

玉米发酵蛋白及其他新型玉米副产品 在动物饲料中的应用指南

Use of Corn Fermented Protein and Other Novel
Corn Co-Products in Animal Feeds Users Guide



U.S. GRAINS
COUNCIL

美国谷物协会

序言与致谢

随着美国乙醇行业技术的不断发展，新型玉米副产品的研发应运而生。这些副产品在营养成分、特性和饲喂应用等方面都与传统的DDGS（含可溶物干酒糟）有所不同。目前，许多新型玉米副产品已经开始量产，不仅在美国国内使用广泛，而且还出口到世界各地。尤其是粗蛋白含量超过50%，并含有废酵母的玉米发酵蛋白副产品，正逐渐成为水产、家禽和生猪营养学专家和养殖生产者关注的焦点。但是，由于研究这些副产品的动物饲喂营养特性和饲喂价值的文献相对有限，因而，业界还不能清晰地分辨它们与传统DDGS（含可溶物干酒糟）以及其他高蛋白干酒糟（HP-DDG）副产品的差异。本手册正是基于此目的编写，旨在简明扼要地汇总当前基于科研的信息，全面介绍玉米发酵蛋白副产品及其他新型玉米副产品在动物饲料中的应用。通过此手册，美国谷物协会的领导和代表们将能够更有效地与现有和潜在客户开展交流与培训，帮助他们在动物日粮中使用这些副产品时，获得最大的营养与经济效益。

为此，美国谷物协会特诚请明尼苏达大学动物科学系动物营养学教授杰拉尔德（杰瑞）·舒尔森博士（Dr. Gerald “Jerry” Shurson）编著本手册：《玉米发酵蛋白及其他新型玉米副产品在动物饲料中的应用指南》。舒尔森博士不仅是DDGS（含可溶物干酒糟）及新型玉米副产品营养价值和饲喂应用领域的权威专家，而且在其长达24年的潜心研究中还与众多玉米副产品研究人员建立了广泛的合作关系。自1998年以来，他一直在美国谷物协会担任全球各出口市场区域的技术营养顾问。

除了已公开发表的权威期刊文献之外，本《新型玉米副产品用户指南》还使用了行业技术供应商和玉米副产品销售商用于编写《美国谷物协会用户指南》的未发表的研究数据和资料。这些机构已授权使用其数据，并且对于我们在本手册中使用这些数据进行了审核和批准。此外，ICM公司的Ryan Mass博士、Mallorie Wilken博士和Jackie Lissolo女士，安德森公司的Scott Tilton博士，马奎斯能源有限责任公司的Jennifer Aurandt博士和Trevin Kennedy先生，以及POET公司的Kevin Herrick博士、Melissa Jolly-Breithaupt博士和Derek Balk先生也都慷慨提供并且授权使用他们未发表的数据，我们特此一并予以感谢。

目 录

序言与致谢	I
第一章 玉米发酵蛋白副产品的营养特性与环境影响	1
第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用	22
第三章 玉米发酵蛋白副产品在家禽日粮中的饲喂应用	34
第四章 玉米发酵蛋白副产品在生猪日粮中的应用	39
第五章 玉米发酵蛋白副产品在奶牛和肉牛日粮中的应用	46
第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值	52
第七章 玉米蛋白浓缩物在水产和蛋鸡日粮中的营养特性与饲用价值	76
第八章 干玉米麸皮和可溶物、脱油干酒糟（溶剂萃取DDGS）及玉米酒糟油在动物日粮中的营养特性与饲用价值	85

第一章 玉米发酵蛋白副产品的营养特性与环境影响

引言

随着全球人口的持续增加，可持续地生产营养丰富、经济安全且价格合理的食品已经成为当今世界的一个重大挑战（Shurson, 2017）。要实现全世界粮食的可持续供给，除了合理地管理耕地、保护水资源及水质、维护生态系统和生物多样性和减缓气候变化影响以外，还需要开发和采用新的创新技术，以提高食品生产的营养效率（Shurson, 2017）。生物燃料、食品和动物生产之间对谷物和油料作物的竞争加剧，引发了人们对长期利用这些资源生产生物燃料可持续性的质疑（Shurson, 2017）。不过，在粮食作物转化为生物燃料和副产品的过程中，整体能源效率仅减少1%~2.5%，因而将生物燃料副产品用作动物饲料可以提高食用动物生产的环境可持续性（Lywood and Pinkney, 2012）。鉴于玉米中仅有淀粉及其他可发酵碳水化合物部分转化为乙醇，而剩余的成分，例如，粗蛋白（CP）、油脂、纤维和灰分等则浓缩在副产品中，因而将玉米副产品用作动物饲料是保存和利用这些浓缩能源和营养物质的有效方式，可以经济高效地以环境可持续的方式生产肉类、牛奶和鸡蛋。

美国的乙醇和副产品生产随着时间推移不仅发生了显著变化，而且产量也增长迅猛。玉米副产品最早出现于19世纪。当时，美国的一些酿酒厂（例如，威士忌酿酒厂）使用玉米作为主要的配料进行酿酒，得到的湿酒糟用于饲喂附近农场的奶牛和肉牛（Shurson et al., 2012）。到了20世纪50年代，湿酒糟主要当作蛋白质配料，可部分地替代其他的蛋白质成分，几乎只用于牛饲料中。事实上，直到20世纪90年代末，玉米酒糟副产品依然很少用作生猪和家禽的日粮（Shurson et al., 2012）。在20世纪70、80年代，大型湿磨工艺设施开始出现，以生产足够的乙醇，用作汽油添加剂（Shurson et al., 2012）。湿磨工艺过程将淀粉和玉米油分离开来，用于人类食品和其他工业应用，留下蛋白质和纤维部分。湿磨工艺产生的玉米副产品包括玉米蛋白粉、玉米蛋白饲料和玉米胚芽粕。由于富含可以增强蛋黄及肉鸡皮肤天然色泽的浓缩色素（黄色素），玉米胚芽粕和玉米蛋白粉经过干燥后成为家禽日粮中受欢迎的高蛋白成分，而玉米蛋白饲料通常作为湿副产品销往养牛场和奶牛场，因为这些农场动物能够更好地利用这类湿副产品中的高纤维成分。在20世纪90年代至21世纪初期，为了满足市场对乙醇作为汽油氧化剂的增长需求，许多农民建造了干磨乙醇厂，以大量地生产乙醇（Shurson et al., 2017）。这导致如今美国有超过200家干磨乙醇厂，每年产出大约3800万吨酒糟副产品，包括含或不含可溶物的湿酒糟和干酒糟，以及玉米酒糟油（CDO）。就整个行业而言，除了两种主要生产工艺之外，还有几种次要的乙醇及副产品生产工艺设计，因而产出的玉米副产品所含的营养成分也各不相同。同时，动物营养研究也在不断地发展，从而扩大了DDGS（含可溶物干酒糟）在国内外生猪、家禽和水产养殖日粮中的应用。DDGS（含可溶物干酒糟）前沿研究人员积极地提供后续教育，大幅度地增加了DDGS（含可溶物干酒糟）在美国生猪和家禽日粮中的使用量，而美国谷物协会的营养顾问们在帮助建立出口市场DDGS（含可溶物干酒糟）需求方面则发挥了重要作用。目前，美国每年向60多个国家出口约有1100万吨DDGS（含可溶物干酒糟）。

大约在2005年前后，玉米油可以从发酵后的薄酒糟中分离出来。这不仅降低了DDGS（含可溶物干酒糟）的油脂（粗脂肪）含量，并显著地改变了其营养成分。由

于油脂含量减少，代谢能（ME）含量可能降低的假定，继续在生猪和家禽日粮中使用DDGS（含可溶物干酒糟）的各种担忧随之出现。为了帮助DDGS（含可溶物干酒糟）使用者应对不同来源的DDGS（含可溶物干酒糟）（油脂含量在4%~13%区间）在能量和可消化氨基酸含量方面日益增大的差异，家禽和生猪营养研究人员开始开发代谢能（ME）和可消化氨基酸预测方程，以准确地估算使用特定来源DDGS（含可溶物干酒糟）饲料配方中的这些必要成分的含量。现在，几乎所有的美国乙醇厂都生产低油DDGS（含可溶物干酒糟），而国内外的奶牛、肉牛、生猪、家禽和水产养殖日粮中仍然使用DDGS（含可溶物干酒糟）。美国谷物协会在2018年出版第四版《DDGS（含可溶物干酒糟）用户手册》，精准地总结了低油DDGS（含可溶物干酒糟）对于各种肉产动物的饲喂价值。

随着淀粉-乙醇转化效率提高，一些乙醇设施也像当年的湿磨和油籽加工业一样发生演变：将营养物质浓缩在副产品中，以提高其营养价值和在动物饲料中的应用。这些技术需要在发酵前或发酵后分离出玉米纤维，浓缩蛋白质和酵母，去除或多或少的玉米油，最终才能生产出新型的玉米副产品，即玉米发酵蛋白（CFP）。生产玉米发酵蛋白（CFP）副产品的三大专有技术供应商分别是ICM公司、Fluid Quip Technologies和马奎斯能源公司。这些玉米发酵蛋白（CFP）副产品的粗蛋白（CP）含量（>50%）远高于传统的低油DDGS（含可溶物干酒糟）（粗蛋白（CP）约占到27%），废酵母的含量估计占到20%~29%，玉米发酵蛋白（CFP）副产品的能量和可消化营养成分也均与市面上的高蛋白干酒糟（HP-DDG；粗蛋白（CP）含量占到36%~48%）有显著差异。在所有的各类副产品中，玉米蛋白浓缩物（CPC）中的粗蛋白（CP）含量最高（>67%），油脂含量最低（0.5%），其生产工艺也和干磨乙醇设施中生产玉米发酵蛋白（CFP）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）的湿磨工艺完全不同。由于目前国内外市面上的粗蛋白（CP）副产品的种类繁多，买家对术语和不同类型玉米副产品的营养特性感到困惑也就不足为奇了。因此，本章以及随后的第2、3、4和5章将分别地描述玉米发酵蛋白（CFP）副产品在水产养殖、家禽、生猪和奶牛日粮中的营养价值和饲喂应用；第6章简要地介绍高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源的营养成分和饲喂应用；第7章简要地介绍玉米蛋白浓缩物（CPC）在水产养殖和家禽日粮中的饲喂应用；最后，第8章简要地介绍其他玉米副产品（包括玉米麸皮和可溶物（CBS）、脱油DDGS（含可溶物干酒糟）和玉米酒糟油（CDO））的营养成分和饲喂研究。

了解玉米副产品中的粗蛋白和氨基酸

表面上看，富含粗蛋白（CP）的配料似乎很适宜用于各类动物饲料，因为在动物日粮的各种组分中，粗蛋白（CP）（氨基酸）是仅次于能量的第二大成本组成部分，而且通常仅需在动物的日粮中添加少量的富含粗蛋白（CP）配料即可满足动物对氨基酸的需求。然而，尽管全世界普遍地使用粗蛋白、粗脂肪和粗纤维这些营养指标对饲料配料进行定价和贸易，但是并不依据它们来衡量饲料配料的实际营养和经济价值。实际上，代谢能（ME）或净能（NE）、可消化氨基酸和可消化磷含量才是决定实际营养和经济价值的关键因素。饲料原料的粗蛋白含量是通过测量氮含量并将其浓度乘以固定系数6.25来确定的，这一系数是蛋白质中16%的加权平均氮含量的倒数（Shurson et al., 2021）。氮元素是氨基酸的化学成分之一，而氨基酸则是蛋白质的基本构成单元，因而，氮元素可以用作估算配料中蛋白质含量的代替指标。然而，使用这种通用方法来估算完整蛋白质的实际含量的准确性，不能保证实现动物饲料中氨基酸（蛋白质）的最佳利用，因为氨基酸谱不同，而且有些配料中虽然非蛋白类的氮化合物（如核酸和核苷酸、某些维生素、胺类、酰胺和尿素）含量较高，但这些氮化合物并不是蛋白质。此外，粗蛋白也不体现有关氨基酸的含量、组分占比、消化率和生物利用度等信息，而这些信息正是日粮配制的必要数据（Shurson et al., 2021）。

豆粕（SBM）通常被用作高蛋白（44%~48%的粗蛋白（CP）含量）原料的全球基准或“黄金标准”，因为它含有高浓度的所有必需（不可缺少）氨基酸，这些氨基酸具有高消化率（85%~95%），并且当与谷物能源来源结合时，其比例平衡，符合猪、家禽和鱼类的氨基酸需求。与大豆蛋白相比，玉米蛋白的赖氨酸（Lys）含量相对较低，被认为是单胃动物日粮中的第一限制性氨基酸（最可能缺乏的氨基酸）。玉米副产品中的赖氨酸与粗蛋白比率（2.8~4.0）远低于豆粕（SBM）（6.2）。因此，当玉米副产品（如DDGS（含可溶物干酒糟）、高蛋白DDG（HP-DDG）、玉米发酵蛋白（CFP））被添加到猪、家禽和水产养殖日粮中部分替代豆粕（SBM）时，通常需要补充结晶L-赖氨酸盐酸盐和其他合成氨基酸，以满足单胃动物的可消化氨基酸需求。此外，玉米副产品（如DDGS（含可溶物干酒糟）65%）中赖氨酸的消化率对猪、家禽和鱼类而言通常大大低于豆粕（SBM）（90%）。由于猪和家禽日粮是基于可消化氨基酸配制的，含有较低可消化赖氨酸量的原料（如DDGS（含可溶物干酒糟））必须添加更多以满足动物的可消化氨基酸需求，或者必须补充消化率约为98%的结晶氨基酸（如L-赖氨酸盐酸盐）。同样的原则也适用于其他必需氨基酸，如苏氨酸（Thr）、色氨酸（Trp）、蛋氨酸（Met）、缬氨酸（Val）和异亮氨酸（Ile），这些氨基酸在玉米副产品（如DDGS（含可溶物干酒糟）73%~82%）中对单胃动物的消化率通常低于豆粕（SBM）（85%~91%）。

与豆粕（SBM）相比，玉米副产品的纤维含量（中性洗涤纤维（NDF），总膳食纤维（TDF））更高。研究表明这将会增加生猪肠道的肠道质量和黏蛋白分泌。苏氨酸是构成肠道上皮细胞和黏蛋白的主要氨基酸，所以，在给生猪饲喂这类高纤维日粮时，将导致生猪的苏氨酸内源性损失增加。由于黏蛋白难以消化，且氨基酸不能被重新吸收，因此，必须在含有超过10%玉米副产品的猪日粮中添加合成L-苏氨酸，以补偿这些增加的苏氨酸损失，并优化生长性能（Mathai et al., 2016; Wellington et al., 2018）。目前尚不清楚这些反应是否也发生在家禽和鱼类中，但这种情况很可能存在，因此在含有适量玉米副产品的家禽和鱼类日粮中，可能需要添加L-苏氨酸以优化生长性能和胴体组成。

亮氨酸（Leu）也是一种氨基酸，在豆粕（SBM）（3.62%）和玉米副产品（如DDGS（含可溶物干酒糟）= 5.30%）中含量最大。但是，相对于赖氨酸而言，玉米蛋白中的亮氨酸含量远远地超过生猪、禽类和鱼类的需求。随着日粮中的玉米副产品添加比例不断增加，过量亮氨酸引起的不良后果也更加显著。过量亮氨酸会加剧异亮氨酸和缬氨酸（另外两种支链氨基酸；BCAA）的分解代谢，因为支链氨基酸具有相似的分子结构和分解代谢通路。因此，如果使用粗蛋白玉米副产品部分或完全地替代生猪日粮中的豆粕（SBM），只要粗蛋白的含量超过20%，则必须添加合成L-缬氨酸和L-异亮氨酸，以抵消过量亮氨酸的负面影响（Cemin et al., 2019a,b; Kwon et al., 2019; Kwon et al., 2020; Siebert et al., 2021; Zheng et al., 2016）。然而，关于生猪、家禽或鱼类日粮中的可消化缬氨酸与赖氨酸的最佳比例以及异亮氨酸与赖氨酸的最佳比例目前还无法明确地确定。类似的证据表明，在家禽日粮中，同样也需要管理支链氨基酸平衡的问题（Waldroup et al., 2002; Peganova and Eder, 2003; Erwan et al., 2008; Ospina-Rojas et al., 2017; Soares et al., 2019），但关于日粮中亮氨酸过量及支链氨基酸平衡在水产养殖日粮中的影响研究仍然有限。

与亮氨酸（Leu）不同，在玉米副产品中，色氨酸（Trp）含量在所有其他必需氨基酸最低。尽管生猪和家禽对色氨酸的需求相对较少，但是色氨酸却具有多种重要的生理作用，包括瘦体组织中的蛋白质合成、免疫反应的调节，并且是调节食欲和应激的血清素前体。不过，为支持最佳的血清素生成，就需要有足够量的色氨酸必须能够穿过血脑屏障。不幸的是，色氨酸需要与大中性氨基酸（LNAA）（异亮氨酸、亮氨

酸、苯丙氨酸、酪氨酸和缬氨酸）竞争，通过共用血脑屏障转运蛋白进入脑部。过量的大中性氨基酸（LNAA）（如亮氨酸）会降低血清素含量，这意味着在生猪的日粮中需要适当地补充L-色氨酸，以帮助解决因亮氨酸过量引起的采食下降问题（Salyer et al., 2013; Kwon et al., 2019; Cemin et al., 2020; Kerkaert et al., 2021; Clizer, 2021）。虽然目前还无法确定含玉米副产品的生猪饲料中的可消化色氨酸与赖氨酸的理想比例，但研究表明，这一比例高于美国国家科学研究委员会（NRC，2012年）的当前建议值。为了优化生长和胴体特性，在含有大量粗蛋白（CP）玉米副产品的家禽和水产养殖日粮中，同样也可能需要增加色氨酸的含量。

玉米副产品中的酵母含量

玉米发酵蛋白（CFP）副产品和其他玉米副产品不同。一个显著区别就是在玉米发酵蛋白（CFP）副产品中，废酵母（酿酒酵母）的含量约为20%~29%。这一含量远高于传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源中估计的废酵母含量：7%~10%（Shurson, 2018）。

然而，需要注意的是，玉米发酵蛋白（CFP）中残留的废酵母并不以活性形态存在，因此不能像活性酵母产品（如活性干酵母）那样可以作为动物饲料中的直接饲喂微生物（DFM）或益生菌发挥作用。尽管如此，有些研究表明，在动物饲喂中，酵母细胞壁的组分（甘露寡糖、核苷酸和 β -葡聚糖）具有健康益处（Shurson, 2018）。随着许多国家禁止在动物饲料中使用抗生素促进生长，业界对识别有可能为食品动物提供健康益处的“功能性”成分产生了巨大兴趣（Shurson et al., 2021）。近年来，已有大量研究致力于评估各种非抗生素饲料添加剂对动物生长性能改善的有效性、程度和一致性。这类添加剂包括可以作为直接饲喂微生物（DFM；益生菌）的活性酵母（Vohra et al., 2016）以及酵母细胞壁衍生物，例如，甘露寡糖、核苷酸和 β -葡聚糖（Shurson, 2018）。因此，这些酵母细胞壁组分代表了在动物饲料中使用玉米发酵蛋白（CFP）副产品的潜在增值特性之一。遗憾的是，在动物饲料中添加浓缩形式的甘露寡糖、核苷酸和 β -葡聚糖所带来的生长和健康反应的效果和一致性不尽如人意。

尽管对733多项已发表试验结果的总结显示，在宠物动物、马匹、兔子、家禽、生猪、牛犊和各类水产养殖品种的饲料中，添加甘露寡糖通常不仅能够提升动物的生长速率和饲料的转化效率，而且还能降低动物的死亡率，但是，这些反应并不总是一致（Spring et al., 2015）。在家禽领域，Hooge于2004年的A、B研究中总结了向肉鸡和火鸡饲喂甘露寡糖的反应（16至44项饲喂试验），报告显示尽管在生长速率和饲料转化效率方面的改善幅度相对较小且不稳定，但超过半数研究证实死亡率显著下降。Miguel等人于2004年研究中指出，甘露寡糖添加在仔猪日粮中所带来的改善效果优于Hooge于2004年的A、B研究报告的家禽研究结果，但仍存在一定的不稳定性。类似地，Torrecillas等人于2014年研究中发现，虽然多项试验证明在鱼类饲料中添加甘露寡糖能够提高存活率、增强抗病能力并改善生长性能，但其他研究却未观察到明显变化。

根据Megazyme International酵母 β -葡聚糖测定法测定，玉米发酵蛋白（CFP）副产品中的 β -葡聚糖含量估计约为8.2%~8.4%（Shurson, 2018）。 β -葡聚糖被归类为益生元，但其分子结构因来源不同而异，这也影响了其生理功能。Vetvicka等人于2014年回顾了将 β -葡聚糖添加到生猪日粮中的研究，报告了生长改善和各类免疫反应的提升。然而，Vetvicka和Oliveira于2014年得出的结论是，在生猪日粮中补充 β -葡聚糖所带来的不一致生长和健康反应，可能归因于其分子结构、分子量和纯度的差异。多项研究表明，向多种鱼类饲喂酵母 β -葡聚糖可提高抗病能力、改善生长性能并提高存活率（Ringo et al., 2012）。不过，鉴于水产养殖日粮中玉米发酵蛋白（CFP）副产品的添

加比例相对较低，玉米发酵蛋白（CFP）副产品中的 β -葡聚糖含量可能不足以提供这些健康益处。

酵母衍生的核苷酸已被证实可改善肠道形态与功能，增强免疫反应，优化肠道菌群形成，促进肝脏功能与形态并提高生长性能（Sauer et al., 2011）。然而，由于酵母含有其他生物活性代谢物和细胞壁成分，因此很难将生长和免疫反应的改善完全地归因于核苷酸（Sauer et al., 2011）。对15项研究结果的综合分析显示，向鱼类饲喂各种来源的核苷酸，其免疫反应、病原体抵抗力、生长性能和存活率均有所提高（Ringo et al., 2012）。然而，Sauer等人于2011年回顾的16项关于向生猪饲喂不同含量的酿酒酵母（*Saccharomyces cerevisiae*）、酵母培养物和商业核苷酸产品的研究中，大多数结果显示无明显效果。

尽管玉米发酵蛋白（CFP）副产品中废酵母的含量颇具研究价值，并可能为这些副产品的营养价值提供潜在的增值效益，但这不应成为将其用于动物饲料的主要依据。原因有以下几点：首先，残留酵母已不具活性，无法作为益生菌发挥功能。其次，废酵母的含量大约仅占玉米发酵蛋白（CFP）副产品总质量的约25%，这意味着各种生物活性酵母细胞壁成分（甘露寡糖、 β -葡聚糖和核苷酸）的实际含量更低。最后，添加浓缩酵母产品及其衍生物所带来的生长促进和健康改善效果在实际应用中往往不尽如人意。为了客观评估这一情况，Schweer等人于2017年对超过2,000项生猪饲养试验的生长性能结果进行了综合分析，这些试验评估了包括寡糖、益生元和酵母产品在内的各种非抗生素饲料添加剂。试验结果表明约仅有30%的试验显示生长性能有明显改善。在各类产品中，直接饲喂微生物（39.9%的试验）、药理剂量的锌和铜（39.2%的试验）以及有机酸（31.2%）在促进生猪生长方面效果最为一致。而在评估酵母产品的98项试验中，仅23.5%报告生长速率有所提高，12.2%报告饲料摄入量增加，11.2%显示增重效率改善，而仅1%报告死亡率降低。业内普遍认为，在动物面临健康挑战或者处于应激状况时，抗生素替代品可能发挥更显著的作用。然而，在上述文献综述中，仅8.6%的试验涉及某种健康挑战的情境，且在这些情况下，直接饲喂微生物（35%）和药理剂量的锌和铜（30%）比其他饲料添加剂更有可能带来生长改善。这些研究结果表明，尽管在特定的条件下，酵母产品可能对断奶仔猪（以及家禽和鱼类）的生长表现和健康带来一些益处，但获得稳定积极反应的可能性相对较低，且导致积极生长反应的条件尚未明确界定。

美国饲料管理协会（AAFCO）对玉米副产品的定义

在饲料配料交易中，买卖双方对营养成分和饲用价值的准确有效沟通是避免不必要麻烦和失望的关键。遗憾的是，在玉米副产品市场（以及已发表的科学文献），一个最大的沟通挑战就是对美国饲料管理协会（AAFCO）制定的各类玉米副产品标准定义缺乏认识和使用。此外，不同厂商使用相同技术生产的玉米发酵蛋白（CFP）副产品却采用不同品牌名称，这也给市场带来了混乱。表1汇总了各类玉米副产品的通用名称、品牌名称（如有）、典型分析指标以及美国饲料管理协会（AAFCO）官方定义。买家在与各类玉米副产品供应商沟通时，应使用表中提供的通用名称和品牌名称（如适用），以确保对所考虑的副产品类型有清晰的理解。同时，我们也鼓励玉米副产品营销商在与饲料行业的配料采购人员和营养师沟通时，避免使用乙醇行业内部术语。例如，应使用“浓缩酒糟可溶物”而非“糖浆”，以帮助客户将其对玉米副产品类型和特性的理解与官方美国饲料管理协会（AAFCO）定义和术语保持一致。另一个常见的术语错误涉及DDGS（含可溶物干酒糟）不同类型之间玉米油含量相对差异的描述。“全脂”、“低油”和“脱油”DDGS（含可溶物干酒糟）等术语通常用作DDGS（含可溶物干酒糟）粗脂肪含量的相对指标。但遗憾的是，“脱油”这个词在指代“低油”DDGS（含

可溶物干酒糟)时经常被误用。目前市场上唯一的“脱油”玉米副产品是通过溶剂萃取玉米油生产的,这种DDGS(含可溶物干酒糟)副产品的粗脂肪含量低于3%,并以NovaMeal品牌名称销售。因此,在买卖双方沟通过程中,明确界定DDGS(含可溶物干酒糟)来源的最低粗脂肪或油含量非常重要。

在乙醇副产品中,最容易引起混淆的术语或许是用“高蛋白”来描述那些粗蛋白含量高于传统DDGS(含可溶物干酒糟)(25%~30%粗蛋白(CP))的玉米副产品。尽管高蛋白干酒糟(HP-DDG,蛋白质含量为36%~48%)是玉米副产品中与DDGS(含可溶物干酒糟)截然不同的一类,但经常被误认为是玉米发酵蛋白(CFP)副产品,后者的粗蛋白含量高达48%以上。生产玉米发酵蛋白(CFP)的工艺与生产高蛋白干酒糟(HP-DDG)的工艺大相径庭,因此其营养成分也有所不同。两类玉米发酵蛋白(CFP)产品的关键区别在于,Fluid Quip Technologies和ICM公司的工艺不使用任何添加剂,因此被归入玉米发酵蛋白(CFP)机械分离类别。Marquis ProCap™工艺使用絮凝剂,而Harvesting Technologies则在工艺中使用聚合物,因而这些副产品被归类为玉米发酵蛋白类别(非机械分离)。

同样地,玉米发酵蛋白(CFP)来源也常被混淆为玉米蛋白浓缩物(CPC)。玉米蛋白浓缩物(CPC)采用完全不同的湿磨工艺进行生产,因此具有截然不同的营养特性。遗憾的是,玉米副产品生产商、销售人员和研究人员在研究论文、网站、报告、技术手册和产品规格说明书中传递不同副产品信息时,往往未能精确描述并使用规范术语。因此,营养学家在参考各类已发表研究数据时,应当特别留意过去15年间在动物饲喂试验中评估的各种“高蛋白”玉米副产品间存在的显著营养差异。美国谷物协会《玉米副产品手册》的重要目标之一,即总结这些差异,帮助配料采购人员和动物营养学家清晰理解日益丰富的玉米副产品体系中各产品之间的区别。

表1. 玉米副产品的通用名称、品牌名称、典型分析指标及美国饲料管理协会(AAFCO)定义

通用名称	品牌名称	典型分析 (以原样基础计)			美国饲料管理协会 (AAFCO) 标识	一般说明
		粗蛋白 (%)	粗脂肪 (%)	粗纤维 (%)		
DDGS (含可溶物干酒糟)	无 - 商品	25-30	6-9	<14	27.6, 27.8	干酒糟及可溶物是指谷物经酵母发酵后,通过蒸馏除去乙醇,将所得全酒糟中至少四分之三的固体进行浓缩干燥,并在去除部分油脂后获得的副产品。
DDGS (含可溶物干酒糟)	达科塔金矿公司 (Dakota Gold)	24-29	4-5	<14	27.6, 27.8	干酒糟及可溶物是指谷物经酵母发酵后,通过蒸馏除去乙醇,将所得全酒糟中至少四分之三的固体进行浓缩干燥,并在去除部分油脂后获得的副产品。
脱油 DDGS (含可	NovaMeal	26-36	<3	<14	27.9	经溶剂提取工艺处理的DDGS(含可溶物干酒糟),粗脂肪含量低于3%。

第一章 玉米发酵蛋白副产品的营养特性与环境影响

通用名称	品牌名称	典型分析 (以原样基础计)			美国饲料管理协会 (AAFCO) 标识	一般说明
		粗蛋白 (%)	粗脂肪 (%)	粗纤维 (%)		
溶物干酒糟)						
全脂 DDGS (含可溶物干酒糟)	无 - 商品	25-32	10-14	<14	27.6, 27.8	干酒糟及可溶物是指谷物经酵母发酵后, 通过蒸馏除去乙醇, 将所得全酒糟中至少四分之三的固体进行浓缩干燥, 且未经油脂提取的副产品。
含麸皮 DDGS (含可溶物干酒糟)	无 - 商品	23-36	3-16	<14	27.6, 27.8, 48.2	DDGS (含可溶物干酒糟) 与发酵前工厂分离的麸皮混合物。可呈干态或湿态 (此处提供的是干态常规分析数据)。
机械分离 DDGS (含可溶物干酒糟)	非商用	24-48	3-8	<14	27.6	蒸馏后通过机械方式分离纤维和蛋白质后剩余的全酒糟。含有浓缩酒糟可溶物。可呈干态或湿态 (此处提供的是干态常规分析数据)。
DDG (干酒糟)	无 - 商品	24-35	4-8	<14	27.5	不含浓缩酒糟可溶物的干酒糟, 是指谷物或谷物混合物经酵母发酵后, 通过蒸馏除去乙醇获得的副产品。可能已除去部分油脂。
高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	ANDVantage™ 40Y 及其他采用 ICM 公司 FST™ 技术的非品牌产品	36-48	4-6	<12	27.5	通过去除部分纤维和油脂以提高蛋白质含量的干酒糟, 不含浓缩酒糟可溶物。
浓缩酒糟可溶物 (糖浆)	无 - 商品	5-25	3-23	0-4	27.7	浓缩酒糟可溶物是蒸馏除去乙醇后, 通过将稀酒糟组分浓缩成半固态物获得的副产品。
浓缩酒糟可溶物 (糖浆)	SOLMAX™	19-21	2-7	<1	27.7	浓缩酒糟可溶物是蒸馏除去乙醇后, 通过将稀酒糟组分浓缩成半固态物获得的副产品 (固体含量约 50%-75%)。
干酒糟酵母	ALTO YEAST PROPLEX DY	40-55	0-8	0-6	96.5	蒸馏前或蒸馏后从发酵醪液中分离出的干燥、非发酵性、非活

通用名称	品牌名称	典型分析 (以原样基础计)			美国饲料管理协会 (AAFCO) 标识	一般说明
		粗蛋白 (%)	粗脂肪 (%)	粗纤维 (%)		
						性酿酒酵母 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>), 其粗蛋白含量必须高于40%。
水解酵母	ULTRAMAX™	40-45	6-10	3-5	96.12	经酶解水解制备的浓缩、非提取、部分可溶性酵母消化物。
麸皮与糖浆	Solbran™、 ANDVantage™ Bran Plus及其他采用ICM公司FST™技术的非品牌产品	18-28	4-9	15-20	48.2, 27.7	发酵前从谷物中分离的麸皮, 发酵后添加到浓缩酒糟可溶物中并在干燥前混合。可呈干态或湿态(此处提供的是干态常规分析数据)。
机械分离发酵纤维	非商用	<24	2-7	10-20	27.6	蒸馏后对全酒糟进行机械分离所得的富集纤维产品。除非另有说明, 否则不含酒糟可溶物。
玉米发酵蛋白	无	>48	3-8	<8	27.5	通过蒸馏行业常用方法浓缩残余谷物和酵母蛋白, 并去除部分纤维和油脂的产品。含有浓缩废酵母。除非另有说明, 否则不含浓缩酒糟可溶物。
机械分离玉米发酵蛋白	A+ Pro BP 50 NexPro®AltiPro™ Still Pro 50™ ¹ 和 Vantage™ 50Y PROTOMAX™ ProCap Gold™	>48	1-5	<8	27.5	蒸馏后仅采用机械分离技术从全酒糟中提取蛋白质的产品。含有废酵母成分, 蒸馏后不使用任何非机械分离工艺。除非另有说明, 否则不含酒糟可溶物。

¹Still Pro 50™已不再以此名称销售, 在此列出的原因是已发表的科学文献中使用该名称描述采用Fluid Quip技术的玉米发酵蛋白产品。

玉米酒糟油(CDO)也是一种主要副产品, 可作为动物饲料中的补充能源来源, 因为不含粗蛋白或粗纤维而未列入表1。其工艺涉及通过离心从浓缩酒糟可溶物中部分去除玉米油, 或通过溶剂萃取DDGS(含可溶物干酒糟)获得。玉米酒糟油(CDO)含有85%以上的总脂肪酸, 2.5%以下的不皂化物和不到1%的不溶性杂质, 其脂肪酸组成、代谢能(ME)含量以及在生猪和家禽饲养中的应用详见本手册第8章。

玉米发酵蛋白副产品的营养特性

目前市场上，制备玉米发酵副产品的专利技术至少有三种。ICM公司的先进加工系统™（APPTM）生产PROTOMAX™，而安德森公司（The Andersons, Inc.）也以ANDVantage 50Y品牌销售这种产品。Fluid Quip Technologies公司使用酒糟副产品最大化技术™（MSC™）生产多种品牌的玉米发酵蛋白（CFP）副产品，包括BP50、A+ Pro、NexPro®和Altipro。Marquis ProCap™技术™则生产和销售ProCap Gold™品牌的玉米发酵蛋白（CFP）副产品。虽然这些技术都能浓缩最终副产品中的蛋白质和酵母，但是营养成分特征各不相同（表2）。此外，其他新技术也正在转入商业化应用，因此，新型玉米副产品将不久就会进入饲料配料市场。

以干物质（DM）为基准，玉米发酵蛋白（CFP）产品的总能含量在5,309~5,795千卡/千克干物质（DM）之间，明显高于传统DDGS（含可溶物干酒糟）的总能含量：4,940~5,140千卡/千克干物质（DM）（Yang et al., 2021）。已经有研究针对部分玉米发酵蛋白（CFP）产品与DDGS（含可溶物干酒糟）产品在生猪（第6章）和肉鸡（第5章）饲料中的代谢能（ME）含量进行测定和比较，结果显示玉米发酵蛋白（CFP）副产品的代谢能（ME）含量是DDGS（含可溶物干酒糟）的1.2~1.5倍。各种玉米发酵蛋白（CFP）副产品的粗蛋白（CP）含量也存在差异，但通常都高于53%（干物质基准）。同样地，这种粗蛋白（CP）含量的差异也导致各玉米发酵蛋白（CFP）产品中各种必需氨基酸含量存在变化（表3），尤其是赖氨酸（1.91%~2.26%）、蛋氨酸（0.93%~1.37%）、苏氨酸（1.86%~2.15%）和色氨酸（0.39%~0.62%）。

虽然各种已发表研究报告了不同玉米发酵蛋白（CFP）副产品的多种脂质指标（乙醚提取物和酸水解乙醚提取物）和纤维指标[中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、可溶性膳食纤维、不溶性膳食纤维和总膳食纤维（TDF）]，但是不同来源的营养成分含量也存在差异（表3）。尽管玉米发酵蛋白（CFP）产品的灰分含量都在1.54%~8.49%之间，变动幅度较大，但是，钙和磷的含量在各来源间却相对稳定。因此，如果要在生猪和家禽日粮中添加这些玉米发酵蛋白（CFP）副产品以优化能量和营养利用效率，在饲料配方设计时，确定使用适宜的代谢能（ME）、可消化氨基酸和可消化磷含量值尤其重要。相关信息已在本手册第5章和第6章中做了详细的总结。

表2. 不同来源玉米发酵蛋白的营养成分对比（以干物质计）

指标	ANDVantage 50Y ¹	Still Pro 50 ²	A+ Pro ³	NexPro ⁴	ProCap Gold ⁵
干物质（%）	93.76	100.00	91.73	93.00	88.00
总能（千卡/千克）	5,636	未报告	5,351	5,309	5,795
粗蛋白（%）	55.24	53.0	54.73	53.87	55.78
赖氨酸占粗蛋白比例	3.46	4.19	3.96	3.95	3.93
乙醚提取物（%）	未报告*	5.1	5.0	未报告	未报告
酸水解乙醚提取物（%）	10.56	未报告	未报告	6.02	10.78
中性洗涤纤维（%）	30.566	24.1	26.52	未报告	未报告
酸性洗涤纤维（%）	22.226	4.83	5.27	未报告	未报告
可溶性膳食纤维（%）	2.99	未报告	未报告	3.66	1.16
不溶性膳食纤维（%）	29.2	未报告	未报告	26.23	24.74
总膳食纤维（%）	31.14	未报告	未报告	29.89	25.90
灰分（%）	1.54	5.49	5.98	8.49	8.39

第一章 玉米发酵蛋白副产品的营养特性与环境影响

指标	ANDVantage 50Y ¹	Still Pro 50 ²	A+ Pro ³	NexPro ⁴	ProCap Gold ⁵
钙 (%)	0.026	0.05	0.04	未报告	0.05
磷 (%)	0.706	1.1	0.89	未报告	0.88

*未报告 = 原文未提供相关数据。

¹ Lee和Stein的2021年未发表数据，经The Andersons公司授权使用。

² 数据来源于Correy等人2019年的研究报告；Still Pro 50™现已不再使用此商品名销售，但因该研究中用此名称描述采用Fluid Quip技术生产的玉米发酵蛋白，故在此列出。

