



U.S. GRAINS  
COUNCIL



# 美国谷物协会对美国酿酒高粱的研究

江南大学酿造微生物学与应用酶学研究室

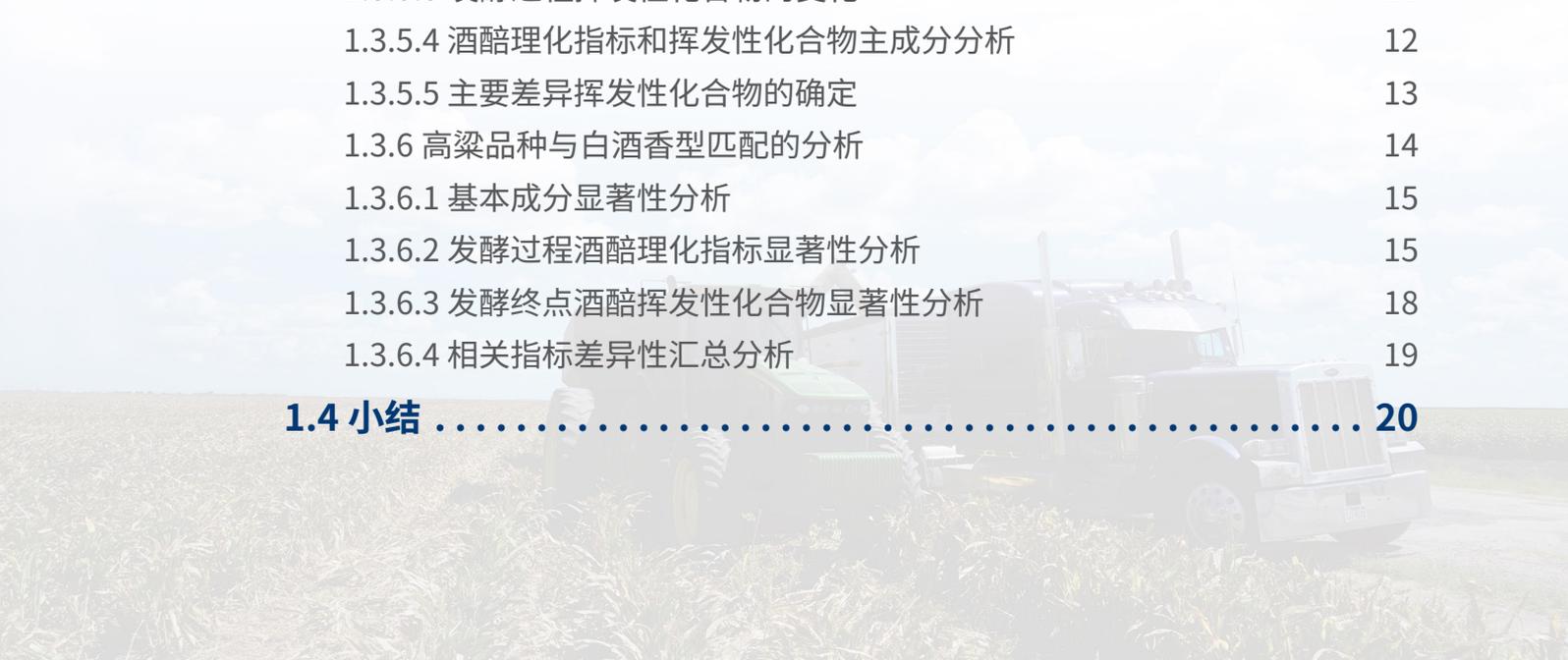
**2024.05**





# 目 录

<b>第 1 章 实验室规模筛选优良白酒酿造用美国高粱品种 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 项目背景与研究背景 .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 2017 年白酒行业	1
1.1.2 原料及其发酵食品概述	2
1.1.2.1 原料与发酵食品品质的关系	2
1.1.2.2 原料的理化成分对发酵食品品质的影响	2
<b>1.2 项目研究目标 .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 结果与分析 .....</b>	<b>2</b>
1.3.1 不同高粱相关信息	3
1.3.2 不同品种高粱物理化学特性	3
1.3.2.1 酿酒用高粱理化性质标准	3
1.3.2.2 不同品种高粱外观特征	4
1.3.2.3 不同品种高粱基本成分含量	5
1.3.2.4 9 种高粱基本成分的主成分 (PCA) 分析	7
1.3.3 白酒安全相关特征	8
1.3.4 高粱蒸煮后的挥发性化合物	8
1.3.5 高粱对酿酒的影响	9
1.3.5.1 高粱对酿酒功能微生物生长的影响	9
1.3.5.2 发酵过程中乙醇, 乙酸, 乳酸含量变化	10
1.3.5.3 发酵过程挥发性化合物的变化	12
1.3.5.4 酒醅理化指标和挥发性化合物主成分分析	12
1.3.5.5 主要差异挥发性化合物的确定	13
1.3.6 高粱品种与白酒香型匹配的分析	14
1.3.6.1 基本成分显著性分析	15
1.3.6.2 发酵过程酒醅理化指标显著性分析	15
1.3.6.3 发酵终点酒醅挥发性化合物显著性分析	18
1.3.6.4 相关指标差异性汇总分析	19
<b>1.4 小结 .....</b>	<b>20</b>



