

# 2005–2019 年美国玉米乙醇行业的回顾性分析：对温室气体减排的影响

李义湘, 权和永, 梅. 吴, 迈克尔. 王, 系统评估中心, 能源系统部, 阿贡国家实验室, 莱蒙特, 伊利诺伊州, 美国

收件日期: 2021 年 2 月 22 日, 修改日期: 2021 年 3 月 31 日; 接受日期: 2021 年 4 月 1 日; 在线阅读请至威利在线图书馆 ([wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)); DOI: 10.1002/bbb.2225; *Biofuels. Bioprod. Bioref.* (2021)

## 摘要

自 2000 年以来, 在生物燃料政策的支持下, 美国的玉米乙醇产量大幅增加—从 16 亿到 150 亿加仑 (61 亿至 570 亿升)。在这项研究中, 我们对 2005 年至 2019 年 15 年间美国玉米乙醇的温室气体排放强度 (有时称为碳强度 (CI)) 的变化进行了回顾性分析。我们的分析表明, 玉米乙醇的碳强度明显下降: 从 58gCO<sub>2</sub>e/MJ 降至 45 克 CO<sub>2</sub>e/MJ (下降了 23%)。这个结果是多个因素造成的。玉米籽粒产量持续增加, 达到 168 蒲式耳/英亩 (10.5 吨/公顷, 增加了 15%), 而每英亩的化肥投入保持不变, 导致化肥摄取强度下降 (例如, 每蒲式耳收获的玉米籽粒氮和钾肥用量分别减少了 7% 和 18%)。乙醇产量增加了 6.5%, 从 2.70 加仑/蒲式耳玉米增加到 2.86 加仑/蒲式耳玉米 (0.402 到 0.427 升/公斤<sup>-1</sup> 玉米), 乙醇生产厂的能源消耗减少了 24%, 从 32,000 到 25,000 英热单位/加仑乙醇 (9.0 到 6.9 MJ L<sup>-1</sup> 乙醇), 这也有助于碳强度的降低。从 2005 年到 2019 年, 通过降低碳强度和增加乙醇产量, 估计乙醇行业的温室气体减排效益为 1.4 亿吨 (MMT)。在运输燃料市场上用玉米乙醇取代石油汽油, 在 2005 年至 2019 年期间, 总的温室气体减排效益为 5.44 亿吨二氧化碳当量。© 2021 年阿贡国家实验室, 生物燃料、生物产品和生物精炼, 由工业化学学会和约翰-威利父子有限公司出版。

支持信息见本文的在线版本。

关键字：玉米乙醇；碳强度；生命周期分析；温室气体排放；油井到车轮

---

通讯作者：, 李义湘, 系统评估中心, 能源系统部, 阿贡国家实验室, 南卡斯大街 9700 号, 莱蒙特, 伊利诺伊州 60439, 美国. 电子邮件: ulee@anl.gov

© 2021 年阿贡国家实验室, 生物燃料、生物产品和生物精炼, 由工业化学学会和约翰-威利父子公司出版。

这是一篇开放性文章, 符合知识共享署名-非商业性-无偿使用许可协议的条款, 允许在任何媒体上使用和传播, 但必须正确引用原作, 用于非商业性用途, 且不做任何修改或改编。

---

## 引言

玉米乙醇在提高能源安全和农业经济方面发挥着重要作用, 同时为美国交通部门的去碳化做出贡献。2019 年, 乙醇占美国汽油市场份额的 10% 以上<sup>1</sup>。在美国环境保护署 (EPA) 的可再生燃料标准 (RFS) 和加州低碳燃料标准

(LCFS) 等支持性生物燃料政策的帮助下, 美国的玉米乙醇产量已从 2000 年的 16 亿加仑/年 (61 亿升/年) 增加到 2012 年的 150 亿加仑/年 (570 亿升/年)

<sup>2</sup>。

可再生燃料标准 (RFS) 和加州低碳燃料标准 (LCFS) 计划评估燃料生产路径的生命周期温室气体 (GHG) 排放, 以对使用可再生燃料的温室气体减排效益进行量化。生命周期分析 (LCA) 用于量化燃料的生命周期温室气体排放, 该标准比较不同燃料生产途径的相对温室气体排放影响。可再生燃料标准 (RFS) 和加州的低碳燃料标准 (LCFS) 在整个生命周期的基础上评估燃料的温室气体排放。这些生命周期的温室气体排放有时被称为燃料的碳强度 (CI)。例如, 可再生燃料标准将玉米乙醇的生产路径归为 D6 类, 这意味着其生命周期温室气体排放将比基准汽油的排放低 20%。<sup>3</sup> 另一方面, 加州的低碳燃料标准对每一种可

再生燃料生产路径的碳强度进行评估，以估计取代石油燃料后实际减少的温室气体排放。例如，Rosenfeld 等人<sup>4</sup>提出，在 2019 年第一季度，经低碳燃料标准认证的乙醇生产路径的平均碳强度为 66 gCO<sub>2</sub>e/MJ，其中包括了土地用途变更（LUC）的温室气体排放，比加州汽油调和组分的碳强度（100.82 gCO<sub>2</sub>e/MJ）低 35%。

玉米乙醇的生产路径，包括玉米种植和生物精炼，在过去 20 年里有了实质性的发展。从 2000 年到 2019 年，美国玉米产量从 2002 年最低的 90 亿蒲式耳（2.3 亿吨）到 2016 年最高的 151 亿蒲式耳（3.8 亿吨），2019 年的产量为 136 亿蒲式耳（3.5 亿吨）。自 2007 年颁布《能源独立和安全法》<sup>6</sup>以来，用于乙醇生产的玉米在 2015 年增加到约 53 亿蒲式耳（1.3 亿吨），约占美国玉米产量的 40%。<sup>7</sup>此外，单位面积玉米单产持续增长，而化学品投入仍保持不变。

生物精炼厂在生产副产品的同时，也提高了每单位玉米的乙醇产量。除了重要的动物饲料—干酒糟及可溶物（DGS）外，如今有更多的设施能够回收玉米油和二氧化碳。这有助于增加收入，同时可减少乙醇生产的排放负担。

以往的生命周期分析研究表明，玉米乙醇作为汽油替代品，具有减少温室气体排放的优势。环保署在 2010 年对可再生燃料标准的生命周期分析研究<sup>3</sup>表明，玉米乙醇可以减少 21% 的温室气体排放。Wang 等人<sup>8</sup>的研究评估了玉米乙醇和其他纤维素乙醇生产路径的碳强度，然后将乙醇生产路径纳入阿贡国家实验室（Argonne）开发的温室气体、管制排放和能源使用技术（GREET）<sup>®</sup>模型中<sup>9</sup>。2012 年 Wang 等人<sup>8</sup>的研究结果是制定玉米乙醇低碳燃料标准默认碳强度的基础。

其他评估玉米乙醇碳强度生命周期分析研究也证实，使用玉米乙醇可以减少温室气体的排放。生命周期协会在 2014 年和 2021 年的两份报告，使用 GREET 模型评估了包括美国玉米乙醇的生物燃料碳强度。2014 年的报告估计玉米乙醇的碳强度为 65.5 gCO<sub>2</sub>e/MJ，其中包括土地用途变更温室气体排放 9.0 gCO<sub>2</sub>e/MJ<sup>10</sup>。2021 年的报告<sup>11</sup>计算出 2020 年玉米乙醇的碳强度为 53.2gCO<sub>2</sub>e/MJ（包括土地用途变更温室气体排放 7.4 gCO<sub>2</sub>e/MJ）。美国农业部（USDA）利用 GREET 模型发布了几份关于美国玉米乙醇碳强度的报告。<sup>4,12-14</sup>这些报告的土地

用途变更温室气体排放值为 6.7 gCO<sub>2</sub>e/MJ，显示 2014 年至 2019 年玉米乙醇的碳强度为 52.8–56.6 gCO<sub>2</sub>e/MJ，并预测 2022 年的碳强度为 47.9–51.7 gCO<sub>2</sub>e/MJ。佩莱拉等人<sup>15</sup>利用具有代表性的公共生命周期分析工具（分别为 GREET、BioGraceGHGenius）比较了三个主要地区（美国、欧洲和加拿大）玉米乙醇的碳强度，发现美国、欧洲和加拿大的碳强度分别为 57.7、43.4 和 61.9 gCO<sub>2</sub>e/MJ（包括土地用途变更）。最近，斯库利等人<sup>16</sup>使用 GREET 模型的历史版本来展示美国玉米乙醇的碳强度随时间发生的变化。在 2020 年，他们估计的碳强度为 51.4 gCO<sub>2</sub>e/MJ，包括土地用途变更温室气体排放 3.9 gCO<sub>2</sub>e/MJ。