³ 数据来源于Yang等人2021年的研究报告。

⁴ 数据来源于Acosta等人2021年的研究报告。

⁵ 数据来源于Cristobal等人2020年的研究报告。

⁶ 未发表数据，经The Andersons公司授权使用。

表3. 不同玉米发酵蛋白来源的氨基酸组成对比（以干物质计）

指标	ANDVantage 50Y ¹	Still Pro 50 ²	A+ Pro ³	NexPro ⁴	ProCap Gold ⁵
干物质 (%)	93.76	100.00	91.73	93.00	88.00
粗蛋白 (%)	55.24	53.0	54.73	53.87	55.78
必需氨基酸 (%)					
精氨酸	2.53	2.49	2.57	2.48	2.81
组氨酸	1.22	1.41	1.57	1.43	1.59
异亮氨酸	2.14	2.24	2.46	2.35	2.31
亮氨酸	6.87	5.80	6.87	6.11	6.33
赖氨酸	1.91	2.22	2.17	2.13	2.15
蛋氨酸	1.37	1.05	1.17	1.09	1.24
苯丙氨酸	2.93	2.67	2.90	2.68	2.85
苏氨酸	2.13	2.06	2.19	2.15	2.15
色氨酸	0.62	0.45	0.40	0.45	0.56
缬氨酸	2.71	3.08	3.21	3.04	3.23
非必需氨基酸 (%)					
丙氨酸	4.07	3.51	4.09	3.73	3.88
天冬氨酸	3.72	3.62	3.89	3.81	3.84
半胱氨酸	1.19	0.90	1.07	0.94	1.14
谷氨酸	9.46	7.61	8.88	7.94	8.55
甘氨酸	2.09	2.00	2.18	2.16	2.34
脯氨酸	4.45	3.46	未报告	3.76	4.00
丝氨酸	2.55	2.25	2.47	2.33	2.50
酪氨酸	2.47	2.08	2.22	2.13	2.16

*未报告 = 原文未提供相关数据。

¹ Lee和Stein的2021年未发表数据，经The Andersons公司授权使用。

² 数据来源于Correy等人2019年的研究报告；Still Pro 50™现已不再使用此商品名销售，但因该研究中用此名称描述采用Fluid Quip技术生产的玉米发酵蛋白，故在此列出。

³ 数据来源于Yang等人2021年的研究报告。

⁴ 数据来源于Acosta等人2021年的研究报告。

⁵ 数据来源于Cristobal等人2020年的研究报告。

玉米发酵蛋白副产品的环境影响

地球和人类社会的未来取决于我们是否能够建立再生循环经济的能力。这种经济模式应在全球人口增长时能够有效减少废弃物的产生、降低碳氮足迹、减缓气候变化，并提高资源利用效率，从而将人类的消耗活动控制在地球能够承载的范围以内。在粮食安全和可持续发展领域，一个备受争议的话题是：畜牧业是否应继续作为全球粮食体系的组成部分。

畜牧业是全球粮食体系、经济和社会的核心支柱，贡献了40%的农业国内生产总值，创造了13亿就业岗位，为10亿贫困人口提供了生计来源，供应了33%的膳食蛋白摄入，并可能成为解决营养不良问题的有效途径（Steinfeld et al., 2006）。然而，畜牧业也是多种环境问题的主要贡献者，包括土地退化、气候变化、空气污染、水资源短缺与污染以及生物多样性丧失（Steinfeld et al., 2006）。

据报道，全球畜牧业产生的温室气体（GHG）排放量估计值在8%至51%之间，这使科学家和政策制定者陷入困局（Herrero et al., 2011）。尽管这一估计值备受争议，但目前普遍接受的估计值为14.5%（Gerber et al., 2013）。根据不同的动物品种、生产系统类型和地理位置，在单胃动物生产体系中，饲料生产贡献了50%~85%的气候变化影响，64%~97%的富营养化潜势，70%~96%的能源消耗，以及几乎100%的土地占用（Garcia-Launay et al., 2018）。因此，由于饲料配料在动物饲养中对环境影响巨大，采用多目标饲料配方策略，特别是通过LCA（生命周期评估）确定和使用低环境影响的饲料配料，成为降低畜牧业环境足迹最有效策略之一（Mackenzie et al., 2016b; Garcia-Launay et al., 2018; de Quelen et al., 2021; Méda et al., 2021; Soleimani和Gilbert, 2021）。LCA（生命周期评估）是对产品整个生命周期中投入、产出及其环境影响进行的系统性评价（van Middelaar et al., 2019）。虽然已建立了确定各类LCA（生命周期评估）环境影响指标的标准化方法和指南（LEAP, 2015），但目前有限的LCA（生命周期评估）饲料配料数据库主要包含欧盟使用的饲料配料，这些LCA（生命周期评估）值不能直接应用于美国使用的配料。值得一提的是，全球饲料生命周期评估研究所（GFLI; <https://tools.blonkconsultants.nl/tool/16/>)已开发出全球最大的饲料配料数据库（包含962种配料），涵盖最多的LCA（生命周期评估）指标变量（18个；表4），并广泛应用于全球（欧盟、美国和加拿大）。

表4. 全球饲料生命周期评估研究所用于饲料配料的环境影响评价指标

环境影响评估	单位	描述
全球变暖潜能（含/不含土地利用变化）	千克二氧化碳当量/千克产品	以二氧化碳为基准，评估温室气体排放对全球变暖的潜在影响，可包括或不包括土地利用变化因素
平流层臭氧层损耗	千克氯氟烃-11当量/千克产品	以氯氟烃-11为参考标准，评估大气排放物对平流层臭氧层破坏的影响
电离辐射	千贝克勒尔钴-60当量/千克产品	以钴-60放射性同位素千贝克勒尔为参考标准的辐射影响评估
臭氧生成（人体健康影响）	千克氮氧化物当量/千克产品	氮氧化物气体对臭氧形成及人体健康的影响评估
细颗粒物形成	千克PM2.5颗粒物当量/千克产品	直径小于2.5微米的大气颗粒物对空气质量的影响评估

第一章 玉米发酵蛋白副产品的营养特性与环境影响

环境影响评估	单位	描述
臭氧生成（陆地生态系统影响）	千克氮氧化物当量/千克产品	氮氧化物气体对臭氧形成及陆地生态系统的影响评估
陆地酸化	千克二氧化硫当量/千克产品	评估氮氧化物和硫氧化物气体释放对土壤和水体酸化的潜在影响
淡水富营养化	千克磷当量/千克产品	评估磷元素向淡水排放增加的潜在影响
海洋富营养化	千克氮当量/千克产品	评估氮元素向水体排放增加的潜在影响
陆地生态毒性	千克1,4-二氯苯/千克产品	以1,4-二氯苯为标准，评估有毒物质排放对陆地生物的影响
淡水生态毒性	千克1,4-二氯苯/千克产品	以1,4-二氯苯为标准，评估有毒物质排放对淡水生物的影响
海洋生态毒性	千克1,4-二氯苯/千克产品	以1,4-二氯苯为标准，评估有毒物质排放对海洋生物的影响
人类致癌毒性	千克1,4-二氯苯/千克产品	以1,4-二氯苯为标准，评估致癌性物质排放对环境及人体的影响
人体非致癌毒性	千克1,4-二氯苯/千克产品	以1,4-二氯苯为标准，评估非致癌性物质排放对环境及人体的影响
土地利用	平方米年作物当量/千克产品	评估非农业用地转为农业用途的环境影响
矿产资源稀缺性	千克铜当量/千克产品	以铜为标准，评估天然无机矿产资源消耗的指标
化石资源稀缺性	千克石油当量/千克产品	评估天然化石燃料资源消耗的指标
水资源消耗	立方米/千克产品	评估生产每千克产品所需水量（立方米）的指标

除温室气体排放和碳足迹外，联合国粮农组织近期提出了一项新重点，即到2030年提高氮素利用率并减少50%的氮排放。全球畜牧业贡献了约三分之一的人为氮排放（硝酸盐、氨气、氧化亚氮和其他氮氧化物），其中家禽和生猪肉生产链占食用动物总排放量的29%，而这些氮排放中68%与饲料生产直接相关（Uwizeye et al., 2020）。氧化亚氮是一种强效温室气体，而氨气和氮氧化物则加剧空气污染，导致酸化和富营养化，并威胁人类健康（Galloway et al., 2008; Sutton et al., 2013）。硝酸盐和有机氮已造成水体污染加剧和生物多样性锐减（Galloway et al., 2003; Hamilton et al., 2018; Ascott et al., 2017; Erisman et al., 2013）。全球仅有20%的氮被有效保留在最终产品中，而80%以各种形式流失到环境中（Sutton et al., 2019）。因此，亟须提高食用动物生产中饲料的蛋白质-氨基酸-氮素利用效率，尤其是那些能提供大量氨基酸的饲料如玉米发酵蛋白（CFP），以满足高效食用动物如鱼类、家禽和生猪的日常营养需求。

磷（P）元素是动物饲料中继能量和氨基酸之后第三大成本因素。Oster等人于2018年指出了平衡农业磷循环、提高生猪和家禽生产可持续性必须解决的几个关键问题，并提出了多项建议：改良动物饲喂策略（日粮添加植酸酶）、加强废弃物再利用与回收（粪便和屠宰废料）、关注土壤农业生态系统、提高农户经济效益，以及制定有效的政府政策法规（磷配额、磷税）。然而，现有策略忽略了一个重要方面，即利用玉米副产品如玉米发酵蛋白（CFP）和DDGS（含可溶物干酒糟），这些产品富含较高含量的可消化磷，可减少对无机磷添加剂的依赖并降低粪便中磷的排泄量。若生猪、家禽和水产养殖饲料中不添加玉米副产品，在给生猪喂养含高植酸的植物性配料

时，添加外源植酸酶是提高磷利用率的唯一选择。使用植酸酶可提高动物对饲料中磷的利用率，减少粪便中磷的排泄，并最大限度地降低植酸对其他营养物质消化率的负面影响（Shurson et al., 2021）。事实上，部分乙醇生产企业在发酵过程中添加植酸酶，进一步促进了不可消化植酸转化为可消化磷酸盐（Reis et al., 2018）。使用玉米发酵蛋白（CFP）和其他玉米副产品可实现上述所有益处，源于玉米中的植酸在发酵过程中会被酵母自然转化为可消化磷酸盐。因此，若在单胃动物饲料中战略性地使用玉米副产品和植酸酶，完全有可能实现Cowlieson等人于2016年提出的“零植酸”营养目标。

玉米生产过程中消耗大量水资源、土地及其他投入品，这些均会导致温室气体排放、气候变化、化石燃料消耗、空气污染和区域性水资源短缺（Smith et al., 2017）。美国乙醇产业和畜牧业作为玉米的主要消费方，正日益关注环境可持续性的评估与改进。尽管有研究（Kraatz et al., 2013）表明，将全酒糟转化为电能、热能和肥料，比加工成DDGS（含可溶物干酒糟）能减少54%的能源强度和67%的全球变暖潜力，但Smith等人于2017年开发的模型显示，在美国畜牧业和乙醇供应链中使用玉米所产生的国家层面环境影响会因地区、行业部门和评估指标的不同而存在显著差异。多项研究已评估关于肉牛（Hünerberg et al., 2014; Leinonen et al., 2018; Asem-Hiablíe et al., 2019; Werth et al., 2021）、奶牛（Aguirre-Villegas et al., 2015）、家禽（Kebreab et al., 2016; Benavides et al., 2020）、生猪（Stone et al., 2012; Meul et al., 2012; Kebreab et al., 2016; Mackenzie et al., 2016a,b; Benavides et al., 2020）和水产养殖（Henriksson et al., 2017; Cortés et al., 2021）饲喂玉米酒糟及可溶物的各种环境影响。根据建模时设定的系统边界、分配方法以及归属于乙醇和DDGS（含可溶物干酒糟）的环境影响比例，各种动物饲喂DDGS（含可溶物干酒糟）既有环境效益，也有环境负担。这一点与大多数其他饲料配料情况类似。

鉴于生物燃料和副产品生产迫切需要减少碳足迹，马奎斯能源公司于2010年成为首批获得ISCC（国际可持续发展与碳认证）的美国乙醇和副产品生产企业之一。ISCC（国际可持续发展与碳认证）的建立旨在满足欧盟通过使用可再生能源减少温室气体（GHG）排放的指令要求，低碳强度（CI）是进入欧盟市场销售生物燃料的必要条件。在日本，生物燃料营销商则需要获得ISCC Plus认证。虽然ISCC（国际可持续发展与碳认证）最初是为生物燃料设计的碳强度评分体系，但该项目同样为玉米副产品（如DDGS（含可溶物干酒糟）和玉米发酵蛋白（CFP）（ProCap Gold™））提供碳强度评分。与大多数生命周期评估不同，ISCC（国际可持续发展与碳认证）项目中的所有碳强度投入是根据各产品流的能源含量分配到每个产品流（包括玉米副产品），这使得乙醇厂出厂时的乙醇和副产品具有相等的碳强度评分。目前美国乙醇行业DDGS（含可溶物干酒糟）的碳强度约为700克二氧化碳当量/千克DDGS（含可溶物干酒糟）。而马奎斯能源公司生产的DDGS（含可溶物干酒糟）和玉米发酵蛋白（CFP）（ProCap Gold™）的碳强度评分（<https://www.iscc-system.org/certificates/valid-certificates/>）仅约为行业内其他玉米副产品的25%（175克二氧化碳当量/千克DDGS（含可溶物干酒糟）和ProCap Gold™）。这一显著降低是通过战略性投资和实施碳捕获与封存等技术和实践实现的。ISCC（国际可持续发展与碳认证）采用全生命周期评估方法，测量从农场到终端用户的乙醇和副产品全供应链各环节的碳强度。马奎斯能源公司与玉米种植户紧密合作，通过第三方审计确保实施和遵循低碳实践（如不将原始林地或草原转为耕地、控制水土流失、科学管理养分、保护自然栖息地等）。仅有自愿参与ISCC（国际可持续发展与碳认证）项目的农户所生产的玉米才能用于生产ISCC（国际可持续发展与碳认证）认证的乙醇和玉米副产品。

玉米发酵蛋白副产品作为一种相对新兴的饲料配料，其生产量及在动物饲料中的应用规模远小于DDGS（含可溶物干酒糟）。因此，关于玉米发酵蛋白（CFP）副产

品在各类动物饲喂中的表现及其环境影响的研究资料十分有限。然而，Burton等于2021年开展的一项基于经济分配法研究评估了添加不同比例的玉米发酵蛋白（CFP）日粮对肉鸡每公斤体重增长和肉产量的温室气体（GHG）排放（表6）、火鸡雏鸟每公斤体重增长的排放水平，以及大西洋鲑每公斤饲料和增重的排放情况（表7）。该研究涉及的饲喂试验结果详见第2章（水产养殖）和第3章（家禽）。研究团队使用全球食品生命周期评估研究所（GFLI）数据库获取试验日粮配方中各成分的数据，用于温室气体（GHG）排放计算。不过，由于GFLI数据库中尚无玉米发酵蛋白（CFP）的生命周期评估数据，研究人员在计算过程中借用了Tallentire等于2018年关于乙醇行业中另一种高蛋白玉米副产品的环境影响数据。这一做法值得商榷，因为不同来源的玉米发酵蛋白（CFP）在生产投入和工艺流程上存在差异。此外，试验中的玉米发酵蛋白（CFP）部分替代了日粮中的豆粕(SBM)，而豆粕(SBM)的生命周期评估数据因原产国差异显著，可能对研究结果产生重大影响。遗憾的是，这些关键细节在研究中并未得到明确说明。尽管上述问题可能影响结果可靠性，但研究数据表明，肉鸡日粮中玉米发酵蛋白（CFP）含量的增加确实降低了每公斤增重和每公斤肉产量的温室气体（GHG）排放（表5）。值得注意的是，虽然添加10%玉米发酵蛋白（CFP）的肉鸡日粮与不含玉米发酵蛋白（CFP）的对照组在氮留存率上相近，但添加5%玉米发酵蛋白（CFP）的日粮却能显著提高氮留存效率。这类改善氮留存的日粮配方通常也能减少氮排泄，从而带来额外的环境效益。同样，在火鸡雏鸟饲料中添加不同比例玉米发酵蛋白（CFP）也显示出积极效果。研究发现，饲喂含0%、4%和8%玉米发酵蛋白（CFP）的日粮可使温室气体（GHG）排放（每公斤体重增加的二氧化碳当量）从3.96千克（对照组）分别降至3.77和3.40千克二氧化碳当量。在大西洋鲑饲养方面，用递增比例的玉米发酵蛋白（CFP）部分替代饲料中的豆粕(SBM)，同样能够降低每公斤饲料和每公斤增重的温室气体（GHG）排放（表6）。因此，在鲑鱼饲料中用玉米发酵蛋白（CFP）代替豆粕(SBM)很可能在减少鲑鱼养殖碳足迹方面具有显著优势，这一点在欧洲环境下尤为突出，因为欧洲政策不鼓励从南美洲森林砍伐地区进口豆粕（SBM）。

表5. 对肉鸡饲喂不同比例玉米发酵蛋白致氮留存和温室气体排放的影响（42天饲喂期）
（改编自Burton et al., 2021）

指标	日粮中玉米发酵蛋白添加比例		
	0%	5%	10%
氮留存率 (%)	29.4 ^b	30.4 ^a	28.7 ^b
温室气体排放量 (千克二氧化碳当量/千克体重增加)	2.48	2.21	2.01
温室气体排放量 (千克二氧化碳当量/千克肉品)	5.85	5.03	4.57

^{a,b}同一行中上标不同的平均值表示差异显著 (P < 0.05)

表6. 对大西洋鲑（初始体重=304克）饲喂含0%、5%、10%、15%和20%玉米发酵蛋白（部分替代豆粕）致温室气体排放的影响（12周饲喂期）（改编自Burton et al., 2021）

测量指标	日粮中玉米发酵蛋白添加比例				
	0%	5%	10%	15%	20%
温室气体排放, 千克二氧化碳当量/千克饲料	1.64	1.55	1.47	1.39	1.30
温室气体排放量, 千克二氧化碳当量/千克增重	1.59	1.44	1.37	1.36	1.27

^{a,b}同一行中上标不同的平均值表示差异显著 (P < 0.05)

结论

玉米发酵蛋白（CFP）副产品是采用干法乙醇生产设施中的新技术生产的，富含能量、粗蛋白和氨基酸，主要用于水产养殖、肉鸡和断奶仔猪饲料中，但也可广泛应用于各类动物饲料。不同来源的玉米发酵蛋白（CFP）在营养成分和氨基酸消化率上存在差异，需要与供应商充分沟通，以确保在饲料配方设计中为特定玉米发酵蛋白（CFP）来源采用合适的代谢能（ME）和氨基酸消化率系数。玉米蛋白的氨基酸组成中赖氨酸和色氨酸含量相对较低，但亮氨酸含量较高，致使缬氨酸和异亮氨酸构成氨基酸不平衡，因此在单胃动物饲料中随着玉米发酵蛋白（CFP）添加比例的提高，需要补充合成氨基酸以实现理想的生长性能和胴体组成。该副产品含有约20%~29%的废酵母，这些酵母改善了氨基酸谱系与氨基酸需求的匹配度，并可能根据饲料添加量和鱼类、生猪类和家禽的健康状况提供动物健康益处。

使用低环境影响的饲料配料是可持续食用动物生产的重要组成部分。虽然一些关于在动物饲料中添加DDGS（含可溶物干酒糟）的生命周期评估显示温室气体（GHG）排放增加，但饲喂DDGS（含可溶物干酒糟）大大减少了其他多种环境影响。一些美国乙醇厂已获得国际可持续发展和碳认证项目认证，以满足欧盟通过使用可再生能源及乙醇和玉米副产品低碳强度评分来减少温室气体（GHG）排放的指令要求。初步研究已对含玉米发酵蛋白（CFP）饲料饲喂肉鸡、火鸡和大西洋鲑对温室气体（GHG）排放的影响进行了估算，结果显示排放量显著降低。

参考文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.
- Acosta, J.P., C.D. Espinosa, N.W. Jaworski, and H.H. Stein. 2021. Corn protein has greater concentrations of digestible amino acids and energy than low-oil corn distillers dried grains with solubles when fed to pigs but does not affect the growth performance of weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 99:1-12. [Doi:10.1093/jas/skab175](https://doi.org/10.1093/jas/skab175)
- Aguirre-Villegas, H.A., T.H., Passos-Fonseca, D.J. Reinemann, L.E. Armentano, M.A. Wattiaux, V.E. Cabrera, J.M. Norman, and R. Larson. 2015. Green cheese: Partial life cycle assessment of greenhouse gas emissions and energy intensity of integrated dairy production and bioenergy systems. *J. Dairy Sci.* 98:1571-1592. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8850>
- Ascott, M.J., D.C. Goody, L. Wang, M.E. Stuart, M.A. Lewis, R.S. Ward, and A.M. Binley. 2017. Global patterns of nitrate storage in the vadose zone. *Nat. Commun.* 8:1416.
- Asem-Hiablíe, S., T. Battagliese, K.R. Stackhouse-Lawson, and C.A. Rotz. 2019. A life cycle assessment of the environmental impacts of a beef system in the USA. *The Intl. J. Life Cycle Assess.* 24:441-455. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1464-6>
- Benavides, P.T., H. Cai, M. Wang, and N. Bajjalieh. 2020. Life-cycle analysis of soybean meal, distiller-dried grains with solubles, and synthetic amino acid-based animal feeds for swine and poultry production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 268:114607. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114607>
- Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soybean alternative in diets for fast-growing meat production species: A circular economy approach. *Sustainability* 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>
- Cemin, H.S., M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019a. Meta-regression analysis to predict the influence of branched-chain and large neutral amino acids on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 2019.97:2505-2514. [Doi:10.1093/jas/skz118](https://doi.org/10.1093/jas/skz118)
- Cemin, H.S., M.D. Tokach, J.C. Woodworth, S.S. Dritz, J.M. DeRouchey, and R.D. Goodband. 2019b. Branched-chain amino acid interactions in growing pig diets. *Trans. Anim. Sci.* 2019.3:1246-1253. [doi:10.1093/tas/txz087](https://doi.org/10.1093/tas/txz087)
- Clizer, D.A. 2021. Evaluating impacts of tryptophan and branched chain amino acids in swine diets containing corn based dried distillers grains on the growth performance and carcass characteristics of grow-finish pigs. Ph.D. Thesis, South Dakota State University, Brookings. 191 pp.
- Corray, S., P. Utterback, D. Ramchandran, V. Singh, S.P. Moose, and C.M. Parsons. 2019. Nutritional evaluation of 3 types of novel ethanol coproducts. *Poult. Sci.* 98:2933-2939. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez043>
- Cortés, A., R. Casillas-Hernández, C. Cambeses-Franco, R. Bórquez-López, F. Magallón-Barajas, W. Quadros-Seiffert, G. Feijoo, M.T. Moreira. 2021. Eco-efficiency assessment of shrimp aquaculture production in Mexico. *Aquaculture* 544:737145. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737145>
- Cowieson, A.J., J.P. Ruckebusch, I. Knap, P. Guggenbuhl, and F. Fru-Nji. 2016. Phytate-free nutrition: A new paradigm in monogastric animal production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 222:180-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.10.016>
- Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and

energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 98:1-9. doi:10.1093/jas/skaa200

de Quelen, F., L. Brossard, A. Wilfart, J.-Y. Dourmad, and F. Garcia-Launay. 2021. Eco-friendly feed formulation and on-farm feed production as ways to reduce the environmental impacts of pig production without consequences on animal performance. *Front. Vet. Sci.* 8:689012. doi: 10.3389/fvets.2021.689012

Erisman, J.W., J.N. Galloway, S. Seitzinger, A. Bleeker, N.B. Dise, A.M.R. Petrescu, A.M. Leach, and W. de vries. 2013. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368:20130166.

Erwan, E., A.R. Alimon, A.Q. Sazili, and H. Yaakub. 2008. Effect of varying levels of leucine and energy on performance and carcass characteristics of broiler chickens. *International J. Poult. Sci.* 7:696-699.

Galloway, J.N., A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J.R. Freney, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger, and M.A. Sutton. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions and potential solutions. *Science* 320:889-892.

Galloway, J.N., J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling, and B.J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* 53:341-356.

Garcia-Launay, F., L. Dusart, S. Espagnol, S. Laisse-Redoux, D. Gaudré, B. Méda, and A. Wilfart. 2018. Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *Br. J. Nutr.* 120:1298-1309. doi:10.1017/S0007114518002672

Gerber, P.J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Falcucci, and G. Tempio. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 139 pp. <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>

Hamilton, H.A., D. Ivanova, K. Stadler, S. Merciai, J. Schmidt, R. van Zelm, D. Moran, and R. Wood. 2018. Trade and the role of non-food commodities for global eutrophication. *Nat. Sustain.* 1:314-321.

Henriksson, P.J.G., C.V. Mohan, and M.J. Phillips. 2017. Evaluation of different aquaculture feed ingredients in Indonesia using life cycle assessment. *IJoLCAS* 1:13-21.

Herrero, M., and P.K. Thornton. 2013. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems. *PNAS* 110(52):20878-20881. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1321844111

Hooge, D.M. 2004a. Meta-analysis of broiler chicken pen trials evaluating dietary mannan oligosaccharide, 1993-2003. *Int. J. Poult. Sci.* 3:163-174.

Hooge, D.M. 2004b. Turkey pen trials with dietary mannan oligosaccharide, 1993-2003. *Int. J. Poult. Sci.* 3:179-188.

Hünerberg, M., S.M. Little, K.A. Beauchemin, S.M. McGinn, D. O'connor, E.K. Okine, O.M. Harstad, R. Kröbel, and T.A. McAllister. 2014. Feeding high concentrations of corn dried distillers' grains decreases methane, but increases nitrous oxide emissions from beef cattle production. *Agric. Sys.* 127:19-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.005>

Kebreab, E., A. Liedke, D. Caro, S. Deimling, M. Binder, and M. Finkbeiner. 2016. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *J. Anim. Sci.* 94:2664-2681. doi:10.2527/jas2015-9036

Kerkaert, H.R., H.S. Cemin, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, K.D. Haydon, C.W. Hastad, and Z.B. Post. 2021. Improving performance of

- finishing pigs with added valine, isoleucine, and tryptophan: validating a meta-analysis model. *J. Anim. Sci.* 99:1-9. doi:10.1093/jas/skab006
- Kraatz, S., J.C. Sinistore, and D.J. Reinemann. 2013. Energy intensity and global warming potential of corn grain ethanol production in Wisconsin (USA). *Food Ener. Secur.* 2:207-219. doi:10.1002/fes3.27
- Kwon, W.B., J.A. Soto, and H.H. Stein. 2020. Effects on nitrogen balance and metabolism of branch-chain amino acids by growing pigs of supplementing isoleucine and valine to diets with adequate or excess concentrations of dietary leucine. *J. Anim. Sci.* 98:1-10. doi:10.1093/jas/skaa346
- Kwon, W.B., K.J. Touchette, A. Simongiovanni, K. Syriopoulos, A. Wessels, and H.H. Stein. 2019. Excess dietary leucine in diets for growing pigs reduces growth performance, biological value of protein, protein retention, and serotonin synthesis. *J. Anim. Sci.* 2019:4282-4292. doi:10.1093/jas/skz259
- LEAP. 2015. Environmental performance of animal feed supply chains: Guidelines for assessment. *Livest. Environ. Assess. Perform. Partnership, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.*
- Leinonen, I., M. MacLeod, and J. Bell. 2018. Effects of alternative uses of distillery by-products on the greenhouse gas emissions of Scottish malt whisky production: A system expansion approach. *Sustainability* 10:1473. doi:10.3390/su10051473
- Lywood, W., and J. Pinkney. 2012. An outlook on EU biofuel production and its implications for the animal feed industry. In: *Biofuel Co-Products as Livestock Feed: Opportunities and Challenges*, ed. H.P.S. Makkar, pp. 13-34. FAO, Rome, Italy.
- Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I Kyriazakis. 2016a. Can the environmental impact of pig systems be reduced by utilizing co-products as feed? *J. Clean. Prod.* 115:172-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.074>
- Mackenzie, S.G., I. Leinonen, N. Ferguson, and I Kyriazakis. 2016b. Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact of diet formulation. *Brit. J. Nutr.* 115:1860-1874. doi:10.1017/S0007114516000763
- Mathai, J.K., J.K. Htoo, J.E. Thomson, K.J. Touchette, and H.H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threonine:lysine ratio for twenty-five-to-fifty-kilogram growing gilts. *J. Anim. Sci.* 2016.94:4217-4230. doi:10.2527/jas2016-0680
- Méda, B., F. Garcia-Launay, L. Dusart, P. Ponchant, S. Espagnol, and A. Wilfart. 2021. Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: What benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal* 15:100024. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100024>
- Meul, M., C. Ginneberge, C.E. van Middelaar, I.J.M. de Boer, D. Fremaut, and G. Haesaert. 2012. Carbon footprint of five pig diets using three land use change accounting methods. *Livest. Sci.* 149:215-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2012.07.012>
- Miguel, J.C., S.L. Rodriguez-Zas, and J.E. Pettigrew. 2004. Efficacy of a mann oligosaccharide (Bio-Mos) for improving nursery pig performance. *J. Swine Health prod.* 12:296-307.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Ospina-Rojas, I.C., A.E. Murakami, C.R.A. Duarte, G.R. Nascimento, E.R.M Garcia, M.I. Sakamoto, and R.V. Nunes. 2017. Leucine and valine supplementation of low-protein diets for broiler chickens from 21 to 42 days of age. *Poult. Sci.* 96:914-922. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew319>

- Oster, M., H. Reyer, E. Ball, D. Fornara, J. McKillen, K. Ulrich Sørensen, H. Damgaard Poulsen, K. Andersson, D. Ddiba, A. Rosemarin, L. Arata, P. Sckokai, E. Magowan, and K. Wimmers. 2018. Bridging gaps in the agricultural phosphorus cycle from an animal husbandry perspective – The case of pigs and poultry. *Sustainability* 10:1825. doi: 10.3390/su10061825
- Peganova, S., and K. Eder. 2003. Interactions of various supplies of isoleucine, valine, leucine and tryptophan on the performance of laying hens. *Poult. Sci.* 82:100-105.
- Qui, X., H. Tian, and D.A. Davis. 2017. Evaluation of a high protein distiller's dried grains product as a protein source in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 480:1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.038>
- Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57:14861-14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>
- Ringo, E., R.E. Olsen, J.L.G. Vecino, S. Wadsworth, and S.K. Song. 2012. Use of immunostimulants and nucleotides in aquaculture: A review. *J. Mar. Sci. Res. Dev.* 1:104.
- Salyer, J.A., M.D. Tokach, J.M. DeRouchey, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2013. Effects of standardized ileal digestible tryptophan:lysine in diets containing 30% dried distillers grains with solubles on finishing pig performance and carcass traits. *J. Anim. Sci.* 2013.91:3244-3252. doi:10.2527/jas2012-5502
- Sauer, N., R. Mosenthin, and E. Bauer. 2011. The role of dietary nucleotides in single-stomached animals. *Nutr. Res. Rev.* 24:46-59.
- Schweer, W., A. Ramirez, and N. Gabler. 2017. Alternatives to In-Feed Antibiotics for Nursery Pigs. XVIII Biennial Congress AMENA 2017, October 17-21, 2017, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico.
- Shurson, G.C., Y.-T. Hung, J.C. Jang, and P.E. Urriola. 2021. Measures matter – Determining the true nutri-physiological value of feed ingredients for swine. *Animals* 11:1259. <https://doi.org/10.3390/ani1051259>
- Shurson, G.C. 2018. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60-76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.010>
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels co-products in feeding the world sustainably. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5:229-254.
- Shurson, G.C., H.D. Tilstra, and B.J. Kerr. 2012. Impact of United States biofuels co-products on the feed industry. In: *Opportunities and Challenges in Utilizing By-products of the Biofuel Industry as Livestock Feed*. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy. pp. 35-60.
- Siebert, D., D.R. Khan, and D. Torrallardona. 2021. The optimal valine to lysine ratio for performance parameters in weaned piglets. *Animals* 11:1255. <https://doi.org/10.3390/ani11051255>
- Smith, T.M., A.L. Goodkind, T. Kim, R.E.O. Pelton, K. Suh, and J. Schmitt. 2017. Subnational mobility and consumption-based environmental accounting of US corn in animal protein and ethanol supply chains. *PNAS* 114:E7891-E7899. <https://doi.org/10.1073/pnas.1703793114>
- Soares, L., N.K. Sakomura, J.C de Paula Dorigam, F. Liebert, A. Sunder, M.Q. do Nascimento, and B.B. Leme. 2019. Optimal in-feed amino acid ratio for laying hens based on deletion method. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 103:170-181. doi:10.1111/jpn.13021

- Soleimani, T., and H. Gilbert. 2021. An approach to achieve overall farm feed efficiency in pig production: environmental evaluation through individual life cycle assessment. *The International J. LCA* <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01860-3>
- Spring, P., C. Wenk, A. Connolly, and A. Kiers. 2015. A review of 733 published trials on Bio-Mos[®], a mannan oligosaccharide, and Actigen[®], a second generation mannose rich fraction, on farm and companion animals. *J. Appl. Anim. Nutr.* 3:1-11.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow – environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 416 pp. <https://www.fao.org/3/A0701E/a0701e.pdf>
- Stone, J.J., C.R. Dollarhide, J.L. Benning, C.G. Carlson, and D.E. Clay. 2012. The life cycle impacts of feed for modern grow-finish Northern Great Plains US swine production. *Agric. Sys.* 106:1-10. doi:10.1016/j.agsy.2011.11.002
- Sutton, M.A., C.M., Howard, T.K., Adhya, E. Baker, J. Baron, A. Basir, W. Brownlie, C. Cordovil, W. de Vries, V. Eory, R. Green, H. Harmens, K.W. Hicks, R. Jeffrey, D. Kanter, L. Lassaletta, A. Leip, C. Masso, T.H. Misselbrook, E. Nemitz, S.P. Nissanka, O. Oenema, S. Patra, M. Pradhan, J. Ometto, R. Purvaja, N. Raghuram, R. Ramesh, N. Read, D.S. Reay, E. Rowe, A. Sanz-Cobena, S. Sharma, K.R. Sharp, U. Skiba, J.U. Smith, I. van der Beck, M. Vieno, and H.J.M. van Grinsven. 2019. Nitrogen-Grasping the Challenge. A Manifesto for Science-in-Action through the International Nitrogen Management System. Summary Report. Center for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.
- Sutton, M.A., S. Reis, S.N. Riddick, U. Dragosits, E. Nemitz, M.R. Theobald, Y.S. Tang, C.F. Braben, M. Vieno, A.J. Dore, R.F. Mitchell, S. Wanless, F. Daunt, D. Fowler, T.D. Blackall, C. Milford, C.R. Flechard, B. Loubet, R. Massad, P. Cellier, E. Personne, P.F. Coheur, L. Clarisse, M. van Damme, Y. Ngadi, C. Clerbaux, C.A. Skjøth, C. Geels, O. Hertel, R.J.W. Kruit, R.W. Pinder, J.O. Bash, J.T. Walker, D. Simpson, L. Horváth, T.H. Misselbrook, A. Bleeker, F. Dentener, and W. de Vries. 2013. Towards a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368:20130166.
- Tallentire, C.W., S.G. Mackenzie, and I. Kyriazakis. 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? *J. Cleaner Prod.* 187:338-347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>
- Torrecillas, S., D. Montero, and M. Izquierdo. 2014. Improved health and growth of fish fed mannan oligosaccharides: potential mode of action. *Fish Shellfish Immunol.* 36:525-544.
- Uwizeye, A., I.J.M. de Boer, C.I. Opio, R.P.O. Schulte, A. Falcucci, G. Tempio, F. Teillard, F. Casu, M. Rulli, J.N. Galloway, A. Leip, J.W. Erisman, T.P. Robinson, H. Steinfeld, and P.J. Gerber. 2020. Nitrogen emissions along the global livestock supply chains. *Nature Food* 1:437-446.
- Van Middelaar, C.E., H.H.E. van Zanten, and I.J.M. de Boer. 2019. Future of animal nutrition: the role of life cycle assessment. In: *Poultry and Pig Nutrition – Challenges of the 21st century*, W.H. Hendriks, M.W.A. Verstegen, and L. Babinsky (eds.), Wageningen Academic Publishers, p.307-314. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-884-1_14
- Vetvicka, V., and C. Oliveira. 2014. $\beta(1-3)(1-6)$ -D-glucans modulate immune status in pigs: potential importance for efficiency of commercial farming. *Ann. Transl. Med.* 2:16. <http://dx.doi.org/10.3928/j.issn.2305-5839.2014.01.04>.
- Vetvicka, V., L. Vannucci, and P. Sima. 2014. The effects of β -glucan on pig growth and immunity. *Open Biochem. J.* 8:89-93.