<b>第 2 章 大生产规模评估美国高粱对白酒酿造的影响 .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 研究背景.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 研究目标.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 结果与分析.....</b>	<b>22</b>
2.3.1 高粱品种及白酒香型	22
2.3.1.1 美国高粱品种	22
2.3.1.2 白酒香型及对应原料	22
2.3.2 安徽金种子酒业股份有限公司的应用	24
2.3.2.1 清香型白酒生产	24
2.3.2.1.1 对白酒发酵的影响	24
2.3.2.1.2 对白酒酒质的影响	25
2.3.2.2 浓香型白酒生产	26
2.3.2.2.1 对白酒发酵的影响	26
2.3.2.2.2 对白酒酒质的影响	27
2.3.2.3 馥合香型白酒生产	28
2.3.2.3.1 对白酒发酵的影响	29
2.3.3 江苏乾隆江南酒业股份有限公司的应用	30
2.3.3.1 对白酒发酵的影响	30
2.3.3.2 对白酒酒质的影响	32
2.3.4 江苏汤沟两相和酒业股份有限公司的应用	33
2.3.4.1 对白酒发酵的影响	34
2.3.4.2 对白酒酒质的影响	36
<b>2.4 小结 .....</b>	<b>38</b>
<b>第 3 章 结果与讨论 .....</b>	<b>39</b>



# 第 1 章 实验室规模筛选优良白酒酿造用美国高粱品种

## 1.1 项目背景与研究背景

为考察美国高粱在中国白酒酿造中的适用性，美国谷物协会与江南大学开展《美国谷物协会对美国酿酒高粱属性的研究》项目的合作研究，该项目于 2017 年 12 月 20 日正式生效，原定合作时间为 2017 年 12 月 20 日至 2019 年 12 月 20 日。2018 年 12 月 20 日，提交关于白酒制作的 6 种不同高粱品种的实验室规模评价报告；2019 年 12 月 20 日提供关于白酒制作的 2-3 种不同高粱品种的扩大评估报告。

在项目实施过程中，第一阶段实验室规模研究工作由于受到国际环境因素的影响，项目实际研究时间发生延后，实验室规模研究用的 6 种美国高粱实际到达实验室时间为 2019 年 1 月 8 日，鉴于此，双方于 2019 年 1 月 9 日签订《关于“美国谷物协会对美国酿酒高粱属性的研究”（2017 年 12 月 20 日）协议的补充说明》，协议中将第一阶段项目报告延期为 2019 年 12 月 30 日。

在项目实施过程中，第二阶段生产应用规模研究工作再次受到国际环境因素的影响，项目实际研究时间再次发生延后，生产应用的 3 种美国高粱实际到达企业的时间为 2023 年 2 月~3 月，根据高粱实际到达时间再进一步开展工作。

### 1.1.1 2017 年白酒行业

中国白酒，是以粮谷为主要原料，以大曲、小曲、麸曲、酶制剂及酵母等为糖化发酵剂，经蒸煮、糖化、发酵、蒸馏、陈酿、勾调而成的蒸馏酒。

中国酒业协会公布的 2017 年全国酿酒行业数据显示，2017 年全国酒类行业生产经营数据。数据显示，2017 年，全国规模以上白酒企业完成酿酒总产量 1198.06 万千升，同比增长 6.86%；销售收入 5654.42 亿元，同比增长 14.42%；实现利润总额 1028.48 亿元，同比增长 35.79%。其具体情况如图 1-1 所示。