一直有人要求根据玉米乙醇的主要数据对生命周期分析结果进行更新，以反映该行业的进步。<sup>13</sup>本研究的目的是利用美国玉米种植和乙醇生产的主要数据以及美国农业部和乙醇行业收集的调查数据，评估 2005 年至 2019 年的 15 年间玉米乙醇碳强度的历史趋势。这种回顾性的生命周期分析有助于证明玉米和乙醇产量、肥料使用以及玉米种植和生物精炼厂的能源消耗等关键参数对玉米乙醇碳强度趋势的影响。通过对这些影响的了解，可以更好地评估玉米乙醇行业过去的温室气体减排量和未来的潜在减排量。本研究收集的所有数据也被用来更新将于 2021 年 10 月发布的 GREET2021 中关键的玉米乙醇参数

(<https://greet.es.anl.gov/>)。

## 研究方法

### 系统边界

拥有一个一致的、完整的系统边界是可靠的生物燃料生命周期分析的重要因素之一。如图 1 所示，在玉米乙醇生产供应链中有四个主要阶段—玉米种植、乙醇生产、乙醇运输和配送（T&D）以及乙醇燃烧。我们对每个阶段的所有温室气体排放（即 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O）以及每个阶段的上游投入（如电力、天然气、肥料等）的温室气体排放进行核算。

玉米种植阶段将农场生产（上游）投入以及玉米生长的温室气体排放计算在内，其中包括了各种农业投入，如化肥/化学品、农业设备的农场燃料和电力。

在乙醇生产阶段，生物精炼厂在酶/酵母的作用下，通过发酵将玉米转化为乙醇。发酵、下游蒸馏和酒糟干燥都需要大量的蒸汽和热量，这些都是主要用天然气进行生产的。少量电力被用于工厂运行。在转化过程中，生物精炼厂出产一种动物饲料—干酒糟及可溶物。目前许多乙醇工厂回收玉米油和二氧化碳以增加收入。售出的玉米油被用于生产生物柴油和可再生柴油，而二氧化碳主要用于食品加工和饮料生产。因此，副产品生产的影响也应纳入考虑。

乙醇的运输和配送阶段包括用卡车和火车将乙醇从生物精炼厂运到最终用户（油泵）。乙醇燃烧阶段指车辆运行过程中的乙醇燃烧排放。然而，由于乙醇燃烧产生的二氧化碳排放被玉米作物在生长过程中对二氧化碳的吸收所抵消，在碳中和假设下，乙醇燃烧产生的生物质二氧化碳排放被认为是零。乙醇燃烧产生的  $CH_4$  和  $N_2O$  排放则被计算在内。

本研究中的功能单位是乙醇生产和使用的兆焦耳（MJ）。温室气体排放以克（g）二氧化碳当量（ $CO_2e$ ）为单位，采用基于政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告的全球升温潜能值（GWP<sub>s</sub>），时间跨度为 100 年。<sup>17</sup>

在本研究中，我们在前两个阶段使用了玉米种植数据和生物精炼厂调查结果，在图 1 中以红色标注，将在以下章节中进行详细介绍。对于其他阶段和参数，我们采用 GREET 模型采用的默认参数。<sup>9</sup> GREET 模型能够估计玉米种植和生物精炼的各种投入的上游排放以及与运输和车辆燃料燃烧有关的排放。我们假设副产品取代了它们的对应物。请注意，本研究中的所有结果都是基于未添加变性剂的乙醇。

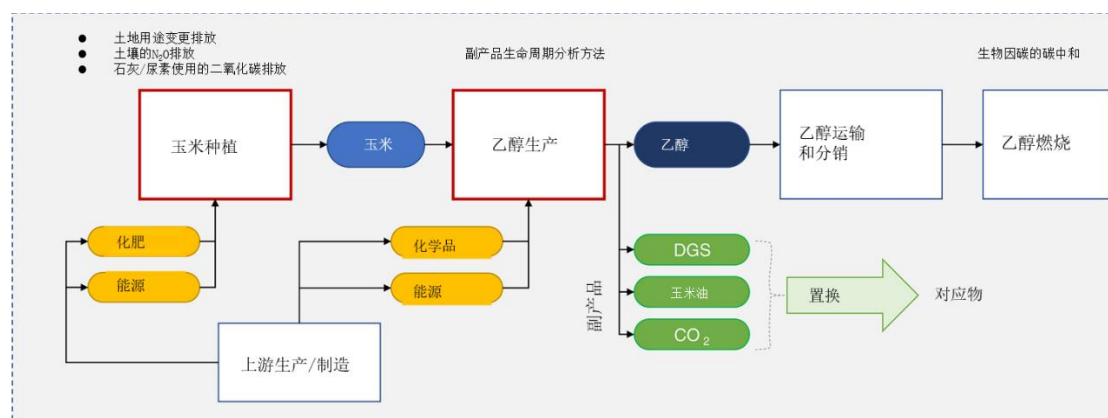


图 1：玉米乙醇的生命周期分析系统边界和主要参数

## 玉米种植

对影响玉米种植的关键参数的州一层面的估计（表 1）是基于美国农业部的主要调查项目、国家农业统计局（NASS）<sup>18</sup>、经济研究局（ERS）<sup>21</sup>和首席经济学家办公室（OCE）报告<sup>22,23</sup>的数据。关于数据来源的更多细节可以参见支持信息（SI）。

玉米单位面积产量用于计算每蒲式耳或每单位重量（一蒲式耳玉米重 56 磅或 25.4 公斤）玉米籽粒的耕作投入。产量数据加上玉米生物质中的氮（N）含量及收获指数，可以计算出收获后留在田间的作物中的氮，这是土壤中一氧化二氮（N<sub>2</sub>O）排放的主要来源之一。在本分析中，我们从国家农业统计局农业调查中提取了玉米产量历史数据，该数据报告了州一级的谷物产量，单位是蒲式耳/英亩。使用政府间气候变化专门委员会（IPCC）<sup>24</sup>和 Liu 等人的研究<sup>25</sup>中描述的 IPCC 方法估计了作物残留氮的 N<sub>2</sub>O 排放量。

我们在本研究中纳入了农业投入，包括氮（如尿素）、磷（以磷酸盐形式，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）、钾（以钾盐形式，K<sub>2</sub>O）、石灰和除草剂/农药。我们从经济研究局的玉米年度化肥使用数据集中提取了玉米作物氮磷钾使用率（施用养分的施肥面积）和施用氮磷钾的玉米面积百分比，该数据集的依据是国家农业统计局的农业资源管理调查（ARMS）第二阶段（详情见 SI 1.1）。通过这些数据与州一级玉米种植面积（国家农业统计局数据）相结合，我们计算出每个州用于玉米生产的氮磷钾肥料的总用量。最后，我们将使用量除以州级粮食产量（z 国家农业统计局数据）对养分投入强度（磅养分/蒲式耳玉米颗粒）进行估计（表 1）。我们采用首席经济学家办公室（OCE）报告中提供的石灰和化学品使用情况，这份报告对九个主要玉米生产州的玉米乙醇的能量平衡进行了分析（详情见 SI 1.1）。

然后，我们用养分/化学品投入强度的估计值乘以 GREET 模型中制造的肥料/化学品的温室气体强度。<sup>9</sup> 尤其是，根据 2010 年美国的肥料消费情况，氮磷钾强度被分配给不同的肥料类型，以给每种肥料类型的生产分配特定的温室气体强度（例如，氨的生产排放为 2,620 公斤二氧化碳/吨，而尿素排放为 1,219 公斤二氧化碳/吨）。经济研究署对到 2015 年为止每种肥料类型的使用份额进行了跟踪。例如，从 2010 年到 2015 年，氨-N（无水氨加水）在氮肥总用量中

表 1: 玉米种植主要参数州级估计数的数据来源、地区和时空范围

空间范围	用于得出关键参数的数据 (及来源)	单位	年份														参数	单位
			2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018		
沿海地区 41 个州 ** 选中的 15 - 19 个州 ***	玉米单产 (国家农业统计局 NASS)	英热/英亩															谷物单产	英热/英亩
	玉米所使用的 N, P205, 和 K20, 每英亩面积施肥率 (农业部经济研究局 ERS) ****	磅/英亩															N, P205, 和 K20 的使用	磅/英热
	玉米种植面积施用的每种化肥 (NASS)	%																
	玉米种植面积 (NASS)	英亩																
	谷物产量 (NASS)	英热																

表 1: (续)