- Vohra, A., P. Syal, and A. Madan. 2016. Probiotic yeasts in livestock sector. *Anim. Feed Sci. Technol.* 219:31-47.
- Waldroup, P.W., J.H. Kersey, and C.A. Fritts. 2002. Influence of branched-chain amino acid balance in broiler diets. *International J. Poult. Sci.* 1:136-144.
- Wellington, M.O., J.K. Htoo, A.G. van Kessel, and D.A. Columbus. 2018. Impact of dietary fiber and immune system stimulation on threonine requirement for protein deposition in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 2018.96:5222-5232. doi:10.1093/jas/sky381
- Werth, S.J., A.S. Rocha, J.W. Oltjen, E. Kebreab, F.M. Mitloehner. 2021. A life cycle assessment of the environmental impacts of cattle feedlot finishing rations. *The Intl. J. Life Cycle Assess.* 26:1779-1793. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01957-3>
- Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers grains with solubles for swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 282:115149. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>
- Zheng, L., H. Wei, C. Cheng, Q. Xiang, J. Pang, and J. Peng. 2016. Supplementation of branched- chain amino acids to a reduced-protein diet improves growth performance in piglets: involvement of increased feed intake and direct muscle growth-promoting effect. *Brit. J. Nutr.* 115:2236-2245. doi:10.1017/S0007114516000842

第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用

引言

尽管玉米发酵蛋白（CFP）副产品在水产饲料中的应用得到了广泛推广，但令人惊讶的是，相关发表研究却寥寥无几。玉米发酵蛋白副产品是水产饲料中优质的能量和易消化氨基酸来源，已被研究用于替代欧洲鲈鱼（*Dicentrarchus labrax*）、尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）、太平洋白虾（凡纳滨对虾）和大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）饲料中的部分或全部豆粕和鱼粉。

玉米发酵蛋白与水产饲料中常见蛋白源的营养特性对比

不同于生猪家禽饲料配方的设计思路，水产养殖饲料中各种“高蛋白”饲料配料的应用价值往往基于其对鱼粉（FM）和豆粕（SBM）标准配料的替代能力来衡量。目前关于玉米发酵蛋白（CFP）相对于豆粕（SBM）和鱼粉（FM）在各种鱼类中的能量和氨基酸消化率的对比数据仍然有限，但Qui等人于2017年对一种玉米发酵蛋白（CFP）产品（NexPro）与豆粕（SBM）和鱼粉（FM）在太平洋白虾（凡纳滨对虾）体内的干物质（DM）、能量、粗蛋白（CP）及氨基酸消化率进行了比较研究。如表1所示，玉米发酵蛋白（CFP）的干物质消化率优于鱼粉（FM），能量和氨基酸消化率与鱼粉（FM）相近，但蛋白质消化率低于鱼粉（FM）。而豆粕（SBM）在干物质、粗蛋白、能量和氨基酸消化率方面均高于玉米发酵蛋白（CFP）和鱼粉（FM）。这些研究结果表明，在太平洋白虾饲料中，玉米发酵蛋白（CFP）可以作为鱼粉（FM）的合适替代品，但不适合替代豆粕（SBM）。

表1. 玉米发酵蛋白（CFP, NexPro）、豆粕（SBM）和鱼粉（FM）在太平洋白虾（凡纳滨对虾）中的常规成分分析、氨基酸组成及表观消化率对比（改编自Qiu等，2017）

指标（%）（以饲喂基础计）	玉米发酵蛋白（CFP）	豆粕（SBM）	鱼粉（FM）
干物质	94.77	89.03	92.01
干物质表观消化率	69.72	78.51	49.15, 49.45
粗蛋白	49.20	44.89	62.78
蛋白质表观消化率（%）	60.58	97.03	67.07, 71.3
粗脂肪	4.31	3.78	10.56
粗纤维	4.29	3.20	0.00
能量表观消化率（%）	68.09	82.56	69.77, 67.78
灰分	4.87	6.67	18.75
丙氨酸	3.26 (70)	2.04 (94)	3.91 (69)
精氨酸	3.26 (77)	3.35 (97)	3.68 (75)
天冬氨酸	4.05 (73)	5.10 (95)	5.34 (69)
半胱氨酸	0.82 (73)	0.62 (91)	0.47 (54)
谷氨酸	7.49 (68)	8.24 (96)	7.47 (71)

指标 (%) (以饲喂基础计)	玉米发酵蛋白 (CFP)	豆粕 (SBM)	鱼粉 (FM)
甘氨酸	1.54 (73)	2.04 (95)	4.88 (67)
组氨酸	1.42 (76)	1.20 (94)	1.63 (74)
异亮氨酸	2.18 (71)	2.17 (93)	2.42 (69)
亮氨酸	5.64 (68)	3.57 (92)	4.21 (71)
赖氨酸	2.14 (72)	3.06 (95)	4.67 (77)
蛋氨酸	0.83 (74)	0.66 (95)	1.61 (71)
苯丙氨酸	2.89 (69)	2.35 (93)	2.39 (65)
脯氨酸	3.58 (68)	2.39 (95)	3.08 (67)
丝氨酸	2.53 (75)	1.90 (93)	2.11 (58)
苏氨酸	2.02 (73)	1.75 (92)	2.41 (66)
色氨酸	0.54 (80)	0.62 (95)	0.62 (80)
酪氨酸	2.34 (74)	1.64 (95)	1.67 (74)
缬氨酸	2.73 (72)	2.34 (91)	2.99 (67)

欧洲鲈鱼 (*Dicentrarchus labrax*)

已发表的两项研究评估了玉米发酵蛋白 (CFP) 饲喂欧洲鲈鱼的效果(Goda等, 2019; 2020)。在第一项研究中, Goda等人于2019年进行了为期8周的生长性能试验, 旨在确定在平均初始体重为每条7.5克的欧洲鲈鱼幼鱼日粮中, 是否可以通过分别增加30%、40%和50%玉米发酵蛋白来部分替代豆粕 (SBM)。研究人员最初将本研究中使用的玉米发酵蛋白 (CFP) 称为“高蛋白干玉米酒糟 (DDG)”, 但在结论中正确将其描述为NexPro。试验日粮配方的粗蛋白 (45%) 和粗脂肪 (13%) 含量相同。如表2所示, 与对照组饲料相比, 分别饲喂30%、40%和50%玉米发酵蛋白 (CFP) 日粮的鱼体重增加、特定生长率和采食量均有所提高。各日粮处理组均无死亡现象, 且饲喂50%玉米发酵蛋白 (CFP) 日粮的鱼比其他处理组具有更好的饲料转化率。与对照组相比, 饲喂玉米发酵蛋白 (CFP) 日粮的鱼在血液学指标、生化指标、总抗氧化能力和肠道形态等方面均有改善, 作者认为这些反应可能与玉米发酵蛋白 (CFP) 中的酵母成分有关。本研究结果表明, 在欧洲鲈鱼幼鱼日粮中最多添加50%的玉米发酵蛋白 (CFP) 以部分替代豆粕, 可改善其生长性能, 并可能提升其健康状况。

表2. 添加不同比例玉米发酵蛋白 (NexPro) 对欧洲鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)生长性能的影响
(改编自Goda等, 2019)

指标	日粮中玉米发酵蛋白 (CFP) 添加比例			
	0%	30%	40%	50%
初始体重 (克/条)	7.47	7.50	7.50	7.53
最终体重 (克/条)	14.47 ^b	17.20 ^a	17.37 ^a	18.03 ^a
增重率 (克/条)	7.00 ^{bc}	9.70 ^a	9.87 ^a	10.50 ^a
特定生长率 (%/天)	0.87 ^b	1.39 ^a	1.41 ^a	1.70 ^a
采食量 (克/条)	11.97 ^b	14.17 ^a	13.30 ^a	13.20 ^a
饲料转化率 ²	1.71 ^a	1.45 ^{ab}	1.46 ^{ab}	1.26 ^b
成活率 (%)	100	100	100	100

第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用

1特定生长率 = $100 \times [(\text{最终体重 (克)} - \text{初始体重 (克)}) / \text{饲养时长(天)}]$

2饲料转化率=活体增重(克)/干料采食量(克)

a,b同一行中上标不同的平均值表示差异显著 ($P < 0.05$)

在后续研究中，Goda等人于2020年在日粮中分别添加30%、40%和50%玉米发酵蛋白（CFP）部分替代豆粕（SBM），并补充添加商业蛋白酶，以评估其对欧洲鲈鱼幼鱼生长性能、生理状况和肠道组织形态的影响。研究发现，与对照组及30%、40%玉米发酵蛋白（CFP）处理组相比，饲喂50%玉米发酵蛋白（CFP）日粮组鱼类的最终体重、增重、特定生长率和饲料转化率均显著提高（表3）。这些改善主要归因于饲喂50%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的鱼类在蛋白效率比、蛋白生产值、脂肪留存率和能量留存率方面的提升；同时，饲喂30%和40%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的鱼类与对照组相比，这些营养利用效率指标也有所改善（表3）。在70天饲喂试验期内，所有处理组鱼类均未出现死亡现象。与Goda等人于2019年的研究结果一致，添加蛋白酶的玉米发酵蛋白（CFP）日粮显著改善了鱼类血液学参数、血清生化指标、体液免疫反应和肠道形态结构。这些研究结果表明，在幼龄欧洲鲈鱼日粮中添加高达50%的玉米发酵蛋白（CFP）替代部分豆粕（SBM），能够有效促进其最佳生长性能和健康状况。

表3. 日粮中添加不同比例玉米发酵蛋白（NexPro）并补充蛋白酶对欧洲鲈鱼（*Dicentrarchus labrax*）生长性能和营养利用效率的影响（改编自Goda等，2020）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例			
	0%	30%	40%	50%
初始体重（克/条）	7.47	7.53	7.43	7.43
最终体重（克/条）	15.57 ^a	16.80 ^{ab}	17.07 ^{ab}	19.28 ^b
增重率（克/条）	8.10 ^a	9.27 ^{ab}	9.63 ^b	11.85 ^b
特定生长速率（%/天）	1.31 ^a	1.43 ^{ab}	1.48 ^{ab}	1.70 ^b
饲料摄入量（克/条）	16.93 ^a	15.57 ^b	14.47 ^b	13.07 ^c
饲料转化率 ²	2.09 ^a	1.68 ^{ab}	1.47 ^{ab}	1.10 ^b
成活率（%）	100	100	100	100
蛋白质效率比	1.07 ^c	1.33 ^b	1.48 ^b	1.94 ^a
蛋白质生产价值（%）	11.08 ^c	17.33 ^b	19.78 ^b	26.15 ^a
脂质保留率（%）	22.42 ^c	26.94 ^b	35.69 ^a	27.82 ^b
能量保留率（%）	6.72 ^d	7.80 ^{cd}	10.20 ^a	8.28 ^b

1特定生长率 = $100 \times [(\text{最终体重 (克)} - \text{初始体重 (克)}) / \text{饲养时长(天)}]$

2饲料转化率=活体增重(克)/干料采食量(克)

a、b、c、d同一行中上标不同的字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）

目前关于玉米发酵蛋白（CFP）副产品在各种水产养殖品种中的营养物质消化率研究数据较为有限。不过，已有一项未发表研究评估了ProCap Gold生产的玉米发酵蛋白（CFP）在尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)体内的有机物、总能、粗蛋白（CP）、乙醚提取物和氨基酸消化率，具体消化率系数如表4所示。

表4. 成年尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)对两种玉米发酵蛋白(CFP)样品的有机物、总能、粗蛋白、乙醚提取物和氨基酸的表观消化率(%) (未发表数据, 经Marquis ProCap授权改编)

指标 (%)	玉米发酵蛋白 (CFP)
有机物	60.6
总能	83.1
粗蛋白	83.1
乙醚提取物	52.9
必需氨基酸	
精氨酸	93
组氨酸	94
异亮氨酸	93
亮氨酸	94
赖氨酸	89
蛋氨酸	89 ^a
苯丙氨酸	93
苏氨酸	85
缬氨酸	92
非必需氨基酸	
丙氨酸	94
天冬氨酸	93
谷氨酸	96
甘氨酸	93 ^a
脯氨酸	95
丝氨酸	92
酪氨酸	92

a,b同一行中上标不同的字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Suehs和Gatlin于2022年开展了一项研究,旨在评估ProCap Gold来源的玉米发酵蛋白(CFP)对尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)幼鱼生长性能、体组成和免疫应答的营养价值。在第一阶段试验中,研究人员配制了对照日粮,含36%粗蛋白(CP),蛋白质来源包括豆粕(SBM)、大豆蛋白浓缩物和鱼粉(FM)。试验日粮则通过分别添加7.5%、15%、22.5%、30%或37.5%的玉米发酵蛋白(CFP)来部分替代豆粕(SBM)和鱼粉(FM),并补充大豆油以保证所有日粮均含6%脂肪。每种制成的颗粒饲料分别饲喂,每个水族箱饲喂初始体重为10.6克的15条幼龄罗非鱼,每个日粮处理重复3次,饲喂期持续8周。饲喂期结束后,从每个水族箱中随机抽取3条鱼进行人道安乐死,测定其肝体指数、腹腔脂肪率、鱼片产量和鱼片组成。同时采集血液样本,用于测定多项非特异性免疫指标,包括血液中性粒细胞氧化自由基产生量、细胞内外超氧阴离子产生量、溶菌酶活性、总蛋白含量、总免疫球蛋白水平和抗蛋白酶活性。研究结果显示,各日粮处理组在生长性能、增重效率、成活率、鱼片产量(表5)和体组成(表6)方面均无显著差异。这一结果符合预期,因为所有日粮配方均保持相同的蛋白质和能量水平,只是在添加不同比例的玉米发酵蛋白(CFP)的同时相应调整豆粕(SBM)和鱼粉(FM)的比例。此外,饲喂含量高达37.5%玉米发酵蛋白(CFP)的日粮对本研究评估的所有非特异性免疫指标均无显著影响(数据未展示)。

第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用

表5. 日粮中分别添加来不同比例 (0、7.5%、15%、22.5%、30%和37.5%)来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白对初始体重为0.25克的尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)在8周饲喂期间生长性能、鱼片产量、肝体指数、腹腔脂肪率和存活率的影响(Suehs和Gatlin, 2022; 经Marquis ProCap授权改编)

指标	日粮中玉米发酵蛋白 (CFP) 添加比例					
	0%	7.5%	15%	22.5%	30%	37.5%
增重率 ¹ (%)	383	321	353	376	354	364
增重效率 ²	0.85	0.79	0.82	0.87	0.81	0.83
鱼片产量 ³ (%)	27.2	27.3	28.5	26.1	26.7	26.7
肝体指数 ⁴ (%)	3.09	2.73	3.26	2.92	3.30	3.32
腹腔脂肪 (%)	1.10	1.33	0.99	1.13	0.94	1.40
成活率 (%)	100	97.8	91.1	100	88.9	95.6

¹增重率 = (最终体重 (克) - 初始体重 (克)) / 初始体重 (克) × 100

²增重效率 = 增重率 (克) / 干料投喂量 (克)

³鱼片产量 = 鱼片重量 (克) / 体重 (100克)

⁴肝体指数 = (100 × 肝脏重量 (克)) / 体重 (克)

⁵腹腔脂肪 (%) = (腹腔脂肪重量 (克) / 体重 (克) × 100)

表6. 饲喂含0、7.5%、15%、22.5%、30%和37.5%来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白日粮8周后尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)幼鱼全鱼体成分(Suehs和Gatlin, 2022; 经Marquis ProCap授权改编)

指标	日粮中玉米发酵蛋白 (CFP) 添加比例					
	0%	7.5%	15%	22.5%	30%	37.5%
水分 (%)	70.9	72.9	70.9	70.8	71.4	69.9
蛋白质 (%)	17.5	16.8	17.4	17.2	17.2	17.4
脂质 (%)	7.4	6.5	7.4	7.8	7.0	8.3
灰分 (%)	3.8	3.7	3.7	3.9	3.9	3.9
蛋白转化率 (%)	44.2	40.0	42.4	43.4	40.1	42.5

奥本大学开展的一项未发表研究评估了在9周饲喂期内对初始体重为7.5克的尼罗罗非鱼幼鱼日粮中添加不同比例 (0、3.15%、6.30%、9.45%和12.60%) 来源于NexPro的玉米发酵蛋白 (CFP) 部分替代玉米蛋白浓缩物 (CPC) 对其生长性能的影响。结果表明, 各日粮处理组在增重、饲料转化率和成活率方面均无显著差异, 证明在幼龄罗非鱼日粮中添加高达12.6%的玉米发酵蛋白 (CFP) 可有效替代玉米蛋白浓缩物 (CPC), 且不会对生长性能产生负面影响 (表7)。

表7. 日粮中添加不同比例(0、3.15%、6.30%、9.45%和12.60%)来源于NexPro的玉米发酵蛋白日粮对尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)幼鱼在9周饲喂期内生长性能的影响 (改编自奥本大学未发表研究, 经POET授权)

指标	日粮中玉米发酵蛋白 (CFP) 添加比例				
	0%	3.15%	6.30%	9.45%	12.60%
最终平均体重 (克)	80.4	73.1	79.8	79.5	79.5
最终生物量 (克)	1,446	1,405	1,436	1,447	1,447
增重率 ¹ (%)	965	880	953	954	936
饲料转化率 ²	1.23	1.30	1.24	1.23	1.24
成活率 (%)	90.0	96.3	90.0	91.3	92.5

¹增重率 = (最终体重 - 初始体重) / 初始体重 × 100

²饲料转化率 = 饲料投喂量 / (最终体重 - 初始体重)

太平洋白虾（凡纳滨对虾）

Qui等人于2017年开展了三组生长性能试验，评估不同添加量来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）替代豆粕（SBM）或豆粕与鱼粉（FM）组合在太平洋白虾（凡纳滨对虾）幼虾实用日粮中的效果。在试验1中，幼虾（初始体重0.18克；每缸10只）饲喂含有0%、10%、20%或30%玉米发酵蛋白（CFP）替代豆粕的日粮，饲喂期为6周。各日粮处理组之间的生长速率和饲料转化率均无显著差异（表8）。然而，在试验2中，当日粮中添加10%、20%或30%的玉米发酵蛋白（CFP）部分替代豆粕（SBM）和鱼粉（FM）时，与对照组（0%）和10%玉米发酵蛋白（CFP）组相比，饲喂20%和30%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的虾最终体重和增重均下降，且饲料转化率变差（表9）。因此，进行了第三组试验，以确定玉米发酵蛋白（CFP）在幼虾日粮中保持最佳生长性能的最大添加量（表10）及其对虾体组成的影响（表7）。根据这些生长性能结果，推荐幼虾日粮中玉米发酵蛋白（CFP）的上限为18%，因为饲喂24%玉米发酵蛋白（CFP）日粮时会导致增重和饲料转化率下降。在较高添加量下观察到的生长性能下降可能是由于玉米发酵蛋白（CFP）的能量消化率（68%）和蛋白质消化率（61%）低于豆粕（SBM）（分别为83%和97%），且蛋白质消化率低于鱼粉（FM）（67%~71%）所致。实际上，与豆粕（SBM）相比，玉米发酵蛋白（CFP）中多种氨基酸的表观消化率较低（详见第1章）。除了在18%和24%日粮添加量下铁和铜含量增加外，与饲喂对照日粮相比，虾体组成中的水分、蛋白质、脂肪、灰分以及大量和微量矿物质均无差异（表11）。这些结果表明，与日粮中使用的其他配料相比，玉米发酵蛋白（CFP）中铁和铜的生物利用度相对较高。

综上所述，这三组试验的结果表明，玉米发酵蛋白（CFP）是一种良好的植物性蛋白源，可添加至太平洋白虾（凡纳滨对虾）幼虾日粮中，替代豆粕时可达30%，替代豆粕（SBM）和鱼粉（FM）组合时可达18%，且不会对生长性能产生负面影响。然而，本研究中评估的玉米发酵蛋白（CFP）来源的能量和氨基酸消化率低于豆粕（SBM）。

表8. 在试验1中，在为期6周的饲养期间，对初始体重为0.18克的太平洋白虾（凡纳滨对虾）分别饲喂含0%、10%、20%和30%来源于NexPro的玉米发酵蛋白日粮对其生长性能的影响（改编自Qui等人，2017年）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例			
	0%	10%	20%	30%
最终平均体重（克）	3.4	3.5	3.1	3.1
最终生物量（克）	28.0	31.7	29.0	29.4
增重率 ¹ （%）	1,724.4	1,894.9	1,679.8	1,827.8
饲料转化率 ²	2.44	2.35	2.62	2.58
成活率（%）	84.0	92.0	94.0	94.0

¹增重率 = (最终体重 - 初始体重) / 初始体重 × 100

²饲料转化率 = 饲料投喂量 / (最终体重 - 初始体重)

第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用

表9. 在试验2中, 在为期7周饲养期间, 分别饲喂含0%、10%、20%和30%来源于NexPro的玉米发酵蛋白日粮对初始体重为1.24克的太平洋白虾(凡纳滨对虾)幼虾生长性能的影响(改编自Qui等人, 2017年)

指标	日粮中玉米发酵蛋白(CFP)添加比例			
	0%	10%	20%	30%
最终平均体重(克)	9.9 ^a	9.2 ^a	8.0 ^b	7.7 ^b
最终生物量(克)	225.8	204.6	191.4	199.0
增重率 ¹ (%)	684.8 ^a	644.7 ^{ab}	554.9 ^{bc}	519.4 ^c
饲料转化率 ²	1.61 ^a	1.72 ^a	2.05 ^b	2.12 ^b
成活率(%)	76.7	73.3	80.0	85.8

¹增重率 = (最终体重 - 初始体重) / 初始体重 × 100

²饲料转化率 = 饲料投喂量 / (最终体重 - 初始体重)

^a、^b、^c同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

表10. 在试验3中, 分别饲喂含0%、6%、12%、18%和24%玉米发酵蛋白(NexPro)日粮对太平洋白虾(凡纳滨对虾)幼虾(初始体重0.25克)6周饲养期间生长性能的影响(改编自Qui等人, 2017年)

指标	日粮中玉米发酵蛋白(CFP)添加比例				
	0%	6%	12%	18%	24%
最终平均体重(克)	5.1 ^{ab}	5.4 ^a	5.1 ^a	4.6 ^{ab}	4.3 ^b
最终生物量(克)	41.9	46.8	46.2	41.5	37.6
增重率 ¹ (%)	1837.7 ^{ab}	2065.7 ^a	1854.2 ^{ab}	1776.2 ^{ab}	1593.5 ^b
饲料转化率 ²	1.81 ^b	1.67 ^b	1.74 ^b	1.94 ^{ab}	2.14 ^a
成活率(%)	82.5	87.5	90.0	90.0	87.5

¹增重率 = (最终体重 - 初始体重) / 初始体重 × 100

²饲料转化率 = 饲料投喂量 / (最终体重 - 初始体重)

^a、^b同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

表11. 试验3中, 在6周的饲养期间, 分别饲喂含0%、6%、12%、18%和24%来源于NexPro的玉米发酵蛋白日粮的初始体重为0.25克的太平洋白虾(凡纳滨对虾)幼虾体组成(改编自Qui等人, 2017年)

指标	日粮中玉米发酵蛋白的添加量				
	0%	6%	12%	18%	24%
水分(%)	77.98	77.45	77.40	76.64	75.90
蛋白质(%)	75.18	73.00	72.60	73.90	73.90
脂质(%)	5.62	5.88	6.81	6.29	6.92
灰分(%)	11.43	11.70	11.58	11.70	11.55
钙(%)	2.97	3.33	3.09	3.41	3.40
磷(%)	1.08	1.06	1.01	1.03	1.02
钠(%)	1.06	1.15	1.10	1.10	1.09
钾(%)	1.38	1.45	1.41	1.39	1.38
硫(%)	0.87	0.90	0.88	0.88	0.88
镁(%)	0.26	0.29	0.27	0.29	0.28
铁(mg/kg)	13.53 ^b	16.40 ^{ab}	16.05 ^{ab}	15.70 ^{ab}	18.68 ^a

指标	日粮中玉米发酵蛋白的添加量				
	0%	6%	12%	18%	24%
铜 (mg/kg)	66.53 ^c	69.68 ^{bc}	73.93 ^{abc}	84.85 ^a	80.58 ^{ab}
锌 (mg/kg)	73.28	76.13	74.18	75.13	75.48
锰 (mg/kg)	2.23	3.55	2.75	3.20	3.90

^{a, b, c} 同一行中上标不同的字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Guo等人于2019年也进行了一项研究, 评估在初始体重为0.36克的太平洋白虾幼虾日粮中添加不同比例来源于NexPro的玉米发酵蛋白(CFP)替代玉米蛋白浓缩物(CPC)或鱼粉(FM)的效果, 试验持续8周。如表12所示, 所有日粮处理组之间幼虾的平均体重、增重、料重比和成活率均无差异。然而, 用20%玉米发酵蛋白(CFP)替代鱼粉(FM)会降低最终生物量, 并使饲料转化率下降, 与饲喂含0%或10%玉米发酵蛋白(CFP)日粮的对虾相比。这些结果表明, 玉米发酵蛋白(CFP)是太平洋白虾的良好蛋白质来源, 可替代高达20%的玉米蛋白浓缩物(CPC)或高达15%的鱼粉(FM), 而不会影响虾的生长性能。

表12. 在56天的饲养期间, 在太平洋白虾(凡纳滨对虾)幼虾日粮中分别添加不同比例来源于NexPro的玉米发酵蛋白(CFP)以部分替代玉米蛋白浓缩物(CPC)或鱼粉(FM)对虾的生长性能和成活率的影响(改编自Guo等人, 2019年)

指标	日粮类型							
	玉米蛋白浓缩物(CPC)	玉米蛋白浓缩物(CPC)	玉米蛋白浓缩物(CPC)	玉米蛋白浓缩物(CPC)	鱼粉(FM)	鱼粉(FM)	鱼粉(FM)	鱼粉(FM)
	0%玉米发酵蛋白(CFP)	10%玉米发酵蛋白(CFP)	15%玉米发酵蛋白(CFP)	20%玉米发酵蛋白(CFP)	0%玉米发酵蛋白(CFP)	10%玉米发酵蛋白(CFP)	15%玉米发酵蛋白(CFP)	20%成本加玉米发酵蛋白(CFP)
生物量(克)	225	227	230	221	240 ^b	235 ^b	230 ^{ab}	216 ^a
平均重量(克)	7.49	7.64	7.88	7.50	8.05	7.90	7.88	7.38
增重率(克)	7.13	7.28	7.52	7.14	7.68	7.54	7.52	7.02
增重率(%)	1,997	2,032	2,106	1,996	2,104	2,093	2,106	1,920
料重比	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4 ^a	1.4 ^a	1.5 ^{ab}	1.6 ^b
成活率(%)	100.0	99.2	97.5	98.3	99.2	99.2	97.5	97.5

^{a, b} 同一行中上标不同的字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

大西洋鲑鱼 (Salmo salar)

Burton等人于2021年进行了为期12周的饲喂试验, 评估在大西洋鲑鱼(初始体重为304克; 每缸5条鱼)日粮中分别添加不同比例(0%、5%、10%、15%和20%)玉米发酵蛋白(CFP), 部分替代豆粕(SBM), 对生长性能、日粮蛋白利用率和温室气

第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用

体（GHG）排放的影响。除了日粮中豆粕替代比例的百分比外，没有提供关于日粮组成和配方的具体细节，对应0%、5%、10%、15%和20%来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）添加比例，豆粕替代比例分别为0%、12.9%、25.8%、37.9%和50.8%。饲喂10%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的鱼最终体重和采食量高于饲喂20%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的鱼（表13）。然而，各玉米发酵蛋白（CFP）添加比例间的饲料转化率和蛋白沉积没有差异。

表13. 在为期12周饲养期间，分别饲喂0%、5%、10%、15%和20%来源于NexPro的玉米发酵蛋白部分替代豆粕的日粮，对初始体重为304克的大西洋鲑鱼的生长性能的影响（改编自Burton等人，2021年）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例				
	0%	5%	10%	15%	20%
初始体重（克）	295.0	301.9	305.7	304.7	305.0
最终体重（克）	720.0 ^{ab}	701.1 ^{ab}	752.1 ^a	690.8 ^{ab}	663.7 ^b
增重率（克）	425.0	399.2	446.4	386.1	358.7
每条鱼采食量（克）	411.9 ^a	370.5 ^{ab}	414.4 ^a	377.8 ^{ab}	348.3 ^b
饲料转化率	0.98	0.93	0.93	0.97	0.97
蛋白沉积率（%）	19.8	23.1	23.0	22.1	26.0

^{a,b} 同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

随着日粮中玉米发酵蛋白（CFP）含量的增加，对鱼体干物质、蛋白质、氨基酸（数据未显示）、脂肪和灰分含量没有影响，对蛋白质沉积率和保留率也没有影响（表13）。日粮中玉米发酵蛋白（CFP）含量对前部鱼片的暗度、黄度和红度以及后部鱼片的红度和黄度均无影响，仅在颜色暗度上有显著但微小的差异（表14）。大多数血生化指标无差异，仅有血浆磷和镁含量增加，这可能反映了玉米发酵蛋白（CFP）中这些元素的高消化率。随着玉米发酵蛋白（CFP）添加量增加，总细胞计数和红细胞压积均有所增加（数据未显示）。肌酸激酶是组织炎症的指标，各日粮处理组间含量相似。组织学评估显示没有肠道肠炎和其他肠道疾病的证据，大多数远端肠道样本显示固有层和黏膜下层无炎症（数据未显示）。这些结果表明，玉米发酵蛋白（CFP）是大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）后熏苗期日粮中良好的蛋白质和能量来源，能提供相似的鱼体组成、蛋白质和脂肪利用率、鱼片色素沉着和肠道组织学特性。然而，当向鲑鱼日粮中添加超过15%的玉米发酵蛋白（CFP）时，生长性能可能会下降。

表14. 分别饲喂0%、5%、10%、15%和20%来源于NexPro的玉米发酵蛋白部分替代豆粕的日粮对初始体重为304克的大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）在12周饲养期后全鱼体组成、营养物质沉积和保留率的影响（改编自水产养殖技术中心2019年未发表数据，经POET公司授权提供）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例				
	0%	5%	10%	15%	20%
干物质（%）	37.1	37.2	38.0	37.8	37.0
蛋白质（%）	18.8	18.4	18.5	18.7	19.0
蛋白质沉积率（mg/°C-d）	45.4	41.4	47.6	41.1	41.1
蛋白质保留率（%）	19.8	23.1	23.0	22.1	26.0
脂质（%）	17.1	17.5	18.4	18.0	16.8
脂肪沉积率（mg/°C-d）	50.7	50.7	62.6	51.9	43.3
脂质保留率（%）	59.0	50.4	58.7	54.5	50.5
灰分	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例				
	0%	5%	10%	15%	20%
色度指数					
前部鱼片					
L*	60.0	56.5	56.9	56.3	56.0
a*	7.9	8.0	7.7	7.9	7.9
b*	17.2	17.5	17.2	17.2	17.0
后部鱼片					
L*	54.9 ^{ab}	54.7 ^b	55.5 ^{ab}	55.7 ^a	54.6 ^b
a*	9.1	9.6	9.1	9.2	9.5
b*	18.8	19.1	18.8	18.6	18.5

^{a,b}同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

另一项研究在爱达荷大学水产养殖研究所的哈格曼鱼类养殖实验站进行，旨在确定来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白（CFP）对大西洋鲑鱼幼鱼生长性能的营养价值。试验日粮配方含43%粗蛋白（CP）和20%粗脂肪。对照组日粮中豆粕（SBM）含量为22%，并逐步被不同添加量的玉米发酵蛋白（CFP）所替代，形成五种处理日粮：日粮1（22%豆粕（SBM）和0%玉米发酵蛋白（CFP））；日粮2（16.5%豆粕（SBM）和5.5%玉米发酵蛋白（CFP））；日粮3（11.0%豆粕（SBM）和10.9%玉米发酵蛋白（CFP））；日粮4（5.5%豆粕（SBM）和16.4%玉米发酵蛋白（CFP））；以及日粮5（0%豆粕（SBM）和21.9%玉米发酵蛋白（CFP））。初始体重为21克的大西洋鲑鱼按各自的日粮处理组饲喂至饱食，持续12周。研究结束时，所有处理组的成活率均为100%，且随着日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加量的增加，生长性能指标无统计学显著差异（表15）。

表15. 向大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）日粮中添加不同比例来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白对生长性能的影响（改编自爱达荷大学2022年未发表研究）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例				
	0%	5.5%	10.9%	16.4%	21.9%
初始体重（克/条）	21.4	21.5	21.5	21.6	21.4
最终体重（克/条）	169.4	165.3	161.6	168.6	165.2
增重率（%）	691.1	668.9	653.6	682.3	673.0
特定生长速率（%/天）	2.47	2.42	2.40	2.45	2.43
饲料摄入量（克/条）	147.1	143.3	142.6	150.8	146.3
饲料转化率	1.00	0.99	1.02	1.03	1.02
成活率（%）	100	100	100	100	100

鲑鱼日粮中玉米发酵蛋白（CFP）含量的增加显著提高了日粮脂肪消化率，但对日粮干物质、粗蛋白（CP）或能量消化率没有影响（表16）。这些结果得到了饲喂大西洋鲑鱼的来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白（CFP）高脂肪消化率（97.2%）的支持。玉米发酵蛋白（CFP）的干物质、粗蛋白（CP）和能量消化率分别为67.5%、88.7%和76.8%。这些结果表明，玉米发酵蛋白（CFP）是一种高消化率的配料，可以在大西洋鲑鱼幼鱼日粮中添加高达22%，而不会对生长性能和成活率产生影响。

第二章 玉米发酵蛋白副产品在水产饲料中的应用

表16. 大西洋鲑鱼 (*Salmo salar*) 饲喂不同添加比例来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白的试验日粮中干物质、蛋白质、脂肪和能量的表观消化率系数 (%) 差异 (改编自爱达荷大学2022年未发表研究)

指标	日粮中玉米发酵蛋白 (CFP) 添加比例				
	0%	5.5%	10.9%	16.4%	21.9%
干物质	69.9	68.3	69.1	69.7	69.8
蛋白质	88.3	87.5	87.3	87.6	87.4
脂质	95.7 ^a	95.9 ^{ab}	96.7 ^{bc}	97.5 ^c	97.3 ^c
能量	78.6	78.2	78.1	78.4	78.5

^a, ^b, ^c同一行中不含相同上标的均值 (n = 3) 具有统计学差异 (P<0.05)。

结论

饲喂含高达50%玉米发酵蛋白 (CFP) 的日粮, 部分替代欧洲鲈鱼 (*Dicentrarchus labrax*) 幼鱼日粮中的豆粕 (SBM), 可改善鱼的生长性能, 并可能对鱼类健康状况产生积极影响。含高达37.5%玉米发酵蛋白 (CFP) 的日粮可为尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 提供最佳生长性能和鱼片组成。玉米发酵蛋白 (CFP) 是一种良好的植物性蛋白源, 可在太平洋白虾 (*凡纳滨对虾*) 幼虾日粮中添加高达30%以替代豆粕 (SBM), 或添加高达18%以替代豆粕 (SBM) 和鱼粉 (FM) 的组合, 且不会对生长性能产生负面影响。然而, 不同来源的玉米发酵蛋白 (CFP) 的能量和氨基酸消化率可能存在差异, 有时低于豆粕 (SBM)。尽管两项生长性能研究显示大西洋鲑鱼日粮中玉米发酵蛋白 (CFP) 的最大添加量不同, 但一项研究结果表明, 日粮中含高达22%玉米发酵蛋白 (CFP) 时, 不会影响生长速率和采食量。

参考文献

- Auburn University. Evaluation of corn fermented protein as a partial replacement for corn protein concentrate in diets for juvenile Nile tilapia (7.5 g initial body weight) on growth performance during a 9-week feeding period. (Unpublished data provided with permission from POET).
- Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soy bean alternative in diets for fast-growing meat production species: A circular economy approach. *Sustainability* 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>
- Goda, A.A.S., T.M. Srour, E. Omar, A.T. Mansour, M.Z. Baromh, S.A. Mohamed, E. El-Haroun, and S.J. Davies. 2019. Appraisal of a high protein distillers dried grain (DDG) in diets for European sea bass, *Dicentrarchus labrax* fingerlings on growth performance, hematological status and related gut histology. *Aquaculture Nutrition* 25:808-816. <https://doi.org/10.1111/anu.12898>
- Goda, A.M.A.-S., S.R. Ahmed, H.M. Nazmi, M.Z. Baromh, K. Fitzsimmons, W. Rossi, Jr., S. Davies, E. El-Haroun. 2020. Partial replacement of dietary soybean meal by high-protein distiller's dried grains (HPDDG) supplemented with protease enzyme for European seabass, *Dicentrarchus labrax* fingerlings. *Aquaculture Nutrition* 26:842-852.
- Guo, J., J. Reis, G. Salze, M. Rhodes, S. Tilton, and D.A. Davis. 2019. Using high protein distiller's dried grain product to replace corn protein concentrate and fish meal in practical diets for the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *J. World Aquac. Soc.* 50:983-992. <https://doi.org/10.1111/jwas.12606>
- The Center for Aquaculture Technologies. 2019. Effect of NexPro on weight gain, nutrient utilization, fillet color, blood plasma biochemistry and gut physiology of post-smolt Atlantic salmon. Unpublished report provided with permission from POET.
- Qui, X., H. Tian, and D.A. Davis. 2017. Evaluation of a high protein distiller's dried grains product as a protein source in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 480:1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.038>
- Suehs, B.A. and D.M. Gatlin III. 2022. Evaluation of a commercial high-protein distillers dried grain with solubles (DDGS) product in the diet of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Nutrition*, In press.