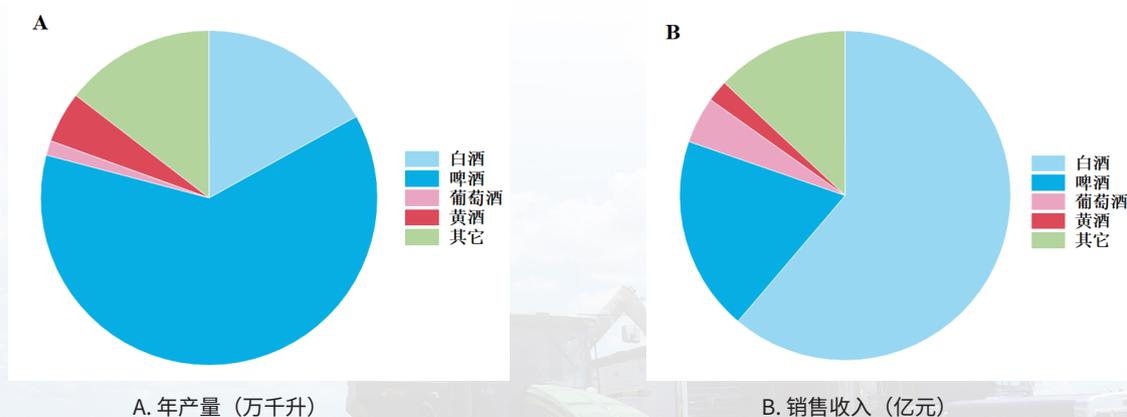


图 1-1 2017 年中国酿酒行业数据

## 1.1.2 原料及其发酵食品概述

### 1.1.2.1 原料与发酵食品品质的关系

各式各样的原料可形成多种营养丰富和风味独特的发酵食品。传统发酵食品多为自发式发酵，所获得产品的品质取决于两个因素：一是发酵基质，二是微生物菌群。其中，原料中的营养物质（碳水化合物、脂肪酸和氨基酸等）、挥发性化合物及其前体物质等可直接或间接（酶促反应）的提供营养物质及挥发性化合物；微生物菌群负责启动食品发酵过程，将原料中的碳源和氮源等营养物质转化为新的代谢产物，从而丰富发酵产品中的营养及风味，因此，使用高质量的原料有利于提高发酵食品的品质。

### 1.1.2.2 原料的理化成分对发酵食品品质的影响

原料含有丰富的营养物质供微生物生长与代谢。发酵食品的风味与其原料的理化成分密切相关，主要包括碳水化合物、蛋白质、脂肪、单宁等。

淀粉作为大部分酿造原料中的主要碳源物质，对发酵食品的品质有着重要影响。不同原料中淀粉的差异不仅体现在含量上，也体现在其结构上，如高粱的粳 / 糯之分与其淀粉结构有关。糯高粱中支链淀粉含量较高，而支链淀粉更容易糊化，易被微生物利用，有研究表明糯高粱的出酒率及优质品率高于粳高粱。谷物中的多糖（淀粉、纤维素、半纤维素等）在发酵过程中被各种碳水化合物水解酶水解，生成可发酵糖（葡萄糖、麦芽糖、木糖、阿拉伯糖等），不同的微生物对可发酵糖的偏好性存在差异，不同的碳源组成可决定不同的微生物菌群组成，进而导致发酵产品风味的差异。

蛋白质作为原料中的主要氮源，其含量受到品种及产地的影响。研究表明原料中适当的蛋白质能够促进代谢产物的生成，丰富发酵食品的风味，而过高的蛋白质含量则会导致高级醇含量的增加，降低产品品质。此外，原料蛋白组成的差异还会直接影响芳香族化合物的合成，造成发酵产品风味的差异。

单宁属于酚类物质，广泛存在于发酵原料中。目前已有很多关于原料中单宁的研究。在白酒发酵过程中添加单宁后，高级醇（异丁醇，2-甲基-1-丁醇，3-甲基-1-丁醇）的含量有了显著的提高。但是，单宁过高会对发酵过程中酵母的生长代谢产生抑制作用，进而影响挥发性化合物的产生，降低发酵食品品质。

## 1.2 项目研究目标

调查美国 6 种不同的高粱品种对白酒及其生产过程（中国白酒）的影响，包括品质、发酵效率和产品安全。

第一阶段目标：6 种不同高粱品种的实验室规模评估

第二阶段目标：对 3 种酿造白酒的高粱品种进行生产规模的评估

## 1.3 结果与分析

### 1.3.1 不同高粱相关信息

表 1-1 各品种高粱产地及基本特征

高粱种类	产地	特征
A1	South Dakota, Farmer	/, 白色
A2	Texas levelland Elevator	/, 混合
A3	Waxy Kansas Farmer	/, 红色
A4	Kansas liberal Elevator	/, 红色
A5	Texas Angelo Elevator	/, 红色
A6	Texas corpus Farmer	/, 红色
C7	中国东部	粳高粱, 红色
C8	贵州	糯高粱, 红色
C9	中国东北	粳高粱, 黄色

### 1.3.2 不同品种高粱物理化学特性

#### 1.3.2.1 酿酒用高粱理化性质标准

表 1-2 高粱相关标准规定的理化性质

指标	清香型	浓香型	酱香型		食品用高粱	工业用高粱
高粱品种	粳高粱		糯高粱	粳高粱		
水分 (%)	≤ 14.0	≤ 14.0	≤ 14.0	≤ 14.0	≤ 14.0	≤ 14.0
不完整率 (%)	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0
发霉率 (%)		≤ 2.0				
容重 (g/L)	≥ 720	≥ 720	≥ 700	≥ 700	≥ 700	
支链淀粉 (%)	总淀粉含量 占比 ≤ 90.0 %					
淀粉含量 (%)	≥ 65		50~75	50~70		≥ 64.5
单宁含量 (%)	1.0±0.5					
粗蛋白含量 (%)	8.0 ~ 10.0					
粗脂肪含量 (%)	≤ 4.0					
应用	酿酒用	酿酒用	酿酒用		食品 / 饲料	制造淀粉和糖类
标准	DB 14/T 1187-2016	T/AHFIA 010-2018	DB 52/T 867-2014		GB/T 8231-2007	GB/T 26633-2011