空间范围	用于得出关键参数的数据 (及来源)	单位	年份															参数	单位		
			2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019				
9 个州 ****	谷物单产 (NASS)	英热/英亩																			
	柴油 (OCE 和 ARMS)	加仑/英亩																		柴油	加仑/英热
	汽油 (OCE 和 ARMS)	加仑/英亩																		汽油	加仑/英热
	液化石油气 (OCE 和 ARMS)	加仑/英亩																		液化石油气	加仑/英热
	电力 (OCE 和 ARMS)	kWh/英亩																		电力	kWh/英亩
	天然气 (OCE 和 ARMS)	ft <sup>3</sup> /英亩																		天然气	ft <sup>3</sup> /英热
	石灰 (OCE)	磅/英亩																		石灰	磅/英热
	化学品 (OCE)	磅/英亩																		化学品	磅/英热

- 灰色框表示可获得数据的年份。
- \* NASS 发布的所有数据都可以通过 Quick Stats (<https://quickstats.nass.usda.gov/>)。<sup>18</sup>
- \*\*在 48 个相邻的州中, 有 41 个州报告了 2005-2019 年的玉米谷物单产。
- \*\*\*在 ERS 数据集中选择的年度玉米年度肥料使用状态如图 S1 所示。
- \*\*\*\*九个州是伊利诺伊州, 印第安纳州, 爱荷华州, 明尼苏达州, 内布拉斯加州, 俄亥俄州, 密歇根州, 南达科他州和威斯康星州 (图 S1), 占 2019 年美国玉米总产量的 70% 以上。
- \*\*\*\*\* ERS 数据集包括来自实际定制施用的养分和肥料以及商业制备的粪肥或堆肥的 N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的实际重量或百分比分析来, 但不包括未加工的粪肥。<sup>19</sup> 结果说明, 与未计入施用粪肥农田的调查相比, 在明尼苏达州和威斯康星州等经常施用粪肥的州, 这一比率可能被低估了。<sup>20</sup>



的份额下降了 3%，而同期尿素-N 的份额则增加了 5%。在本分析中，我们没有考虑 2015 年的份额，因为该份额并非仅针对玉米，而是针对美国种植的所有农作物。我们像对 GREET 的采用一样，使用了 2010 年数据中专门针对玉米种植的化肥类型的份额。我们还采用了氮肥和尿素/石灰的应用率，通过使用经验排放因子来计算化肥相关的 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放量。<sup>26, 27</sup>

各种农业操作，如耕作、种植和生物质收获、玉米籽粒干燥，均需要使用能源：柴油、汽油、液化石油气（LPG）、电力和天然气。自 20 世纪 90 年代初以来，农业资源管理调查（ARMS）定期调查玉米种植业的具体能源消耗，并在首席经济学家办公室（OCE）报告中进行总结。在本研究中，我们使用九个州的数据来计算农场的能源消耗。请注意，最近一年的玉米数据（2016 年）的估计值是通过使用农业资源管理调查第三阶段数据集农场商业调查中提供的州级玉米生产燃料成本<sup>21</sup> 和美国能源信息署（EIA）报告的燃料和电力价格计算出来的。<sup>28</sup> 例如，截至 2016 年，来自农业资源管理调查数据集<sup>21</sup> 的伊利诺伊州玉米种植的电力成本为 2.88 美元/英亩（7.11 美元/公顷），根据美国能源信息署（EIA）的数据<sup>28</sup>，该州居民电价为 12.5 美分/千瓦时（3.5 美分/兆焦），因此估计值为 23 千瓦时/英亩（205 兆焦/公顷）。

最后，我们用各州的玉米产量作为加权系数，计算出每蒲式耳玉米籽粒的平均耕作投入排放量，以代表国家层面的耕作碳强度。在没有记录/数据的年份，我们通过内插加权平均数来填补任何缺失的估计值，并用于分析玉米乙醇碳强度（表 S1）。我们假定玉米种植中消耗的柴油和汽油与田间作业的面积有关，而不是与收获的玉米产量有关。柴油和汽油的使用量（加仑/英亩）首先在各年份之间进行插值，然后除以玉米籽粒的蒲式耳数。这个过程与氮磷钾使用量和其他燃料类型（如液化石油气、电力和天然气）的内插不同，后者先除以产量，然后在各年份之间进行内插（表 S1）。由于采用了这种内插法，以及 2012 年缺乏玉米种植的数据（表 1），当时极端严重的干旱导致该年的玉米产量损失超过四分之一，<sup>29</sup> 我们的分析只反映了干旱对柴油和汽油使用的影

## 玉米乙醇生产

克里斯蒂安森 (www.christiansoncpa.com) 是一家玉米乙醇标杆管理和农业咨询公司, 自 2003 年起每年对干法玉米乙醇设施进行季度调查。<sup>30</sup> 干法生产的乙醇占美国燃料乙醇的 91% (其余 9% 来自湿法生产)。调查内容包括乙醇产量 (包括玉米投入和乙醇产出)、所有能源投入 (天然气、煤和电)、化学投入、副产品产量和财务信息。在这项研究中, 克里斯蒂安森同意向阿贡实验室提供其 2005 年至 2019 年的年度玉米乙醇行业标杆统计数据。阿贡实验室将克里斯蒂安森的统计数据应用于 GREET 模型, 以评估玉米乙醇生产设施的投入/产出变化的影响。补充材料中的图 S2 显示了克里斯蒂安森标杆数据库中工厂的乙醇总产量在美国乙醇总产量中的份额。该调查覆盖了 2019 年乙醇产量的 40% (65 家设施), 2008 年的最低覆盖率为 22% (25 家设施)。虽然调查的覆盖面有限, 尤其是在早期, 但后期的覆盖面已经足够。数据集 (乙醇产量、干酒糟及可溶物和玉米油产量以及能源使用量) 由阿贡实验室通过独立调查进行进一步验证, 该调查在 2017 年覆盖了 66 家美国设施。<sup>31</sup> 除了玉米乙醇, 生物精炼厂还生产其他产品, 如干酒糟及可溶物、糖浆、玉米油和二氧化碳。酒糟及可溶物是一种牲畜饲料, 根据首选的最终用途分为三种类型: 干酒糟、湿酒糟和改良湿酒糟,<sup>32</sup> 数据库中记录了每种酒糟类型的数量的相关信息。标杆数据库还包含糖浆和玉米油的产量 (磅/加仑乙醇) 和二氧化碳的捕获量 (磅/加仑乙醇) 的信息。

在本研究中, 我们假设酒糟及可溶物和糖浆被用于替代传统的动物饲料 (玉米、大豆和尿素)。<sup>8,33</sup> 由于玉米油可以用于其他燃料的生产, 所以假设玉米油替代大豆油用于生产生物柴油和可再生柴油。<sup>9</sup> GREET 模型估计乙醇副产品取代了传统动物饲料或豆油的排放额度, 这有助于减少乙醇生产的排放负担。在本研究中, 我们认为二氧化碳是一种副产品, 不会影响乙醇的排放负担。即使二氧化碳可以被视为可能取代传统二氧化碳生产的副产品, 但目前的商业二氧化碳主要是由生产作为副产品的二氧化碳的设施支持的 (例如, 合成氨或氢气的生产过程)。因此, 在乙醇工厂捕获的二氧化碳的减排效益可能是有限的。在生物精炼厂的二氧化碳被捕获和封存的情况下, 我们预计玉米乙醇可能为进一步减少温室气体排放提供机会。<sup>35</sup>

对于化学品投入，如酶和酵母，我们使用了 GREET 的默认值，它采用 Wang 等人的研究<sup>8</sup>，而不是使用克里斯蒂安森公司的标杆结果。这是因为这些投入的标杆统计是以美元/加仑乙醇为单位的，不能可靠地转换为化学投入的数量。请注意，生物精炼厂的化学投入对玉米乙醇温室气体排放的总影响估计约为 1.8gCO<sub>2</sub>e/MJ。尽管影响不可忽视，但从 2005 年到 2019 年化学投入的变化影响应该不大。例如，这些化学品投入的 10% 变化所导致的乙醇碳强度变化小于 0.2gCO<sub>2</sub>e/MJ。