第三章 玉米发酵蛋白副产品在家禽日粮中的饲喂应用

引言

玉米发酵蛋白（CFP）副产品在家禽日粮中的应用研究远少于在生猪和水产日粮中的应用研究。然而，玉米发酵蛋白（CFP）副产品高代谢能（ME）和可消化氨基酸含量最适合用于肉鸡和火鸡日粮，因为这些动物需要高能量和高营养密度的日粮以支持快速生长。以下部分总结了各种来源的玉米发酵蛋白（CFP）的代谢能含量、氨基酸组成和消化率，并包括使用玉米发酵蛋白（CFP）日粮对肉鸡和火鸡生长性能及环境影响研究。遗憾的是，目前尚未有研究评估玉米发酵蛋白（CFP）在蛋鸡日粮中的应用。

玉米发酵蛋白副产品用于家禽的营养特性

营养组成

表1显示了使用三种不同技术生产的三个不同品牌玉米发酵蛋白（CFP）的蛋白质、脂肪、纤维和灰分含量。注意，尽管这些玉米发酵蛋白（CFP）副产品含有相似的粗蛋白，但赖氨酸与粗蛋白的比例从3.82到4.19不等，远高于传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源中的比例。此外，脂肪、纤维和灰分含量在各玉米发酵蛋白（CFP）来源之间差异很大。与DDGS（含可溶物干酒糟）类似，玉米发酵蛋白（CFP）副产品的钙含量较低，而磷含量从0.68%到1.1%不等。这些结果表明，由于玉米发酵蛋白（CFP）的非蛋白营养成分存在差异，终端用户必须了解用于家禽饲料配方中的具体来源，以优化营养效率和家禽性能。

表1. 不同来源和工艺的玉米发酵蛋白的蛋白质、脂肪、纤维和灰分组成比较

指标	ANDVantage 50Y ¹	NexPro ²
干物质 (%)	90.0	100.00
粗蛋白 (%)	51.1	53.0
赖氨酸: 粗蛋白	3.82	4.19
乙醚提取物 (%)	9.6	5.1
酸水解乙醚提取物 (%)	9.90	-
粗纤维 (%)	8.5	-
中性洗涤纤维 (%)	27.5	24.1
酸性洗涤纤维 (%)	20.0	4.83
可溶性膳食纤维 (%)	2.8	-
不溶性膳食纤维 (%)	29.2	-
总膳食纤维 (%)	32.0	-
灰分 (%)	2.17	5.49
钙 (%)	0.01	0.05
磷 (%)	0.68	1.1

指标	ANDVantage 50Y ¹	NexPro ²
硫 (%)	0.64	-
镁 (%)	0.07	-
钾 (%)	0.29	-
钠 (%)	0.04	0.05

¹ 数据来源于产品规格（以原样基础计），经The Andersons, Inc.授权提供。

² 数据来源于Correy等人2019年已发表数据（以干物质基础计）。

代谢能

与生猪相比，对不同来源的玉米发酵蛋白（CFP）的代谢能（ME）含量评估较少，但已对三种主要的玉米发酵蛋白（CFP）生产技术进行了评估（表2）。已确定ANDVantage 50Y和NexPro副产品的氮校正真代谢能（TMEn）值，同时也测定了ProCap Gold的氮校正表观代谢能（ME）（AMEn）含量（3,546千卡/千克；来自奥本大学Bill Dozier博士的未发表数据，经马奎斯能源公司授权提供）。因此，很难比较这三种来源之间的相对代谢能含量，但显然它们的代谢能含量均约为传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源的130%至150%，这使得玉米发酵蛋白（CFP）成为肉鸡和火鸡日粮中的优质配料。

表2. 玉米发酵蛋白源对家禽的总能（GE）、代谢能（ME）和ME比值的比较（以干物质计）

指标	ANDVantage 50Y ¹	NexPro ²
干物质 (%)	93.76	93.52
总能 (千卡/千克)	5,636	5,366
代谢能 (千卡/千克)	3,378	3,713
代谢能 (ME)	0.60	0.69

¹TMEn = 氮校正真代谢能；未发表数据，经The Andersons, Inc.授权提供。

²TMEn值（6个样本的平均值）；未发表数据，经POET许可提供。

可消化氨基酸

表3展示了ANDVantage 50Y和NexPro必需和非必需氨基酸含量及消化率的比较。氨基酸含量和消化率因来源而异，但总体而言，玉米发酵蛋白（CFP）是家禽日粮中一种高消化率的氨基酸配料。然而，最终用户必须了解饲料配方中所使用的具体来源，以优化营养效率和家禽性能。

表3. 玉米发酵蛋白来源对家禽的粗蛋白和氨基酸含量及回肠消化率比较

指标 ¹	ANDVantage 50Y ²	NexPro ³
干物质 (%)	90.0	93.0
粗蛋白 (%)	51.1	50.2
赖氨酸：粗蛋白	3.82	4.19
精氨酸	2.62 (91)	2.37 (96)
组氨酸	1.81 (89)	1.46 (91)
异亮氨酸	2.16 (87)	2.22 (93)
亮氨酸	6.53 (93)	6.65 (94)
赖氨酸	1.95 (83)	2.11 (85)

指标 ¹	ANDVantage 50Y ²	NexPro ³
蛋氨酸	1.08 (91)	1.26 (94)
苯丙氨酸	2.75 (90)	2.82 (95)
苏氨酸	1.98 (85)	2.17 (87)
色氨酸	0.42 (89)	0.51 (89)
缬氨酸	2.58 (87)	2.95 (90)
丙氨酸	3.82	3.51 (91)
天冬氨酸	3.49	3.62 (87)
胱氨酸	1.12 (92)	0.90 (87)
谷氨酸	8.87	7.61 (93)
甘氨酸	1.96	2.00
脯氨酸	4.17	3.46 (93)
丝氨酸	2.39	2.25 (89)
酪氨酸酶	2.32	2.08 (87)

¹ 括号中的数值为各种副产品来源中氨基酸在家禽中的回肠消化率系数(%)。

² 氨基酸消化率系数的未发表数据经The Andersons, Inc.授权获得。

³ 总氨基酸含量(以干物质计)和消化率系数经POET授权获得。

可消化磷

目前尚未开展研究确定家禽中玉米发酵蛋白（CFP）来源的磷消化率或相对利用率。Mutucumarana等人于2014年报告指出，使用非植酸磷来估计饲料配料中可消化磷含量并不准确，因为在饲料配料中测定的可消化磷含量通常高于非植酸磷含量，这表明禽类可以利用部分非植酸磷。然而，合理的做法是使用从评估DDGS（含可溶物干酒糟）来源的研究中获得的家禽磷消化率和利用率估计值。Mutucumarana等人于2014年报告玉米DDGS（含可溶物干酒糟）中真可消化磷含量为0.59%，约占总磷的73%。Wamsley等人于2013年确定他们评估的DDGS（含可溶物干酒糟）来源中磷的利用率在66%至68%之间，这与Martinez-Amezcuca等人于2006年报告的数值一致。因此，在开展研究确定玉米发酵蛋白（CFP）在家禽中的磷消化率和利用率之前，可以合理假设玉米发酵蛋白（CFP）中约60%的总磷可被禽类利用。然而，需要注意的是，许多乙醇厂在发酵过程中添加了植酸酶，这进一步增加了不可消化植酸向可消化磷酸盐的转化（Reis et al., 2018）。营养师应询问其使用的玉米副产品来源在生产过程中是否使用了植酸酶，因为这会影响磷消化率数值。

肉鸡饲喂玉米发酵蛋白日粮的试验总结

Burton等人于2021年开展了一项生长性能试验，评估用来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）替代豆粕对肉鸡的影响。试验从商业孵化场获取刚出壳的罗斯公鸡，称重后分配到平养鸡舍（每栏9只），分别饲喂含0%、5%或10%玉米发酵蛋白（CFP）的日粮。采用两阶段饲喂方案，0-21日龄饲喂开食料，21-42日龄饲喂生长料。日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加量对最终体重和增重无影响，但饲喂10%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的肉鸡采食量增加，饲料转化率较饲喂不含玉米发酵蛋白（CFP）的对照日粮差（表4）。与饲喂对照日粮相比，饲喂10%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的肉鸡氮保留率相似，而饲喂5%玉米发酵蛋白（CFP）日粮则提高了氮保留率（表4）。这种日粮氮利用率的提高，可能是由于在这些日粮中添加了结晶赖氨酸、蛋氨酸、精氨

酸、苏氨酸和缬氨酸，以纠正部分用玉米发酵蛋白（CFP）替代豆粕导致的氨基酸不平衡。

表4. 在42天饲养期间，饲喂不同添加比例来源于NexPro的玉米发酵蛋白日粮对肉鸡的生长性能、氮保留率和胴体组分产量的影响（改编自Burton等人，2021年）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例		
	0%	5%	10%
初始体重（克）	45	45	44
最终体重（克）	3,360	3,439	3,339
增重率（克）	3,315	3,394	3,295
饲料摄入量（克/只）	4878 ^b	5042 ^{ab}	5151 ^a
饲料转化率 ²	1.47 ^a	1.49 ^a	1.57 ^b
氮保留率（%）	29.4 ^b	30.4 ^a	28.7 ^b
胴体胸脯肉、大腿肉、小腿肉产量（千克）	1.41	1.49	1.45

^{a,b} 同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

火鸡饲喂玉米发酵蛋白日粮的试验总结

与肉鸡研究类似，Burton等人于2021年进行了一项生长性能试验，评估在火鸡日粮中用来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）替代豆粕的效果。从商业孵化场获取刚孵化的BUT6雄性火鸡雏，称重后分配到平养栏（每栏5只），分别饲喂含0%、4%或8%玉米发酵蛋白（CFP）的日粮。采用2阶段饲喂方案，从0至21日龄饲喂开食料，21至42日龄饲喂生长料。日粮中玉米发酵蛋白（CFP）的添加比例对最终体重、增重、采食量和饲料转化率均无影响，与饲喂不含玉米发酵蛋白（CFP）的对照日粮相比无差异（表5）。饲喂8%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的火鸡氮留存率高于饲喂对照日粮的火鸡（表5）。这种日粮氮利用率的提高可能是由于在日粮中添加了结晶赖氨酸、蛋氨酸和苏氨酸，以纠正因部分用玉米发酵蛋白（CFP）替代豆粕而导致的氨基酸不平衡。

表5. 在42天饲养期间，分别饲喂不同添加比例来源于NexPro的玉米发酵蛋白日粮对火鸡雏鸡生长性能的影响（改编自Burton等人，2021年）

指标	日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例		
	0%	4%	8%
初始体重（克）	66	66	66
最终体重（克）	2,328	2,423	2,518
增重率（克）	2,262	2,357	2,452
采食量（克/只）	3,741	3,850	3,743
饲料转化率 ²	1.66	1.64	1.61
氮保留率（%）	18.3 ^b	21.0 ^{ab}	21.8 ^a

^{a,b} 同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

结论

有关玉米发酵蛋白（CFP）副产品在肉鸡和火鸡饲喂中的饲用价值及生长性能的现有研究数据虽然有限，但结果表明，与传统的玉米干酒糟及DDGS（含可溶物干酒糟）相比，玉米发酵蛋白（CFP）能量水平更高，氨基酸消化率更好。研究显示，在肉鸡日粮中添加量不超过10%、火鸡日粮中添加量不超过8%的情况下，玉米发酵蛋白（CFP）或可维持可接受的生长性能和氮保留率。

参考文献

- Burton, E., D. Scholey, A. Alkhtib, and P. Williams. 2021. Use of an ethanol bio-refinery product as a soy bean alternative in diets for fast-growing meat production species: A circular economy approach. *Sustainability* 13:11019. <https://doi.org/10.3390/su131911019>
- Correy, S., P. Utterback, D. Ramchandran, V. Singh, S.P. Moose, and C.M. Parsons. 2019. Nutritional evaluation of 3 types of novel ethanol coproducts. *Poult. Sci.* 98:2933-2939. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez043>
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy, and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 85:470-475.
- Mutucumarana, R.K., V. Ravindran, G. Ravindran, and A.J. Cowieson. 2014. Measurement of true ileal digestibility of phosphorus in some feed ingredients for broiler chickens. *J. Anim. Sci.* 92:5520-5529.
- Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57:14861-14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K. Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279-297.

第四章 玉米发酵蛋白副产品在生猪日粮中的应用

引言

玉米发酵蛋白（CFP）副产品是仔猪日粮中极具吸引力的饲料原料，因为它们具有高代谢能（ME）以及可消化氨基酸和磷含量。这种高能量和营养密度使得在配方容量受限的日粮中，只需较小的添加量即可提供充足的能量和营养物质。此外，仔猪日粮必须配制成能量和氨基酸高度浓缩的形式，这只能通过使用代谢能（ME）和可消化氨基酸含量高的原料来实现，因为这些原料更有可能在仔猪应激期（此时采食量通常较低且不稳定）支持良好的生长。由于玉米发酵蛋白（CFP）中含有废酵母，当以相对较高的添加比例添加到日粮中时，这些副产品可能会因酵母细胞壁中存在的甘露寡糖、 β -葡聚糖和核苷酸而为仔猪提供健康益处（Shurson, 2018）。因此，本章总结了几项近期研究的结果，该研究确定了生产玉米发酵蛋白（CFP）的三种不同技术类型的可消化能（DE）、代谢能（ME）、氨基酸的标准回肠消化率（SID）以及磷（P）的标准总肠道消化率（STTD），并总结了保育猪饲喂试验中的生长性能结果。

玉米发酵蛋白副产品的猪用营养特性

目前有三种不同类型的专利加工技术用于生产玉米发酵副产品，包括ICM公司的先进加工技术包™（APP™）、FluidQuip公司的最大化酒糟副产品技术™（MSC™）和Marquis公司的ProCap技术™。尽管这些技术都能在最终副产品中浓缩蛋白质和酵母，但它们的营养特性各不相同。因此，为了在猪日粮中添加这些副产品时提高能量和营养效率，在饲料配方过程中使用适当的代谢能（ME）、氨基酸标准回肠消化率（SID）和磷的标准总肠道消化率（STTD）值至关重要。值得欣慰的是，已经针对每种类型的玉米发酵蛋白（CFP）副产品进行了消化率研究，以确定猪用可消化能（DE）和代谢能（ME）含量以及氨基酸标准回肠消化率（SID）。

营养组成

不同品牌玉米发酵蛋白（CFP）的蛋白质、脂质、纤维和灰分含量如表1所示。需要注意的是，尽管这些玉米发酵蛋白（CFP）副产品含有相似的粗蛋白（CP）浓度，但乙醚提取物（粗脂肪）和酸水解乙醚提取物、中性洗涤纤维（NDF）、总膳食纤维（TDF）和灰分含量在不同来源间差异较大。与DDGS（含可溶物干酒糟）类似，玉米发酵蛋白（CFP）副产品的钙含量较低，而磷（P）含量在0.68%至1.04%之间变化。这些结果表明，由于玉米发酵蛋白（CFP）来源间的营养特性差异较大，最终用户必须了解猪饲料配方中使用的具体来源，以优化营养效率和动物性能。

表1. 玉米发酵蛋白源中蛋白质、脂肪、纤维和灰分组成的对比（以原样基础计）

指标	ANDVantage 50Y ¹	A+Pro2	NexPro ³	ProCap Gold ⁴
干物质（%）	93.76	91.73	93.00	88.00
粗蛋白（%）	51.79	50.20	50.1	49.09
赖氨酸：粗蛋白	3.46	3.96	3.95	3.93
乙醚提取物（%）	9.60*	4.62		-

第四章 玉米发酵蛋白副产品在生猪日粮中的应用

指标	ANDVantage 50Y ¹	A+Pro ²	NexPro ³	ProCap Gold ⁴
酸水解乙醚提取物 (AEE) ⁵ (%)	9.90	-	5.6	9.49
中性洗涤纤维 (%)	27.50*	24.33	-	-
酸性洗涤纤维 (%)	20.00*	4.83	-	-
可溶性膳食纤维 (%)	2.8	-	3.4	1.02
不溶性膳食纤维 (%)	29.2	-	24.4	21.77
总膳食纤维 (%)	32.0	-	27.8	22.79
灰分 (%)	1.44	5.49	7.9	7.38
钙 (%)	0.01*	0.04	-	0.04
磷 (%)	0.68*	0.82	-	0.77

¹ Lee和Stein的(2021)未发表数据, 经The Andersons公司授权使用。

² 数据来源于Yang等人2021年的研究报告。

³ 数据来源于Acosta等人2021年的研究报告。

⁴ 数据来源于Cristobal等人2020年的研究报告。

⁵ AEE = 酸水解乙醚提取物

*数值取自供应商提供的营养规格说明书, 经The Andersons公司授权使用。

代谢能

由于各种玉米发酵蛋白(CFP)来源间的脂质、纤维和灰分含量差异较大, 可消化能(DE)和代谢能(ME)含量也存在差异, A+ Pro的可消化能(DE)和代谢能(ME)分别为3,837和3,643千卡/千克, 而ProCap Gold则分别为4,560和4,306千卡/千克(表2)。然而, 这些玉米发酵蛋白(CFP)来源的代谢能(ME)含量是常规DDGS(含可溶物干酒糟)来源的117%至150%。各副产品来源的代谢能与总能(GE)之比相似, 但ProCap Gold除外, 其比率为0.84, 表明猪对其总能的利用更高, 这可能是因为相比其他玉米产品, 它具有相对较高的油脂含量和较低的纤维含量。

表2. 猪用玉米发酵蛋白来源的总能(GE)、可消化能(DE)、代谢能(ME)及能量比率对比(以原样基础计)

指标	ANDVantage 50Y ¹	A+Pro ²	NexPro ³	ProCap Gold ⁴
干物质 (%)	93.76	91.73	93.00	88.00
总能 (千卡/千克)	5,284	4,908	4,937	5,100
可消化能 (千卡/千克)	4,421	3,837	4,070	4,560
代谢能 (千卡/千克)	4,085	3,643	3,705	4,306
代谢能: 可消化能 (ME:DE)	0.92	0.95	0.91	0.94
可消化能: 总能 (DE:GE)	0.84	0.78	0.82	0.89
代谢能: 总能 (ME:GE)	0.77	0.74	0.75	0.84

¹ Lee和Stein的2021年未发表数据, 经The Andersons公司授权使用。

² 数据来源于Yang等人2021年的研究报告。

³ 数据来源于Acosta等人2021年的研究报告。

⁴ 数据来源于Cristobal等人2020年的研究报告。

可消化氨基酸

玉米发酵蛋白（CFP）副产品的氨基酸组成有所不同，但正如预期的那样，较高的粗蛋白（CP）含量导致氨基酸浓度增加（表3）。与传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源的氨基酸组成相比（数据未显示），相对于赖氨酸含量的氨基酸比例得到改善，这是由于废酵母含量增加及其相关的氨基酸组成所致（Shurson, 2018）。需要注意的是，氨基酸的标准回肠消化率（SID）通常高于传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源，但在不同玉米发酵蛋白（CFP）来源之间存在差异。例如，在ProCap Gold中，赖氨酸的标准回肠消化率（SID）的A+ Pro和NexPro范围为61%~85%。同样，由于这些差异，最终用户必须了解猪饲料配方中使用的具体来源，以优化营养效率和猪的性能。

表3. 不同玉米发酵蛋白来源的粗蛋白和氨基酸含量及其在生猪中的标准回肠消化率对比（以原样基础计）

指标 ¹	ANDVantage 50Y ²	A+Pro ³	NexPro ⁴	ProCap Gold ⁵
干物质（%）	93.76	91.73	93.00	88.00
粗蛋白（%）	51.79 (80)	50.20 (70)	50.1 (75)	48.09 (84)
赖氨酸：粗蛋白	3.46	3.96	3.95	3.93
精氨酸	2.37 (90)	2.36 (81)	2.31 (81)	2.47 (92)
组氨酸	1.41 (84)	1.44 (77)	1.33 (80)	1.40 (88)
异亮氨酸	2.01 (81)	2.26 (74)	2.19 (75)	2.03 (87)
亮氨酸	6.44 (89)	6.30 (84)	5.68 (85)	5.57 (90)
赖氨酸	1.79 (72)	1.99 (61)	1.98 (61)	1.89 (85)
蛋氨酸	1.28 (89)	1.07 (81)	1.01 (84)	1.09 (89)
苯丙氨酸	2.75 (86)	2.66 (81)	2.49 (81)	2.51 (89)
苏氨酸	2.00 (80)	2.01 (67)	2.00 (70)	1.89 (83)
色氨酸	0.58 (83)	0.37 (75)	0.42 (81)	0.49 (90)
缬氨酸	2.54 (82)	2.94 (74)	2.83 (74)	2.84 (85)
丙氨酸	3.82 (86)	3.75 (78)	3.47 (79)	3.41 (86)
天冬氨酸	3.49 (78)	3.57 (67)	3.55 (69)	3.38 (82)
半胱氨酸	1.12 (81)	0.98 (70)	0.87 (73)	1.00 (84)
谷氨酸	8.87 (87)	8.15 (82)	7.39 (83)	7.52 (89)
甘氨酸	1.96 (81)	2.00 (56)	2.01 (65)	2.06 (76)
脯氨酸	4.17 (100)	-	3.50	3.52 (73)
丝氨酸	2.39 (86)	2.27 (77)	2.17 (77)	2.20 (86)
酪氨酸	2.32 (90)	2.04 (83)	1.98 (82)	1.90 (90)

¹ 括号内的数值为各副产品来源中氨基酸在猪体内的标准回肠消化率系数（%）。

² Lee和Stein的2021年未发表数据，经The Andersons公司授权使用。

³ 数据来源于Yang等人2021年的研究报告。

⁴ 数据来源于Acosta等人2021年的研究报告。

⁵ 数据来源于Cristobal等人2020年的研究报告。

可消化磷

玉米发酵蛋白（CFP）为猪日粮提供了大量可消化磷（P），这可以通过基于磷的标准总肠道消化率（STTD）配制生猪日粮加以利用。玉米副产品中相对较高的总磷含量和高消化率可以减少满足猪磷需求所需的无机添加剂（如单磷酸钙）用量，同时减少粪便中的磷排泄和日粮成本。然而，目前仅有一项研究确定了玉米发酵蛋白（CFP）副产品中磷的标准总肠道消化率（STTD）。Cristobal等人于2020年测定并比较了低油DDGS（含可溶物干酒糟）与来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白（CFP）中磷的标准总肠道消化率（STTD）和钙（Ca）的表现总肠道消化率（ATTD）。玉米发酵蛋白（CFP）中磷的标准总肠道消化率（STTD）低于传统DDGS（含可溶物干酒糟），但仍显著高于玉米粒（表4）。这一结果表明，发酵和加工后仍有一些植酸残留，添加植酸酶有助于释放更多的磷供猪利用。同样，玉米发酵蛋白（CFP）中钙的表现总肠道消化率（ATTD）低于传统DDGS（含可溶物干酒糟），但由于低油DDGS（含可溶物干酒糟）和玉米发酵蛋白（CFP）对日粮总钙的贡献非常低，因此这一点并不重要。目前尚未有研究确定其他玉米发酵蛋白（CFP）来源中的磷消化率，但推测磷的标准总肠道消化率（STTD）与ProCap Gold的结果相当。然而，值得注意的是，一些乙醇厂在发酵过程中添加植酸酶，进一步提高了不可消化植酸向可消化磷酸盐的转化（Reis等人，2018）。因此，对于营养师而言，了解其所使用的玉米副产品具体来源以及生产过程中是否添加了植酸酶至关重要，因为这直接影响到磷的消化利用率指标。

表4. 传统低油DDGS（含可溶物干酒糟）与来源于ProCap Gold的玉米发酵蛋白在生猪中钙的表现总肠道消化率和磷的标准总肠道消化率对比（以原样基础计；改编自Cristobal等人，2020）

指标	低油DDGS（含可溶物干酒糟）	玉米发酵蛋白（CFP）
钙（%）	0.04	0.04
磷（%）	1.01	0.77
钙的表现总肠道消化率（ATTD）（%）	83	66
磷的标准总肠道消化率（STTD）（%）	81	56

断奶仔猪饲喂玉米发酵蛋白日粮的试验总结

与玉米相比，玉米发酵蛋白（CFP）副产品具有更高的代谢能（ME）和可消化氨基酸含量，因此最适合用于断奶仔猪的第1阶段和第2阶段日粮。高度易消化的动物源蛋白，如喷雾干燥动物血浆（SDAP），以及植物蛋白如酶处理豆粕，是保育猪日粮中常见的添加物，但价格昂贵。此外，营养师希望能在第1阶段日粮中尽量减少豆粕用量，因为初次摄入时大豆蛋白会产生抗原效应。因此，业界对使用价格较低、高度易消化能量和蛋白质来源，作为新断奶仔猪日粮中豆粕、酶处理豆粕和喷雾干燥动物血浆（SDAP）的替代品有着相当大的兴趣。

Martindale等人于2018年进行了一项初步研究，以确定断奶仔猪第1阶段（断奶后0至14天）和第2阶段（断奶后14至28天）日粮中分别增加含量为0%、8%、16%和24%来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP），在第3阶段（断奶后28至35天）饲喂普通玉米-豆粕日粮，对21日龄断奶仔猪生长性能的影响。在第1阶段，各日粮处理组的日增重（ADG）、日采食量（ADFI）和增重效率（G:F）无显著差异，但在第2阶段，饲喂含24%玉米发酵蛋白（CFP）日粮的仔猪，其平均日增重（ADG）和平均日采食量（ADFI）均低于饲喂对照日粮0%玉米发酵蛋白（CFP）的仔猪。在第3阶段以及整个35天试验期间内，生长性能没有受到影响。但需要指出的是，由于本研究中每个处理方案仅设置4个重复栏位，每栏仅有5头猪，因此统计学检出处理方案间差异的能力有

限，而且这也不符合商业化生产的规模条件。研究人员得出结论，在第1阶段和第2阶段保育猪日粮中添加高达16%的玉米发酵蛋白（CFP）不会对生长性能产生负面影响。

Acosta等人于2021年评估了在断奶后第1阶段和第2阶段饲喂含不同量玉米发酵蛋白（CFP）以部分替代喷雾干燥动物血浆（SDAP）和酶处理豆粕（ES）的日粮对猪生长性能和粪便评分的影响（表5）。在断奶后最初7天内，饲喂含5%酶处理豆粕（ES）和2.5%喷雾干燥动物血浆（SDAP）的对照第1阶段日粮，其日增重（ADG）和增重效率（G:F）高于饲喂含4.5%酶处理豆粕（ES）+5%玉米发酵蛋白（CFP）和10%玉米发酵蛋白（CFP）的日粮，但各日粮处理组间的日采食量（ADFI）没有显著差异。然而，在断奶后第8至21天饲喂的第2阶段日粮中，添加0%至10%玉米发酵蛋白（CFP）对日增重（ADG）、日采食量（ADFI）和增重效率（G:F）没有影响。在第3阶段（断奶后第22至35天），所有猪均饲喂普通玉米-豆粕日粮，后续生长性能没有差异。这些结果表明，如果日粮中也包含2.5%喷雾干燥动物血浆（SDAP），则在断奶仔猪第1阶段日粮中添加5%玉米发酵蛋白（CFP）可以提供可接受的生长性能，但当日粮中含4.5%酶处理豆粕（ES）时则不然。在第1阶段保育猪日粮中添加10%玉米发酵蛋白（CFP）似乎过多，无法在不添加喷雾干燥动物血浆（SDAP）或酶处理豆粕（ES）的情况下支持最佳生长性能。然而，在第2阶段日粮中添加10%玉米发酵蛋白（CFP）可实现与饲喂含7.5%酶处理豆粕（ES）的对照日粮相当的可接受生长性能。

这些研究结果表明，根据所使用的其他饲料原料情况，来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）可以成功添加到第1阶段和第2阶段日粮中，添加量可达16%，具体取决于使用的其他原料。然而，玉米发酵蛋白（CFP）副产品含有高浓度的亮氨酸（Leu），会对缬氨酸（Val）和异亮氨酸（Ile）的利用和代谢产生负面影响，这已被许多研究人员认为是一项营养挑战（Harris et al., 2004; Cemin et al., 2019; Kwon et al., 2019; Yang et al., 2019）。此外，过量的亮氨酸与色氨酸（Trp）竞争通过血液进入大脑的转运，从而减少血清素合成，导致日采食量（ADFI）降低（Kwon et al., 2019; Yang et al., 2019）。另外，玉米发酵蛋白（CFP）中的高膳食纤维含量可能会增加小肠中的黏蛋白产生和苏氨酸（Thr）损失，这可能会增加猪的苏氨酸需求（Mathai et al., 2016）。因此，添加结晶苏氨酸、色氨酸、缬氨酸和异亮氨酸似乎是优化饲喂含玉米发酵蛋白（CFP）日粮的断奶仔猪生长性能所必需的。

表5. 断奶仔猪在断奶后第1和第2阶段饲喂不同含量动物血浆蛋白（PP）、酶处理豆粕（ES）和来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）日粮的生长性能（改编自Acosta等人，2021）

指标	对照组 - 无玉米发酵蛋白（CFP）	低玉米发酵蛋白（CFP）	适度玉米发酵蛋白（CFP）+ 酶处理豆粕（ES）	高玉米发酵蛋白（CFP）
初始体重（千克）	5.86	6.03	6.02	6.02
最终体重（千克）	18.53	18.58	18.51	18.20
第一阶段（第1天至第7天）	5% 酶处理豆粕（ES）+ 2.5% PP	2.5% 血浆蛋白（PP）+ 5% 玉米发酵蛋白（CFP）	4.5% 酶处理豆粕（ES）+ 5% 玉米发酵蛋白（CFP）	10% 玉米发酵蛋白（CFP）
日增重（千克）	0.134 ^a	0.106 ^{ab}	0.088 ^{bc}	0.074 ^c
平均日采食量（千克）	0.162	0.146	0.147	0.136
增重效率	0.836 ^a	0.731 ^{ab}	0.604 ^{bc}	0.538 ^c

第四章 玉米发酵蛋白副产品在生猪日粮中的应用

第二阶段 (第8天至 第21天)	7.5% 酶处理豆 粕 (ES)	5% 酶处理豆粕 (ES) + 2.5% 玉米发酵蛋白 (CFP)	1% 酶处理豆粕 (ES) + 7.5% 玉米发酵蛋白 (CFP)	10% 玉米发酵 蛋白 (CFP)
日增重 (千 克)	0.285	0.292	0.277	0.267
平均日采食 量 (千克)	0.433	0.430	0.418	0.404
增重效率	0.662	0.681	0.663	0.661
第三阶段 (第22天至第35天) ——普通玉米-豆粕日粮				
日增重 (千 克)	0.554	0.552	0.572	0.566
平均日采食 量 (千克)	0.837	0.848	0.851	0.859
增重效率	0.663	0.653	0.672	0.662
总体 (第1天至第35天)				
日增重 (千 克)	0.362	0.359	0.357	0.348
平均日采食 量 (千克)	0.541	0.540	0.537	0.533
增重效率	0.673	0.666	0.666	0.656

a^{*}、b^{*}、c 同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)。

生长育肥猪饲喂玉米发酵蛋白日粮的试验总结

Clizer等人在南达科他州立大学进行了一项未发表研究 (数据经POET公司授权提供) 评估了在在生长育肥猪 (59.5公斤至出栏重) 日粮中添加低比例 (10%~15%) 来源于NexPro的玉米发酵蛋白 (CFP) 时, 日粮中异亮氨酸 (Ile) 与赖氨酸 (Lys)、缬氨酸 (Val) 与赖氨酸 (Lys) 的比例。研究结果表明, 在早期生长阶段需要使用豆粕或结晶氨基酸调整标准回肠消化率 (SID) 缬氨酸 (Val) 和异亮氨酸 (Ile) 水平, 以克服由玉米发酵蛋白 (CFP) 带来的过量亮氨酸浓度的负面影响。虽然饲喂10%至15%玉米发酵蛋白 (CFP) 日粮的生猪与饲喂玉米-豆粕对照日粮的生猪有相似的生长性能, 但在玉米发酵蛋白 (CFP) 日粮中添加豆粕以提供更多的缬氨酸和异亮氨酸, 可使生猪的整体生长性能与饲喂玉米-豆粕对照日粮的生猪相当。因此, 尽管在生长育肥猪日粮中添加10%或15%的玉米发酵蛋白 (CFP) 对生长性能和胴体组成的负面影响很小, 但应使用豆粕而非结晶氨基酸来增加标准回肠消化率 (SID)、缬氨酸 (Val) 和异亮氨酸 (Ile) 浓度, 以减轻过量亮氨酸 (Leu) 的负面影响。

结论

玉米发酵蛋白 (CFP) 副产品是一种高能量、可消化氨基酸和磷含量丰富的原料, 最适合用于新断奶仔猪的第1和第2阶段日粮。由于不同来源间营养特性的差异性, 最终用户必须了解生猪饲料配方中使用的具体来源, 以优化营养效率和动物性能。在保育猪日粮中添加玉米发酵蛋白 (CFP) 时, 应计算苏氨酸、色氨酸、缬氨酸和异亮氨酸相对于赖氨酸含量的比例, 并使用结晶氨基酸进行调整, 以实现最佳的生猪生长性能。

参考文献

- Acosta, J.P., C.D. Espinosa, N.W. Jaworski, and H.H. Stein. 2021. Corn protein has greater concentrations of digestible amino acids and energy than low-oil corn distillers dried grains with solubles when fed to pigs but does not affect the growth performance of weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 99:1-12. doi:10.1093/jas/skab175
- Cemin, H.S., M.D. Tokach, J.C. Woodworth, S.S. Dritz, J.M. DeRouche, and R.D. Goodband. 2019. Branched-chain amino acid interactions in growing pig diets. *Transl. Anim. Sci.* 3:1246-1253. doi:10.1093/tas/txz087
- Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 98:1-9. doi:10.1093/jas/skaa200
- Harris, R.A., M. Joshi, and N.H. Jeoung. 2004. Mechanisms responsible for regulation of branched-chain amino acid catabolism. *Biochem. Res. Commun.* 313:391-396. doi:10.1016/j.bbrc.2003.11.007
- Kwon, W.B., K. Touchette, A. Simongiovanni, K. Syriopoulos, A. Wessels, and H.H. Stein. 2019. Excess dietary leucine in diets for growing pigs reduces growth performance, biological value of protein, protein retention, and serotonin synthesis. *J. Anim. Sci.* 97:4282-4292. doi:10.1093/jas/skz259
- Martindale, A., M. Trenhaile-Grannemann, S. Barnett, P. Miller, and T. Burkey. 2018. Growth performance of weaned pigs fed a high-protein corn co-product. *J. Anim. Sci.* 96(Suppl. S3):295.
- Mathai, J.K., J.K. Htoo, J.E. Thomson, K.J. Touchette, and H.H. Stein. 2016. Effects of dietary fiber on the ideal standardized ileal digestible threonine:lysine ratio for twenty-five to fifty kilogram growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:4217-4230. doi:10.2527/jas.2016-0680
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Reis, C.E.R., Q. He, P.E. Urriola, G.C. Shurson, and B. Hu. 2018. Effects of modified processes in dry-grind ethanol production on phosphorus distribution in coproducts. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57:14861-14869. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02700>
- Shurson, G.C. 2018. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60-76. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.010>
- Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers grains with solubles for swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 282:115149. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>
- Yang, Z., P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2019. Growth performance of nursery pigs fed diets containing increasing levels of a novel high-protein corn distillers dried grains with solubles. *Transl. Anim. Sci.* 3:350-358. Doi:10.5713/ajas.2010.90513

第五章 玉米发酵蛋白副产品在奶牛和肉牛日粮中的应用

引言

玉米发酵蛋白（CFP）副产品在肉牛和奶牛日粮中的使用尚未被广泛评估，但已经确定了能量和蛋白质消化率值，并且在饲喂成长肉牛犊和泌乳期奶牛时已报告了积极结果。以下部分总结了干物质（DM）、粗蛋白（CP）和中性洗涤纤维（NDF）的降解率，以及一些玉米发酵蛋白（CFP）来源的代谢能（ME）、净能（NE）、氨基酸和脂肪酸组成。

玉米发酵蛋白副产品用于肉牛和奶牛的营养特性

营养组成

Palowski等人于2021年进行了一项体外消化率研究，比较了一种玉米发酵蛋白（CFP, A+ Pro）、一种水解酵母（Ultramax）、一种高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源以及两种常见的传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源的干物质（DM）、中性洗涤纤维（NDF）和粗蛋白（CP）降解率。结果显示，水解酵母的干物质（DM）降解率与两种DDGS（含可溶物干酒糟）来源相当，且均高于所评估的玉米发酵蛋白（CFP）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源（表1）。水解酵母和玉米发酵蛋白（CFP）来源的中性洗涤纤维（NDF）降解率低于高蛋白干酒糟（HP-DDG）和DDGS（含可溶物干酒糟）来源，由于水解酵母颗粒较细，且在培养过程中会通过滤袋流失，其降解率实际为负值。瘤胃可降解蛋白和不可降解蛋白在玉米副产品中含量相似。除水解酵母最低外，所有副产品的肠道可降解蛋白预估值和总可消化饲料蛋白均相似。此外，针对来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）进行了其他营养分析和样品变异研究，包括其他碳水化合物、矿物质、脂肪酸和氨基酸（表2）。

表1. 玉米副产品在反刍动物中的性洗涤纤维降解率、体外总干物质降解率、瘤胃蛋白降解率和肠道蛋白降解率（改编自Palowski等人，2021年）

指标 (%)	玉米发酵蛋白 (CFP) A+ Pro	水解酵母 Ultramax*	高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	DDGS (含可溶物干酒糟) Dakota Gold	含可溶性干酒糟绝对能量 DDGS Absolute Energy
中性洗涤纤维 (NDF) 降解率 ₁	24	-8	53	62	79
可降解中性洗涤纤维	4	-1	24	16	30
不可降解中性洗涤纤维	14	7	21	10	8
体外总干物质 (DM) 降解率 ₂	86	93	79	90	92
瘤胃不降解蛋白	57	52	59	55	56

指标 (%)	玉米发酵蛋白 (CFP) A+ Pro	水解酵母 Ultramax*	高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	DDGS (含可 溶物干酒糟) Dakota Gold	含可溶性干酒 糟绝对能量 DDGS Absolute Energy
肠道可降解蛋白 预估值	74	52	80	68	77
瘤胃可降解蛋白 ³	43	48	41	45	44
肠道可吸收饲料 蛋白 ⁴	43	27	47	38	43
总可消化饲料蛋 白 ⁵	85	75	88	82	87

¹ 中性洗涤纤维降解率在48小时培养后测定

² 体外干物质降解率在48小时培养后测定

³ 瘤胃可降解蛋白 = 100 - 瘤胃不降解蛋白

⁴ 肠道可吸收饲料蛋白 = 瘤胃不降解蛋白 × 肠道可降解蛋白预估值

⁵ 总可消化饲料蛋白 = 瘤胃可降解蛋白 + 肠道可吸收饲料蛋白

*负降解率值可能是由于该副产品颗粒较小，导致在培养期间产品通过过滤袋损失。

表2. 来自同一生产工厂（内布拉斯加州费尔蒙特）的10份玉米发酵蛋白（NexPro）样本的营养成分及其变异性（改编自内布拉斯加大学未发表数据，经POET公司授权提供）

指标（占干物质的百分比）	平均值 + 标准差
干物质（DM）	92.1 ±2.57
粗蛋白（CP）	53.6 ±1.13
可溶性蛋白	4.52 ±0.82
中性洗涤不溶性粗蛋白	5.00 ±2.22
酸性洗涤不溶性粗蛋白	3.73 ±1.46
aNDF（使用α-淀粉酶和亚硫酸钠测定）	31.2 ±3.53
酸性洗涤纤维（ADF）	19.2 ±2.43
木质素	1.96 ±0.76
糖	1.25 ±0.39
淀粉	1.47 ±0.28
乙醚提取物	5.81 ±0.46
矿物质	
灰分（%）	3.47 ±0.37
钙（%）	0.03 ±0.01
磷（%）	0.72 ±0.16
镁（%）	0.22 ±0.08
钾（%）	0.52 ±0.26
硫（%）	0.71 ±0.10
钠（%）	0.12 ±0.03

第五章 玉米发酵蛋白副产品在奶牛和肉牛日粮中的应用

氯 (%)	0.08 ±0.01
铁 (毫克/千克)	120 ±12.9
锰 (毫克/千克)	16.7 ±7.51
锌 (毫克/千克)	116 ±67.8
铜 (毫克/千克)	3.80 ±0.98
脂肪酸 (占干物质的百分比)	
总脂肪酸	7.17 ±0.50
C14:0	0.01 ±0.005
C16:0	1.24 ±0.09
C16:1	0.01 ±0.003
C17:0	0.01 ±0.003
C18:0	0.17 ±0.01
C18:1 ω 9	1.63 ±0.16
C18:2 ω 6	3.87 ±0.30
C18:3 ω 3	0.15 ±0.01
C20:0	0.02 ±0.005
C20:1 ω 9	0.02 ±0.005
C22:0	0.01 ±<0.001
C24:0	0.02 ±0.005
C24:1	0.01 ±0.007
氨基酸 (占干物质的百分比)	
精氨酸	2.29 ±0.13
组氨酸	1.39 ±0.08
异亮氨酸	1.83 ±0.17
亮氨酸	6.53 ±0.34
赖氨酸	1.99 ±0.13
蛋氨酸	1.34 ±0.09
苯丙氨酸	2.81 ±0.13
苏氨酸	2.26 ±0.10
色氨酸	0.62 ±0.03
缬氨酸	3.51 ±0.24
必需氨基酸总量	12.7 ±0.56
丙氨酸	3.86 ±0.16
天冬氨酸	3.96 ±0.15
胱氨酸	1.23 ±0.07
谷氨酸	9.37 ±0.43
甘氨酸	2.11 ±0.09
脯氨酸	4.89 ±0.29
丝氨酸	3.00 ±0.13
酪氨酸	2.33 ±0.10