1.3.2.2 不同品种高粱外观特征



图 1-2 不同品种高粱外观特征

表 1-3 不同品种高粱外观特征

	水分 %	/10 粒重 (g)	不完善粒	杂质	颜色	气味
A1	13.42	0.229	轻微	轻微	白色	正常
A2	12.50	0.296	轻微	较多	混合	正常
A3	10.58	0.395	正常	正常	红色	正常
A4	11.98	0.335	正常	正常	红色	正常
A5	9.89	0.241	轻微	较多	红色	正常
A6	12.01	0.258	轻微	较脏	红色	异味
C7	11.59	0.305	正常	正常	红色	正常
C8	13.09	0.222	正常	正常	红色	正常
C9	12.51	0.343	正常	正常	黄色	正常

9 种高粱中的水分含量在 9%-14% 之间，其中 A5 的水分含量最低，为 9.89%，A1 的水分含量最高，为 13.41%。对于高粱粒径大小来说，A3 最大，C8 最小。美国 6 种高粱中 A1, A2, A5, A6 均有轻微的不完善粒。

A2 和 A5 的杂质较多，A6 种有较多灰尘且存有异味。

### 1.3.2.3 不同品种高粱基本成分含量

#### (1) 9 种高粱中的粗蛋白含量

粗蛋白在不同品种高粱间的含量为 80-110 mg/g，其中 A1,A2,A3,A6 的粗蛋白含量在所设三组对照（C7，C8，C9）之间（80~100 mg/g）。A5 含量最高，达到了 132.24 mg/g。

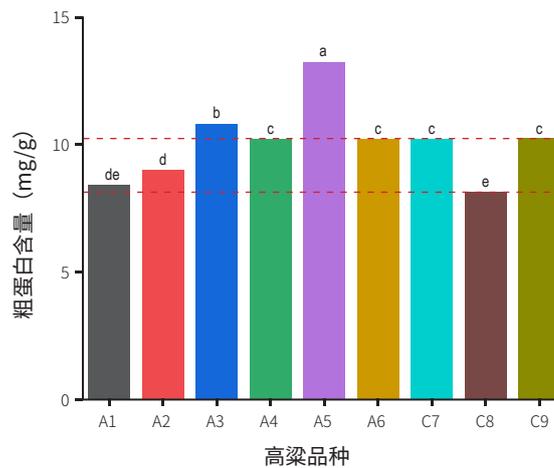


图 1-3 9 种高粱中粗蛋白含量

#### (2) 9 种高粱中的粗脂肪含量

粗脂肪在不同品种高粱间的含量为 35-65 mg/g，其中 A1-A6 高粱的粗脂肪含量均在所设三组对照（C7，C8，C9）之间（35~65 mg/g），其中 A5 含量最高，达到了 53.18 mg/g。

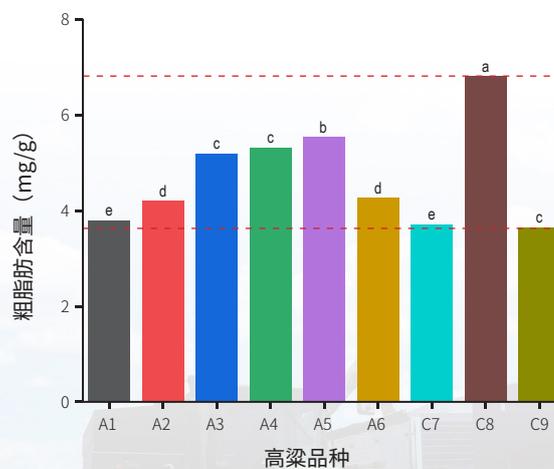


图 1-4 9 种高粱粗脂肪含量

(3) 9 种高粱中的单宁含量

单宁在不同品种高粱间的含量为 4.8-23.5 mg/g，其中 A1~A6 高粱的单宁含量要显著低于对照组中的 C8 和 C9 高粱，普遍在 5 mg/g 上下。