## 结果和讨论

### 玉米种植和乙醇生产趋势

玉米产量持续增长，从 1990 年的 119 蒲式耳/英亩（7.4 吨/公顷）到 2019 年的 168 蒲式耳/英亩（10.5 吨/公顷）（图 2（a））。除了干旱的 2012 年，过去 15 年里，玉米产量一直远远高于 140 蒲式耳/英亩（8.8 吨/公顷）。同时，每英亩的肥料投入保持不变，导致肥料/化学品投入强度下降：例如，从 2005 年到 2019 年，每蒲式耳玉米籽粒的氮和钾肥用量分别减少了 7% 和 18%（图 2（b））。同样，每蒲式耳玉米的耕作能源使用量也从 9,700 英热单位略微减少到 8,400 英热单位（0.40 到 0.35 兆焦耳/公斤；减少了 14%）（图 2（c））。2012 年柴油和汽油使用量的突然增加是由于我们的插值方法和上文所述的玉米产量的大幅下降。使用 2011 年至 2013 年三年的移动平均产量，我们估计 2012 年玉米乙醇的碳强度降低了 0.23gCO<sub>2</sub>e/MJ（只限于 2012 年）。

15 年来，另一个显著的变化是乙醇产量的持续增加（图 3（a））。从 2005 年到 2019 年，乙醇产量增加了 6.5%。2005 年，乙醇加权平均产量估计为 2.70 加仑/蒲式耳（0.402 升/公斤<sup>-1</sup>），2019 年增加到 2.86 加仑/蒲式耳（0.427 升/公斤<sup>-1</sup>）。图 3（a）中的分布（P10 至 P90）表明，在乙醇行业中乙醇产量得到了总体提高。2019 年最低的 10 个百分点代表乙醇产量比 2005 年的加权平均值高。各年份的乙醇产量也呈现出平均水平的 10% 左右的变动。

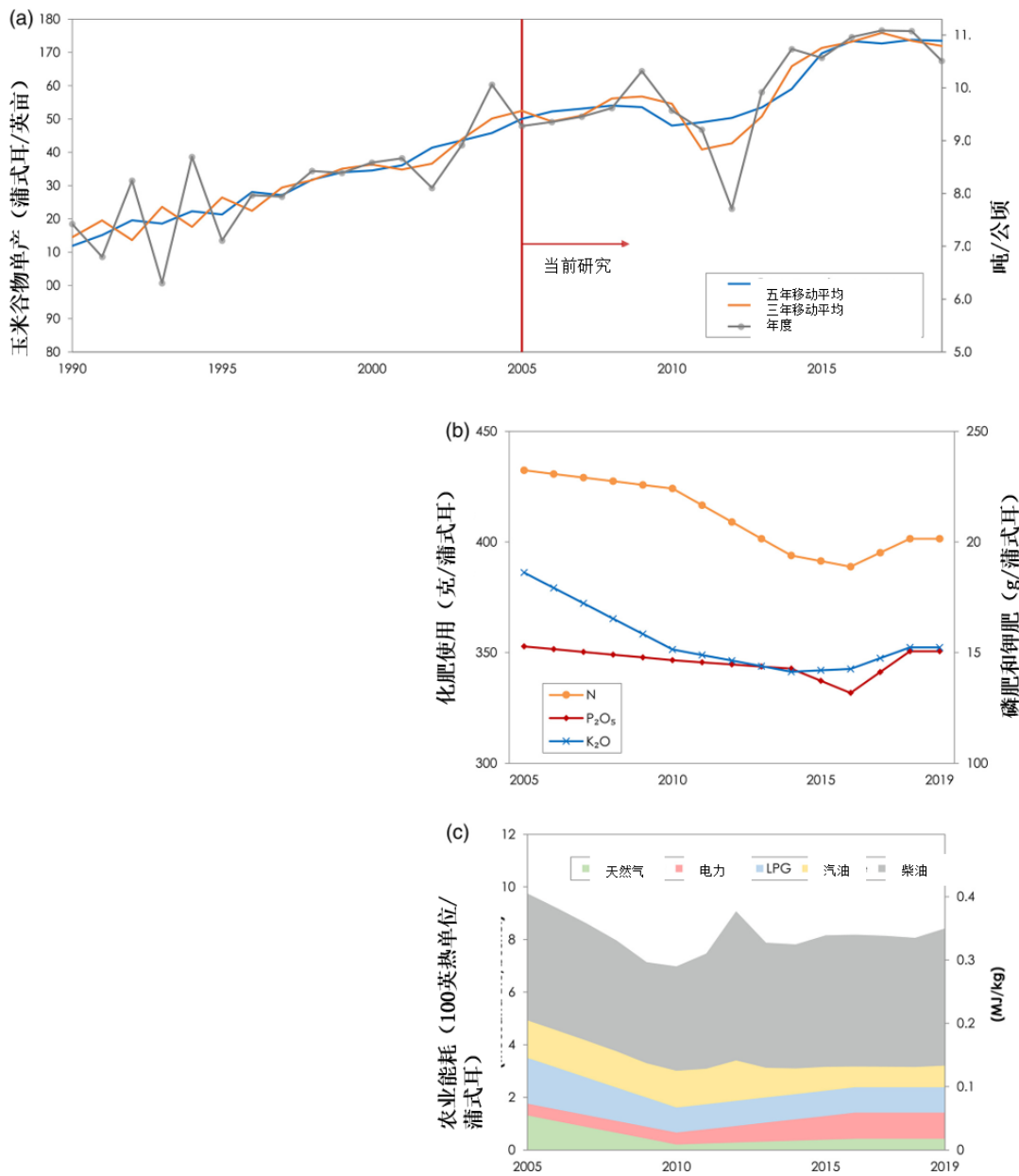


图 2：2005 年至 2019 年美国玉米种植业参数的历史趋势。(a) 美国玉米谷物产量，以蒲式耳/英亩为单位，分为年度、3 年和 5 年的移动平均值；(b) 玉米耕作肥料使用量，以克养分/蒲式耳为单位；(c) 玉米耕作能源使用量，以 1000Btu（低热值）/蒲式耳为单位。请注意，2012 年的干旱造成了玉米产量的大幅下降。

在 2005 年和 2019 年，变化范围从 2005 年的 2.53-2.80 加仑/蒲式耳（0.377-0.417 升/公斤<sup>-1</sup>）到 2019 年的 2.74-2.95 加仑/蒲式耳（0.408-0.440 升/公斤<sup>-1</sup>）。2019 年的变化可能意味着，如果低单产作物能够得到改良，达到高单产作物的产量，那么产量仍有提高的空间。

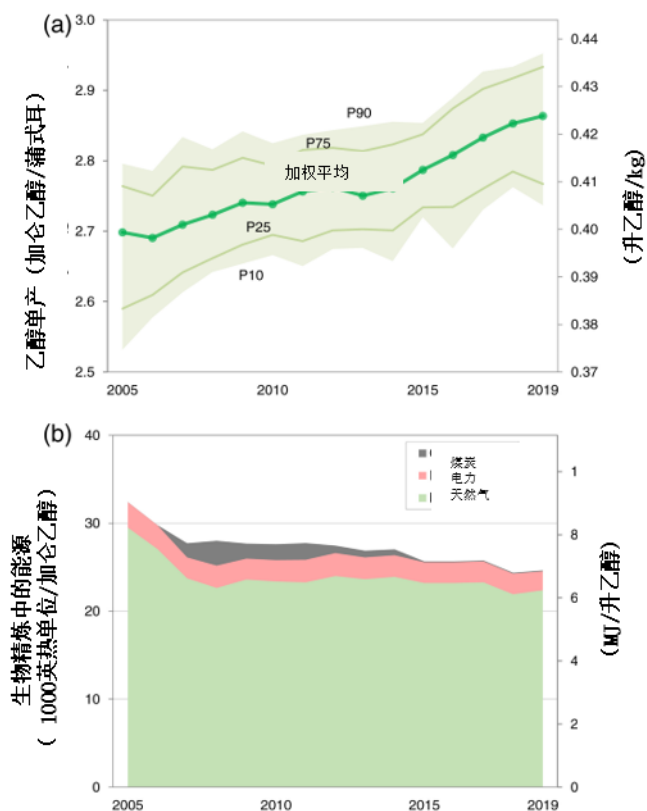


图 3：2005 年至 2019 年美国玉米乙醇生产参数的历史趋势。(a) 玉米乙醇产量，以未添加变性剂的乙醇加仑/蒲式耳为单位；(b) 生物精炼厂的能源使用，以 1000Btu（低热值）/加仑乙醇为单位。