非必需氨基酸总量	30.8 ±1.26
氨基酸总量	55.3 ±0.10

泌乳期奶牛饲喂玉米发酵蛋白日粮的试验总结

试验中，为泌乳期娟珊奶牛提供了含有以下组分的日粮：青贮玉米（40%）、苜蓿干草（18.1%）、玉米粉（14.3%）、豆粕（2.66%）、大豆皮（8.61%）、脂肪（3%）、尿素（0.64%）、维生素和矿物质，同时分别添加0%、2.64%、5.36%和8.0%含量的来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）来替代非酶褐变豆粕。由于玉米发酵蛋白（CFP）比非酶褐变豆粕的脂质含量更高，导致日粮粗蛋白（CP）含量略微下降（从16.14%到16.06%），但总脂肪酸浓度有所上升。随着日粮中玉米发酵蛋白（CFP）水平的增加，氧气消耗量、二氧化碳和甲烷产生量没有差异（表3）。然而，随着日粮中玉米发酵蛋白（CFP）含量的增加，呼吸商（即呼吸过程中释放的二氧化碳体积与吸收的氧气体积之比）呈现二次效应。干物质（DM）采食量也呈现二次趋势，而随着日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例的增加，产奶量呈现线性增长趋势（表4）。同时，随着日粮中玉米发酵蛋白（CFP）添加比例的增加，能量校正乳（ECM）产量、每单位干物质采食量的能量校正乳（ECM）、乳脂浓度和产量以及乳糖浓度和产量均呈现出显著线性增长趋势（表4）。尽管乳蛋白浓度和乳尿素氮未观察到明显差异，但随着奶牛摄入更多的玉米发酵蛋白（CFP），乳蛋白产量呈现线性增长趋势。这些结果表明，在泌乳期奶牛日粮干物质中添加高达8.0%的玉米发酵蛋白（CFP）可以提高产奶量、改善乳成分并提升能量利用效率。

表3. 饲喂泌乳期娟珊奶牛不同递增量来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）的氧气消耗、二氧化碳和甲烷产生、呼吸商和能量利用情况（改编自内布拉斯加大学未发表数据，经POET公司授权提供）

指标	0%玉米发酵蛋白（CFP）	2.64%玉米发酵蛋白（CFP）	5.36%玉米发酵蛋白（CFP）	8%玉米发酵蛋白（CFP）
<i>气体（升/天）</i>				
氧气（O ₂ ）消耗	4,892	4,674	4,779	4,770
二氧化碳（CO ₂ ）产量	4,995	4,861	4,984	4,869
甲烷（CH ₄ ）产量	436	403	413	402
呼吸商 ^b	1.02	1.04	1.04	1.02
<i>能量（兆卡/千克干物质）</i>				
总能 ^a （GE）	4.25	4.26	4.28	4.31
可消化能（DE）	2.81	2.84	2.83	2.83
代谢能（ME）	2.48	2.54	2.54	2.53
泌乳净能（NEL）	1.60	1.72	1.76	1.72
<i>能量效率</i>				
代谢能（ME）:可消化能（DE）	0.88	0.90	0.90	0.89
泌乳净能（NEL）:代谢能（ME） ^a	0.65	0.68	0.69	0.68

^a 日粮玉米发酵蛋白（CFP）添加率的线性效应（P < 0.05）。

^b 日粮玉米发酵蛋白（CFP）添加率的二次效应（P < 0.05）。

第五章 玉米发酵蛋白副产品在奶牛和肉牛日粮中的应用

表4. 饲喂泌乳期娟珊奶牛不同递增量来源于NexPro的玉米发酵蛋白（CFP）的干物质摄入量、产奶量及组成、饮水量和体况评分（改编自内布拉斯加大学未发表数据，经POET公司授权提供）

指标	0%玉米发酵蛋白（CFP）	2.64%玉米发酵蛋白（CFP）	5.36%玉米发酵蛋白（CFP）	8%玉米发酵蛋白（CFP）
干物质（DM）摄入量 ^d （千克/天）	19.2	19.9	20.7	19.9
产奶量 ^b （千克/天）	27.8	28.6	29.8	29.0
能量校正乳 ^{1,a} （千克/天）	34.3	35.7	37.3	37.4
能量校正乳/干物质（DM）摄入量 ^a	1.80	1.81	1.81	1.89
乳蛋白（%）	3.35	3.43	3.40	3.40
乳蛋白 ^b （千克/天）	0.93	0.98	1.01	0.99
乳脂 ^a （%）	5.05	5.18	5.15	5.47
乳脂 ^a （千克/天）	1.40	1.46	1.53	1.58
乳糖 ^a （%）	4.86	4.89	4.90	4.93
乳糖 ^a （千克/天）	1.35	1.40	1.46	1.43
乳尿素氮（毫克/分升）	12.9	13.0	12.8	13.5
自由饮水量 ^{b,d} （升/天）	79.0	90.6	84.7	80.9
体重（千克）	436	440	440	439
体况评分	3.05	3.04	3.16	3.04

¹能量校正乳 = 0.327 × 产奶量（千克）+ 12.95 × 乳脂（千克）+ 7.20 × 真蛋白（千克）

^a 日粮玉米发酵蛋白（CFP）添加率的线性效应（P < 0.05）。

^b 日粮玉米发酵蛋白（CFP）添加率的线性趋势（P < 0.1）。

^c 日粮玉米发酵蛋白（CFP）添加率的二次效应（P < 0.05）。

^d 日粮玉米发酵蛋白（CFP）添加率的二次趋势（P < 0.1）。

育成期肉牛饲喂玉米发酵蛋白日粮的试验总结

Wiseman等人于2020年用250公斤杂交育肥牛进行了一项生长性能研究，在以青贮玉米为基础的日粮中，分别添加不同比例（0%、4.5%、9%、13.5%和18%）来源于NexPro的补充玉米发酵蛋白（CFP）、SoyPass（非酶褐变豆粕）和豆粕作为蛋白质补充剂对比其效果。与饲喂对照日粮相比，饲喂18%的SoyPass（非酶褐变豆粕）、玉米发酵蛋白（CFP）和豆粕的育肥牛的日增重（ADG）分别提高了56%、42%和32%，料重比分别改善了33%、26%和23%。这些结果表明，在育肥牛的青贮玉米为基础的日粮中补充玉米发酵蛋白（CFP）、SoyPass（非酶褐变豆粕）和豆粕可以改善生长性能，而饲喂玉米发酵蛋白（CFP）和SoyPass（非酶褐变豆粕）时观察到的改善效果更为显著，这表明玉米发酵蛋白（CFP）和SoyPass（非酶褐变豆粕）具有相似但比豆粕更高的瘤胃不降解蛋白含量。

结论

玉米发酵蛋白（CFP）是泌乳期奶牛的优质瘤胃不降解蛋白和能量来源，饲喂高达日粮干物质（DM）8.0%的玉米发酵蛋白（CFP）可以提高产奶量、乳成分和能量利用效率。在育成期肉牛日粮中，通过在以青贮玉米为基础的肉牛育肥日粮中补充玉米发酵蛋白（CFP）、SoyPass（非酶褐变豆粕）和豆粕可以改善生长性能，而饲喂玉米发酵蛋白（CFP）和SoyPass（非酶褐变豆粕）比豆粕获得的改善效果更显著，表明这些成分的瘤胃非降解蛋白含量与豆粕相似，但高于豆粕。

参考文献

- Kononoff, P.J. Feed characterization and studying the effects of a novel corn milling co-product (NexPro) on milk production, composition and nitrogen and energy utilization in lactating dairy cows. Unpublished study with permission for use granted by POET.
- Palowski, A., Z. Yang, J. Jang, T. Dado, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination of in vitro dry matter, protein, and fiber digestibility and fermentability of novel corn coproducts for swine and ruminants. *Transl. Anim. Sci.* 5:1-14. doi:10.1093/tas/txab055
- Wiseman, A.R., Z.E. Carlson, L.J. McPhillips, A.K. Watson, G.E. Erickson, and S.L. Tilton. 2020. Evaluation of RUP content of Nexpro dried distillers grains plus solubles and their effect on growing calf performance in corn silage based diets. *The Board of Regents of the University of Nebraska, Nebraska Beef Cattle Report*, p. 38-40.

第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值

引言

除传统的DDGS（含可溶物干酒糟）外，在美国乙醇行业生产的所有玉米副产品中，针对不含可溶物的高蛋白干酒糟（HP-DDG）的营养价值及动物饲喂反应研究最为广泛。遗憾的是，高蛋白干酒糟（HP-DDG）也是当前市场上最令人困惑的玉米副产品类别之一，因为它迄今为止一直，而且今后仍将采用多种不同的工艺生产方式，这导致各来源产品之间的营养组成存在显著差异。“高蛋白”干酒糟这一术语最初于2006~2007年间提出，用来区分粗蛋白（CP）含量为36%~48%的新型玉米副产品与粗蛋白（CP）含量为27%~30%的传统DDGS（含可溶物干酒糟）。这些新型玉米副产品采用多种分馏工艺生产，通过去除部分玉米纤维和油脂来提高蛋白浓度。尽管高蛋白干酒糟（HP-DDG）与DDGS（含可溶物干酒糟）是截然不同类别的玉米副产品，但它经常被混淆为玉米发酵蛋白（CFP），后者也含有高含量的粗蛋白（CP >50%）。然而，虽然某些玉米发酵蛋白（CFP）来源的粗蛋白（CP）含量与部分高蛋白干酒糟（HP-DDG）相似，但玉米发酵蛋白（CFP）的生产工艺使其含有更高比例的废酵母（20%~27%），而高蛋白干酒糟（HP-DDG）中的废酵母含量可能仅为0~18%。遗憾的是，玉米副产品的生产者、销售人员及研究人员在研究出版物、网站、技术资料、讲座及产品说明书中，并未准确区分并使用合适的术语来描述这些产品。因此，建议营养学家在参考过往15年中不同来源的高蛋白干酒糟（HP-DDG）喂养试验数据时，务必认识到其营养组成存在显著差异。请务必联系您的供应商，确保获得最准确的产品信息。

自2005年以来，用于生产高蛋白干酒糟（HP-DDG）的分馏工艺技术已经发生了巨大变革。表1汇总了使用较早期前端分馏工艺（其中大多数目前已不再使用）生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源在动物饲喂研究中的评估结果。目前所有正在生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）产品均采用ICM公司开发的FST™分离技术。虽然这些研究结果可能有助于大致了解高蛋白干酒糟（HP-DDG）对各种动物的相对饲用价值，但这些研究结果并不能准确反映目前少数美国乙醇工厂所生产高蛋白干酒糟（HP-DDG）在营养组成、消化性及饲喂用途方面的真实状况。为强调这一点，表2总结了近期文献中评估的生猪用高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源的营养成分和消化率系数，并与NRC（2012）中基于早期前端分馏技术及表1所列文献的营养成分进行了对比。需要注意的是，NRC（2012）中粗蛋白（CP）含量较高，而乙醚提取物和磷的含量则低于使用新工艺生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源（表2）。

例如，表2中显示的生猪用NRC（2012）高蛋白干酒糟（HP-DDG）的营养成分，代表了表1中许多研究所评估的高蛋白干酒糟（HP-DDG）的来源特点。相比于近期研究中采用新生产技术评估的高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源的营养成分，其粗蛋白（CP）含量相对较高（45%），而粗脂肪含量则偏低（3.5%）。然而，由于营养成分、能值以及氨基酸与磷的消化率的高易变性，因此了解具体原料来源并使用该来源的专属营养数据，是进行精准日粮配方设计的关键。

表1. 旧工艺技术生产（目前已停用）高蛋白干酒糟（HP-DDG）的研究总结

动物种类	参考文献
生猪	Widmer et al. (2007, 2008)
	Gutierrez et al. (2009a,b)
	Kim et al. (2009)
	Jacela et al. (2010)
	Seabolt et al. (2010)
	Anderson et al. (2012)
	Adeola and Ragland (2012)
	Adeola and Ragland (2016)
	Peterson et al. (2014)
	Rojo et al. (2016)
	家禽
Kim et al. (2008, 2010)	
Applegate et al. (2009)	
Jung and Batal (2009, 2010)	
Rochell et al. (2011)	
水产	Tangenjaja and Wina (2011)
	Barnes et al. (2012a,b)
	Øverland et al. (2013)
	Prachom et al. (2013)
	Herath et al. (2016a,b)
奶牛	Mjoun et al. (2009)
	Christen et al. (2010)
	Maxin et al. (2013a,b)
	Swanepoel et al. (2014)

当前高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源的营养组成与消化率

生猪

大多数已发表的针对高蛋白干酒糟（HP-DDG）能量和氨基酸消化率的研究主要集中于生猪类（表2）。由于生产高蛋白干酒糟（HP-DDG）采用的工艺技术各异，不同来源产品的组成可能存在较大差异，其粗蛋白（CP）含量在34%~43%之间，赖氨酸（Lys）含量在1.0%~1.4%之间，而赖氨酸标准回肠消化率（SID）则在47%~76%之间。此外，总能（GE）可在4,813~5,296千卡/千克范围内变化，而消化能（DE）含量则在3,352~4,424千卡/千克之间。值得注意的是，与消化能和氨基酸含量相比，不同高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源的磷含量（0.40%~0.50%）波幅较小，但磷标准总肠道消化率（STTD）的有限预估值却显示出更大的差异，范围在48%~68%之间（表2）。氨基酸标准回肠消化率在不同高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源间也存在较大差异，通常在60%~89%范围内，赖氨酸除外，其标准回肠消化率对大多数来源而言在47%~66%之间。这些结果表明，高蛋白干酒糟（HP-DDG）生产企业应针对其具体产品确定能值、可消化氨基酸和可消化磷的具体数值，并向客户提供这些信息，以使得该原料在实际日粮配方中的经济性与营养价值实现最大化。

第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值

表2. 近期发表研究中生猪用品牌和非品牌高蛋白干酒糟（HP-DDG）的化学成分（以原样基础计）、能量、氨基酸和磷消化率对比

指标	NRC (2012) ¹	Rho et al. (2017) ²	Rho et al. (2017) ²	Paula et al. (2021) ³	Paula et al. (2021) ⁴	Espinosa and Stein (2018) ⁵	Lee and Stein (2021) ⁶
干物质 (%)	91.20	91.9	91.3	89.62	92.30	86.50	87.45
粗蛋白 (%)	45.35	38.9 (61) ⁷	39.4 (73)	34.83 (62)	42.93 (67)	37.11 (77)	39.05 (76)
乙醚提取物 (%)	3.54	9.27	8.63	7.80	10.30	*	8.50**
酸水解乙醚提取物 (%)	*	*	*	*	*	7.59	8.46
中性洗涤纤维 (%)	33.63	29.4	28.4	47.48	37.40	31.87	*
酸性洗涤纤维 (%)	20.63	14.6	14.8	19.81	17.53	14.68	*
总膳食纤维 (%)	*	*	*	*	*	34.20	37.6
可溶性膳食纤维 (%)	*	*	*	*	*	2.40	2.2
不溶性膳食纤维 (%)	*	*	*	*	*	31.80	35.4
总能 (千卡/千克)	5,173	4,986	4,935	4,915	5,296	4,825	4,813
消化能 (千卡/千克)	4,040	4,130	4,157	3,352	4,060	4,424	3,688
代谢能 (千卡/千克)	3,732	*	*	3,116	3,757	4,275	3,496
灰分 (%)	2.39	2.40	2.34	3.39	2.81	2.41	1.80
钙 (%)	0.02	0.05	0.06	0.02	0.02	*	< 0.10**
磷 (%)	0.36	0.50	0.47	0.46	0.48	*	0.40**
磷的标准总肠道消化率 (%)	73	*	*	68	48	*	*
镁 (%)	0.09	*	*	0.18	0.01	*	*
钠 (%)	0.06	*	*	0.47	0.09	*	*
钾 (%)	0.37	*	*	0.63	0.41	*	*
铜 (毫克/千克)	2.03	*	*	7.9	7.10	*	*
铁 (毫克/千克)	65.30	*	*	52.1	112.5	*	*
锰 (毫克/千克)	7.00	*	*	9.00	9.97	*	*

第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值

锌（毫克/ 千克）	27.30	*	*	56.40	75.55	*	*
必需氨基酸（%）							
精氨酸	1.62(85)	1.64 (72)	1.66 (79)	1.50 (76)	2.06 (83)	1.63 (87)	1.59 (84)
组氨酸	1.07(79)	1.01 (66)	1.04 (72)	0.89 (66)	1.26 (76)	0.97 (82)	1.00 (75)
异亮氨酸	1.83(80)	1.48 (68)	1.50 (75)	1.46 (68)	1.79 (76)	1.59 (82)	1.53 (75)
亮氨酸	6.18(86)	4.78 (81)	5.01 (84)	4.38 (72)	5.30 (81)	4.39 (89)	4.92 (86)
赖氨酸	1.22(69)	1.19 (47)	1.20 (56)	1.00 (53)	1.37 (66)	1.43 (76)	1.34 (62)
蛋氨酸	0.93(86)	0.79 (79)	0.82 (83)	0.54 (75)	0.95 (82)	0.70 (87)	0.84 (83)
苯丙氨酸	2.42(84)	2.01 (77)	2.07 (80)	1.86 (72)	2.16 (78)	2.03 (86)	2.00 (80)
苏氨酸	1.59(75)	1.45 (60)	1.46 (67)	1.32 (67)	1.66 (76)	1.39 (75)	1.52 (72)
色氨酸	0.24(82)	-	-	0.22 (71)	0.23 (73)	0.30 (80)	0.42 (81)
缬氨酸	2.12(78)	1.92 (69)	1.95 (75)	1.82 (69)	2.37 (76)	2.07 (81)	1.89 (73)
非必需氨基酸（%）							
丙氨酸	3.32(82)	2.78	2.87	2.65 (72)	3.28 (82)	2.58 (85)	2.83 (80)
天冬氨酸	2.75(74)	2.62	2.60	2.72 (64)	3.29 (73)	2.44 (73)	2.64 (73)
半胱氨酸	0.82(78)	0.73	0.78	0.80 (72)	1.09 (82)	0.69 (75)	0.80 (70)
谷氨酸	7.52(83)	6.69	6.92	6.21 (70)	7.98 (81)	5.61 (88)	6.83 (82)
甘氨酸	1.39(70)	1.44	1.43	1.40 (73)	1.77 (93)	1.45 (71)	1.38 (65)
脯氨酸	3.65(79)	3.29	3.40	3.08 (43)	3.99 (55)	-	3.26 (92)
丝氨酸	1.96(82)	1.89	1.93	1.74 (64)	2.18 (79)	1.46 (82)	1.94 (82)
酪氨酸	1.92(85)	-	-	1.45 (70)	1.91 (79)	1.46 (87)	1.59 (86)
总氨基酸	-	-	-	34.76 (65)	44.39 (68)	35.11 (83)	38.45 (80)
赖氨酸：粗 蛋白	2.69	3.06	3.05	2.87	3.19	3.85	3.43

¹ 数据来源于国家研究委员会于2012年的生猪用研究报告。

² 数据来源于Rho等人于2017年的研究报告，用于两个采用ICM公司（堪萨斯州科尔维奇）开发的纤维分离技术™生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）样品。

³ 数据来源于Paula等人于2021年的研究报告，用于Corn Plus合作社（明尼苏达州温纳贝戈）采用ICM公司（堪萨斯州科尔维奇）开发的纤维分离技术™生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）。

⁴ 数据来源于Paula等人于2021年的研究报告，用于FS Bioenergia公司（巴西马托格罗索州卢卡斯多里奥韦尔德）采用ICM公司（堪萨斯州科尔维奇）开发的纤维分离技术™生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）。

⁵ 数据来源于Espinosa和Stein于2018年的研究报告，用于Lincolnway Energy（爱荷华州内华达）生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG），该公司采用基于发酵前可溶性的机械纤维分离、发酵后油脂提取以及低温压缩干燥技术。

⁶ 经The Andersons（俄亥俄州莫米）授权提供的Lee和Stein于2021年未发表数据。高蛋白干酒糟（HP-DDG）（ANDVantage™ 40Y）采用堪萨斯州科尔维奇市ICM公司生产的纤维分离技术™。

⁷ 括号中的数值为相应氨基酸的标准回肠消化率系数。

* 未提供数据。

** 数值来自供应商营养规格表。

第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值

如表3所示，高蛋白干酒糟（HP-DDG）中淀粉含量相对较低（2.3%），而中性洗涤纤维（NDF；41.3%）及总膳食纤维（TDF；39.7%）的浓度较高，这与传统DDGS（含可溶物干酒糟）类似。由于DDGS（含可溶物干酒糟）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）中纤维含量相对较高，猪禽营养学家Jang等人于2021年评估了在DDGS（含可溶物干酒糟）日粮中添加各种商用碳水化合物酶和蛋白酶的效果，基于高蛋白干酒糟（HP-DDG）相似的物理化学特性（如膨胀性和持水能力），这些酶制剂在高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮中可能产生类似效果（表3）。Boucher等人在2021年评估了在含有DDGS（含可溶物干酒糟）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）的生猪日粮中添加复合碳水化合物混合物（木聚糖酶、葡聚糖酶、纤维素酶、淀粉酶、转化酶和蛋白酶）的效果，以确定其是否能有效提高日粮的消化能（DE）和代谢能（ME）含量。该研究所用的高蛋白干酒糟（HP-DDG）采用机械分离技术（ICM公司，美国堪萨斯州Colwich）生产，该技术在发酵前去除大型不可发酵纤维颗粒，以提高产量和乙醇产出。然而，该研究中报告的这种高蛋白干酒糟（HP-DDG）营养成分因粗蛋白（CP）含量较低且纤维含量较高，与使用ICM公司FST技术生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）的典型成分不符。反映了研究人员对所评估玉米副产品的生产工艺存在误解，或未使用准确术语的情况。最终研究结果表明，与DDGS（含可溶物干酒糟）相比，该高蛋白干酒糟（HP-DDG）来源的淀粉含量降低了约50%，蛋白质含量提高了20%，持水能力提高了14%，并且生猪的消化能（DE）（分别为3,896和4,405千卡/千克干物质）和代谢能（ME）（分别为3,494和3,872千卡/千克干物质）含量均较高，但结果表明，该复合碳水化合物酶对提升DDGS（含可溶物干酒糟）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的消化能（DE）和代谢能（ME）值方面均无效。

表3. 玉米及副产品的化学特性和理化特性（改编自Boucher等人，2021年）

特性	玉米	DDGS（含可溶物干酒糟）	高蛋白干酒糟（HP-DDG）	干玉米麸皮+可溶物
化学组成				
干物质（%）	86.1	89.3	88.9	94.9
总能（千卡/千克）	3,769	4,600	4,950	4,629
粗蛋白（%）	6.5	27.1	32.5	19.4
乙醚提取物（%）	2.7	7.6	9.6	6.8
淀粉（%）	67.1	4.5	2.3	7.4
总膳食纤维（%）	11.2	36.7	39.7	37.0
中性洗涤纤维（%）	12.3	30.5	41.3	33.5
酸性洗涤纤维（%）	3.2	7.1	15.1	7.6
理化特性				
容重（克/升）	522	507	478	386
膨胀性（升/千克）	2.4	3.5	3.6	4.4
持水能力（克/克）	2.1	2.9	3.3	2.9

家禽

Fries-Craft和Bobeck于2019年评估了某来源的高蛋白干酒糟（HP-DDG）在肉鸡日粮中的氮校正表现代谢能（AMEn）和氨基酸的标准回肠消化率（SID）（表4）。与传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源相比，高蛋白干酒糟（HP-DDG）的粗蛋白（CP）（34.1%氮校正表现代谢能（AMEn）（2,725千卡/千克）和氨基酸的含量更高，氨基酸标准回肠消化率（SID）系数相对较高，赖氨酸（Lys）、苏氨酸（Thr）和半胱氨酸（Cys）为81%，精氨酸（Arg）和亮氨酸（Leu）为90%。ANDVantage™ 40Y未发表数据（经The Andersons授权提供）显示，其粗蛋白（CP）和氨基酸含量高于Fries-Craft研究中报告的水平，但氨基酸消化率系数相当（表4）。ANDVantage™ 40Y的真氮校正代谢能（TMEn）含量也明显高于传统DDGS（含可溶物干酒糟）来源的水平。

表4. 肉鸡用各来源的高蛋白干酒糟（HP-DDG）的营养成分、氮校正表现代谢能（AMEn）和真氮校正代谢能（TMEn）以及氨基酸标准回肠消化率（以原样基础计）（改编自Fries-Craft和Bobeck, 2019年）

指标	DDGS (含可溶物干酒糟) ¹	高蛋白干酒糟 (HP-DDG) ¹	ANDVantage™40Y ²
干物质 (%)	89.80	83.10	90.0
粗蛋白 (%)	27.10	34.10	40.4
乙醚提取物 (%)	9.63	7.91	8.50
粗纤维 (%)	7.85	8.35	8.80
氮校正表现代谢能 (千卡/千克)	2,629	2,725	未报告 ⁴
真氮校正代谢能 (千卡/千克)	2,509	未报告	3,286
精氨酸	1.10	1.49 (90) ³	1.69 (93) ³
组氨酸	0.62	0.88 (86)	1.15 (88)
异亮氨酸	1.15	1.26 (84)	1.65 (87)
亮氨酸	2.40	4.32 (90)	4.93 (94)
赖氨酸	0.70	1.16 (81)	1.35 (81)
蛋氨酸	0.50	0.74 (89)	0.80 (91)
苯丙氨酸	1.35	1.57 (88)	2.11 (91)
苏氨酸	0.93	1.31 (81)	1.56 (85)
色氨酸	0.20	0.30 (82)	0.30 (88)
缬氨酸	1.40	1.60 (86)	1.97 (87)
丙氨酸	未报告	未报告 (86)	未报告
天冬氨酸	未报告	未报告 (82)	未报告
半胱氨酸	0.45	0.58 (81)	未报告
谷氨酸	NR	未报告 (90)	未报告
甘氨酸	0.60	1.25 (未报告)	未报告
脯氨酸	未报告	未报告 (82)	未报告
丝氨酸	1.30	1.60 (87)	未报告
酪氨酸	0.80	1.34 (84)	未报告
赖氨酸: 粗蛋白	2.58	3.40	3.34

¹ 数据来源于Fries-Craft和Bobeck于2019年发表的研究

² 经The Andersons公司授权的未发表数据

³ 括号内数值为氨基酸标准回肠消化率系数（%）

⁴ NR = 未报告

水产

最近一项研究比较了来源于ANDVantage™ 40Y的高蛋白干酒糟（HP-DDG）、豆粕（SBM）和禽肉粉之间的营养差异，以及在斑点叉尾鱼日粮中用高蛋白干酒糟（HP-DDG）替代不同比例豆粕（SBM）或禽肉粉的效果（Nazeer et al., 2022）。表5显示了这三种原料的营养成分对比。除亮氨酸（Leu）外，禽肉粉含有比高蛋白干酒糟（HP-DDG）更高的粗蛋白（CP）和必需氨基酸含量。同样，除亮氨酸（Leu）和蛋氨酸（Met）外，豆粕（SBM）含有比高蛋白干酒糟（HP-DDG）更高浓度的氨基酸。因此，在水产饲料中部分用高蛋白干酒糟（HP-DDG）替代禽肉粉或豆粕（SBM）时，为保障最佳生长和鱼体品质，可能需要补充合成的赖氨酸（Lys）、蛋氨酸（Met）、苏氨酸（Thr）和色氨酸（Trp）。

表5. 禽肉粉、豆粕（SBM）及高蛋白干酒糟（HP-DDG）的营养成分对比（以原样基础计；改编自Nazeer等人，2002年）

指标（%）	禽肉粉	豆粕（SBM）	ANDVantage™40Y ²
干物质	91.05	88.52	90.86
粗蛋白	64.59	46.66	42.25
乙醚提取物	12.29	0.48	8.48
粗纤维	-	3.59	7.05
灰分	9.88	6.47	2.13
必需氨基酸			
精氨酸	4.32	3.49	1.84
组氨酸	1.41	1.24	1.18
异亮氨酸	2.64	2.27	1.88
亮氨酸	4.55	3.64	5.48
赖氨酸	4.11	3.02	1.30
蛋氨酸	1.22	0.61	0.86
苯丙氨酸	2.57	2.38	2.34
苏氨酸	2.55	1.83	1.58
色氨酸	0.60	0.64	0.34
缬氨酸	3.21	2.31	2.30
非必需氨基酸			
丙氨酸	4.05	2.04	3.19
天冬氨酸	5.29	5.31	2.86
半胱氨酸	0.77	0.69	0.83
谷氨酸	8.58	9.00	7.17
甘氨酸	5.54	2.00	1.56
羟赖氨酸	0.23	0.02	0.00
羟脯氨酸	1.55	0.11	0.07

脯氨酸	3.59	2.21	3.44
丝氨酸	2.53	2.26	1.82
牛磺酸	0.47	0.12	0.10
酪氨酸	2.15	1.73	1.79

生猪饲喂高蛋白干酒糟日粮的试验总结

Yang等人于2019年评估了将Lincolnway Energy (艾奥瓦州内华达) 生产的高蛋白干酒糟 (HP-DDG, 37.6%) 应用于仔猪日粮中的效果, 研究采用了实验测定的代谢能 (ME) 和氨基酸标准回肠消化率 (SID) 值。断奶仔猪在断奶后第一周内喂食通用1阶段日粮, 随后在2阶段 (断奶后7-21天) 和3阶段 (断奶后21-42天) 分别喂食含有0%、10%、20%或30%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的4种日粮之一。各日粮配方中的代谢能 (ME)、可消化赖氨酸 (Lys)、蛋氨酸 (Met)、苏氨酸 (Thr) 和色氨酸 (Trp) 以及可消化磷的含量均保持一致。随着日粮中高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 含量的增加, 计算的氨基酸标准回肠消化率 (SID) 亮氨酸与赖氨酸含量在2阶段日粮中从119%增至173%, 在3阶段日粮中从120%增至160%。同样, 氨基酸标准回肠消化率 (SID) 异亮氨酸 (Ile) 与赖氨酸 (Lys) 含量在2阶段日粮中范围为60%~69%, 在3阶段日粮中为54%~59%, 而氨基酸标准回肠消化率 (SID) 缬氨酸 (Val) 与赖氨酸 (Lys) 含量在2阶段为63%~79%, 在3阶段日粮中为64%~68%。随着日粮中高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 添加含量的增加, 在2阶段和3阶段期间观察到日增重 (ADG)、日采食量 (ADFI) 和增重效率呈线性下降。尽管本研究中的仔猪受到猪链球菌和大肠杆菌的感染挑战, 各处理组的发病率无显著差异, 但与对照组相比, 添加高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 有降低死亡率的趋势。研究结果表明, 该高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 来源在提高添加水平的同时出现的生长性, 可能与以下因素有关: 对标准回肠消化率 (SID) 氨基酸含量的高估, 膳食中消化性亮氨酸含量过高 (相较于可消化缬氨酸和异亮氨酸) 所带来的氨基酸拮抗效应, 以及较高膳食纤维水平可能导致苏氨酸需求增加。

同样, Cemin等人于2019年的B研究中评估了在仔猪日粮中添加不同比例 (0%、10%、20%、30%或40%) 的高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 对生长性能的影响, 该产品采用ICM公司的纤维分离技术生产。研究同时估算了高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的生产能值。该研究采用三种不同的消化能 (DE) 预测方程估算了高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的净能 (NE) 含量。研究通过将日采食量 (ADFI) 乘以每千克日粮估计净能的千卡数, 再除以日增重 (ADG) 计算得出热效率。在整个21天的饲喂期间, 随着高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 含量的增加, 日增重 (ADG)、日采食量 (ADFI) 和最终体重均呈线性下降。料重比 (F) 呈现二次曲线效应, 含40%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮组表现最佳。结果表明, 随着高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮含量增加, 其热效率呈线性下降, 而且所用的消化能 (DE) 预测方程低估了高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的净能 (NE) 含量。根据热效率计算, 该高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 来源的净能 (NE) 估计约为NRC (2012) 玉米净能 (NE) 值的97%。

Yang等人于2020年进行了两项在四阶段饲喂方案中使用30%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮对生长育肥猪的生长性能、胴体特性和猪脂肪品质的影响的试验。第一项试验使用了来自IGPC Ethanol, Inc. (加拿大安大略省Alymer) 的高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 来源, 其中脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON) 含量相对较低 (1.7毫克/千克), 总伏马菌素 (FUM) 含量为0.60毫克/千克, 玉米赤霉烯酮 (ZEA) 含量为0.2毫克/千克。第二项试验评估了从ICM公司 (密苏里州圣约瑟夫) 获得的高蛋白干酒糟 (HP-DDG)

来源，其DON含量也相对较低（1.0毫克/千克），FUM含量为3.80毫克/千克，ZEA含量为0.06毫克/千克。DON（<1毫克/千克）、FUM（5毫克/千克）和ZEA（<1毫克/千克）的“安全”最大浓度指南表明，当高蛋白干酒糟（HP-DDG）添加含量为总日粮的30%时，预计不会对生长性能产生负面影响。第一项试验结果显示，与喂食玉米-豆粕对照日粮相比，饲喂含有低浓度DON、FUM和ZEA的30%高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮导致16周饲喂试验的前8周内日增重（ADG）和日采食量（ADFI）降低。为确定这种生长速率和采食量的降低是由于高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮中亮氨酸过量还是低浓度霉菌毒素导致的，研究者在试验中采用了一半生猪的对照组和30%高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮中添加了商业霉菌毒素缓解产品，而另一半生猪在剩余8周的饲喂期间继续食用不含霉菌毒素缓解剂的日粮。研究发现，向日粮中添加霉菌毒素缓解剂能有效恢复高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮组生猪的生长性能，使其与对照组生猪相当。这些结果表明，饲喂期前8周生长性能的下降是DON、FUM和ZEA低浓度累积负面影响的结果，而非日粮中亮氨酸过量所致。

在第二项试验中，研究者从饲喂期开始就在日粮中添加了霉菌毒素缓解产品。结果显示，在16周饲喂期间，饲喂30%高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的生猪的日增重（ADG）、最终体重、日采食量（ADFI）和增重效率均降低（表6）。此外，与对照组相比，饲喂30%高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮导致热胴体重、胴体率、背最长肌面积和无脂胴体瘦肉百分比降低，但对背膘厚度无影响（表6）。饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的生猪猪脂肪中多不饱和脂肪酸含量和碘值高于饲喂玉米-豆粕对照组日粮的生猪，表明饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮时胴体猪脂肪硬度降低。这些研究结果表明：

- 1) 含有受污染高蛋白干酒糟（HP-DDG）的日粮中低浓度霉菌毒素可降低生长性能，但有效的缓解添加剂可减轻这些负面影响；
- 2) 30%高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮中过量的亮氨酸干扰了异亮氨酸和缬氨酸的有效利用，导致采食量、生长、增重效率和胴体瘦肉不理想；
- 3) 当高蛋白干酒糟（HP-DDG）在日粮中添加含量为30%时，其中玉米油的高不饱和脂肪酸含量会降低胴体猪脂肪的硬度。

表6. 饲喂添加霉菌毒素缓解剂的30%高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮对生长育肥猪生长性能及胴体特性的影响（改编自Yang等人，2020年）

指标	对照组		30% 高蛋白干酒糟（HP-DDG）+ 霉菌毒素吸附剂（MA）	
	母猪	阉公猪	母猪	阉公猪
初始体重（千克）	22.75		22.74	
最终体重（千克）	133.37 ^a		126.58 ^b	
日增重（千克）	1.01 ^a		0.95 ^b	
日采食量（千克）	2.63 ^a		2.57 ^b	
增重效率	0.41 ^a		0.39 ^b	
胴体特性	母猪	阉公猪	母猪	阉公猪
热胴体重 ¹ （千克）	98.34	98.16	96.07	95.86
胴体率 ¹ （%）	75.55	75.33	74.04	73.78
背膘厚度 ² （毫米）	19.75	23.45	20.72	23.22
背最长肌面积 ^{1,2,3} （厘米）	49.26	44.91	42.58	43.71
无脂瘦肉率 ^{1,2,3} （%）	52.40	49.38	50.10	49.04

^{a,b} 同一行中上标不同的平均值表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

¹ 日粮效应（ $P < 0.01$ ）

² 性别效应（ $P < 0.05$ ）

³ 日粮与性别交互作用（ $P < 0.01$ ）

Rao等人于2021年开展了一项最新研究，评估在日粮中添加不同含量的高蛋白干酒糟（HP-DDG）对生长育肥猪生长性能及胴体组成的影响。该研究将饲喂不同含量（0%、15%和30%）传统DDGS（含可溶物干酒糟）或高蛋白干酒糟（HP-DDG，ICM公司）日粮，对生长育肥猪的生长性能和胴体组成反应。所有日粮配方中可消化赖氨酸（Lys）含量相等，但净能（NE）水平不同。日粮支链氨基酸比例根据Cemin等人于2019年提出的方程式进行调整，以平衡DDGS（含可溶物干酒糟）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮中过量的亮氨酸（Leu）。研究通过将估算的净能（NE）摄入量除以增重量计算热效率（Cemin et al., 2020）。结果显示，随着传统DDGS（含可溶物干酒糟）日粮添加含量的增加，最终体重呈显著线性下降，而随着高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮添加含量增加，最终体重也有下降趋势（表7）。这些最终体重的下降是由于生长阶段饲喂不同含量DDGS（含可溶物干酒糟）或高蛋白干酒糟（HP-DDG）的日粮时，日增重（ADG）线性下降所致。饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的生猪与饲喂DDGS（含可溶物干酒糟）日粮的生猪相比，具有更高的日采食量（ADFI）和增重效率。随着DDGS（含可溶物干酒糟）或高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮添加含量增加，热胴体重和胴体率呈线性下降。碘值作为胴体脂肪中不饱和与饱和脂肪酸比例的估算指标，随着DDGS（含可溶物干酒糟）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）饲喂量增加而线性上升。这些结果表明，饲喂相当含量的高蛋白干酒糟（HP-DDG）与饲喂DDGS（含可溶物干酒糟）的生猪日增重（ADG）相近，但饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的生猪具有更高的增重效率。饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的生猪胴体脂肪碘值更高，这可能是由于高蛋白干酒糟（HP-DDG）中玉米油含量（10.27%乙醚提取物）高于传统DDGS（含可溶物干酒糟）（8.03%）所致。

表7. 生长育肥猪日粮中添加不同含量的传统DDGS（含可溶物干酒糟）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）的生长性能、热效率和胴体特性比较（改编自Rao等人，2021年）