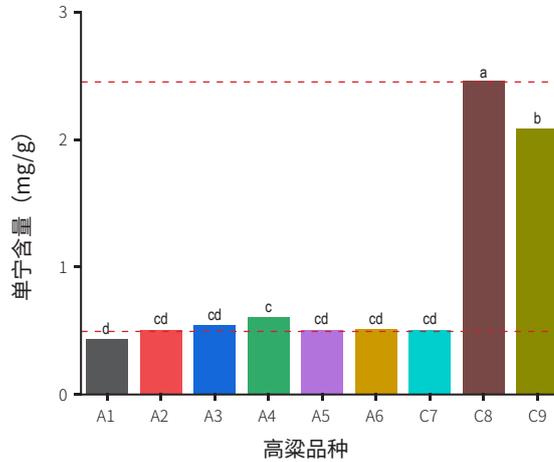
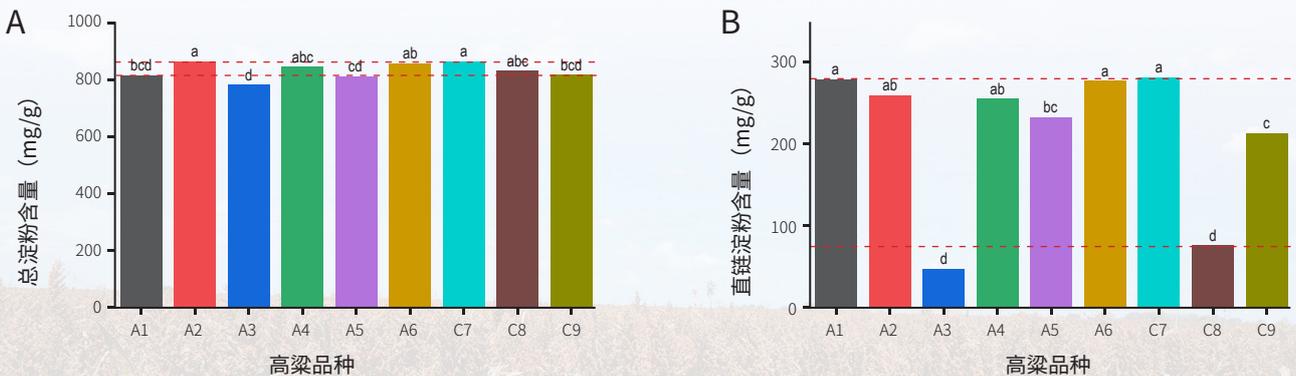


图 1-5 9 种高粱单宁含量

(4) 9 种高粱中的淀粉含量

淀粉分为直链淀粉和支链淀粉，由图 1-6 可知不同品种高粱在淀粉含量和结构组成方面均有明显的差异，6 种高粱总淀粉含量在 750-850 mg/g 之间；总淀粉含量最高的为 A6，最低的为 A3。在淀粉结构组成上，粳高粱中直链淀粉含量在总淀粉含量中所占比例远小于相对支链淀粉，并且总淀粉含量较高的粳高粱品种，其对应的支链淀粉含量也相对更高。其中作为对照的三种高粱 C7 和 C9 为直链淀粉占比高的粳高粱，C8 为支链淀粉占比高的糯高粱，在美国 6 种高粱中，A3 为糯高粱，其余 5 种均为粳高粱。

淀粉是发酵过程中生产乙醇最主要的底物。在白酒酿造过程中，由于高粱原料蒸煮后摊凉时，直链淀粉相对支链淀粉更容易老化，老化后的淀粉不易被淀粉酶酶解，而没有直链淀粉包裹的淀粉颗粒的外围结构更为松散，从而更容易被酶解，因此固态发酵过程中淀粉的结构组成决定了其相应的酶解速率，从而直接影响淀粉到乙醇的转化速率。所以，总淀粉含量越高，支链淀粉所占比例越大的高粱品种在白酒酿造过程中越有利于提高出酒率。根据测定结果，在所有高粱品种中，尽管 A3 淀粉含量较低，但其属于支链淀粉占比高的糯高粱，因此从淀粉角度分析，A1~A6 高粱均具有酿酒的潜能。



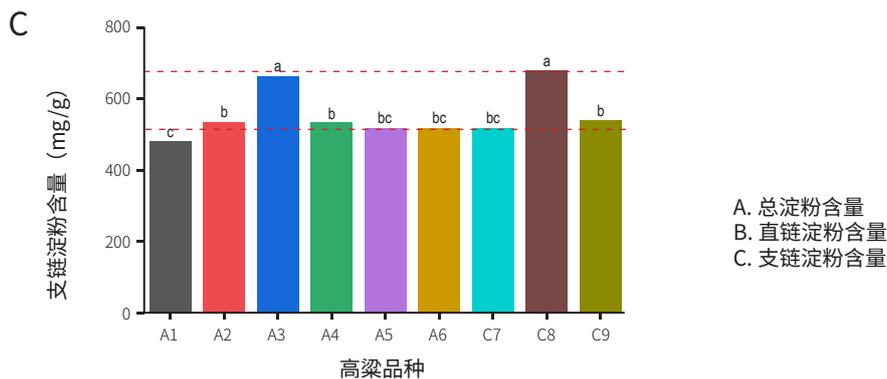


图 1-6 不同品种高粱淀粉含量

#### (5) 9 种高粱的淀粉糊化特性

淀粉作为高粱籽粒中的重要组成成分，其含量和结构组成决定了高粱的蒸煮品质，进而影响白酒发酵，而淀粉的糊化属性是高粱蒸煮品质的直接体现。因此，本研究采用快速粘度分析仪（RVA）对 9 种高粱淀粉的糊化属性进行了测定，测定结果见表 1-4。如表 1-4 所示，9 种高粱淀粉的峰值粘度变化范围为 2590.00-4414.00 cP，其中峰值粘度在 4000.00cP 以上的为 A3，A4 和 C8，而 A1 的峰值粘度最低为 2590.00cP。对于糊化温度，A6 的糊化温度最高，为 79.85° C，A2，A4，C8 最低为 77.40° C。高粱中直链淀粉含量越低，淀粉崩解值越大，高粱淀粉更容易破裂；支链淀粉含量更高的糯高粱淀粉在蒸煮过程中更容易破裂，从而有利于节省能源以及更容易被微生物分解代谢转化为乙醇。