乙醇生产厂为减少能源消耗做出了努力。从 2005 年到 2019 年，能源投入减少了 24%：从 32,000 Btu/加仑乙醇到 25,000 Btu/加仑乙醇，或从 9.0 MJ L<sup>-1</sup>乙醇下降到 6.9 MJ L<sup>-1</sup>乙醇（图 3 (b)）。同时，从 2005 年到 2019 年，酒糟及可溶物的产量下降了 21%，从 5.1 磅干酒糟/加仑乙醇到 4.0 磅干酒糟/加仑乙醇（0.61 到 0.48 公斤 L<sup>-1</sup>）（图 S3）。这主要是由于乙醇产量的增加以及产出了其他新的副产品（玉米糖浆和玉米油）。例如，从 2008 年起，乙醇工厂开始生产玉米糖浆（图 S3），从 2008 年开始的玉米油生产到 2019 年就翻了一番（图 S4）。

发酵过程中会产生高纯度的二氧化碳，它可以被捕获并用于其他目的。美国的乙醇工厂一直是主要的商业二氧化碳供应商。<sup>36</sup> 截至到 2013 年，超过 30% 的乙醇生产工厂开展了二氧化碳捕获（图 S5）。从 2005 年到 2019 年，二氧化碳捕获率也增加了 63%：从 2.3 磅二氧化碳/加仑乙醇到 3.7 磅二氧化碳/加仑乙醇（0.27 到 0.45 千克升<sup>-1</sup>）。

## 玉米乙醇的碳强度

图 4 展现了美国玉米乙醇的生命周期温室气体排放（碳强度），显示了从 2005 年到 2019 年的 15 年中每个阶段不考虑土地用途变更影响的排放情况，（根据 GREET 模型计算为 7.4gCO<sub>2</sub>e/MJ，见下节）。主要的温室气体排放来源是玉米种植和乙醇生产。2019 年，玉米种植（能源和肥料/化学品）和乙醇生产贡献了温室气体排放总量的 95%（分别为 50%和 45%），而运输（原料和燃料）贡献了 5%。由于该系统产出副产品，如干酒糟及可溶物、糖浆和玉米油，因此还有一个置换排放抵扣，估计 2019 年为-12gCO<sub>2</sub>e/MJ。自 2011 年以来，玉米油和糖浆生产的排放抵扣分别贡献了 3-6%和 1-3%，而最大的温室气体抵扣来自干酒糟及可溶物。

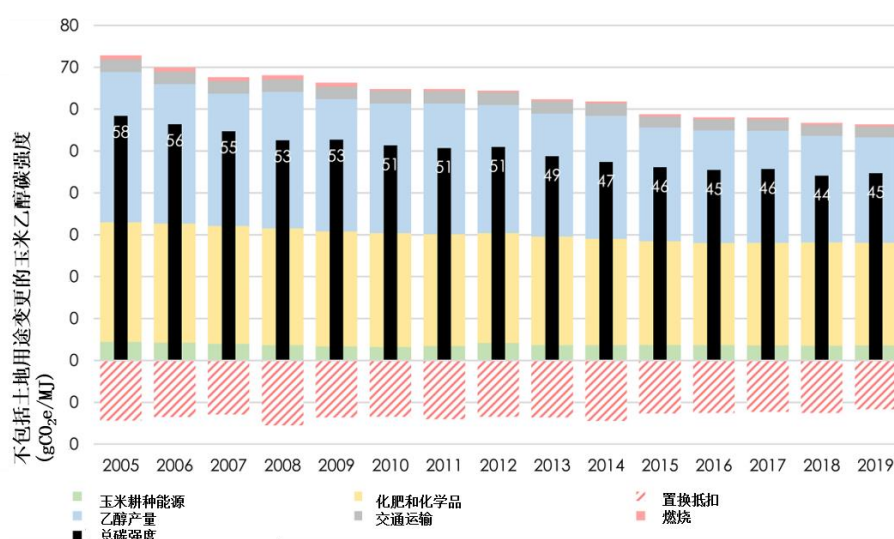


图 4：2005-2019 年不包括土地用途变更的玉米乙醇碳强度（gCO<sub>2</sub>e/MJ 未变性乙醇）

由于耕作和乙醇生产过程的投入大幅减少，玉米乙醇的碳强度（黑条）减少了 23%（14 gCO<sub>2</sub>e/MJ），从 2005 年的 258 gCO<sub>2</sub>e/MJ 减少到 2019 年的 45 gCO<sub>2</sub>e/MJ。具体来说，在这 15 年期间，乙醇生产过程的排放减少了 11 gCO<sub>2</sub>e/MJ，乙醇产量增加了 6.5%（图 3(a)），而能源使用减少了 24%（图 3(b)）。乙醇产量决定了用于生产乙醇的玉米数量。因此，乙醇产量的增加有助于减少每兆焦耳乙醇的玉米生产排放量。乙醇工厂减少天然气的使用，可以减少天然气的燃烧排放和上游排放（天然气回收和运输），从而降低乙醇的碳强度。我们发现，乙醇工厂的天然气使用量变化很大，大约是 2019 年天然气使用量中位数的 ±40%，这意味着如果高天然气消耗设施能够将其效率提高到接近低天然气消耗设施的水平，那么就有可能进一步减少温室气体排放。此外，改用可再生能源可以进一步减少乙醇工厂的碳强度。例如，使用由有机废料（如食物残渣、动物粪便和废水污泥）生产的可再生天然气，可以满足乙醇生产的热量需求，并减少乙醇的碳强度。

与玉米种植相关的温室气体排放也显示出随时间推移的减少。从 2005 年到 2019 年，化肥/化学品和农业能源消耗的温室气体排放分别减少了 4.1 和 0.8 gCO<sub>2</sub>e/MJ。请注意，部分减排量可归因于乙醇产量的增加（肥料/化学品和耕作能源分别为 1.5 和 0.22 gCO<sub>2</sub>e/MJ）。

副产品可以取代它们的同类产品，从而间接地减少玉米乙醇的碳强度。我们观察到，图 4 中的红色阴影条表示从 2005 年到 2019 年，由于每加仑乙醇的干酒糟产量减少，其碳排放从 -14 gCO<sub>2</sub>e/MJ 增加到 -12 gCO<sub>2</sub>e/MJ。如前所述，较高的乙醇产量和玉米油产量越来越高会使干酒糟产量减少，从而影响到玉米的碳强度。

尽管大部分碳强度的降低主要可归因于耕作和乙醇生产的改进，但上游工艺也得到了改进。例如，2019 年的电耗排放（722 gCO<sub>2</sub>e/kWh[201 gCO<sub>2</sub>e/MJ]）比 2005 年（449 gCO<sub>2</sub>e/kWh[125 gCO<sub>2</sub>e/MJ]）低得多<sup>9</sup>。

加州空气资源署自 2011 年以来每季度都会报告低碳燃料标准认证的乙醇的平均碳强度值。<sup>37</sup> 虽然将加州空气资源署报告的碳强度绝对值和本次研究的碳强度值相比较可能不合适，但由于加州空气资源署和克里斯蒂安森数据库中的工厂可能存在重叠，以及加州空气资源署和本次研究对生命周期分析的考虑不

同，仍可以发现趋势是相似的（图 S6）。除了低碳燃料标准的碳强度在 2019 年突然下降外，加州空气资源署的数据库和本研究对 2011 年至 2018 年碳强度的降低估计分别为 15% 和 13%（当两种情况下都排除了土地用途变更时）。罗斯菲尔德等人<sup>4</sup>调查了有助于降低碳强度的技术，并提供了采用每种策略降低碳强度的水平。他们还还为低碳燃料标准提供了各州的碳强度，显示了玉米乙醇碳强度的地区差异。

## 土地用途变更

自 2008 年以来，一直在对用于玉米乙醇的大规模玉米生产的土地用途变更温室气体排放进行模拟。早期的研究显示土地用途变更排放量极高（塞钦格等人<sup>38</sup>），而最近的研究显示土地用途变更排放量明显降低（图 5）。土地用途变更模拟排放的下降趋势是由于更好地开发和校准了经济模型以及更好地模拟了土地用途变更的温室气体排放。全球贸易分析项目（GTAP）模型等经济模型在处理土地集约化（即对现有土地进行管理提高其生产力）与土地扩展化（即将耕地扩展到新的牧场和森林区域），<sup>39</sup> 作物产量随时间增长，现有耕地和新开垦耕地的作物产量差异，亚洲等地区的复种，某些土地转换的可用性和限制性（例如，限制公共林地转换为耕地），作物产量反应的价格弹性，以及粮食需求对价格变化的反应。而对于土地用途变更的温室气体建模，已对模型进行了改进，使其具有更好的空间和时间分辨率。