指标	对照组(0%)	DDGS（含可溶物干酒糟）		高蛋白干酒糟（HP-DDG）	
		15%	30%	15%	30%
初始体重（千克）	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1
最终体重（千克）	130.0	127.3	127.8	129.0	128.0
生长阶段					
日增重（克）	893	879	862	875	852
日采食量（克）	1,870	1,840	1,828	1,825	1,721
增重效率（克/千克）	479	479	472	480	497
热效率（千卡/千克）	5,395	5,317	5,322	5,420	5,300
育肥阶段					
日增重（克）	855	833	864	860	870
日采食量（克）	2,609	2,604	2,644	2,555	2,510
增重效率（克/千克）	328	321	327	336	347
热效率（千卡/千克）	8,040	8,136	7,890	7,937	7,743
全期					

第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值

日增重（克）	876	857	865	870	863
日采食量（克）	2,262	2,243	2,259	2,212	2,139
增重效率（克/千克）	388	382	384	394	404
热效率（千卡/千克）	6,747	6,758	6,655	6,699	6,586
胴体特性					
热胴体重（千克）	94.9	92.5	92.1	94.0	92.0
胴体率（%）	73.1	72.6	72.1	72.9	71.9
背膘厚度（毫米）	15.9	15.5	15.9	15.8	15.6
背最长肌厚度（毫米）	67.0	67.0	66.9	67.3	66.7
瘦肉率（%）	57.2	57.5	57.2	57.3	57.4
碘值（克/100克）	64.8	69.0	73.7	72.9	80.0

肉鸡饲喂高蛋白干酒糟日粮的试验总结

Fries-Craft和Bobeck于2019年测定了一种未指明来源的高蛋白干酒糟（HP-DDGS）（粗蛋白（CP）34%）在肉鸡日粮中的氮校正表观代谢能（AMEn）含量、氨基酸标准回肠消化率（SID）及肉鸡的生长性能（42天）。测定结果显示，其氮校正表观代谢能（AMEn）含量为2,725千卡/千克，必需的氨基酸的标准回肠消化率（SID）范围从赖氨酸（Lys）的81%到精氨酸（Arg）和亮氨酸（Leu）的90%。与饲喂10%高蛋白干酒糟（HP-DDGS）日粮相比，饲喂含15%和20%高蛋白干酒糟（HP-DDGS）的日粮导致体重增长和饲料转化率下降，但对采食量无显著影响（表8）。该研究结果表明，这种高蛋白干酒糟（HP-DDGS）来源可在肉鸡日粮中添加至10%，不会对生长性能产生负面影响，且无需在日粮中额外补充赖氨酸（Lys）和精氨酸（Arg）。

表8. Cobb 500肉鸡日粮中添加5%传统DDGS（含可溶物干酒糟）和递增添加率高蛋白干酒糟（HP-DDGS）42天饲喂的生长性能比较（改编自Fries-Craft和Bobeck，2019年）

指标	5% DDGS（含可溶物干酒糟）	10% 高蛋白干酒糟（HP-DDGS）	15% 高蛋白干酒糟（HP-DDGS）	20% 高蛋白干酒糟（HP-DDGS）
初始体重（克）	37.93	37.74	37.40	37.48
开始期（0-14天）				
14天体重（千克）	0.39 ^a	0.39 ^a	0.35 ^b	0.37 ^a
增重量（千克）	0.34 ^a	0.35 ^a	0.31 ^b	0.34 ^a
采食量（千克）	0.51 ^{ab}	0.53 ^a	0.51 ^b	0.53 ^a
料重比	1.49 ^c	1.51 ^c	1.63 ^a	1.58 ^b
生长期（14-35天）				
35天体重（千克）	1.99 ^{ab}	2.02 ^a	1.91 ^c	1.93 ^{bc}
增重量（千克）	1.61 ^{ab}	1.64 ^a	1.56 ^b	1.55 ^b
采食量（千克）	2.66 ^{ab}	2.74 ^a	2.63 ^b	2.70 ^{ab}

料重比	1.66 ^c	1.67 ^{bc}	1.69 ^b	1.76 ^a
育肥期 (35-42天)				
42天体重 (千克)	2.70 ^a	2.72 ^a	2.56 ^b	2.58 ^b
增重量 (千克)	0.70 ^a	0.70 ^{ab}	0.65 ^b	0.65 ^b
采食量 (千克)	1.30 ^a	1.29 ^{ab}	1.24 ^b	1.26 ^{ab}
料重比	1.86	1.86	1.91	1.94
全期 (0-42天)				
增重量 (千克)	2.65 ^a	2.68 ^a	2.52 ^b	2.54 ^b
采食量 (千克)	4.47 ^{ab}	4.55 ^a	4.38 ^b	4.49 ^{ab}
料重比	1.69 ^c	1.70 ^c	1.74 ^b	1.77 ^a

^{a,b,c} 同一行中上标不同的平均值表示差异显著 ($P < 0.05$)

Hussain等人于2019年评估了在肉鸡日粮中添加6.4%高蛋白干酒糟 (HP-DDGS) (来自未指明的美国来源, 43%粗蛋白 (CP) 含量) 以及添加蛋白酶、甘露聚糖酶和木聚糖酶组合、三种酶组合对肉鸡生长性能、营养消化率和肠道形态的影响。研究结果显示, 酶制剂添加对体重增加、采食量、饲料转化率、胴体特性、器官重量、肠道形态以及能量和氨基酸消化率均无显著影响。这些结果表明, 该研究中评估的碳水化合物酶和蛋白酶对改善肉鸡的生长性能、营养消化率和肠道形态无明显效果。

蛋鸡饲喂高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮的试验总结

Foley等人于2022年评估了采用ICM公司纤维分离技术生产的两种新型高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 对21至45周龄白来航蛋鸡的采食量、产蛋性能及表观代谢能 (AME) 含量的影响。这两种高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的粗蛋白 (CP) 含量分别为40.3%的样品一 (FST1) 和39.1%的样品二 (FST2)。日粮处理组包括一组不含高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的玉米-豆粕 (SBM) 对照组, 以及分别在日粮中添加5%、10%或15%的样品一 (FST1) 或样品二 (FST2) 的试验组。结果表明, 时间与日粮处理组在产蛋率、蛋黄颜色评分和蛋壳强度方面观察到“时间 x 日粮处理”的显著交互作用。在试验后期, 饲喂15%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮组 (无论来源) 的产蛋率均有所提高。随着日粮中高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 添加含量的增加, 蛋黄颜色评分提高, 但随着时间推移, 所有处理组的蛋黄颜色评分均有所下降。饲喂对照日粮和15%的样品二日粮 (FST2) 组的蛋壳强度最高, 但高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 的来源或添加水平对采食量、蛋重或母鸡体重均无显著影响。与对照组相比, 饲喂含5%的样品一 (FST1) 日粮组和10%的样品二 (FST2) 日粮组以及所有高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮组的表观代谢能 (AME) 含量均有所提高。总体而言, 蛋鸡日粮中可添加高达15%的采用ICM公司纤维分离技术生产的高蛋白干酒糟 (HP-DDG), 未观察到对采食量或产蛋性能产生不良影响, 且在产蛋周期后期阶段可改善蛋黄颜色和产蛋性能。

水产饲喂高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮的试验总结

尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)

Herath等人于2016年的(A)研究报告即在一项为期12周的饲喂试验中,研究了在等氮日粮中使用玉米蛋白浓缩物(CPC, 19.4%)、高蛋白干酒糟(HP-DDG, 33.2%)、玉米蛋白粉(CGM, 23.5%)或含可溶物干酒糟(DDGS, 52.4%)完全替代鱼粉(21.8%)对初始平均体重为4.5克的幼年尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)生长性能和体组成的影响。结果显示,在所有日粮处理组中,饲喂含21.8%鱼粉的对照组日粮和52.4%含可溶物干酒糟(DDGS)日粮的鱼具有最高的特定生长率、采食量、蛋白质保留率和成活率(表9)。相比之下,饲喂玉米蛋白粉(CGM)和玉米蛋白浓缩物(CPC)日粮的鱼具有较低的特定生长率、热生长率、采食量、蛋白质保留率和成活率。饲喂高蛋白干酒糟(HP-DDG)日粮的鱼的特定生长率和热生长率较低,但与饲喂对照组日粮和含可溶物干酒糟(DDGS)日粮的鱼相比,采食量和蛋白质保留率相当。此外,饲喂高蛋白干酒糟(HP-DDG)日粮使鱼体和鱼片的蛋白质含量高于饲喂对照和含可溶物干酒糟(DDGS)日粮的鱼,且脂肪含量高于饲喂对照组日粮的鱼(表9)。然而,在所测量的各种体指数方面未观察到显著差异。这项研究结果表明,在幼年尼罗罗非鱼日粮中用各种玉米副产品完全替代鱼粉,对其生长性能以及鱼体和鱼片组成将产生不同程度影响。在评估的玉米副产品中,含可溶物干酒糟(DDGS)日粮提供了最佳的生长性能和组成反应,但饲喂高蛋白干酒糟(HP-DDG)日粮比饲喂不含鱼粉的玉米蛋白粉(CGM)和玉米蛋白浓缩物(CPC)日粮的生长性能及鱼体和鱼片蛋白质组成更优。

表9. 饲喂玉米副产品日粮12周后尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的生长性能、体指数及鱼片颜色对比(改编自Herath等人, 2016a)

指标	对照组	高蛋白干酒糟 ¹ (HP-DDG ¹)	含可溶物干酒糟 ² (DDGS ²)	玉米蛋白粉 ³ (CGM ³)	玉米蛋白浓缩物 ⁴ (CPC ⁴)
生长性能					
特定生长率 (%)	3.56 ^a	3.30 ^b	3.53 ^a	2.75 ^c	2.63 ^d
热生长系数	1.21 ^a	1.06 ^c	1.16 ^b	0.81 ^d	0.76 ^c
采食量 (克干重)	84.05 ^a	71.05 ^a	81.20 ^a	40.2 ^b	38.80 ^b
饲料转化率	1.00	1.05	1.05	1.00	1.10
蛋白质效率比	3.20	2.99	3.06	3.10	2.84
蛋白质保留率 (%)	49.62 ^a	46.17 ^{ab}	46.70 ^{ab}	42.02 ^{bc}	38.42 ^c
成活率 (%)	100.0 ^a	80.6 ^{bc}	97.2 ^{ab}	66.6 ^c	75.0 ^c
全鱼体组成 (%) 以湿重基础计					
水分	69.4	68.9	69.7	70.9	71.6
蛋白质	15.5 ^b	16.7 ^a	15.4 ^b	14.6 ^c	13.9 ^d
脂肪	8.5 ^b	9.9 ^a	10.0 ^a	9.8 ^a	9.6 ^a
灰分	6.9 ^a	5.4 ^c	5.7 ^b	4.0 ^c	5.0 ^d

鱼片组成 (%) 以湿重基础计					
水分	78.2	76.2	77.2	77.9	78.5
蛋白质	18.8 ^b	19.8 ^a	18.3 ^b	19.2 ^b	18.7 ^b
脂肪	1.6 ^c	2.4 ^b	3.1 ^a	2.2 ^b	1.9 ^{bc}
灰分	1.4	1.2	1.3	1.3	1.4
体指数					
内脏体指数 ⁵	10.8	11.6	12.9	12.1	12.8
肝体指数 ⁶	3.0	2.1	2.7	2.2	2.0
鱼片产量 ⁷ (%)	30.4	30.8	32.4	31.9	28.3
肥满度系数 ⁸	2.0	2.0	2.0	1.8	1.9

a,b,c,d,e同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

¹HP-DDG = 高蛋白干酒糟

²DDGS = 含可溶物干酒糟

³CGM = 玉米蛋白粉

⁴CPC = 玉米蛋白浓缩物

⁵内脏体指数 = (内脏重量 (克) / 鱼体重量 (克)) × 100

⁶肝体指数 = (肝脏重量 (克) / 鱼体重量 (克)) × 100

⁷鱼片产量 = (鱼片重量 (克) / 鱼体重量 (克)) × 100

⁸肥满度系数 = 鱼体重量 (克) × 100 / 总长度 (cm³)

Herath等人于2016年开展的另一项长期对比研究 (B), 评估在24周饲喂期内, 以玉米副产品为基础的日粮对尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 生长性能、鱼片颜色和组成的影响。在这项研究中, 试验设计包括一组含10%鱼粉 (FM) 的对照日粮, 以及四种不含鱼粉但分别添加高蛋白干酒糟 (HP-DDG, 33.2%)、含可溶物干酒糟 (DDGS, 52.4%)、玉米蛋白粉 (CGM, 23.5%) 或玉米蛋白浓缩物 (CPC, 19.4%) 替代50%日粮蛋白的试验日粮。结果表明, 饲喂对照组、高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 和含可溶物干酒糟 (DDGS) 日粮的鱼 (初始体重=21克) 在平均增重、特定生长率、平均采食量、蛋白质效率比方面表现更佳, 且饲料转化率和成活率优于饲喂玉米蛋白粉 (CGM) 和玉米蛋白浓缩物 (CPC) 日粮的鱼 (表10)。然而, 玉米副产品对鱼片的亮度、红度、黄度、粗蛋白 (CP) 和总氨基酸含量没有显著影响。饲喂玉米蛋白粉 (CGM) 日粮的鱼片具有最高的脂肪和灰分含量, 而鱼片的脂肪酸组成在各日粮处理组之间存在差异。该研究结果表明, 在无鱼粉日粮中添加高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 或含可溶物干酒糟 (DDGS) 作为50%的日粮蛋白来源, 对生长性能或鱼片颜色没有负面影响, 但在这些添加水平下, 饲喂含玉米蛋白粉 (CGM) 和玉米蛋白浓缩物 (CPC) 的日粮会对生长性能产生不利影响。

第六章 高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 在动物饲料中的营养特性与饲用价值

表10. 饲喂含高蛋白干酒糟 (HP-DDG)、含可溶物干酒糟 (DDGS)、玉米蛋白粉 (CGM) 及玉米蛋白浓缩物 (CPC) 日粮24周后尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 的生长性能、体指数、鱼片组成及颜色对比 (改编自Herath等人, 2016b)

指标	对照组	高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	含可溶物干酒糟 (DDGS)	玉米蛋白粉 (CGM)	玉米蛋白浓缩物 (CPC)
生长性能					
平均增重 (克)	162 ^a	161 ^a	161 ^a	88 ^b	75 ^b
特定生长率 (%)	1.27 ^a	1.26 ^a	1.27 ^a	0.96 ^b	0.90 ^b
平均采食量 (克/条)	216 ^a	222 ^a	226 ^a	149 ^b	124 ^b
饲料转化率	1.33 ^b	1.38 ^b	1.40 ^b	1.72 ^a	1.66 ^a
蛋白质效率比	2.31 ^a	2.12 ^a	2.30 ^a	1.69 ^b	1.68 ^b
成活率 (%)	97.2 ^a	97.2 ^a	97.2 ^a	91.7 ^a	52.7 ^b
体指数					
腹腔脂肪比率	1.88	2.22	1.50	2.02	1.34
肝体指数	2.70 ^b	2.70 ^b	1.93 ^c	3.45 ^a	2.30 ^{bc}
内脏体指数	9.33	10.92	9.44	11.62	11.50
鱼片产量	28.16	27.52	27.34	27.14	26.37
肥满度系数	2.01 ^a	1.83 ^c	1.89 ^{bc}	1.94 ^b	1.87 ^{bc}
鱼片组成					
水分 (%)	77.85	77.60	77.35	77.30	77.70
粗蛋白 (%)	19.60	19.60	19.65	19.40	19.35
粗脂肪 (%)	1.80 ^b	2.05 ^{ab}	2.20 ^{ab}	2.35 ^a	2.05 ^{ab}
灰分 (%)	1.30 ^b	1.30 ^b	1.26 ^b	1.60 ^a	1.50 ^{ab}
鱼片三刺激值颜色					
L*	47.8	48.0	47.8	41.5	41.8
a*	1.3	0.7	1.2	1.8	2.3
b*	3.2	2.3	2.3	1.3	2.2
色度 ¹	3.5	2.4	2.7	1.9	3.3
色调角 ² (度)	67.5	74.0	54.5	53.6	43.3
ΔE ³	0	1.11	0.97	6.61	6.22

a,b,c 同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

¹色度 = 颜色强度

²色调角 = 0° 代表红色, 90°代表黄色

³ΔE = 与对照组相比的总体颜色差异

鳊鲢 (*Pangasianodon hypophthalmus*)

Allam等人于2020年研究了某种高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 来源的副产品 (含粗蛋白 (CP) 40%、乙醚提取物3.1%、粗纤维28.1%和灰分2.4%) 对鳊鲢的影响。研究中将该产品以不同比例 (0%、5.8%、11.6%和17.4%) 添加到等氮、等脂和等热量的日

粮中，部分替代鱼粉，评估其对生长性能和经济效益的影响。结果表明，用高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 替代25%的鱼粉 (占日粮总量的5.8%) 时，鱼类生长率和饲料转化率表现良好；但替代比例进一步提高则导致生长和饲料转化率线性下降。此外，在最高添加量下，鱼体蛋白质含量降低，脂肪含量增加。高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 添加量为11.6%和17.4%时对生长性能和体组成的负面影响，可通过添加适量的晶体氨基酸来满足因日粮中赖氨酸 (Lys)、蛋氨酸 (Met) 和其他必需氨基酸的不足。

斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*)

Tidwell等人于2017年开展了一项研究，评估高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 副产品在不同添加比例 (0%、20%、40%和40%+结晶赖氨酸) 对幼年斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*) 颗粒品质与生长性能的影响。结果显示，饲喂20%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮的鱼平均收获重量达86.8克，明显高于饲喂40%高蛋白干酒糟 (57.0克) 和40%高蛋白干酒糟+补充赖氨酸 (73.7克) 的鱼，但各处理组间的饲料转化率和成活率无显著差异。与饲喂40%高蛋白干酒糟日粮 (无论是否补充赖氨酸) 的鱼相比，对照组鱼体的蛋白质浓度更高，而水分、脂肪和灰分含量则无明显差异。研究还发现，增加日粮中高蛋白干酒糟含量会降低颗粒膨胀率，同时提高单位密度和颗粒耐久性指数。这些结果表明，当高蛋白干酒糟在日粮中的添加比例超过20%时，需要补充赖氨酸及其他必需氨基酸，以保证鱼类最佳的生长性能和鱼片品质。然而，即使在高水平添加高蛋白干酒糟的情况下，仍能生产出具有良好耐久性的颗粒饲料。

Nazeer等人于2022年开展的一项最新研究比较了来源于ANDVantage™ 40Y的高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 以不同水平部分替代幼年斑点叉尾鲷日粮中禽肉粉或豆粕的效果。在等氮 (粗蛋白 (CP) 32%) 和等脂 (脂肪6.5%) 的日粮中：一组以分别添加0%、3.1%、6.2%和9.3%的高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 替代6%、4%、2%和0%的禽肉粉；另一组以分别添加5%、10%、15%、20%、30%和40%的高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 替代51%、46.5%、41.9%、37.4%、28.2%和19.2%的豆粕。第一阶段试验中，所有日粮均制成颗粒饲喂幼年斑点叉尾鲷 (平均初始重量1.8克)。第二阶段试验旨在验证鱼类在两种饲喂率下对9.3%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 替代禽肉粉日粮的低采食量反应。结果显示，高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 添加水平与被替代的蛋白源 (禽肉粉或豆粕) 之间存在显著交互效应。当增加高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 水平替代日粮中更多的禽肉粉时，鱼类的生长、采食量、饲料转化率和净蛋白质保留率均明显下降，这种情况在9.3%高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 日粮组尤为显著 (表11)。然而，各处理组间的成活率以及鱼体水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量无显著差异 (表11)。当用高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 替代日粮中部分豆粕时，除30%和40%高蛋白干酒糟组外，其他处理组的生长性能无显著差异 (表12)。同样，鱼类成活率和体组成也不受日粮中高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 添加水平的影响 (表12)。该研究结果表明，高蛋白干酒糟 (HP-DDG) 是斑点叉尾鲷日粮的优质蛋白源，但在部分替代豆粕时，应将添加量控制在20%以内，以避免生长性能下降。然而，当高蛋白干酒糟 (HP-DDG 9.3%) 完全替代禽肉粉时，鱼类生长性能显著降低，这很可能是某些营养素缺乏所致。

第六章 高蛋白干酒糟（HP-DDG）在动物饲料中的营养特性与饲用价值

表11. 饲喂来源于ANDVantage™ 40Y的不同添加率的高蛋白干酒糟（HP-DDG）部分替代禽肉粉日粮的斑点叉尾鲷10周饲喂期的生长性能和全鱼体组成对比（改编自Nazeer等人，2022年）

指标	对照组	3.1%高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	6.2%高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	9.3%高蛋白干酒糟 (HP-DDG)
生长性能				
最终生物量 (克)	479 ^a	445 ^{ab}	411 ^b	351 ^c
最终重量 (克/条)	24.26 ^a	22.25 ^{ab}	21.40 ^b	18.02 ^c
增重 (克/条)	22.41 ^a	20.50 ^{ab}	19.62 ^b	16.18 ^c
增重率 (%)	1,215 ^a	1,169 ^a	1,103 ^a	882 ^b
总干料摄入量 (克/条)	24.35 ^a	23.27 ^a	23.52 ^a	20.50 ^b
饲料转化率	1.09 ^c	1.14 ^{bc}	1.20 ^{ab}	1.27 ^a
成活率 (%)	98.75	100.0	96.25	97.50
净蛋白质保留率 (%)	42.85 ^a	40.43 ^{ab}	38.47 ^{ab}	33.90 ^b
全鱼体组成 (%)				
水分	72.15	72.15	73.12	75.13
粗蛋白	14.65	14.40	14.40	13.80
粗脂肪	8.98	9.16	8.42	7.78
灰分	2.64	3.17	2.89	2.49

a,b,c 同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

表12. 饲喂来源于ANDVantage™ 40Y的不同添加率的高蛋白干酒糟（HP-DDG）部分替代豆粕（SBM）日粮的斑点叉尾鲷10周饲喂期的生长性能和全鱼体组成比较（改编自Nazeer等人，2022年）

指标	日粮中高蛋白干酒糟（HP-DDG）添加比例 (%)						
	0	5	10	15	20	30	40
生长性能							
最终生物量 (克)	479 ^a	493 ^a	504 ^a	512 ^a	507 ^a	403 ^b	253 ^c
最终重量 (克/条)	24.26 ^a	24.64 ^a	25.18 ^a	25.92 ^a	26.00 ^a	20.15 ^b	12.65 ^c
增重 (克/条)	22.41 ^a	22.85 ^a	23.33 ^a	24.13 ^a	24.19 ^a	18.35 ^b	10.88 ^c
增重率 (%)	1,215 ^a	1,277 ^a	1,263 ^a	1,349 ^a	1,340 ^a	1,020 ^b	613 ^c
总干料摄入量 (克/条)	24.35 ^a	24.24 ^{bc}	24.83 ^{ab}	25.30 ^{ab}	25.65 ^a	23.32 ^c	18.30 ^d
饲料转化率	1.09 ^c	1.06 ^c	1.07 ^c	1.05 ^c	1.06 ^c	1.27 ^b	1.68 ^a
成活率 (%)	98.75	100.0	100.0	98.75	100.0	100.0	100.0
净蛋白质保留率 (%)	42.85 ^a	42.11 ^{ab}	44.82 ^a	43.78 ^a	43.65 ^a	35.26 ^b	24.39 ^c
全鱼体组成 (%)							
水分	72.15	72.47	70.72	71.65	71.55	73.37	73.40
粗蛋白	14.65	13.57	15.02	14.05	13.92	13.90	13.15
粗脂肪	8.98	9.31	9.50	9.52	9.86	8.78	8.23
灰分	2.64	3.15	3.19	3.31	2.82	2.96	3.21

a,b,c,d 同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

黄鲈（*Perca flavescens*）

Von Eschen等人于2021年开展了一项为期105天的饲喂试验，评估了某种含40%粗蛋白（CP）的高蛋白干酒糟（HP-DDG）在幼年黄鲈（*Perca flavescens*）日粮中部分或完全替代鲱鱼粉（72%粗蛋白）的效果。试验设计了高蛋白干酒糟（HP-DDG）替代鱼粉比例分别为25%、50%、75%和100%的日粮。研究结果表明，增重、饲料转化率、表观蛋白质消化率和肥满度系数与日粮中高蛋白干酒糟（HP-DDG）增加率呈负相关关系。随着日粮中鱼粉添加量的减少，生长性能相应下降，但所有处理组均保持了100%的成活率。该研究结果表明，黄鲈日粮中高蛋白干酒糟（HP-DDG）的替代率不宜超过50%，而适当补充合成赖氨酸有望改善其生长性能。

泌乳期奶牛饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的试验总结

Zynda等人于2021年进行的一项未发表研究，评估了在泌乳期奶牛日粮中添加占干物质摄入量20%的高蛋白干酒糟（HP-DDG，由ICM公司生产），以及在是否添加酵母或调整日粮阳离子和阴离子差值（DCAD）条件下，对产奶量、营养消化率和粪便气体排放产生的影响。与饲喂对照组豆粕（SBM）基础日粮相比，饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮导致产奶量与乳脂产量同时下降，这主要与有机物和中性洗涤纤维（NDF）消化率降低，和日粮中多不饱和脂肪酸含量高及日粮阳离子和阴离子差值（DCAD）低有关。研究发现，通过补充阳离子来提高高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮的阳离子和阴离子差值，能有效缓解乳脂下降现象，但添加酵母的高蛋白干酒糟（HP-DDG）对所有评估指标均未显示明显益处。此外，由于高蛋白干酒糟（HP-DDG）中磷和硫含量相对较高，饲喂该原料的奶牛粪便中磷和硫排泄量增加，进而导致硫化氢排放量上升。这些结果强调，为防止乳脂下降，在给泌乳期奶牛饲喂含大量高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮时，平衡日粮阳离子和阴离子差值至关重要；而饲喂含更多酵母的高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮并不能改善产奶性能、乳成分、营养消化率，也不能减少粪便气体排放。

结论

目前市场上的高蛋白干酒糟（HP-DDG）产品与10至15年前生产和评估的高蛋白干酒糟（HP-DDG）在营养成分上存在显著差异，且当前各来源之间也有明显不同。因此，与高蛋白干酒糟（HP-DDG）供应商保持沟通，获取特定产品的实际能量、可消化氨基酸和可消化磷数据至关重要，这有助于确保日粮配方的精准设计并实现最佳动物生产性能。理论上，在生猪、家禽和水产日粮中添加适当的碳水化酶和蛋白酶可能会提高高蛋白干酒糟（HP-DDG）日粮中膳食纤维和代谢能（ME）的利用效率，但目前针对生猪和家禽的有限研究表明，这一策略效果并不显著。虽然高蛋白干酒糟（HP-DDG）的粗蛋白（CP）和可消化氨基酸含量高于传统含可溶物干酒糟（DDGS），但其亮氨酸（Leu）相对于异亮氨酸（Ile）和缬氨酸（Val）过量，这种氨基酸比例失衡会在仔猪保育阶段及生长育肥期中，随着高蛋白干酒糟（HP-DDG）添加比例的提高，导致采食量下降和生长速度减缓。。因此，根据高蛋白干酒糟（HP-DDG）在日粮中的添加比例，可能需要补充多种结晶氨基酸（如赖氨酸（Lys）、苏氨酸（Thr）、色氨酸（Trp）、异亮氨酸（Ile）、缬氨酸（Val））以克服这些问题。对肉鸡和蛋鸡的研究虽然有限，但结果表明，当肉鸡日粮中高蛋白干酒糟（HP-DDG）限制在10%以内，蛋鸡限制在15%以内时，可维持良好的生产性能。总体而言，高蛋白干酒糟（HP-DDG）可用于替代尼罗罗非鱼和黄鲈非鱼粉日粮中最多50%的膳食蛋白，但可能需要补充赖氨酸以确保最佳生长性能。对于鳊鲶和斑点叉尾鮰，建议使用不超过20%的高蛋白干酒糟（HP-DDG）作为豆粕（SBM）的部分替代量，并可能需要补充赖氨酸和其他必需氨基酸，以确保鱼类获得最佳的生长性能。在泌乳期奶牛日粮中应用高蛋白干酒糟（HP-DDG）可支持满意的产奶量和乳成分，但合理平衡日粮中的阳离子和阴离子的差值是优化其使用效果的重要考虑因素。

参考文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.
- Adeola, O., and D. Ragland. 2016. Comparative ileal amino acid digestibility of distillers' grains for growing pigs. *Anim. Nutr.* 2:262- 266. doi: 10.1016/j.aninu.2016.07.008
- Adeola, O., and D. Ragland. 2012. Ileal digestibility of amino acids in coproducts of corn processing into ethanol for pigs. *J. Anim. Sci.* 90:86-88.
- Allam, B.W., H.S. Khalil, A.T. Mansour, T.M. Srour, E.A. Omar, and A.A.M. Nour. 2020. Impact of substitution of FM by high protein distillers grains on growth performance, plasma protein and economic benefit of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Aquaculture* 517:734792. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734792>
- Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.J. Ziemer, and G.C. Shurson. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.
- Applegate, T.J., C. Troche, Z. Jiang, and T. Johnson. 2009. The nutritional value of high-protein corn distillers grains for broiler chickens and its effect on nutrient excretion. *Poult. Sci.* 88:354-359. doi:3382/ps.2008-00346
- Barnes, M.E., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2012a. Initial observations on the inclusion of high protein distiller's dried grain into rainbow trout diets. *Open Fish Sci. J.* 5:21-29.
- Barnes, M.E., M.L. Brown, K.A. Rosentrater, and B. Fletcher. 2012b. Replacement of FM with high protein distiller's dried grain in juvenile rainbow trout diets. *J. Aquac. Feed Sci. Nutr.* 4:39-47.
- Batal, A. 2007. Nutrient digestibility of high protein corn distillers dried grains with solubles, dehydrated corn germ and bran. *Poult. Sci.* 86(Suppl. 1):206.
- Boucher, M., C. Zhu, S. Holt, and L.-A. Huber. 2021. Physiochemical characterization and energy contents of novel corn ethanol co-product streams, with and without inclusion of a multi- carbohydrase enzyme blend, for growing pigs. *Can. J. Anim. Sci.* 101:353-361. [dx.doi.org/10.1139/cjas-2020-0144](https://doi.org/10.1139/cjas-2020-0144)
- Buenavista, R.M.E., K. Siliveru, and Y. Zheng. Utilization of distiller's dried grains with solubles: A review. *J. Agric. Food Res.* 5:100195. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100195>
- Cemin, H.S., H.E. Williams, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouche, R.D. Goodband, K.F. Coble, B.A. Carrender, and M.J. Gerhart. 2020. Estimate of the energy value of SBM relative to corn based on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 11:70. doi:10.1186/s40104-020-00474-x
- Cemin, H.S., M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouche, and R.D. Goodband. 2019a. Meta-regression analysis to predict the influence of branched-chain and large neutral amino acids on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 97:2505-2514. doi:10.1093/jas/skz118
- Cemin, H.S., M.D. Tokach, and S.S. Dritz. 2019b. Evaluating the productive energy content of high-protein distillers dried grains in swine diets. *Kansas Agric. Exp. Sta. Rep.* 5(8):1-9. <https://doi.org/10.4148>
- Christen, K.A., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, K.K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Response of lactating dairy cows to high protein distillers grains or 3 other protein supplements. *J. Dairy Sci.* 93:2095-2104.

Cristobal, M., J.P. Acosta, S.A. Lee, and H.H. Stein. 2020. A new source of high-protein distillers dried grains with solubles (DDGS) has greater digestibility of amino acids and energy, but less digestibility of phosphorus, than de-oiled DDGS when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 98:1-9. doi:10.1093/jas/skaa200

Espinosa, C.D., and H.H. Stein. 2018. High-protein distillers dried grains with solubles produced using novel front-end-back-end fractionation technology has greater nutritional value than conventional distillers dried grains with solubles when fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 96:1869-1876. doi:10.1093/jas/sky052

Foley, J., S. Purdum, and M.F. Wilken. 2022. New generation high protein dried distillers grain in White Leghorn laying hens diets. Unpublished abstract provided with permission from ICM, Inc.

Fries-Craft, K., and E.A. Bobeck. 2019. Evaluation of a high-protein DDGS product in broiler chickens: performance, nitrogen-corrected apparent metabolizable energy, and standardized ileal amino acid digestibility. *Brit. Poult. Sci.* 60: <https://doi.org/10.1080/00071668.2019.1652884>

Garland, S.A., M.L. Jolly-Breithaupt, H.C. Hamilton, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019a. Evaluation of the energy value and nutrient digestibility of distillers grains that have undergone a fiber separation process in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1019, p. 94-96. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1019>

Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019b. Evaluation of corn bran plus solubles on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1020, p. 91-93. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1020>

Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019c. Evaluation of fractionated distillers grains (high protein and bran plus solubles) on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1021, p. 88-90. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1021>

Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, and H.H. Stein, 2009a. Net energy of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains fed to growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87(Suppl. 2):332

Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, B.G. Kim, and H.H. Stein. 2009b. Effects of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains on growth performance and organ weights of growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87(Suppl. 3):136.

Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251-261.

Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070-4078.

Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016a. Potential use of corn co-products in fishmeal-free diets for juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Fish Sci.* 82:811-818. <https://doi.org/10.1007/s12562-016-1008-6>

Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016b. Effects of long-term feeding of corn co-product-based diets on growth, fillet color, and fatty acid and amino acid composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 464:205-212. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.032>

- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Hussain, M., M.A. Mirza, H. Nawaz, M. Asghar, and G. Ahmed. 2019. Effect of exogenous protease, mannanase, and xylanase supplementation in corn and high protein corn DDGS based diets on growth performance, intestinal morphology and nutrient digestibility in broiler chickens. *Braz. J. Poult. Sci.* 21:1-10. <https://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2019-1088>
- Jacela, J.Y., J.M. DeRouche, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, R.C. Sulabo, R.C. Thaler, L. Brandts, D.E. Little, and K.J. Prusa. 2011. Amino acid digestibility and energy content of deoiled (solvent extracted) corn distillers dried grains with solubles for swine and effects on growth performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 89:1817-1829. Doi:10.2527/jas.2010-3097
- Jacela, J.Y., H.L. Frobose, J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88:3617-3623.
- Jang, J.-C., Z. Zeng, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Effects of feeding corn distillers dried grains with solubles diets without or with supplemental enzymes on growth performance of pigs: a meta-analysis. *Transl. Anim. Sci.* 5:1-15. doi:10.1093/tas/txab029
- Jung, B., and A.B. Batal. 2010. Evaluation of high protein distillers' dried grains as a feed ingredient for broiler chickens. *Can. J. Anim. Sci.* 90:505-512. Doi:10.4141/cjas10030
- Jung, B., and A. Batal. 2009. The nutrient digestibility of high-protein corn distillers dried grains and the effect of feeding various levels on the performance of laying hens. *J. Appl. Poult. Res.* 18:741-751.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2016. Lipid digestibility and energy content of distillers' corn oil in swine and poultry. *J. Anim. Sci.* 94:2900-2908.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- Kim, E.J., C.M. Parsons, R. Srinivasan, and V. Singh. 2010. Nutritional composition, nitrogen- corrected true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of new corn distillers dried grains with solubles produced by new fractionation processes. *Poult. Sci.* 89:44-51.
- Kim, B.G., G.I. Petersen, R.B. Hinson, G.L. Allee, and H.H. Stein. 2009. Amino acid digestibility and energy concentration in a novel source of high-protein distillers dried grains and their effects on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 87:4013-4021.
- Kim, E.J., C. Martinez-Amezcu, P.L. Utterback, and C.M. Parsons. 2008. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. *Poult. Sci.* 87:700-705. doi:10.3382/ps.2007-003302.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Ruminant degradability of dry matter, crude protein, and amino acids in SBM, canola meal, corn, and wheat dried distillers grains. *J. Dairy Sci.* 96:5151-5160.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Effect of substitution of SBM by canola meal or distillers grains in dairy rations on amino acid and glucose availability. *J. Dairy Sci.* 96:7806-7817.

- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010a. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288-303. doi:10.3168/jds.2009-2377
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176-3191. doi:10.3168/jds.2009-2974
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010c. Ruminant degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144-4154. doi:10.3168/jds.2009-2883
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2009. In situ ruminal degradability and intestinal digestibility of protein in soybean and dried distillers grains with solubles products. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 84.
- Nazeer, S., D.C. Fornari, H.S.C. Galkanda-Arachchige, S. Tilton, and D.A. Davis. 2022. Use of high protein distiller's dried grain with yeast in practical diets for the channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* 546:737387. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737387>
- Noblet, J., H. Fortune, X.S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180-2189.
- Noblet, J., and J.M. Perez. 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pig diets from chemical analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389-3398.
- Øverland, M., Å. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 416-417:201-208. <https://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.016>
- Petersen, G.I., Y.Liu, and H.H. Stein. 2014. Coefficient of standardized ileal digestibility of amino acids in corn, SBM, corn gluten meal, high-protein distillers dried grains, and field peas fed to weanling pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 188:145-149.
- Prachom, N., Y. Haga, and S. Satoh. 2013. Impact of dietary high protein distillers dried grains on amino acid utilization, growth response, nutritional health status and waste output in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquac. Nutr.* 19:62-71. <https://doi.org/10.1111/anu.12049>
- Rao, Z.-X., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, J.M. DeRouchey, H.I. Calderone, and M.F. Wilken. 2021. Evaluation of high-protein distillers dried grains on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs. *Transl. Anim. Sci.* 5:1-9. doi:10.1093/tas/txab038
- Rho, Y., C. Zhu, E. Kiarie, and C.F.M. de Lange. 2017. Standardized ileal digestible amino acids and digestible energy contents in high-protein distiller's dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:3591-3597. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1553>
- Rochell, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier, III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999-2007. doi:10.3382/ps.2011-01468
- Rojo, A., M. Ellis, E.B. Gaspar, A.M. Gaines, B.A. Peterson, F.K. McKeith, and J. Killefer. 2016. Effects of dietary inclusion level of distillers dried grains with solubles (DDGS) and high-protein distillers dried grains (HP-DDG) on the growth performance and carcass characteristics of wean-to-finish pigs. *J. Anim. Sci* abstract doi: 10.2527/msasas2016-187 p. 88

- Seabolt, B.S., E. van Heugten, S.W. Kim, K.D. Ang-van Heugten, and E. Roura. 2010. Feed preferences and performance of nursery pigs fed diets containing various inclusion amounts and qualities of distillers coproducts and flavor. *J. Anim. Sci.* 88:3725-3738.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Soares, J.A., H.H. Stein, V. Singh, G.C. Shurson, and J.E. Pettigrew. 2012. Amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles, liquid condensed solubles, pulse dried thin stillage, and syrup balls fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1255-1261.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson, and L.J. Erasmus. 2014. Determining the optimal ratio of canola meal and high protein dried distillers grain protein in diets of high producing Holstein dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 189:41-53.
- Tangendjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* 34:133-139. <https://doi.org/10.5398/medpet.2011.34.2.133>
- Tidwell, J., S. Coyle, L. Bright, L. Pires, and K. Rosentrater. 2017. Effects of varying levels of high- protein distillers grains on growth performance of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, and post-extrusion feed pellet characteristics. *J. World Aquac. Soc.* 48:426-434. <https://doi.org/10.1111/jwas.12374>
- Von Eschen, A.J., M.L. Brown, and K. Rosentrater. 2021. Effect of increasing dietary high protein distillers dried grains on yellow perch *Perca flavescens* performance. *J. Appl. Aquac.* <https://doi.org/10.1080/10454438.2021.1885558>
- Widmer, M.R., L.M. McGinnis, D.M. Wulf, and H.H. Stein. 2008. Effects of feeding distillers dried grains with solubles, high-protein distillers dried grains, and corn germ to growing-finishing pigs on pig performance, carcass quality, and the palatability of pork. *J. Anim. Sci.* 86:1819-1831.
- Widmer, M.R., L.M. McGinnis, and H.H. Stein. 2007. Energy, phosphorus, and amino acid digestibility of high-protein distillers dried grains and corn germ fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:2994-3003.
- Wiseman, J., J. Powles, and F. Salvador. 1998. Comparison between pigs and poultry in the prediction of dietary energy value of fats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 71:1-9.
- Yang, Z., P.E. Urriola, A. Hilbrands, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2020. Effects of feeding high-protein corn distillers dried grains and a mycotoxin mitigation additive on growth performance, carcass characteristics, and pork fat quality of growing-finishing pigs. *Transl. Anim. Sci.* 4:1-16. doi:10.1093/tas/txaa051
- Yang, Z., P.E. Urriola, A.M. Hilbrands, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2019. Growth performance of nursery pigs fed diets containing increasing levels of a novel high-protein corn distillers dried grains with solubles. *Transl. Anim. Sci.* 3:350-358. doi:10.1093/tas/txy101
- Zynda, H.M., J.E. Copelin, L.R. Rebelo, W.P. Weiss, M. Wilken, and C. Lee. 2021. Effects of high- protein corn distillers' grains with and without yeast or manipulation of dietary cation and anion difference on production, nutrient digestibility, and gas emissions from manure in lactating dairy cows. Unpublished but included with permission from ICM, Inc.