表 1-4 不同品种高粱外观特征

高粱品种	峰值粘度 PV/cP	热浆粘度 HV/cP	崩解值 BD/cP	最终粘度 FV/cP	回生值 SB/cP	峰值时间 PT/min	糊化温度 T/° C
A1	2590.00	1687.00	903.00	3101.00	1414.00	5.00	79.50
A2	3109.00	1626.00	1483.00	3141.00	1515.00	4.73	77.40
A3	4414.00	1521.00	2893.00	1970.00	449.00	3.73	76.55
A4	4008.00	1563.00	2445.00	3100.00	1573.00	3.90	77.40
A5	3133.00	1815.00	1318.00	3478.00	1663.00	4.33	79.80
A6	3504.00	1626.00	1878.00	3197.00	1571.00	3.97	79.85
C7	3763.00	1646.00	2117.00	3174.00	1528.00	4.07	77.45
C8	4143.00	1174.00	2969.00	2092.00	918.00	3.73	77.40
C9	3551.00	1522.00	2029.00	3122.00	1600.00	3.87	75.45

#### 1.3.2.4 9 种高粱基本成分的主成分（PCA）分析

将前面所检测的粗蛋白，粗脂肪，单宁，淀粉等的理化指标进行主成分分析（PCA），发现美国高粱除了 A3 和 A5 两种外，其余和 C9 出现了明显的聚集情况，说明这几种高粱酿酒相关的指标相近（图 1-7），推测出它们的酿酒性能较为相似。

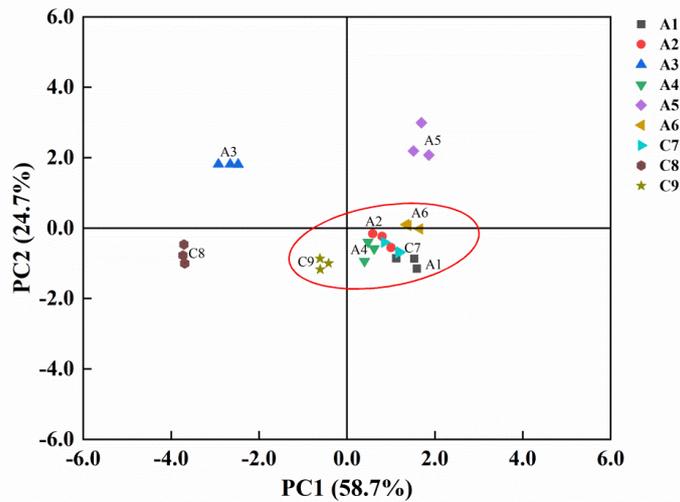


图 1-7 不同品种高粱基本成分 PCA 分析

### 1.3.3 白酒安全相关特征

氨基甲酸乙酯作为白酒中的有害物质要被尽可能降低，氰化物作为氨基甲酸乙酯的前体物质也在高粱籽粒中存在，对比 9 种高粱氰化物的含量可看出 A5 含量显著高于其他品种高粱，达到 0.54  $\mu\text{g/g}$ ，最低的 A4 是 0.027  $\mu\text{g/g}$ 。其余高粱氰化物含量在 0.0257  $\mu\text{g/g}$ ~0.284  $\mu\text{g/g}$  之间（图 1-8）。

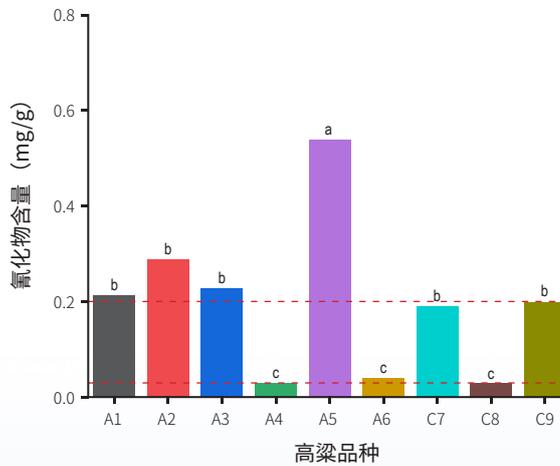


图 1-8 不同品种高粱氰化物含量

### 1.3.4 高粱蒸煮后的挥发性化合物

高粱蒸煮后的挥发性化合物对最终白酒的风味贡献程度较大，因此对 9 种高粱蒸煮后的挥发性化合物进行了检测。在 9 种高粱中共检测到 127 种挥发性化合物，其中 37 种是共有的挥发性化合物，14 种是国内高粱所特有的化合物，76 种是美国高粱所特有化合物。其中在美国 6 种高粱中检测到 18 种醇类化合物，15 种醛类化合物，6 种酸类化合物，10 种酮类化合物，6 种酯类化合物，2 种萜烯类化合物，6 种呋喃类化合物和 13 种芳香族类化合物。