GREET 模型通过使用阿贡实验室的生物燃料生产的土地利用和土地管理变化碳计算器（CCLUB），估算出美国玉米乙醇的土地用途变更温室气体排放率为 7.4g CO<sub>2</sub>e/MJ。<sup>50</sup> 在依托改进的全球贸易分析项目（GTAP）版本中的土地用途变更结果的同时，土地利用和土地管理变化碳计算器（CCLUB）通过采用基于过程的土壤碳变化模型的详细建模结果，从全球贸易分析项目土地用途变更结果中开发出温室气体排放结果，该模型包含了管理实践（即耕作）的影响和在地域方面明确的设定（例如，美国县级作物产量）。<sup>53</sup>



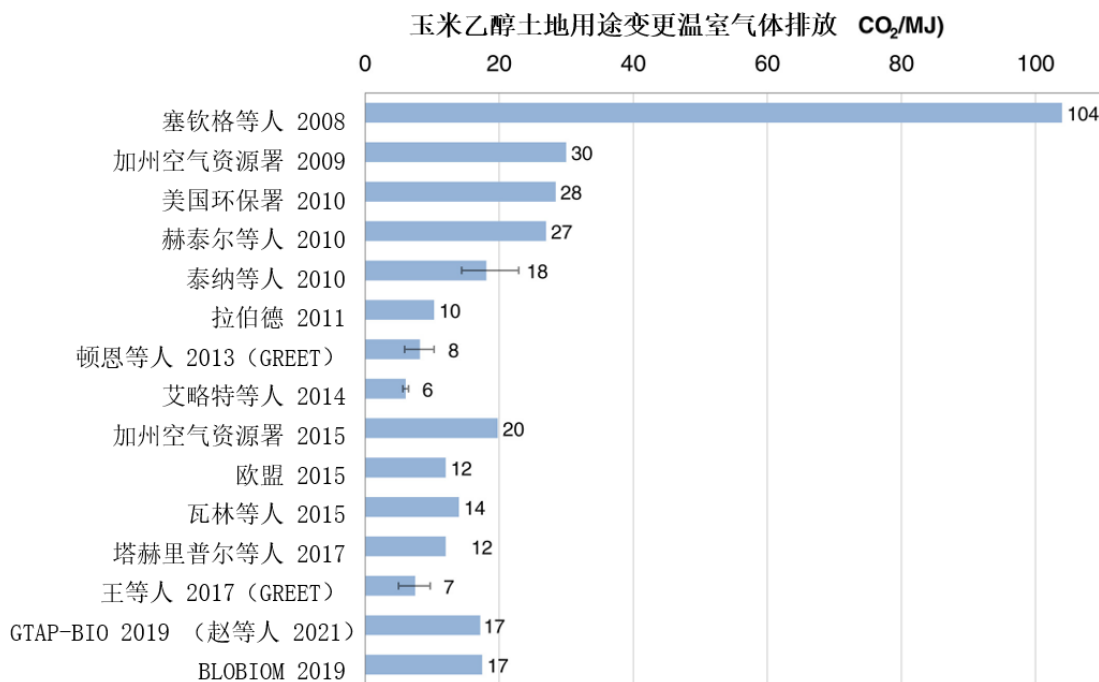


图 5: 美国玉米乙醇模拟土地用途变更 LUC 温室气体排放的趋势。<sup>39, 42-53, 40</sup> 对于 GTAP-BIO 2019 (赵等人, 2021<sup>40</sup>)和 GLOBIOM 2019, 国际民用航空组织 (ICAO)<sup>41</sup> 中为玉米乙醇衍生的喷气燃料计算的 land use change 排放值被转换为每兆焦耳乙醇。误差条反映了个别研究中的最大值和最小值。

## 玉米乙醇的温室气体总减排量

玉米乙醇碳强度的降低, 加之以乙醇生产量的扩大, 带来了巨大的减排效益。2005 年, 未添加变性剂的乙醇产量估计为 38 亿加仑/年 (140 亿升/年),<sup>2</sup> 碳强度值为 58 g/MJ (图 4)。就 2005 年的乙醇产量而言, 由于 2005 年至 2019 年玉米乙醇的碳强度值下降, 乙醇行业的累计减排效益估计为 3,900,000 吨 CO<sub>2</sub>e (图 6)。美国的乙醇产量也在逐步增加, 2019 年燃料乙醇产量将达到 160 亿加仑 (590 亿升)。从 2005 年到 2019 年, 通过扩大乙醇生产获得的额外减排效益为 1.01 亿吨 CO<sub>2</sub>e。请注意, 我们使用图 4 中的单个碳强度值, 加上图 5 中的土地用途变更排放值 7.4 g/MJ (Wang 等人<sup>8</sup>), 用来估计 2005 年至 2019 年乙醇行业的温室气体减排总量。

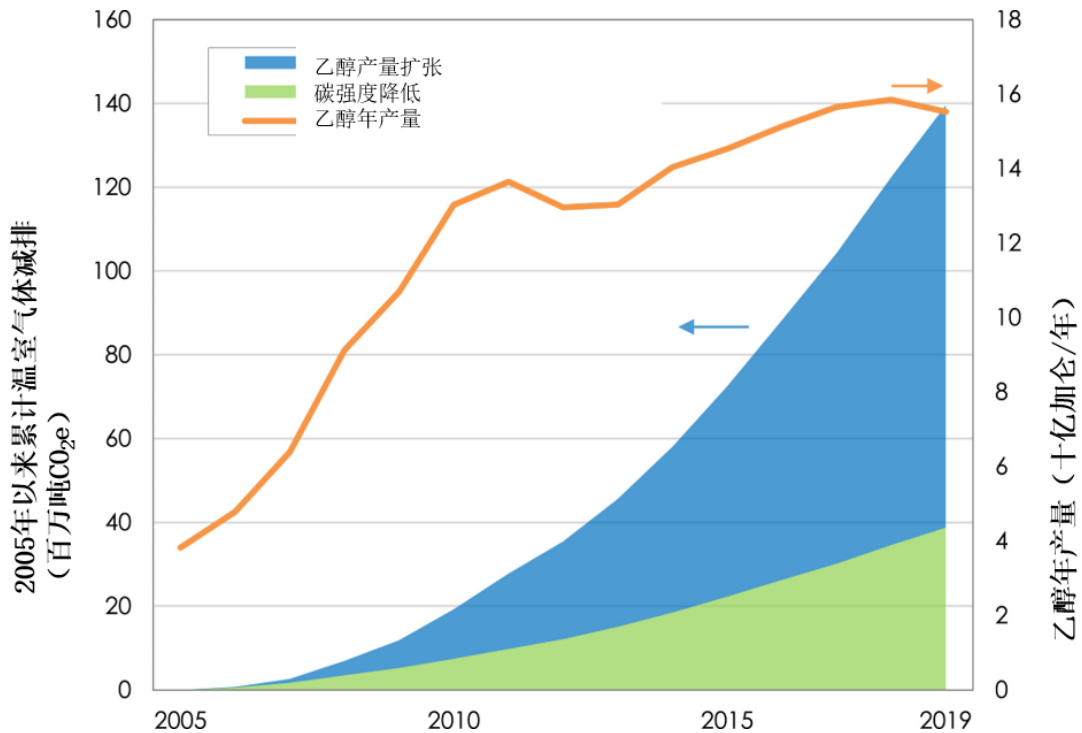


图 6：2005 年至 2019 年玉米乙醇行业通过降低碳排放和扩大乙醇产量获得的累计温室气体减排效益（面积）（单位：百万吨 CO<sub>2</sub>e），年乙醇产量（曲线）。减排效益是用图 4 中的碳强度加上 GREET 的土地用途变更排放量 7.4 g/MJ 来估计的。

与美国平均石油汽油组分燃料的碳强度值 93 gCO<sub>2</sub>e/MJ 相比，玉米乙醇的碳强度值从 2005 年的 58 gCO<sub>2</sub>e/MJ 降至 2019 年的 45 g/MJ（加上土地用途变更排放值 7.4 g/MJ），温室气体排放量大幅减少。从 2005 年到 2019 年，以能量当量为基础，用玉米乙醇替代汽油，累计减少温室气体排放 5.44 亿吨 CO<sub>2</sub>e。

人们越来越关注通过减少生物燃料原料的温室气体排放来进一步降低作物基生物燃料的总体碳强度，这与个别农场的农艺实践以及化学和能源投入有很大关系。一直有人提出关于在美国燃料监管计划中对低碳生物燃料原料进行激励的建议，以促进可持续的农业实践。这将为促进农业的可持续性和降低生物燃料碳强度提供进一步的机会。<sup>25</sup>