第七章 玉米蛋白浓缩物在水产和蛋鸡日粮中的营养特性与饲用价值

引言

长期以来，鱼粉一直被视为水产饲料中“黄金标准”的粗蛋白（CP）饲料原料，但其持续使用已不具可持续性（Naylor 等人，2009年）。因此，寻找适合替代鱼粉的原料至关重要，而谷物、油籽和豆类的蛋白浓缩物通常被认为是极具吸引力的替代选择。遗憾的是，使用植物性替代蛋白源（如玉米蛋白浓缩物（CPC）和含可溶物干酒糟（DDGS））时，即使已满足所有已知必需营养素（包括氨基酸）的需求，但在尤其是肉食性鱼类日粮中使用低量鱼粉和高量植物性蛋白浓缩物时，仍可能导致该鱼类的生长性能不佳和蛋白转化率下降（Gomes 等人，1995年；Davies 等人，1997年；Refstie 等人，2000年；Martin 等人，2003年；Gómez-Requeni 等人，2004年）。鱼类摄食高比例植物性蛋白源导致生长性能下降的潜在原因包括：采食量减少；抗营养因子、合成代谢类固醇和植物雌激素的存在；未被确定的营养缺乏，以及必需氨基酸的不平衡（Gatlin 等人 2007年；Glencross 等人，2007年；Krogdahl 等人，2010年）。最可能导致生长不佳的原因是植物性蛋白源提供的可消化氨基酸不足，因为相较于鱼粉，这些蛋白源的赖氨酸（Lys）、苏氨酸（Thr）和色氨酸（Trp）含量普遍较低，可使鱼类氨基酸需求不足。为纠正这些不足，必须在所有含植物性蛋白源（包括玉米蛋白浓缩物（CPC）等玉米副产品）的日粮中添加合成氨基酸。此外，Brezas 和 Hardy 于 2020 年还指出，植物性蛋白原料的蛋白质消化动态可能因氨基酸消化和吸收的同步性及均匀性而异，并最终会对生长造成影响。因此，尽管在水产日粮中使用高蛋白玉米副产品（如玉米蛋白浓缩物（CPC））实现最佳生长和鱼片品质存在营养挑战，但通过添加适量合成氨基酸，而非仅依靠直接替代鱼粉而不调整日粮中的氨基酸，部分挑战可得以实现。

美国饲料管理协会（AAFCO）对玉米蛋白浓缩物的定义

与所有其他玉米副产品相比，玉米蛋白浓缩物（CPC）因含有最高浓度的粗蛋白（约80%）而独具特色。玉米蛋白浓缩物（CPC）的生产是采用与干磨乙醇设施中生产玉米发酵蛋白（CFP）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）完全不同的湿磨工艺。玉米蛋白浓缩物（CPC）由美国嘉吉玉米加工厂生产，并以Empyreal® 75品牌名称销售。Yu 等于2013年还使用改良工艺生产出Lysto™，与Empyreal® 75相比，该产品含有更高的赖氨酸含量和更优化的氨基酸组成。由于玉米蛋白浓缩物（CPC）有极高的粗蛋白含量，能够在部分或完全替代鱼粉（粗蛋白64%）的同时，仍能维持日粮中高水平的总蛋白质和氨基酸浓度，从而满足各类鱼种的营养需求，因此成为水产营养学家关注的焦点。美国饲料管理协会对玉米蛋白浓缩物的定义如下：

48.89 玉米蛋白浓缩物

“玉米蛋白浓缩物是玉米中以胚乳为主要来源的干蛋白质部分，经湿法工艺获得的蛋白质流中，再经酶解去除大部分非蛋白成分而获得。玉米的蛋白质部分必须在无水基础上含有不低于80%的蛋白质，以及在水基础上含有不超过1%的淀粉。产品标签必须以‘原样’为基础标示。除非在良好生产工艺中不可避免地出现少量残留，否则此

部分不得含有发酵玉米提取物、玉米胚芽粕和其他非蛋白成分。可添加植物油或美国饲料管理协会官方出版物（AAFCO OP）第87节定义的其他适当成分，浓度不超过3%，以减少处理过程中的粉尘。如使用粉尘控制剂，必须将其名称作为添加成分标示。”

因此，玉米蛋白浓缩物（CPC）主要含有玉米籽粒胚乳中的蛋白质，与其他玉米副产品相比，其纤维和灰分含量极低。此外，与玉米发酵蛋白不同，玉米蛋白浓缩物不含残留废酵母。

玉米蛋白浓缩物的营养组成

关于玉米蛋白浓缩物（CPC）营养组成的已发表数据有限，但可在网上获取Empyreal® 75的部分商业营养规格和信息（https://agripemata.com/brochure/commodity/corn_protein_concentrate/brochure2.pdf）。Yu等人于2013年比较了两种玉米蛋白浓缩物（CPC）与鲱鱼粉、脱壳溶剂萃取豆粕（SBM）和玉米蛋白粉的营养组成（表1）。尽管玉米蛋白浓缩物（CPC）的粗蛋白含量远高于鲱鱼粉（64%）、玉米蛋白粉（CGM；65%）和豆粕（SBM,50%），但与豆粕和鱼粉相比，其赖氨酸和色氨酸含量相对较低。此外，玉米蛋白浓缩物（CPC）和玉米蛋白粉（CGM）含有极高浓度的亮氨酸（Leu），这会干扰异亮氨酸（Ile）、缬氨酸（Val）和色氨酸（Trp）的利用。关于平衡单胃动物日粮中所有玉米副产品的玉米蛋白氨基酸组成的详细讨论，请参见本手册第一章。

表1. 两种玉米蛋白浓缩物与鱼粉、脱壳溶剂萃取豆粕和玉米蛋白粉的营养组成对比（以原样基础计）
（改编自Yu等人，2013年）

指标 (%)	鲱鱼粉	溶剂萃取豆粕	玉米蛋白粉	玉米蛋白浓缩物 Empyreal® ¹	玉米蛋白浓缩物 Lysto™ ¹
干物质	90.61	88.36	91.59	90.16	88.39
粗蛋白	64.3	49.9	64.8	79.7	79.8
乙醚提取物	10.7	1.19	0.46	2.36	2.58
酸性洗涤纤维	-	2.83	2.82	9.8	7.5
灰分	15.1	5.34	6.63	0.91	0.91
必需氨基酸					
精氨酸	4.99	3.26	2.03	2.11	2.16
组氨酸	2.21	1.16	1.30	2.05	1.40
异亮氨酸	3.10	1.86	2.51	2.36	2.99
亮氨酸	5.50	3.36	10.04	10.40	11.95
赖氨酸	6.04	2.81	1.03	1.37	5.66
蛋氨酸	1.47	0.82	1.45	1.77	1.67
苯丙氨酸	2.97	2.16	3.88	5.00	4.57
苏氨酸	3.46	1.56	2.02	2.42	2.19
色氨酸	1.10	未报告 ²	0.34	0.55	0.37
缬氨酸	4.09	1.78	3.03	2.85	3.29
非必需氨基酸					
丙氨酸	6.45	1.72	5.32	8.26	6.17
天冬氨酸	6.84	6.55	3.72	3.89	4.10
半胱氨酸	0.43	0.88	1.10	1.28	1.27

谷氨酸	9.70	9.64	12.89	14.20	14.06
甘氨酸	6.05	1.89	1.79	1.84	1.83
脯氨酸	4.48	2.36	5.82	7.42	6.78
丝氨酸	3.37	1.95	2.97	3.53	2.78
酪氨酸	2.50	1.49	3.08	3.74	3.75

¹嘉吉玉米加工，内布拉斯加州布莱尔市嘉吉公司

²未报告

尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）饲喂玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的试验总结

在已发表的关于使用玉米蛋白浓缩物（CPC）进行的水产饲料研究里，大多数以尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）为试验对象。最初的研究由Herath等人于2016年的（A）研究中进行，旨确定在等氮日粮中完全用19.4%玉米蛋白浓缩物（CPC）、33.2%高蛋白干酒糟（HP-DDG）、23.5%玉米蛋白粉（CGM）或52.4%DDGS（含可溶物干酒糟）替代21.8%鱼粉对初始平均体重4.5克的幼年尼罗罗非鱼的生长性能和体组成的影响，该试验为期12周。在所有日粮处理组中，摄食含21.8%鱼粉的对照日粮和52.4%DDGS（含可溶物干酒糟）日粮的鱼具有最高的特定生长率、采食量、蛋白质保留率和成活率（表2）。相比之下，摄食玉米蛋白粉（CGM）和玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的鱼具有最低的特定生长率、热生长率、采食量、蛋白质保留率和成活率。饲喂含玉米蛋白粉（CGM）和玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的罗非鱼的全鱼体蛋白质含量降低，致使其蛋白质保留率降低，但鱼片的蛋白质含量未受影响（表2）。与摄食对照日粮的鱼相比，摄食玉米副产品日粮的鱼全鱼体脂肪含量较高，灰分含量较低。然而，所有测量的体指数均未观察到差异。该研究结果表明，在幼年尼罗罗非鱼日粮中完全使用各种玉米副产品替代鱼粉对生长性能以及全鱼体和鱼片组成将产生不同影响。在评估的玉米副产品中，含DDGS（含可溶物干酒糟）的日粮表现出最佳的生长性能和组成反应，而在不含鱼粉的日粮中，饲喂玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮表现出最差的生长性能。

表2. 尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）饲喂玉米副产品日粮12周的生长性能、体指数和鱼片颜色对比（改编自Herath等人，2016a）

指标	对照组	高蛋白干酒糟 ¹ (HP-DDG ¹)	DDGS ² (含可溶物干酒糟 ²)	玉米蛋白粉 ³ (CGM ³)	玉米蛋白浓缩物 ⁴ (CPC ⁴)
<i>生长性能</i>					
特定生长率 (%)	3.56 ^a	3.30 ^b	3.53 ^a	2.75 ^c	2.63 ^d
热生长系数	1.21 ^a	1.06 ^c	1.16 ^b	0.81 ^d	0.76 ^e
采食量 (克干重)	84.05 ^a	71.05 ^a	81.20 ^a	40.2 ^b	38.80 ^b
饲料转化率	1.00	1.05	1.05	1.00	1.10
蛋白质效率比	3.20	2.99	3.06	3.10	2.84
蛋白质保留率 (%)	49.62 ^a	46.17 ^{ab}	46.70 ^{ab}	42.02 ^{bc}	38.42 ^c

成活率 (%)	100.0 ^a	80.6 ^{bc}	97.2 ^{ab}	66.6 ^c	75.0 ^c
全鱼体组成 (%) 以湿重基础计					
水分	69.4	68.9	69.7	70.9	71.6
蛋白质	15.5 ^b	16.7 ^a	15.4 ^b	14.6 ^c	13.9 ^d
脂质	8.5 ^b	9.9 ^a	10.0 ^a	9.8 ^a	9.6 ^a
灰分	6.9 ^a	5.4 ^c	5.7 ^b	4.0 ^e	5.0 ^d
鱼片组成 (%) 以湿重基础计					
水分	78.2	76.2	77.2	77.9	78.5
蛋白质	18.8 ^b	19.8 ^a	18.3 ^b	19.2 ^b	18.7 ^b
脂质	1.6 ^c	2.4 ^b	3.1 ^a	2.2 ^b	1.9 ^{bc}
灰分	1.4	1.2	1.3	1.3	1.4
体指数					
内脏体指数 ⁵	10.8	11.6	12.9	12.1	12.8
肝体指数 ⁶	3.0	2.1	2.7	2.2	2.0
鱼片产量 ⁷ (%)	30.4	30.8	32.4	31.9	28.3
肥满度系数 ⁸	2.0	2.0	2.0	1.8	1.9

a,b,c,d,e同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

¹HP-DDG = 高蛋白干酒糟

²DDGS = 含可溶物干酒糟

³CGM = 玉米蛋白粉

⁴CPC = 玉米蛋白浓缩物

⁵内脏体指数 = 100 × 内脏重量 (克) / 体重 (克)

⁶肝体指数 = 100 × 肝重 (克) / 体重 (克)

⁷鱼片产量 = 100 × 鱼片重量 (克) / 体重 (克)

⁸肥满度系数 = 100 × 体重 (克) / 总长 (立方厘米)

Herath等人于2016年开展的另一项为期更长的比较研究(B),评估了饲喂基于玉米副产品日粮对尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)在24周饲喂期间的生长性能、鱼片颜色和组成的影响。在该研究中,日粮包括含10%鱼粉的对照组日粮,以及四种不含鱼粉但分别含有33.2%高蛋白干酒糟(HP-DDG)、52.4%DDGS(含可溶物干酒糟)、23.5%玉米蛋白粉(CGM)或19.4%玉米蛋白浓缩物(CPC)以替代50%粗蛋白(CP)的日粮。摄食对照组、高蛋白干酒糟(HP-DDG)和DDGS(含可溶物干酒糟)日粮的鱼(初始体重=21克)其平均增重、特定生长率、平均采食量、蛋白质效率比均高于玉米蛋白粉(CGM)和玉米蛋白浓缩物(CPC)日粮组,且其饲料转化率和成活率显著提高(表3)。然而,玉米副产品对鱼片的亮度、红度、黄度、粗蛋白和总氨基酸含量没有影响。摄食玉米蛋白粉(CGM)日粮的鱼片中脂肪和灰分含量最高,而鱼片脂肪酸组成在各日粮处理组间有所不同。该研究结果表明,在无鱼粉日粮中添加可达日粮的50%粗蛋白的高蛋白干酒糟(HP-DDG)或DDGS(含可溶物干酒糟),对生长性能或鱼片颜色没有负面影响,但以该添加比例饲喂含玉米蛋白粉(CGM)和玉米蛋白浓缩物(CPC)的日粮对生长性能有害。

第七章 玉米蛋白浓缩物在水产和蛋鸡日粮中的营养特性与饲用价值

表3. 尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 饲喂玉米副产品日粮24周的生长性能、体指数和鱼片颜色对比 (改编自Herath等人, 2016b)

指标	对照组	高蛋白干酒糟 (HP-DDG)	DDGS (含可溶物干酒糟)	玉米蛋白粉 (CGM)	玉米蛋白浓缩物 (CPC)
生长性能					
平均增重率 (克)	162.2 ^a	160.7 ^a	161.4 ^a	88.3 ^b	74.9 ^b
特定生长率 (克)	1.27 ^a	1.26 ^a	1.27 ^a	0.96 ^b	0.90 ^b
平均采食量 (克)	216.2 ^a	222.2 ^a	225.5 ^a	148.8 ^b	124.1 ^b
饲料转化率	1.33 ^b	1.38 ^b	1.40 ^b	1.72 ^a	1.66 ^a
蛋白质效率比	2.31 ^a	2.12 ^a	2.30 ^a	1.69 ^b	1.68 ^b
成活率 (%)	97.2 ^a	97.2 ^a	97.2 ^a	91.7 ^a	52.7 ^b
体组成					
腹腔脂肪比例	1.99	2.22	1.50	2.02	1.34
肝体指数	2.70 ^b	2.70 ^b	1.93 ^c	3.45 ^a	2.30 ^{bc}
内脏体指数	9.33	10.92	9.44	11.62	11.50
鱼片产量	28.16	27.52	27.34	27.14	26.37
色泽度系数	2.01 ^a	1.83 ^c	1.89 ^{bc}	1.94 ^b	1.87 ^{bc}
鱼片颜色测量					
L*	47.8	48.0	47.8	41.5	41.8
a*	1.3	0.7	1.2	1.8	2.3
b*	3.2	2.3	2.3	1.3	2.2
色度 ¹	3.5	2.4	2.7	1.9	3.3
色调角 ² (度)	67.5	74.0	54.5	53.6	43.3
ΔE ³	0	1.11	0.97	6.61	6.22

a,b,c同一行中上标不同的字母表示差异显著 (P < 0.05)

¹色度 = 颜色强度

²色调角度 = 0°表示红色, 90°表示黄色

³ΔE = 与对照组相比的总颜色差异

与Herath等人于2016年进行的A、B研究即与日粮中添加19.4%玉米蛋白浓缩物 (CPC) 的饲喂试验不同, Khalfia等人于2017年对尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 鱼种进行了8周饲喂试验, 使用四种等热能-等氮日粮, 其中含有较低添加率 (0%、5%、10%和19%) 的玉米蛋白浓缩物 (CPC) 作为鱼粉的替代物。研究表明, 摄食5%和10%玉米蛋白浓缩物 (CPC) 日粮的鱼与摄食0%玉米蛋白浓缩物 (CPC) 日粮的鱼相比, 生长性能没有显著差异, 且这三组日粮均提供了比19%玉米蛋白浓缩物 (CPC) 日粮更好的生长性能。此外, 各日粮处理组间的鱼片产量和体组成没有显著差异。有趣的是, 通过电子显微镜观察发现, 与摄食含玉米蛋白浓缩物 (CPC) 日粮

的鱼相比，摄食对照组日粮的鱼胃部略小，胃壁更薄。此外，与摄食0%和5%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的鱼相比，饲喂10%和19%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的鱼体内其总好氧菌和大肠菌群计数明显低于饲喂0%和5%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的鱼。该研究结果表明，在罗非鱼鱼类日粮中添加高达10%的玉米蛋白浓缩物（CPC）替代高达53%的鱼粉，对生长性能和体组成没有任何负面影响。

最近，Ng等人于2019年评估了用玉米蛋白浓缩物（CPC）替代鱼粉对红色杂交罗非鱼（*Oreochromis sp.*）生长性能、营养利用、肠道形态和皮肤着色的影响。研究配制了五种等氮（35%粗蛋白）和等脂（1%乙醚提取物）日粮，其中玉米蛋白浓缩物（CPC）替代了0%、25%、50%、75%或100%的鱼粉，并对三组平均初始重量为10.33克的罗非鱼进行了63天的饲喂。结果表明，在红色杂交罗非鱼日粮中用玉米蛋白浓缩物（CPC）替代高达50%的鱼粉对罗非鱼的生长率、饲料利用、血细胞比容计数、饱满度系数和肠道形态没有负面影响，但当玉米蛋白浓缩物（CPC）替代75%或100%的鱼粉时，观察到了负面影响。此外，玉米蛋白浓缩物（CPC）中的类胡萝卜素增加了摄食玉米蛋白浓缩物（CPC）替代100%鱼粉日粮的鱼的皮肤黄度。通过回归分析，玉米蛋白浓缩物（CPC）替代鱼粉的最佳替代率为：增重百分比为25%，饲料转化率为33%，蛋白质效率比为29%。该研究结果表明，玉米蛋白浓缩物（CPC）可作为单一植物蛋白源，在红色杂交罗非鱼日粮中替代高达50%的鱼粉。

太平洋白虾（*凡纳滨对虾*）饲喂玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的试验总结

Yu等人于2013年进行了三次水箱饲喂试验和一次池塘生产试验，以评估增加玉米蛋白浓缩物（CPC）添加量对凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）在不同饲喂期间生长性能的影响。在第一次水箱试验中，对平均初始重量为0.52克的幼虾饲喂含8%玉米蛋白粉（CGM）和6.5%或13.0%玉米蛋白浓缩物（CPC）的日粮，持续6周。第二次水箱试验在等氮基础上分别对平均初始重量为0.36克的虾饲喂含0%、4%、8%和16%玉米蛋白浓缩物（CPC）并补充合成L-赖氨酸以替代等豆粕（SBM），以及含9.7%玉米蛋白浓缩物（CPC）且氨基酸组成更优、赖氨酸含量更高以替代玉米蛋白浓缩物（CPC）和合成L-赖氨酸的日粮，饲喂期为10周。第三次水箱试验即对平均初始体重为0.128克幼虾分别饲喂含0%、4%、8%和16%玉米蛋白浓缩物（CPC）的日粮，进行为期44天的生长性能试验。前两次试验结果显示，最终平均体重、增重、饲料转化率或成活率没有显著差异。在第二次试验结束时，饲喂各含量水平的玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮之间的虾的干物质和粗蛋白（CP）或蛋白质保留效率没有差异。然而，第三次试验结果表明，与摄食0%和4%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的虾相比，摄食8%和12%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的虾的最终生物量、最终体重和饲料转化率有所下降。

Yu等人在2013年开展的池塘生产试验中，将平均初始重量为0.023克的幼虾放入16个生产池塘中，并在收获前的16周饲养期内，饲喂四种含0%、4%、8%或12%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮中的一种，如表3所示，各日粮处理组间虾的最终体重、产量、饲料转化率、成活率和生产价值没有差异。然而，随着日粮中玉米蛋白浓缩物（CPC）水平的提高，饲料成本显著降低，相较于摄食0和4%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的虾，摄食8%和12%玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的虾的每千克饲料成本较低。该研究结果表明，在太平洋白虾日粮中添加高达12%玉米蛋白浓缩物（CPC），不影响其生长性能，同时显著降低了每千克虾的日粮成本。

表3. 太平洋白虾（凡纳滨对虾）饲喂不同含量的玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮16周的生长性能、饲料成本和生产价值（改编自Yu等人，2013年）

指标	0%玉米蛋白浓缩物（CPC）	4%玉米蛋白浓缩物（CPC）	8%玉米蛋白浓缩物（CPC）	12%玉米蛋白浓缩物（CPC）
最终重量（克）	20.51	17.48	17.17	18.71
产量（千克/公顷）	5,008	5,190	5,421	5,440
饲料转化率	1.38	1.34	1.27	1.29
成活率（%）	64.9	77.6	83.6	75.9
饲料成本（美元）	791 ^a	716 ^b	651 ^c	598 ^d
每千克对虾饲料成本	1.60 ^a	1.39 ^{ab}	1.20 ^b	1.11 ^b
生产价值（美元）	2,107	1,808	1,844	2,018

^{a,b}同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

蛋鸡饲喂玉米蛋白浓缩物（CPC）日粮的试验总结

一项研究已评估了在蛋鸡日粮中添加玉米蛋白浓缩物（CPC）对产蛋性能和蛋品质的营养价值（Herrera等人，2019年）。在该试验中，持续10周给蛋鸡（64周龄，体重2.05千克）饲喂等热能（2,850千卡/千克）、等氮（15%粗蛋白），以及分别含有0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%或2.5%的玉米蛋白浓缩物（CPC）的日粮。随着日粮玉米蛋白浓缩物（CPC）含量的增加，蛋鸡体重增加、采食量、料蛋比、产蛋率、蛋总量和蛋重均呈二次曲线响应。日粮中玉米蛋白浓缩物（CPC）含量的增加还线性提高了采食量、料蛋比、蛋壳厚度、蛋壳强度以及蛋黄颜色。然而，蛋清高度和哈氏单位不受日粮玉米蛋白浓缩物（CPC）水平的影响。研究结果表明，在蛋鸡日粮中添加最高2.5%的玉米蛋白浓缩物（CPC）可提高产蛋性能。

结论

玉米蛋白浓缩物是水产和家禽日粮中极具吸引力的高蛋白饲料替代原料。目前关于在尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）和太平洋白虾（凡纳滨对虾）日粮中添加玉米蛋白浓缩物（CPC）的研究尚属有限，但现有研究表明，在罗非鱼日粮中添加高达10%的玉米蛋白浓缩物（CPC）替代高达50%的鱼粉，以及在对虾日粮中添加高达12%的玉米蛋白浓缩物（CPC），均可获得令人满意的生长性能、体组成及鱼片品质。研究还表明，在蛋鸡日粮中添加高达2.5%的玉米蛋白浓缩物（CPC）可改善产蛋性能和蛋品质。

参考文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.
- Brezas, A., and R.W. Hardy. 2020. Improved performance of a rainbow trout selected strain is associated with protein digestion rates and synchronization of amino acid absorption. *Sci. Rep.* 10:4678. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61360-0>
- Davies, S.J. and P.C. Morris. 1997. Influence of multiple amino acid supplementation on the performance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), fed soya based diets. *Aquaculture res.* 28:65-74.
- Gatlin, D.M., III, F.T. Barrows, P. Brown, K. Dabrowski, T.G. Gaylord, R.W. Hardy, E. Herman, G. Hu, Å. Krogdahl, R. Nelson, K. Overturf, M. Rust, W. Sealey, D. Skonberg, E.J. Souza, D. Stone, R. Wilson, and E. Wurtele. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquaculture Res.* 38:551-579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704x>
- Glencross, B.D., M. Booth, and G.L. Allan. 2007. A feed is only as good as its ingredients – A review of ingredient evaluation strategies for aquaculture feeds. *Aquaculture Nutr.* 13:17-34.
- Gomes, E.F., P. Rema, and S.J. Kaushik. 1995. Replacement of FM by plant protein in the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Digestibility and growth performance. *Aquaculture* 130:177-186.
- Gómez-Requeni, P., M. Mingarro, J.A. Calduch-Giner, F. Médale, S.A.M. Martin, D.F. Houlihan, S. Kaushik, and J. Pérez-Sánchez. 2004. Protein growth performance, amino acid utilization and somatotrophic axis responsiveness to FM replacement by plant protein sources in gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture* 232:493-510. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00532-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00532-5)
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016a. Potential use of corn co-products in fishmeal-free diets for juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Fish Sci.* 82:811-818. <https://doi.org/10.1007/s12562-016-1008-6>
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016b. Effects of long-term feeding of corn co-product-based diets on growth, fillet color, and fatty acid and amino acid composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 464:205-212. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.032>
- Herrera, A., M. Ortiz, H. Torrealba, and C.H. Ponce. 2019. Effects of corn protein concentrate levels on egg production and egg quality parameters of commercial layers. *J. Anim. Sci.* 97(Suppl. 3):345. <https://doi.org/10.1093/jas/skz258.688>
- Khalifa, N.S.A., I.E.H. Belal, K.A. El-Tarabily, S. Tariq, and A.A. Kassab. 2017. Evaluation of replacing FM with corn protein concentrate in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings commercial diet. *Aquac. Nutr.* 24:143-152. <https://doi.org/10.1111/anu.12542>
- Krogdahl, Å., M. Penn, J. Thorsen, S. Refstie, and A. Bakke. 2010. Important antinutrients in plant feedstuffs for aquaculture: An update on recent findings regarding responses in salmonids. *Aquaculture Res.* 41:333-344.
- Martin, S.A.M., O. Vilhelmsson, F. Médale, P. Watt, S. Kaushik, and D.F. Houlihan. 2003. Proteomic sensitivity to dietary manipulations in rainbow trout. *Biochim. Biophys. Acta.* 1651:17-29. doi:10.1016/s1570-9639(03)00231-0

Naylor, R.L., R.W. Hardy, D.P. Bureau, A. Chiu, M. Elliott, A.P. Farrell, I. Forster, D.M. Gatlin, R.J. Goldberg, K. Hua, and P.D. Nichols. 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106:15103-15110. Doi:10.1073/pnas.0905235106

Ng, W.-K., T.-C. Leow, and R. Yossa. 2019. Effect of substituting fishmeal with corn protein concentrate on growth performance, nutrient utilization and skin coloration in red hybrid tilapia, *Oreochromis* sp. *Aquaculture Nutr.* 25:1006-1016. <https://doi.org/10.1111/anu.12918>

Refstie, S., Ø. Korsøen, T. Storebakken, G. Baeverfjord, I. Lein, and A. Roem. 2000. Differing nutritional responses to dietary soybean meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 190:49-63. doi:10.1016/S0044-8486(00)00382-3

Yu, D., X. Fang, Y. Zhou, M. Rhodes, and D.A. Davis. 2013. Use of corn protein products in practical diets for the Pacific White shrimp. *Avances En Nutrición Acuicola*. <https://nutricionacuicola.uani.mx/index.php/acu/article/view/62>

第八章 干玉米麸皮和可溶物、脱油干酒糟（溶剂萃取DDGS）及玉米酒糟油在动物日粮中的营养特性与饲用价值

引言

除了玉米发酵蛋白（CFP；第一、二、三、四和五章）、不含可溶物的高蛋白干酒糟（HP-DDG）（第六章）和玉米蛋白浓缩物（CPC）（第五章）外，一些乙醇工厂正在使用新型工业工艺生产其他几种新型玉米副产品，且产出的产品具有不同的营养特性和饲喂应用。这些副产品包括湿态与干态的玉米纤维/麸皮与可溶物混合物（CBS）、脱油干酒糟（De-oiled DDGS）以及玉米酒糟油（CDO）。因此，本章的目的是提供每种副产品类别的当前营养成分，描述其在不同动物种类日粮中的使用益处和局限性，并提供已进行的饲喂试验总结。

干玉米麸皮和可溶物

反刍动物用玉米麸皮和可溶物的营养成分

目前，一些采用ICM公司纤维分离技术™的乙醇工厂正在生产高水分（40%干物质）玉米麸皮和可溶物（CBS）。由于高水分含量导致运输成本增加，该副产品主要供应国内市场而非出口，并已在育肥期肉牛日粮中进行了评估。本章后续部分将简要总结高水分玉米麸皮和可溶物在育肥期肉牛日粮中的应用研究结果。

生猪用干玉米麸皮和可溶物的营养成分

巴西的新建玉米乙醇厂正在采用ICM公司纤维分离技术™生产干玉米麸皮和可溶物（CBS），用于生猪、家禽和牛的日粮配制。Paula等人于2021年对干玉米麸皮和可溶物（CBS）的消化能（DE）、代谢能（ME）、氨基酸标准回肠消化率（SID）和磷（P）的标准总肠道消化率（STTD）进行了测定，并与美国生产的传统含可溶物干酒糟（DDGS）、高蛋白干酒糟（HP-DDG）以及巴西采用ICM公司纤维分离技术™生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）进行了比较。研究结果显示，正如预期，玉米麸皮和可溶物（CBS）的粗蛋白（CP）含量相对较低（13.87%），而乙醚提取物（9.00%）和中性洗涤纤维（NDF；39.07%）含量相对较高（表1）。玉米麸皮和可溶物（CBS）的代谢能（ME）含量分别约为美国含可溶物干酒糟（DDGS）的代谢能（ME）的91%，以及美国高蛋白干酒糟（HP-DDG）和巴西高蛋白干酒糟（HP-DDG）的代谢能的80%和71%。尽管玉米麸皮和可溶物（CBS）的磷含量（0.71%）高于其他玉米副产品，但其磷的标准总肠道消化率（STTD）是所有副产品对照组中最低的（46.4%）（表1）。此外，玉米麸皮和可溶物（CBS）中赖氨酸（Lys）、蛋氨酸（Met）、苏氨酸（Thr）和色氨酸（Trp）的标准回肠消化率（SID）均低于其他玉米副产品。这些结果表明，干玉米麸皮和可溶物（CBS）的代谢能和可消化氨基酸含量显著低于美国生产的传统含可溶物干酒糟（DDGS）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）以及巴西生产的高蛋白干酒糟（HP-DDG）。然而，这种营养特性非常适合用于母猪妊娠期日粮，因为在妊娠期需要限制能量摄入以控制体况，且对可消化氨基酸的需求相对较低。

表1. 美国含可溶物干酒糟（DDGS）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）与巴西高蛋白干酒糟（HP-DDG）和含可溶物干玉米麸皮（CBS）的化学成分对比（以原样基础计；改编自Paula等人，2021年）

指标	美国含可溶物干酒糟（DDGS）	美国高蛋白干酒糟（HP-DDG）	巴西高蛋白干酒糟（HP-DDG）	巴西含可溶物干玉米麸皮（CBS）
干物质（%）	86.08	89.62	92.30	87.59
粗蛋白（%）	26.37 (72)	34.83 (62)	42.93 (67)	13.87 (59)
乙醚提取物（%）	6.40	7.80	10.30	9.00
中性洗涤纤维（%）	36.59	47.48	37.40	39.07
酸性洗涤纤维（%）	14.31	19.81	17.53	13.31
总能（千卡/千克）	4,532	4,915	5,296	4,513
消化能（生猪用）（千卡/千克）	3,134	3,352	4,060	2,843
代谢能（生猪用）（千卡/千克）	2,941	3,116	3,757	2,680
灰分（%）	4.89	3.39	2.81	4.80
钙（%）	0.04	0.02	0.02	0.02
磷（%）	0.68	0.46	0.48	0.71
磷的标准总肠道消化率（%）	62.7	67.6	48.3	46.4
镁（%）	0.28	0.18	0.01	0.33
钠（%）	0.44	0.47	0.09	0.24
钾（%）	1.09	0.63	0.41	1.50
铜（毫克/千克）	14.26	7.9	7.10	7.14
铁（毫克/千克）	59.56	52.1	112.5	87.32
锰（毫克/千克）	12.72	9.00	9.97	16.81
锌（毫克/千克）	63.39	56.40	75.55	61.26
必需氨基酸（%）				
精氨酸	1.10 (84)	1.50 (76)	2.06 (83)	0.69 (74)
组氨酸	0.64 (72)	0.89 (66)	1.26 (76)	0.36 (69)
异亮氨酸	0.98 (67)	1.46 (68)	1.79 (76)	0.46 (65)
亮氨酸	2.90 (74)	4.38 (72)	5.30 (81)	1.20 (72)
赖氨酸	0.73 (55)	1.00 (53)	1.37 (66)	0.40 (46)
蛋氨酸	0.43 (75)	0.54 (75)	0.95 (82)	0.25 (73)
苯丙氨酸	1.21 (72)	1.86 (72)	2.16 (78)	0.54 (64)
苏氨酸	0.95 (68)	1.32 (67)	1.66 (76)	0.51 (54)
色氨酸	0.15 (74)	0.22 (71)	0.23 (73)	0.11 (66)
缬氨酸	1.30 (66)	1.82 (69)	2.37 (76)	0.64 (65)

非必需氨基酸 (%)				
丙氨酸	1.86 (78)	2.65 (72)	3.28 (82)	0.90 (79)
天冬氨酸	2.02 (65)	2.72 (64)	3.29 (73)	1.02 (53)
半胱氨酸	0.59 (70)	0.80 (72)	1.09 (82)	0.34 (59)
谷氨酸	4.34 (75)	6.21 (70)	7.98 (81)	2.03 (69)
甘氨酸	1.08 (94)	1.40 (73)	1.77 (93)	0.66 (80)
脯氨酸	2.14 (59)	3.08 (43)	3.99 (55)	1.08 (52)
丝氨酸	1.20 (66)	1.74 (64)	2.18 (79)	0.61 (63)
酪氨酸	1.09 (69)	1.45 (70)	1.91 (79)	0.49 (62)
氨基酸总量	24.44 (62)	34.76 (65)	44.39 (68)	12.16 (65)
赖氨酸: 粗蛋白	2.77	2.87	3.19	2.88

Anderson等人于2012年和Rochell于2011年开展的早期研究确定了生猪用干玉米麸皮和可溶物（CBS）来源的营养成分、消化能（DE）和代谢能（ME）含量，以及对家禽的氮校正表观代谢能（AMEn）含量（表2）。尽管目前没有针对家禽估算玉米麸皮和可溶物（CBS）氮校正表观代谢能（AMEn）的最新研究，但Anderson等人于2012年确定的生猪用玉米麸皮和可溶物（CBS）的消化能（3,282千卡/千克干物质）和代谢能（3,031千卡/千克干物质）含量与Paula等人于2021年确定的玉米麸皮和可溶物（CBS）消化能（3,246千卡/千克干物质）和代谢能（3,060千卡/千克干物质）含量几乎完全相同。尽管Anderson等人于2012年和Paula等人于2021年研究中玉米麸皮和可溶物（CBS）的氨基酸含量有所不同，但磷（P）含量相似。

表2. 玉米麸皮和可溶物用于生猪和家禽的已发表营养成分值（以干物质基础计）（改编自Anderson等人，2012年，和Rochell等人，2011年）

指标 (%) 以干物质基础计	玉米麸皮+可溶物
干物质	90.82
总能 (千卡/千克)	4,982
消化能 (生猪用) (千卡/千克)	3,282
代谢能 (生猪用) (千卡/千克)	3,031
氮校正表观代谢能 (家禽用) (千卡/千克)	3,030
粗蛋白	34.74
乙醚提取物	9.68
总膳食纤维	26.65
中性洗涤纤维	25.21
酸性洗涤纤维	5.35
灰分	5.31
钙	0.03
磷	0.76
必需氨基酸	
精氨酸	0.77
组氨酸	0.44
异亮氨酸	0.50

亮氨酸	1.30
赖氨酸	0.62
蛋氨酸	0.23
苯丙氨酸	0.55
苏氨酸	0.61
色氨酸	0.09
缬氨酸	0.76
非必需氨基酸	
丙氨酸	1.04
天冬氨酸	1.02
半胱氨酸	0.30
谷氨酸	1.95
甘氨酸	0.77
脯氨酸	1.08
丝氨酸	0.65
酪氨酸	0.41