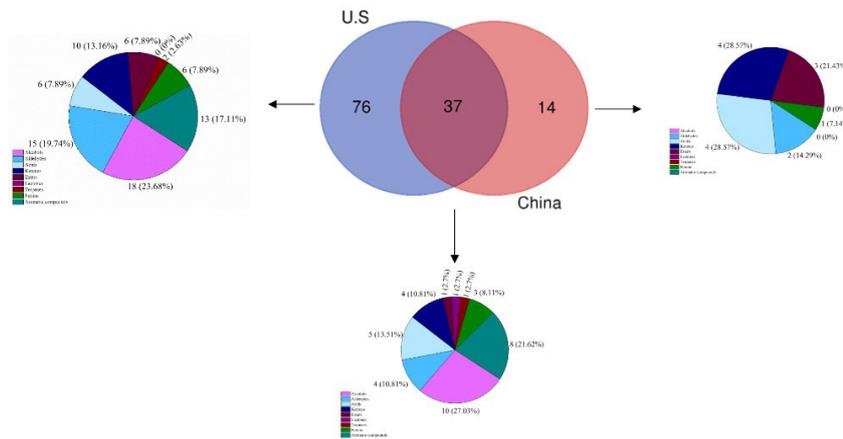


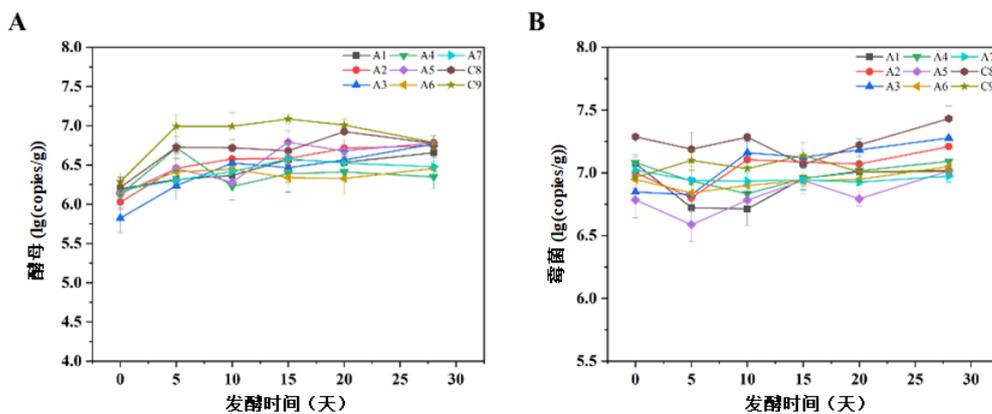
图 1-9 9 种高粱蒸煮后的挥发性化合物

### 1.3.5 高粱对酿酒的影响

#### 1.3.5.1 高粱对酿酒功能微生物生长的影响

为进一步探究 9 种高粱原料对发酵过程中微生物的影响，通过实时荧光定量的方法对发酵过程中的微生物生物量进行分析。所定量的微生物分别为酵母菌，霉菌，细菌，芽孢杆菌（图 1-10），这些都是经之前研究所得出对白酒中代谢产物有贡献是关键菌。

对于酵母生物量的动态变化，可大致分为两个阶段（发酵 0-10 d 和 15-28d），大部分高粱均在第一阶段呈现出明显的上升趋势，并在发酵 10 d 达到最高值，其中最大值能达到 C9 的 7.08 lg(copies/g)，最小值为 A3 的 5.82 lg(copies/g)；而在第二阶段呈现下降趋势。对于发酵过程的霉菌生物量，9 种高粱也表现出不同的差异，其中 9 种高粱酒醅中的霉菌均在 7 lg(copies/g) 上下小范围内动态波动。对于细菌的生物量，两者均在发酵开始便呈现急剧增长的趋势，且在第 5 天时达到峰值，并开始下降，直到第 15d 时达到较稳定状态，其中 A4 最高值可达到 9.56 lg(copies/g)。芽孢杆菌的变化情况与霉菌类似，但其数量为 7 lg(copies/g) 上下。结果表明，9 种高粱发酵过程酒醅中微生物的变化情况各不相同，但大体趋势一致；在生物量方面，9 种高粱酒醅存在着较大的差异。