## 结论

从 2005 年到 2019 年，美国的玉米乙醇产量翻了两番，美国的玉米种植业的产量也在不断提高。乙醇生物精炼厂采用了提高乙醇产量、减少能源使用和增

加额外副产品生产的技术。这些趋势当然有助于减少玉米乙醇的温室气体排放。我们利用美国农业部和乙醇行业的玉米种植和乙醇生产的主要数据，评估了美国玉米乙醇碳强度 15 年来的下降趋势。我们的研究表明，虽然玉米乙醇行业经历了显著的扩张，但通过改善美国玉米种植和乙醇生物精炼的操作，降低了玉米乙醇的温室气体排放强度。玉米产量增加，而玉米种植的化学和能源使用强度下降。乙醇生物精炼厂的乙醇产量增加，能源使用量大幅减少。此外，还产出了副产品，如玉米油、二氧化碳和干酒糟及可溶物。这些改进使美国玉米乙醇的碳强度降低了 14 gCO<sub>2</sub>e/MJ——从 2005 年的 58 gCO<sub>2</sub>e/MJ 降至 2019 年的 45 gCO<sub>2</sub>e/MJ。乙醇工厂在这 15 年中减少了 30% 的乙醇生产排放（或 11 gCO<sub>2</sub>e/MJ），主要是通过减少每单位乙醇生产的能源投入实现的。玉米种植业减少了化学和能源投入强度，有助于减少与种植业有关的排放量。

结合玉米乙醇温室气体排放强度的降低和乙醇产量的扩张，我们估计，从 2005 年到 2019 年，乙醇行业已经实现了 1.4 亿吨的累计温室气体减排。15 年来我们生产的乙醇已经被引入交通领域替代石油汽油。通过这样的替代措施，在生命周期分析的基础上，在这一时期内玉米乙醇已经帮助美国交通部门减少了 5.44 亿吨的温室气体排放。

还有一些措施可以进一步减少玉米乙醇的温室气体排放。在耕作阶段，可持续的耕作方法，如休耕和覆盖作物，可以有助于减少化肥投入，增加土壤有机碳含量。在乙醇生物精炼厂，发酵过程中的二氧化碳可以被捕获和封存，化石天然气可以被可再生天然气和生物质气化取代。包括玉米乙醇在内的生物燃料，可以在美国经济深度去碳化的期望中发挥关键作用。

## 鸣谢

阿贡国家实验室的这项工作得到了美国能源部（DOE）能源效率和可再生能源办公室的车辆技术办公室（VTO）的支持，合同为 DE-AC02-06CH11357。我们感谢车辆技术办公室的马克·史密斯和凯文·斯托尔克的支持和指导。作者感谢克里斯蒂安森标杆管理公司的约翰·克里斯蒂安森，桑迪·霍尔伯格和康尼·林德斯托姆为玉米乙醇碳强度分析提供其乙醇工厂标杆数据库的统计数据。我们还感谢美国农业部经济研究局（ERS）的劳拉·多德森和艾米·博莱那根据 2016 年

农业资源管理调查 (ARMS) 成本和收益数据为玉米种植碳强度分析专门生成了一份表格。本文所表达的观点和意见仅代表作者本人, 并不说明或反映美国政府或其任何机构的观点。美国政府或其任何机构, 或其任何雇员, 都不对所披露的任何信息、仪器、产品或工艺的准确性、完整性或有用性做出任何明示或暗示的保证, 或承担任何法律责任或义务, 或表示其使用不会侵犯私人拥有的权利。

### 参考文献:

1. 美国能源信息署 (EIA). 石油和其他液态物: 供应和处置. (2020)  
[https://www.eia.gov/dnav/pet/pet\\_sum\\_snd\\_d\\_nus\\_mbb1\\_a\\_cur.htm](https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_sum_snd_d_nus_mbb1_a_cur.htm)
2. 美国能源信息署 (EIA). 月度能源回顾. (2020 年).  
<https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.php>
3. 美国环境保护署 (EPA). 可再生燃料标准 (RFS2) 计划监管影响分析. (2010). <https://permanent.fd1p.gov/lps122365/420r10006.pdf>
4. 罗森菲尔德, J. 卡菲尔, M., 勒万德罗夫斯基, J. 和帕比, D. 加利福尼亚州低碳燃料标准: 乙醇行业的温室气体减排激励. (2020).  
<https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/CA-LCFS-Incentivizing-Ethanol-Industry-GHG-Mitigation.pdf>
5. 加州法规. 17 CCR § 95488.5. (2021).  
<https://govt.westlaw.com/calregs/Document/I598F88ED659D44A69B5D99C2C3442E9C?viewType=FullTextandoriginationContext=documenttocandtransitionType=StatuteNavigatorandcontextData=%28sc.Default%29>
6. 2007 年能源独立和安全法案. HR 6. 第 110 届国会. (2007-2008).  
<https://www.congress.gov/bill/110th-congress/house-bill/6>
7. 美国能源部 (DOE). 替代燃料数据中心: 地图和数据. (2020).  
<https://afdc.energy.gov/data/10339>
8. 王 M, 韩 J, 顿恩 JB, 蔡 H 和艾尔高韦尼 A, 美国使用的玉米乙醇、甘蔗乙醇和纤维生物质乙醇油井到车轮能源使用和温室气体排放. 环境研究

- 简报. 7:045905 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>.
9. 王, M. 等人, 技术模型中的温室气体、规范排放及能源使用® (2020 Excel) (2020).  
[doi:https://doi.org/10.11578/GREET-EXCEL-2020/](https://doi.org/10.11578/GREET-EXCEL-2020/) DC. 20200912. 1.
  10. 博蓝德, S. 乌纳什, S. 边际石油和玉米乙醇燃料的碳强度. (2014).  
<https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2015/09/Carbon-Intensity-of-Marginal-Petroleum-and-Corn-Ethanol-Fuels1.pdf>
  11. 乌纳什, S. 和帕力达, D. 实施可再生能源标准 (RFS2) 达成的温室气体减排—2020 年情况更新. (2021).  
<https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2015/09/Carbon-Intensity-of-Marginal-Petroleum-and-Corn-Ethanol-Fuels1.pdf>
  12. 法拉格, M, 勒万德罗夫斯基, J, 罗斯菲尔德 J, 博蓝德, C, 汉德里克森 T, 贾格罗 K 等人, 玉米基乙醇温室气体排放的生命周期分析. 工业生物技术 13 (1) : 19-22 (2018) .  
<https://doi.org/10.1089/ind.2017.29071.usda>.
  13. 勒万德罗夫斯基 J, 罗森菲尔德 J, 帕比 D, 汉德里克森 T, 贾格罗 K 和莫弗瓦德 K, 玉米乙醇的温室气体效益—评估最新的证据. 生物燃料 11:361-375 (2020) .  
<https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1546488>.
  14. J. 罗森菲尔德, J. 勒万德罗夫斯基, T. 汉德里克森, K. 贾格罗, K. 莫弗瓦德, D. 帕比 D, 玉米基乙醇的温室气体排放的生命周期分析. 华盛顿特区, 美国农业部. (2018).  
[https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/CA\\_of\\_Corn\\_Ethanol\\_2018\\_Report.pdf](https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/CA_of_Corn_Ethanol_2018_Report.pdf)
  15. 佩莱拉 LG, 卡瓦莱特 O, 博诺米 A, 张 Y, 华纳 E 和覃 HL, 生物燃料生命周期温室气体排放评估工具的比较: 产自甘蔗、玉米和小麦的乙醇案例研究. 可再生及可持续能源评论. 110:1-12 (2019) .  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.043>.

16. 斯库利 MJ, 诺里斯 GA, 法尔克尼 TMA 及麦金塔 DL, 美国玉米乙醇的碳强度: 科学现状. 环境研究简报 16:043001 (2021).  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abde08/pdf>.
17. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC). IPCC 第五次评估报告. (2013).  
<https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
18. 美国农业部 (USDA) 国家农业统计局 (NASS). 快速统计. (2020).  
<https://data.nal.usda.gov/dataset/nass-quick-stats>
19. 美国农业部 (USDA) 国家农业统计局 (NASS). 玉米生产实践和成本报告. (2018).  
[https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/52816/%5E2016%5ECorn%5EPhase2%20Questionnaire%20Production%20Practices\\_Costs%5EQ%5ECOP\\_CPP.pdf?v=5646.2](https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/52816/%5E2016%5ECorn%5EPhase2%20Questionnaire%20Production%20Practices_Costs%5EQ%5ECOP_CPP.pdf?v=5646.2)
20. 拜耳曼 PM, 洛森 CJ, 文特雷亚 RT 和兰姆 JA, 明尼苏达州玉米氮肥使用调查. 农业系统 109:43-52 (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.02.004>.
21. 美国农业部经济研究局 (ERS) 基于农业资源管理调查的专项表格: 成本和收益数据 (2020).
22. 加拉赫, P.W, 伊, W. C. 鲍姆斯, H. S. 2015 年玉米乙醇行业能源平衡 (2016). <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/2015EnergyBalanceCornEthanol.pdf>
23. 萨普利, H., 杜菲尔德, J. A. 及王, M. Q. 玉米乙醇的能量平衡: 最近更新 (2002). <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/2015EnergyBalanceCornEthanol.pdf>
24. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC). 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 (2006). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
25. 刘 X, 权 H, 诺斯卢普 D 和王 M, 将农业实践转向生产可持续的低碳强度生物燃料原料. 《环境研究》15:084014 (2020).  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab794e>.