反刍动物饲喂玉米麸皮和可溶物日粮的试验总结

Garland等人于2019年进行了（A）研究，比较了含玉米（对照组）、20%和40%高蛋白干酒糟（HP-DDG）、40%玉米麸皮和可溶物（CBS）以及40%传统湿酒糟含可溶物（WDGS）和含可溶物干酒糟（DDGS）日粮（占干物质摄入量）的能量和营养消化率。与饲喂玉米的牛相比，饲喂玉米麸皮和可溶物（CBS）导致干物质（DM）和有机物（OM）消化率较低，中性洗涤纤维（NDF）消化率相当，但酸性洗涤纤维（ADF）消化率和消化能更高。玉米麸皮和可溶物（CBS）的干物质和有机物消化率以及消化能与传统湿酒糟含可溶物（WDGS）和含可溶物干酒糟（DDGS）副产品相似。此外，在日粮中添加40%玉米麸皮和可溶物（CBS）的情况下，其干物质、有机物、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维消化率以及消化能与饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）相似。这些结果表明，尽管饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）和玉米麸皮和可溶物（CBS）导致干物质和有机物消化率降低，但当这些副产品添加到日粮中时，能量摄入量增加。此外，玉米麸皮和可溶物（CBS）与湿酒糟含可溶物（WDGS）和含可溶物干酒糟（DDGS）具有相当的饲用价值。

在后续研究中，Garland等人于2019年的（B）研究中比较了饲喂含20%或40%干物质摄入量的湿玉米麸皮和可溶物（CBS）日粮与饲喂含20%或40%干物质摄入量的湿酒糟（WDG）日粮对育肥牛生长性能和胴体特性的影响。随着任一玉米副产品日粮添加比例的增加，采食量和饲料转化率均提高，与饲喂对照组日粮（由高水分干轧玉米组成）相比，饲喂玉米麸皮和可溶物（CBS）或湿酒糟（WDG）日粮的日增重（ADG）更高。这项研究结果表明，按相同日粮添加比例饲喂湿玉米麸皮和可溶物（CBS）与湿酒糟（WDG）可获得相似的生长性能和胴体特性。

Garland等人于2019年的（C）研究还比较了饲喂含40%干物质摄入量的高蛋白干酒糟（HP-DDG）、传统含可溶物干酒糟（DDGS）、湿酒糟含可溶物（WDGS）和湿玉米麸皮和可溶物（CBS）日粮对杂交育肥牛生长性能和胴体特性的影响。各日粮处理组间的采食量无显著差异，但饲喂高蛋白干酒糟（HP-DDG）和湿玉米麸皮和可溶物（CBS）的育肥牛的日增重（ADG）和胴体重量高于饲喂湿酒糟含可溶物（WDGS）

和含可溶物干酒糟（DDGS）日粮的育肥牛。根据本试验中育肥牛的饲料转化率，高蛋白干酒糟（HP-DDG）和湿玉米麸皮和可溶物（CBS）的饲用价值估计分别为玉米的121%和125%。

脱油（溶剂萃取）DDGS

脱油DDGS（商品名为NovaMeal）是一种通过溶剂萃取工艺从DDGS中去除玉米油后所获得的副产品。目前美国市场上的产量仍较有限，但随着美国对可再生柴油中脂肪和油脂需求的持续增长，未来其产量有望增加。目前生产的几乎所有脱油DDGS都用于泌乳期奶牛日粮。因此，关于其营养成分和饲用价值的大多数研究都集中在其对泌乳期奶牛的饲用价值上。

美国饲料管理协会（AAFCO）定义

美国饲料管理协会对脱油玉米含可溶物干酒糟的定义如下：

"27.9 脱油DDGS（溶剂萃取），是从玉米DDGS中通过溶剂萃取后得到的产品，其基于原样的粗脂肪含量低于3%。该产品作为蛋白质来源使用。标签应包括最低粗蛋白和最高硫含量的保证。在制造饲料中作为成分列出时，‘溶剂萃取’字样不是必需的。

反刍动物用脱油DDGS的营养成分

Mjoun等人于2010年（C）研究中评估并比较了传统溶剂萃取豆粕（SBM）、高脂含DDGS、脱油DDGS和高蛋白干酒糟（HP-DDG）在泌乳期荷斯坦奶牛中的营养成分、瘤胃可降解蛋白和瘤胃不降解蛋白以及氨基酸的肠道消化率（表3）。蛋白质慢降解部分的降解速率从豆粕（SBM）的最高11.8%每小时到脱油DDGS的2.7%每小时不等。瘤胃不降解蛋白（RUP）从豆粕（SBM）的32%到脱油DDGS的60%不等。虽然豆粕（SBM）的总消化蛋白高于酒糟副产品，但均超过95%。同样，酒糟副产品中大多数氨基酸的肠道消化率超过92%，略低于豆粕（SBM）（>94%），但赖氨酸消化率除外，酒糟副产品中为84%-87%，而豆粕（SBM）中为96%。肠道可吸收膳食蛋白在脱油DDGS中较高（55%），高于DDGS（48%）和高蛋白干酒糟（HP-DDG）（51%），这些均高于豆粕（SBM）（31%）。这些结果表明，饲喂泌乳期奶牛时，脱油DDGS和其他玉米副产品的蛋白质和氨基酸消化率与豆粕相当。

表3. 泌乳期奶牛中豆粕、DDGS、脱油DDGS和高蛋白干酒糟（HP-DDG）的化学成分、瘤胃可降解和不可降解蛋白及氨基酸肠道消化率对比（改编自Mjoun等人，2010c）

指标（%）以干物质基础计	豆粕	含可溶物干酒糟（DDGS）	脱油DDGS	高蛋白干酒糟（HP-DDG）
干物质	90.2	88.5	87.7	93.2
粗蛋白（粗蛋白（CP））	49.6	30.8	34.0	41.5
可溶性蛋白（占粗蛋白（CP）的百分比）	15.0	14.0	10.9	6.4
瘤胃可降解蛋白（占粗蛋白（CP）的百分比）	68	48	40	46
瘤胃不可降解蛋白（占粗蛋白（CP）的百分比）	32	52	60	54
瘤胃不降解蛋白（RUP）的肠道蛋白质消化率估值（百分比）	97	92	91	94

指标 (%) 以干物质基础计	豆粕	含可溶物干酒糟 (DDGS)	脱油DDGS	高蛋白干酒糟 (HP-DDG)
肠道可吸收膳食蛋白 (占粗蛋白 (CP) 的百分比)	31	48	55	51
总消化膳食蛋白 (占粗蛋白 (CP) 的百分比)	99	96	95	97
中性洗涤不溶性粗蛋白 (NDICP) (占粗蛋白 (CP) 的百分比)	3.4	9.1	19.7	10.1
酸性洗涤不溶性粗蛋白 (ADICP) (占粗蛋白 (CP) 的百分比)	3.2	8.8	13.2	9.9
中性洗涤纤维 (NDF)	12.0	31.5	42.5	30.4
酸性洗涤纤维 (ADF)	6.2	9.4	12.4	10.5
乙醚提取物	1.1	10.6	3.5	3.2
淀粉	2.0	8.9	5.1	8.3
非纤维碳水化合物 (NFC)	29.9	22.7	14.7	22.5
灰分	7.4	4.4	5.3	2.4
钙	0.70	0.06	0.07	0.06
磷	0.73	0.75	0.77	0.51
镁	0.33	0.32	0.34	0.16
钾	2.34	0.92	0.93	0.53
硫	0.42	0.62	0.74	0.79
必需氨基酸 (克/千克粗蛋白 (CP) ¹⁾)				
精氨酸	71.0 [85] (99)	47.4 [66] (93)	46.9 [59] (93)	37.1 [57] (93)
组氨酸	27.9 [87] (96)	30.0 [71] (93)	30.5 [65] (93)	27.7 [68] (93)
异亮氨酸	48.0 [84] (98)	40.4 [65] (93)	43.1 [59] (93)	41.8 [56] (93)
亮氨酸	79.7 [84] (98)	117.4 [59] (96)	125.3 [50] (96)	135.3 [51] (96)
赖氨酸	64.7 [86] (96)	34.8 [77] (84)	32.2 [69] (86)	29.5 [70] (87)
蛋氨酸	14.3 [82] (94)	20.4 [55] (95)	19.9 [37] (95)	20.4 [48] (94)
苯丙氨酸	50.2 [84] (98)	45.2 [53] (95)	47.3 [45] (95)	50.9 [49] (95)
苏氨酸	38.2 [83] (98)	37.8 [63] (88)	38.0 [51] (90)	36.5 [56] (91)
色氨酸	50.0 [83] (97)	53.0 [67] (92)	53.4 [60] (92)	51.4 [59] (92)
必需氨基酸 (克/千克粗蛋白 (CP))				
丙氨酸	43.3	69.3	71.2	73.1
天冬氨酸	114.3	63.7	68.5	65.0
半胱氨酸	14.7	19.3	18.1	18.3
谷氨酸	149.9	130.4	143.8	160.8
甘氨酸	42.9	41.1	41.1	32.6
脯氨酸	47.8	86.3	74.3	88.0
丝氨酸	43.3	40.7	43.1	43.6

指标 (%) 以干物质基础计	豆粕	含可溶物干酒糟 (DDGS)	脱油DDGS	高蛋白干酒糟 (HP-DDG)
总氨基酸	918.1 [84]	877.0	896.9	912.0

[]中的值为必需氨基酸的瘤胃降解率 (%), ()中的值为来自瘤胃不降解蛋白 (RUP) 的必需氨基酸肠道消化率 (%)

生猪用脱油DDGS的营养成分

Jacela等人于2011年和Anderson等人于2012年已有两项研究确定了生猪用脱油DDGS的消化能 (DE) 和代谢能 (ME) 含量, 以及Jacela等人于2011年进行的一项研究评估了氨基酸的标准回肠消化率 (表4)。尽管这些研究中评估的脱油DDGS来源的总能有可比性, 但Anderson等人于2012年直接测定的消化能 (DE) 和代谢能 (ME) 含量远高于Jacela等人于2011年测定的体内消化能 (DE) 含量和计算的代谢能 (ME) 含量。Jacela等人于2011年使用Noblet和Perez于1993年, 以及Noblet等人于1994年的方程分别估计了脱油DDGS的代谢能 (ME) 和净能 (NE) 含量, 但这种方法的准确性不高, 因为该方程是为饲料而非单一原料而制定。总之, 脱油DDGS的消化能和代谢能值与近期研究中获得的低油DDGS的值相当 (Paula等人, 2021; Yang等人, 2021)。Jacela等人于2011年确定的氨基酸标准回肠消化率系数也与近期研究中观察到的低油DDGS来源相当 (Paula等人于2021年; Yang等人于2021年), 但目前尚无生猪用脱油DDGS中磷的标准总肠道消化率 (STTD) 估计值。

表4. 已发表的生猪用脱油DDGS营养成分数据

指标 (%) 以干物质基础计	脱油DDGS (Jacela等人, 2011年)	脱油DDGS (Anderson等人, 2012年)
干物质	87.69	87.36
总能 (千卡/千克)	5,098	5,076
消化能 (千卡/千克)	3,100	3,868
代谢能 (千卡/千克)	2,858 ¹	3,650
净能 (千卡/千克)	2,045 ²	-
粗蛋白	35.58	34.74
乙醚提取物	4.56	3.15
总膳食纤维 (TDF)	-	37.20
中性洗涤纤维 (NDF)	39.46	50.96
酸性洗涤纤维 (ADF)	18.36	15.82
灰分	5.29	5.16
钙	0.06	0.08
磷	0.87	0.84
必需氨基酸		
精氨酸	1.50 (83) ³	1.44
组氨酸	0.93 (75)	0.89
异亮氨酸	1.38 (75)	1.25
亮氨酸	4.15 (84)	4.12
赖氨酸	0.99 (50)	1.00
蛋氨酸	0.67 (80)	0.64

指标 (%) 以干物质基础计	脱油DDGS (Jacela等人, 2011年)	脱油DDGS (Anderson等人, 2012年)
苯丙氨酸	1.92 (81)	1.51
苏氨酸	1.26 (69)	1.26
色氨酸	0.22 (78)	0.18
缬氨酸	1.75 (74)	1.76
非必需氨基酸		
丙氨酸	2.43 (79)	2.48
天冬氨酸	2.10 (65)	2.19
半胱氨酸	0.62 (67)	0.61
谷氨酸	4.85 (79)	5.43
甘氨酸	1.35 (65)	1.39
脯氨酸	2.41 (88)	2.54
丝氨酸	1.48 (77)	1.58
酪氨酸	1.29 (82)	1.22

¹计算公式：代谢能 (ME) = 1 × 消化能 (DE) - 0.68 × 粗蛋白 (CP) (Noblet和Perez, 1993年)。

²计算公式：净能 (NE) = (0.87 × 代谢能 (ME)) - 442 (Noblet等人, 1994年)

³括号内数值为每种氨基酸的标准回肠消化系数。

家禽用脱油DDGS的营养成分

Rochell等人于2011年测定肉鸡饲料中氮校正表观代谢能 (AMEn) 含量时, 使用的也是Anderson等人于2012年评估生猪用饲料时所用的同一种脱油DDGS来源。因此, 表4中显示的脱油DDGS的营养成分, 代表的是同一种脱油DDGS来源, 其家禽氮校正表观代谢能 (AMEn) 含量为2,146千卡/千克 (Rochell等人, 2011年)。

泌乳期奶牛饲喂脱油DDGS日粮的试验总结

Mjoun等人于2010年开展了一项为期8周的饲喂试验 (A) 研究, 旨在确定泌乳中期荷斯坦奶牛日粮中脱油DDGS的最佳添加水平。试验设计了四组日粮, 分别以含0%、10%、20%和30%的脱油DDGS, 用于替代以干物质计的豆科基原料。研究结果显示, 不同添加率的脱油DDGS对奶牛干物质摄入量和产奶量无显著影响 (表5)。随着日粮中脱油DDGS添加率的增加, 乳脂百分比和产量呈线性增长, 而乳蛋白浓度则呈二次曲线变化, 但脱油DDGS添加率的增加对乳蛋白产量无影响。产奶效率有线性增长的趋势, 但氮素转化为乳蛋白的利用效率不受日粮中脱油DDGS含量增加的影响。这些结果表明, 泌乳期奶牛日粮中添加高达30%的脱油DDGS, 其生产性能与饲喂含豆基副产品作为蛋白质和能量来源的对照组日粮相当。

表5.泌乳中期奶牛日粮中分别添加0%、10%、20%和30%脱油DDGS替代豆粕饲料原料的干物质摄入量、产奶量和乳成分对比（Mjoun等人，2010a）

指标	日粮中脱油DDGS添加比例（干物质摄入量）			
	0%	10%	20%	30%
体重（千克）	705	713	721	710
体重变化（克/天）	-167	15	230	-36
体况评分 ¹	3.56	3.37	3.36	3.53
净能摄入量 ² （兆卡/天）	34.7	37.0	38.3	35.2
维持净能 ³ （兆卡/天）	10.9	11.2	11.0	11.0
泌乳所需净能 ⁴ （兆卡/天）	22.6	24.0	24.7	25.0
能量平衡 ⁵ （兆卡/天）	3.18	1.60	2.80	-0.81
能量效率 ⁶	64.6	66.8	64.2	71.2
干物质摄入量（千克/天）	22.7	23.0	23.7	22.2
粗蛋白摄入量（千克/天）	4.0	4.1	4.2	4.0
产奶量（千克/天）	34.5	34.8	35.5	35.2
能量校正产奶量 ⁷ （千克/天）	32.6	34.6	35.6	36.0
脂肪校正产奶量 ⁸ （千克/天）	30.0	31.7	32.1	33.1
饲料效率 ⁹	1.47	1.53	1.49	1.61
氮效率 ¹⁰	25.5	27.0	25.8	26.0
乳成分				
脂肪（%）	3.18	3.40	3.46	3.72
脂肪产量（千克/天）	1.08	1.19	1.23	1.32
蛋白质、灰分（%）	2.99	3.06	3.13	2.99
蛋白质产量（千克/天）	1.03	1.07	1.10	1.06
乳糖（%）	4.95	4.96	4.94	5.06
乳糖产量（千克/天）	1.71	1.74	1.75	1.76
总固体量（%）	12.10	12.39	12.40	12.67
总固体量（千克/天）	4.15	4.35	4.43	4.45

¹体况评分：1=消瘦，5=肥胖

²净能摄入量=泌乳所需净能（兆卡/千克）×干物质摄入量（千克/天）

³维持净能=体重^{0.75}×0.08

⁴泌乳所需净能=产奶量（千克）×[(0.0929×脂肪%)+(0.0563×蛋白质%)+(0.0395×乳糖%)]

⁵能量平衡=净能摄入量-(维持净能+泌乳净能)

⁶能量效率=泌乳净能/净能摄入量

⁷能量校正产奶量=[0.327×产奶量（千克）]+[12.95×脂肪产量（千克）]+[7.2×蛋白质产量（千克）]

⁸脂肪校正产奶量=[0.4×产奶量（千克）]+[15×脂肪产量（千克）]

⁹饲料效率=能量校正产奶量/干物质摄入量

¹⁰氮效率=乳氮（千克/天）/氮摄入量（千克/天）

Mjoun等人于2010年（B）研究中还比较了饲喂不含酒糟副产品（含豆粕、压榨豆粕和豆皮的对照组）、22%传统含可溶物干酒糟（DDGS）或20%脱油DDGS日粮在泌乳期早期奶牛在为期14周试验中的泌乳反应。日粮配方中粗蛋白（CP）、乙醚提取物、中性洗涤纤维（NDF）和泌乳净能浓度相似。各日粮处理组间奶牛的体重、体重变化、体况评分、干物质（DM）摄入量、产奶量、乳脂肪和乳糖含量无显著差异（表6）。然而，饲喂含可溶物干酒糟（DDGS）和脱油DDGS日粮的奶牛的乳蛋白浓度和产量相似，但均高于饲喂对照组日粮的奶牛。与饲喂对照组日粮的奶牛相比，饲喂含可溶物干酒糟（DDGS）和脱油DDGS日粮的奶牛的饲料效率往往更高，氮效率更高。这些结果表明，与饲喂豆类基础日粮相比，给泌乳期早期奶牛饲喂含20%脱油DDGS的日粮可获得相同或更好的泌乳性能和乳成分。

表6.泌乳期早期奶牛日粮中添加含大豆产品（对照组）、22%含可溶物干酒糟（DDGS）和20%脱油DDGS的产奶量、乳成分和营养效率对比（Mjoun等人，2010b）

指标	对照组	22% DDGS	20%脱油DDGS
初始体重（千克）	693	682	660
最终体重（千克）	734	722	704
体重变化（千克/天）	0.47	0.47	0.53
体况评分 ¹	3.43	3.32	3.34
净能摄入量 ² （兆卡/天）	41.3	40.1	40.3
维持净能 ³ （兆卡/天）	11.0	11.0	11.0
泌乳所需净能 ⁴ （兆卡/天）	26.4	26.5	27.4
能量平衡 ⁵ （兆卡/天）	4.39	1.98	1.98
能量效率 ⁶	63.1	66.9	68.1
干物质摄入量（千克/天）	24.8	24.7	24.6
粗蛋白摄入量（千克/天）	4.3	4.3	4.3
产奶量（千克/天）	39.2	38.9	39.8
能量校正产奶量 ⁷ （千克/天）	38.0	37.8	39.5
脂肪校正产奶量 ⁸ （千克/天）	35.7	35.3	37.1
饲料效率 ⁹	1.50	1.57	1.61
氮效率 ¹⁰	24.5 ^b	26.9 ^a	26.5 ^a
乳成分			
脂肪（%）	3.63	3.24	3.57
脂肪产量（千克/天）	1.33	1.34	1.40
蛋白质（%）	2.82 ^b	2.88 ^a	2.89 ^a
蛋白质产量（千克/天）	1.07 ^b	1.15 ^a	1.14 ^a
乳糖（%）	4.90	4.99	4.96
乳糖产量（千克/天）	1.94	1.94	1.96
总固体量（%）	12.3	12.0	12.4
总固体量（千克/天）	4.73	4.70	4.90

¹体况评分：1 = 消瘦5 = 肥胖

²泌乳所需净能（兆卡/千克）×干物质摄入量（千克/天）

³维持净能 = 体重^{0.75} × 0.08

⁴泌乳所需净能 = 产奶量（千克）× [(0.0929 × 脂肪 %) + (0.0563 × 蛋白质 %) + (0.0395 × 乳糖 %)]

⁵能量平衡 = 净能摄入 - (维持净能 + 泌乳净能)

⁶能量效率 = 泌乳净能/净能摄入量

⁷能量校正产奶量 = [0.327 × 产奶量（千克）] + [12.95 × 脂肪产量（千克）] + [7.2 × 蛋白质产量（千克）]

⁸脂肪校正产奶量 = [0.4 × 产奶量（千克）] + [15 × 脂肪产量（千克）]

⁹饲料效率 = 能量校正产奶量/干物质摄入量

¹⁰氮效率 = 乳氮（千克/天）/氮摄入量（千克/天）

^{a,b} 同一行中不含相同上标的均值存在差异（P<0.05）

评估脱油DDGS在保育猪和生长育肥猪日粮中应用效果的饲喂试验总结，Jacela等人于2011年进行了两项饲喂试验，评估在初始体重为9.9千克的仔猪日粮中分别添加不同含量（0%、5%、10%、20%和30%）脱油DDGS饲喂28天对其生长性能的影响（表7），以及对初始体重为30千克的生长育肥猪饲喂99天对其生长性能和胴体特性的影响（表8）。日粮配方保持等代谢能（ME）含量，通过随着脱油DDGS含量的增加而增加豆油添加量，以及基于先前实验获得的测定值保持等标准回肠消化（SID）赖氨酸含量。在生长育肥试验期间，采用了4阶段饲喂方案。如表7所示，各日粮处理组之间的仔猪生长性能无差异，表明当通过豆油补充能量以维持日粮代谢能密度时，饲喂含高达30%脱油DDGS的日粮可为仔猪提供可接受的生长性能。然而，增加生长育肥猪日粮中的脱油DDGS含量导致猪的日增重（ADG）、日采食量（ADFI）、胴体重量和胴体产率线性下降（表8）。但随着脱油DDGS在日粮中添加比例的增加，增重效率有改善趋势，对胴体背膘厚度、瘦肉率和无脂瘦肉指数无影响（表8）。目前尚不清楚为什么在生长育肥试验期间，日增重和日采食量出现降低的情况，而在仔猪试验期间（通常更容易观察到这些负面反应）却未出现类似情况。

表7. 仔猪日粮中添加不同添加率的脱油DDGS对仔猪在28天饲喂期间生长性能的影响（改编自Jacela等人，2011年）

指标	日粮中脱油DDGS添加比例				
	0%	5%	10%	20%	30%
初始体重（千克）	10.0	10.0	9.6	9.9	9.9
最终体重（千克）	22.7	22.8	22.2	22.4	22.3
日增重（千克）	0.455	0.459	0.452	0.445	0.442
日采食量（千克）	0.749	0.771	0.760	0.751	0.761
增重效率	0.609	0.595	0.594	0.593	0.582

表8. 生长育肥猪日粮中添加不同添加率的脱油DDGS对生长育肥猪在99天饲喂期间生长性能和胴体特性的影响（改编自Jacela等人，2011年）

指标	日粮中脱油DDGS添加比例				
	0%	5%	10%	20%	30%
初始体重（千克）	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6
最终体重 ¹ （千克）	121.4	119.3	118.8	118.2	116.2
日增重 ¹ （千克）	0.909	0.893	0.887	0.887	0.873
日采食量 ¹ （千克）	2.16	2.17	2.11	2.11	2.04
增重效率 ²	0.420	0.413	0.422	0.421	0.431
胴体重 ¹ （千克）	91.1	89.0	89.1	87.7	86.3

指标	日粮中脱油DDGS添加比例				
	0%	5%	10%	20%	30%
胴体率 ¹ (%)	75.5	75.0	75.0	74.7	74.3
背膘厚度 (毫米)	16.46	16.53	16.53	16.38	16.96
背最长肌厚度 ³ (毫米)	63.5	62.2	62.5	63.0	60.7
胴体瘦肉 (%)	56.48	55.91	56.30	56.43	55.78
胴体无脂瘦肉指数	50.4	50.4	50.4	50.5	50.2

¹随着脱油DDGS日粮水平增加，线性降低（ $P < 0.01$ ）

²随着脱油DDGS日粮水平增加，线性改善趋势（ $P < 0.10$ ）

³随着脱油DDGS日粮水平增加，线性降低趋势（ $P < 0.10$ ）

玉米酒糟油

美国饲料管理协会（AAFCO）定义

美国饲料管理协会（AAFCO）对玉米酒糟油（CDO）的定义如下：

“33.10 酒糟油（饲料级），是在酵母发酵谷物或谷物混合物后，通过蒸馏除去乙醇，并采用乙醇生产行业使用的机械或溶剂萃取方法提取油脂而获得的产品。它主要由脂肪酸的甘油酯组成，不含来自脂肪的游离脂肪酸或其他物质的添加。它必须含有并保证不少于85%的总脂肪酸，不超过2.5%的不皂化物，以及不超过1%的不溶性杂质，并且需要保证最大游离脂肪酸和水分含量。如果使用抗氧化剂，必须标明通用名称，后面标注‘用作防腐剂’。如果产品带有描述其种类或来源的名称，即‘玉米、高粱、大麦、黑麦’，则必须相应声明占主导地位的谷物作为名称中的第一个词。”（于2015年提出，2016年修订1版通过）。

玉米酒糟油（CDO）由美国乙醇行业大量生产，用于可再生柴油生产以及作为生猪和家禽日粮中的补充能源。

玉米酒糟油（CDO）的代谢能（ME）含量与原脱胶大豆油相当，这是由于其含有高浓度的多不饱和脂肪酸（PUFA），特别是亚油酸。由于玉米酒糟油（CDO）中含有高浓度的多不饱和脂肪酸（PUFA），当其暴露于热处理、氧气和过渡金属（铜和铁）时，极易氧化。因此，有必要添加抗氧化剂以防止运输和储存过程中的氧化，因为氧化脂质添加到日粮中会对生猪和肉鸡的健康和生长性能产生不良影响（Hung等人，2017年）。此外，在玉米-豆粕育肥猪日粮中添加玉米酒糟油（CDO）会增加猪胴体脂肪中的多不饱和脂肪酸（PUFA）含量，从而降低肉质硬度和质保期稳定性。

玉米酒糟油的化学成分

与精制玉米油相比，玉米酒糟油（CDO）的一个显著特点是其游离脂肪酸（FFA）含量较高（表9），范围可从低于2%游离脂肪酸到高达18%游离脂肪酸。先前评估各种饲料脂质的研究表明，游离脂肪酸含量增加会降低生猪和家禽的代谢能（ME）含量，因而催生了有关生猪的消化能（DE）和家禽的氮校正表观代谢能（AMEn）的预测方程（Wiseman等人，1998年）。玉米油因其相对较高的多不饱和脂肪酸（PUFA）含量而与其他脂质来源区分开来，特别是油酸（9c-18:1；总脂质的28%~30%）和亚油酸（18:2n-6；总脂质的53%~55%）含量。植物油比动物脂肪具有更高的多不饱和脂肪酸（PUFA）含量，这导致植物油具有更高的代谢能（ME）含量（Kerr等人，2015年）。因此，玉米酒糟油（CDO）含有所有饲料脂肪和油脂中最高的代谢能（ME）浓度之一，但也更容易受到过氧化作用的影响（Kerr等人，2015年；Shurson

等人，2015年；Hanson等人，2015年）。研究表明，饲喂过氧化脂质会降低生猪和肉鸡的生长速率、采食量和增重效率（Hung等人，2017年），高度过氧化的玉米油会降低仔猪的能量利用效率和抗氧化状态（Hanson等人，2016年）。然而，在高温高湿条件下存储时，向玉米酒糟油添加市售抗氧化剂可有效减少玉米酒糟油（CDO）的过氧化（Hanson等人，2015年）。尽管玉米酒糟油（CDO）的过氧化程度（过氧化值、茴香胺值和己醛）略高于精制玉米油，但远低于Hanson等人于2016年在仔猪研究中饲喂的过氧化玉米油，且在该研究中观察到生长性能下降。

表9. 精制玉米油和玉米酒糟油（CDO）来源的化学成分和过氧化指标（改编自Kerr等人，2016年）

指标	精制玉米油	玉米酒糟油（CDO） (4.9%游离脂肪酸 ¹)	玉米酒糟油（CDO） (12.8%游离脂肪酸)	玉米酒糟油（CDO） (13.9%游离脂肪酸)
水分（%）	0.02	1.40	2.19	1.19
不溶物（%）	0.78	0.40	1.08	0.97
不皂化物（%）	0.73	0.11	0.67	0.09
乙醚提取物（%）	99.68	99.62	98.96	99.63
游离脂肪酸（%）	0.04	4.9	12.8	13.9
脂肪酸（占总脂质的百分比）				
棕榈酸(16:0)	11.39	13.20	11.87	13.20
棕榈油酸(9c-16:1)	0.10	0.11	0.11	0.11
十七烷酸(17:0)	0.07	0.07	0.07	0.07
硬脂酸(18:0)	1.83	1.97	1.95	1.97
油酸(9c-18:1)	29.90	28.26	28.92	28.26
亚油酸(18:2n-6)	54.57	53.11	54.91	53.11
亚麻酸(18:3n-3)	0.97	1.32	1.23	1.32
十九烷酸(19:0)	未检测到 ²	0.65	0.65	0.65
花生酸(20:0)	0.40	0.39	0.39	0.39
二十碳烯酸(20:1n-9)	0.25	0.24	0.24	0.24
山嵛酸(22:0)	0.13	0.13	0.12	0.13
木酯酸(24:0)	0.17	0.19	0.18	0.19
其他脂肪酸	0.21	0.41	未检测到	0.41
过氧化指标				
过氧化值（毫克当量/千克）	1.9	2.9	3.3	2.0
茴香胺值 ³	17.6	80.9	70.3	73.3
己醛（微克/克）	2.3	4.4	3.9	4.9

¹FFA = 游离脂肪酸

²ND = 未检测到

³茴香胺值无单位。

生猪和家禽用玉米酒糟油的代谢能含量

Kerr等人于2016年测定了精制玉米油（0.04%游离脂肪酸）和3种商业化生产的玉米酒糟油（CDO）（游离脂肪酸含量范围为4.9%至13.9%）在生猪日粮中的消化能（DE）和代谢能（ME）含量，以及相同来源在肉鸡日粮中的氮校正表观代谢能（AMEn）含量。如表10所示，玉米酒糟油（CDO）样品的代谢能（生猪用）含量范围为8,036至8,828千卡/千克，其中4.9%游离脂肪酸玉米酒糟油（CDO）样品的代谢能含量与精制玉米油相似。精制玉米油（8,741千卡/千克）、4.9%游离脂肪酸玉米酒糟油（CDO）（8,691千卡/千克）和13.9%游离脂肪酸玉米酒糟油（CDO）（8,397千卡/千克）的代谢能值与NRC（2012）报告的玉米油代谢能值8,570千卡/千克相似。除了12.8%游离脂肪酸玉米酒糟油（CDO）来源具有所有来源中最低的代谢能含量外，游离脂肪酸含量对生猪用玉米酒糟油（CDO）的消化能或代谢能含量没有显著的不利影响。对于肉鸡，各玉米酒糟油（CDO）来源之间的氮校正表观代谢能含量没有差异，范围为7,694~8,036千卡/千克（表10），与精制玉米油的氮校正表观代谢能含量（8,072千卡/千克）无差异。然而，这些值显著低于NRC（1994）报告的精制玉米油的氮校正表观代谢能值（9,639~10,811千卡/千克）。饲喂不同游离脂肪酸含量的玉米酒糟油（CDO）来源的仔猪或肉鸡的乙醚提取物消化率没有差异。Kerr等人于2016年还报告，使用Wiseman等人于1998年提出的方程过高估计了精制玉米油和12.8%及13.9%游离脂肪酸玉米酒糟油（CDO）来源的消化能（生猪用）含量，但对4.9%游离脂肪酸玉米酒糟油（CDO）来源的消化能含量提供了相似的估计。然而，这些方程对所有玉米油来源的肉鸡氮校正表观代谢能含量高估了379~659千卡/千克。这些结果表明，需要开发更准确且针对生猪和肉鸡玉米酒糟油（CDO）的新消化能和氮校正表观代谢能的预测方程，但也表明含有高达14%游离脂肪酸的玉米酒糟油（CDO）可以作为生猪和肉鸡日粮中的优质补充能源。

表10.不同游离脂肪酸（FFA）含量的精制玉米油和玉米酒糟油（CDO）对仔猪和肉鸡的消化能（DE）和代谢能（ME）含量对比（改编自Kerr等人，2016年）

指标	精制玉米油	玉米酒糟油（CDO） （4.9%游离脂肪酸 ¹ ）	玉米酒糟油（CDO） （12.8%游离脂肪酸）	玉米酒糟油（CDO） （13.9%游离脂肪酸）
总能（千卡/千克）	9,423	9,395	9,263	9,374
消化能（生猪用）（千卡/千克）	8,814 ^a	8,828 ^a	8,036 ^b	8,465 ^{ab}
代谢能（生猪用）（千卡/千克）	8,741 ^a	8,691 ^a	7,976 ^b	8,397 ^{ab}
乙醚提取物 ² 消化率（生猪用）（%）	93.2	94.0	91.7	95.0
³ 氮校正表观代谢能（家禽用）（千卡/千克）	8,072	7,936	8,036	7,694
乙醚提取物消化率（家禽用）（%）	91.6	89.8	89.0	88.4
不饱和脂肪酸：饱和脂肪酸 ⁴	6.13	5.00	5.61	5.00

^{a,b}同一行中上标不同的字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）

¹FFA = 游离脂肪酸

²EE = 乙醚提取物

³AMEn = 氮校正表观代谢能

⁴UFA = 不饱和脂肪酸；SFA = 饱和脂肪酸

结论

玉米麸皮和可溶物目前以湿态形式由有限数量的乙醇工厂生产，历史上仅在育肥期肉牛日粮中作为能量来源使用，以替代玉米副产品、高水分玉米和干轧玉米。干玉米麸皮和可溶物（CBS）具有较低的运输成本，可为更广泛的反刍动物日粮提供使用机会，包括奶牛日粮。若生产并提供大量干燥玉米麸皮和可溶物，其相对较低的代谢能和可消化氨基酸含量在生猪和家禽日粮中的饲用价值将有限。干脱油（溶剂萃取）含可溶物干酒糟（DDGS）生产数量有限，并以NovaMeal品牌名称销售。脱油DDGS最适合用于泌乳期奶牛日粮，可占干物质摄入量的20%，与饲喂以大豆为基础的日粮相比，可提高产奶量和乳成分。虽然研究表明脱油DDGS可添加到仔猪日粮中以保证较好的生长性能，但在生长育肥猪日粮中使用，则需要补充日粮能量和可消化氨基酸，以实现最佳生长性能。玉米酒糟油（CDO）是生猪和家禽日粮中优质的补充能源。玉米酒糟油（CDO）的游离脂肪酸含量可高达14%，几乎不影响其对生猪的代谢能含量，但这种游离脂肪酸浓度似乎降低了玉米酒糟油（CDO）对肉鸡的代谢能含量。然而，鉴于美国可再生柴油生产对饲料脂肪和油脂的巨大需求，未来玉米酒糟油（CDO）在出口市场的供应量可能有限。

参考文献

- AAFCO. 2020. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.
- Anderson, P.V., B.J. Kerr, T.E. Weber, C.J. Ziemer, and G.C. Shurson. 2012. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.
- Garland, S.A., M.L. Jolly-Breithaupt, H.C. Hamilton, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019a. Evaluation of the energy value and nutrient digestibility of distillers grains that have undergone a fiber separation process in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1019, p. 94-96. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1019>
- Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019b. Evaluation of corn bran plus solubles on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1020, p. 91-93. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1020>
- Garland, S.A., B.M. Boyd, F.H. Hilscher, G.E. Erickson, J.C. MacDonald, and R.A. Mass. 2019c. Evaluation of fractionated distillers grains (high protein and bran plus solubles) on performance and carcass characteristics in finishing diets. *Nebraska Beef Cattle Reports*, 1021, p. 88-90. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1021>
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251-261.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070-4078.
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Jacela, J.Y., J.M. DeRouche, S.S. Dritz, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J.L. Nelssen, R.C. Sulabo, R.C. Thaler, L. Brandts, D.E. Little, and K.J. Prusa. 2011. Amino acid digestibility and energy content of deoiled (solvent extracted) corn distillers dried grains with solubles for swine and effects on growth performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 89:1817-1829. doi:10.2527/jas.2010-3097
- Jacela, J.Y., H.L. Frobose, J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88:3617-3623.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2016. Lipid digestibility and energy content of distillers' corn oil in swine and poultry. *J. Anim. Sci.* 94:2900-2908.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010a. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288-303. doi:10.3168/jds.2009-2377
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176-3191. doi:10.3168/jds.2009-2974

Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2010c. Ruminant degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144-4154. doi:10.3168/jds.2009-2883

Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D.J. Schingoethe. 2009. In situ ruminal degradability and intestinal digestibility of protein in soybean and dried distillers grains with solubles products. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 84.

Noblet, J., H. Fortune, X.S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86:2180-2189.

Noblet, J., and J.M. Perez. 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pig diets from chemical analysis. *J. Anim. Sci.* 71:3389-3398.

NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*, 11th rev. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
Paula, V.R.C., N.C. Milani, C.P.F. Azevedo, A.A., Sedano, L.J. Souza, B.P. Mike, G.C. Shurson, and U.S. Ruiz. 2021. Comparison of digestible and metabolizable energy and digestible phosphorus and amino acid content of corn ethanol coproducts from Brazil and the United States produced using fiber separation technology for swine. *J. Anim. Sci.* 99:1-13. doi:10.1093/jas/skab126

Rochell, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier, III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999-2007. doi:10.3382/ps.2011-01468

Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.

Wiseman, J., J. Powles, and F. Salvador. 1998. Comparison between pigs and poultry in the prediction of dietary energy value of fats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 71:1-9.

Yang, Z., A. Palowski, J.-C. Jang, P.E. Urriola, and G.C. Shurson. 2021. Determination, comparison, and prediction of digestible energy, metabolizable energy, and standardized ileal digestibility of amino acids in novel maize co-products and conventional dried distillers grains with solubles for swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 282:115149. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115149>



构建全球专业网络，推动美国谷物及乙醇的全球市场拓展

总部

20001华盛顿特区西北街20号900

电话:202-789-0789 传真:202-898-0522

邮箱:grains@grains.org 网站:grains.org

美国谷物协会北京办事处

扫描二维码，关注美国谷物协会微信公众号
或搜索微信公众号：USGC CHINA