26. 徐, H., 蔡, H, 和权, H. GREET® 2019 玉米农田氮肥中 N<sub>2</sub>O 直接排放因子研究进展. (2019).  
[https://greet.es.anl.gov/publication-n2o\\_update\\_2019](https://greet.es.anl.gov/publication-n2o_update_2019)
27. 蔡, H., 王, M. 韩, J. 农田施撒石灰的二氧化碳排放因子更新(2014).  
<https://greet.es.anl.gov/publication-co2-liming>
28. 能源信息署 (EIA). 总能源(2020).  
<https://www.eia.gov/totalenergy/data/browser/>
29. 里佩 BR, 2012 年美国旱灾. 极端天气和气候. 10A:57 - 64 (2015).  
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.004>.
30. 美国农业部. 谷物粉碎及副产品生产(2021).  
<https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/n583xt96p>
31. 吴, M. 美国生物燃料行业中能源和水的可持续性(2019).  
<https://water.es.anl.gov/documents/EW%20survey%20report%20final%20ANL.pdf>
32. 安德森 JL, 辛哥德 DJ, 卡尔朔伊尔 KF 和希蓬 AR, 评估产奶奶牛饲料配方中包含的两种浓度的干酒糟和湿酒糟. 乳品科学杂志. 89:3133 - 3142 (2006). [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(06\)72587-5](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(06)72587-5).
33. 王 Z, 顿恩 JB, 韩 J 和王 MQ, 玉米油回收对玉米乙醇和玉米油生物柴油生命周期温室气体排放的影响. 生物技术生物燃料 8:178 (2015).  
<https://doi.org/10.1186/s13068-015-0350-8>.
34. 桑切斯 DL, 约翰逊 N, 麦考伊 ST, 特纳 PA 和马克 KJ, 美国生物精炼厂碳捕获和封存的近期部署. 《自然科学学报》. 115:4875 - 4880 (2018).  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1719695115>.
35. 李 U, 霍金斯 T, 柳 E, 王 M, 黄 Z 和陶 L, 利用玉米乙醇生物精炼厂的二氧化碳废料进行额外乙醇生产: 生命周期分析. 生物燃料、生物制品和生物精炼. 15 (2) : 468 - 480 (2020).  
<https://doi.org/10.1002/bbb.2175>.
36. 苏伯卡尔 SD 和斯凯洛斯 SJ, 二氧化碳气体回收的市场驱动排放. 环境科技. 48:14615 - 14623 (2014). <https://doi.org/10.1021/es503485z>.

37. 加州空气资源委员会 (CARB). 低碳燃料标准报告工具季度摘要 (2020).  
<https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lrtqsummaries.htm>
38. 塞钦格 T、海姆里希 R、霍顿 RA、董 F、艾罗贝德 d A、法比奥萨 J 等人, 出产生物燃料的美国农田通过土地用途变更增加温室气体排放. 科学. 319:1238 - 1240 (2008) .  
<https://doi.org/10.1126/science.1151861>.
39. 弗利 JA、拉曼库蒂 N、布劳曼 KA、卡西迪 ES、戈伯 JS、约翰逊 M 等人, 耕地的解决方案. 自然. 478:337 - 342 (2011) .  
<https://doi.org/10.1038/nature10452>.
40. 权 H, 刘 X, 邓恩 JB, 穆勒 S, 韦德 MM, 王 M. 生物燃料生产引起的土地用途和土地管理变化碳计算器 (CCLUB) (2020).  
<https://greet.es.anl.gov/publication-cclub-manual-r6-2020>
41. 加州空气资源署. 第三次公开提供修改文本和其他文件和信息的通知 (2009). <https://ww3.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfs3rdnot.pdf>
42. 环境保护署. 可再生燃料标准计划 (RFS2) 监管影响分析 (2010).  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?docky=P1006DXP.txt>
43. 泰纳, W. E., 塔赫里普尔, F., 庄, Q., 比鲁尔, D, 及巴尔多斯, U. 美国玉米乙醇生产引起的土地用途变更和二氧化碳排放: 综合分析 (2010).  
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135275662>
44. 拉伯德, D. 评估欧洲生物燃料政策对土地用途变更的影响 (2011).  
<http://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p157385/id/197/file/198.pdf>
45. 顿恩 JB、穆勒 S、权 H 和王 MQ, 玉米和纤维素乙醇的土地用途变更和温室气体排放. 生物技术生物燃料 6:51 (2013) .  
<https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-51>.
46. 艾略特 J、萨尔曼 B、拜斯特 N、格劳特 M、顿恩 JB、弗斯特 I 等人. 评估国内生物燃料引起的潜在土地用途变更和排放的空间建模框架. 环境科学技术. 48:2488 - 2496 (2014) .  
<https://doi.org/10.1021/es404546r>.



47. 加州空气资源署. 工作人员报告: 从作物生物燃料的间接土地用途变更计算碳强度值(2015).  
[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic//fuels/lcfs/peerreview/050515staffreport\\_iluc.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic//fuels/lcfs/peerreview/050515staffreport_iluc.pdf)
48. 欧洲议会和欧盟理事会. 指令(EU) 2015/1513/EC, 修订关于汽油和柴油质量的指令 98/70/EC, 修订关于促进可再生燃料能源利用的指令 2009/28/EC(2015). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1513&from=ro>
49. 赫泰尔 TW, 戈卢伯 A, 琼斯 AD, 欧海尔 M, 普莱文 RJ 和卡曼 DM, 美国玉米乙醇对全球土地用途和温室气体排放的影响: 预计市场调节反应. 生物科学. 60:223 - 231 (2010).  
<https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.8>.
50. 瓦林 H, 彼得斯 D, 范登伯格 M, 弗兰克 S, 哈夫利克 P, 福塞尔 N, 哈梅林克 C, 皮尔克 J, 莫斯尼尔 A, 巴尔科维奇 J, 施密特 E. 欧盟消耗的生物燃料对土地用途变更的影响: 面积和温室气体影响的量化(2015).  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report\\_GLOBIOM\\_publication.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf)
51. 王, M. 温室气体、管制排放和交通运输中的能源使用® (2017 年 Excel) 2017). [doi:http://doi.org/10.11578/GREET-EXCEL-2017/DC.20200803.2](http://doi.org/10.11578/GREET-EXCEL-2017/DC.20200803.2).
52. 赵 X, 塔赫里普尔 F, 玛琳娜 R, 斯塔堡 MD 和泰纳 WE, 估算可持续航空生物燃料路径的土地用途变更诱导排放量. 全面环境科学. 779:146238 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146238>.
53. 国际民用航空组织(ICAO). CORSIA 支持文件: CORSIA 合格燃料-生命周期评估方法(2019). [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document\\_CORSIA%20Eligible%20Fuels\\_LCA%20Methodology.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf)

## 作者介绍:



### 李义湘 (Lee Uisang)

李义湘博士是阿贡国家实验室的能源系统分析师。他的研究主要致力于评估包括二氧化碳利用，废弃物发电、可持续燃料和水资源压力在内的各种能源系统对环境的影响。



### 权和永 (Hoyoung Kwon)

权和永博士是阿贡国家实验室的首席环境科学家。他的研究重点是开发建模框架，将基于过程的模型与多尺度的时空数据库结合起来，作为一种实用手段，为决策者提供更好的可持续土地利用和管理实践建议。



### 梅. 吴 (May Wu)

梅. 吴博士是阿贡国家实验室的首席环境系统科学家。她的研究方向是水资源可利用量，水足迹以及水的使用对生物燃料生产中水质的影响。吴拥有 25 年的经验，发表了 60 余篇著作，拥有密歇根州立大学的环境工程和环境毒理学博士学位。



### 迈克尔. 王 (Michael Wang)

迈克尔. 王博士是阿贡国家实验室的系统评估中心主任。他一直在实验室领导 GREET LCA 模型的开发。在过去的 25 年中，广泛参与生物燃料生命周期评估。