A. 发酵过程中酵母菌生物量变化

B. 发酵过程中霉菌生物量变化

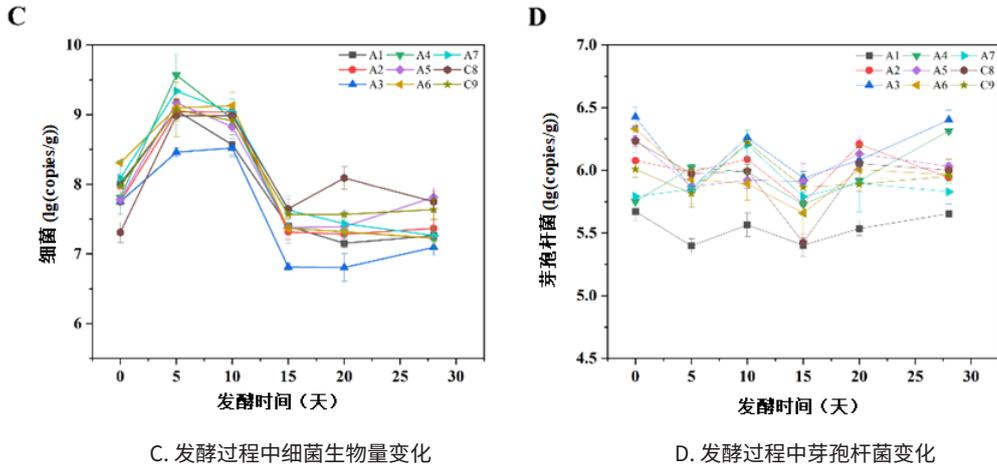


图 1-10 不同品种高粱发酵酒醅中微生物变化情况

进一步对酿酒酵母与耐酸乳杆菌的影响，由图 1-11A 可以看出，9 种高粱发酵过程酒醅中酿酒酵母生物量在第 0-5 d 时迅速增长，并在此后趋于稳定状态，其中在发酵完成时达到最高值 A2 的 6.12 lg(copies/g)，最低值则为 C7 的 5.68 lg(copies/g)。图 1-11B 显示了 9 种高粱发酵过程中耐酸乳杆菌生物量在 0-10 d 时缓慢增长，而在 10 d 以后开始较快增长，最终达到最大值 A5 的 8.36 lg(copies/g)，最低则为 A6 的 6.60 lg(copies/g)。表明不同高粱品种对酿酒酵母生长影响较大。

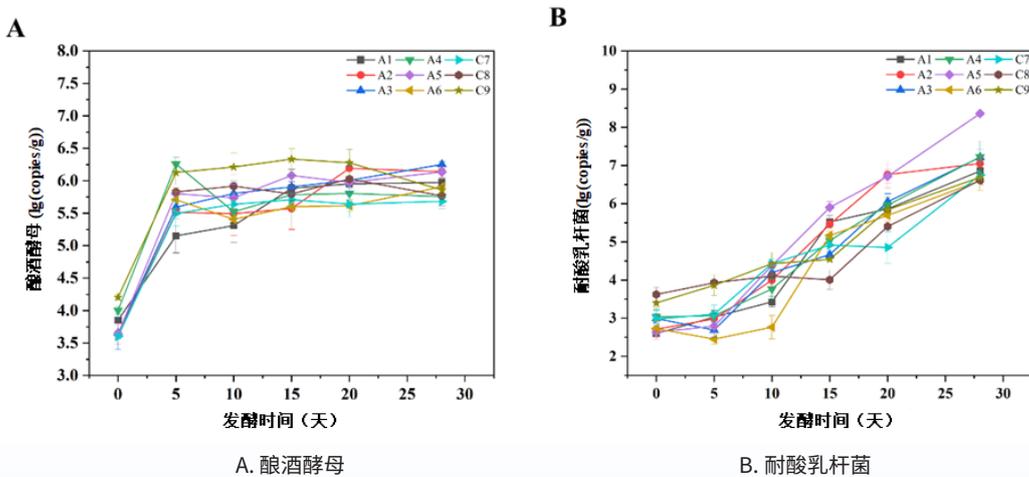


图 1-11 发酵过程酒醅中功能微生物生物量的变化

### 1.3.5.2 发酵过程中乙醇，乙酸，乳酸含量变化

对 9 种高粱发酵酒醅理化指标进行分析。首先是与白酒直接相关的乙醇产生情况，由图 1-12 可以看出 9 种高粱发酵过程中乙醇于第 5d 时增速放缓，第 10 d 时达到稳定，最终 A1 和 C8 乙醇含量要显著高于其他 7 种高粱，能够达到 100 mg/g，而 A6 最低，为 79.5 mg/g。然后是两种有机酸，即乙酸和乳酸的产生情况，由中可以看出 9 种高粱的乙酸和乳酸也在第 5d 时增速放缓，第 10d 时达到稳定状态，其中最高产量分别为 A4 的 1.16 mg/g 与 A1 的 10.15 mg/g。整个发酵过程中酒醅 pH 的变化情况，与乙酸和乳酸变化相一致，酒醅

pH 在第 5d 时达到 3.6-3.8, 而后稳定。通过乙醇的变化趋势来看, 美国 6 种高粱产醇能力与三组对照相比, A4, A6 偏低, 其余高粱处于正常水平; 从产酸变化趋势来看, 各品种高粱发酵过程酒醅中乙酸含量处于波动最后趋于稳定的状态, 与对照组相比美国 6 种高粱产乙酸能力处于正常水平; 美国 6 种高粱产乳酸的能力要优于 C8 和 C9 高粱。醇酸类物质作为酒体香气物质的前体, 其含量的提高在一定程度上有利于成品酒的香气提升。

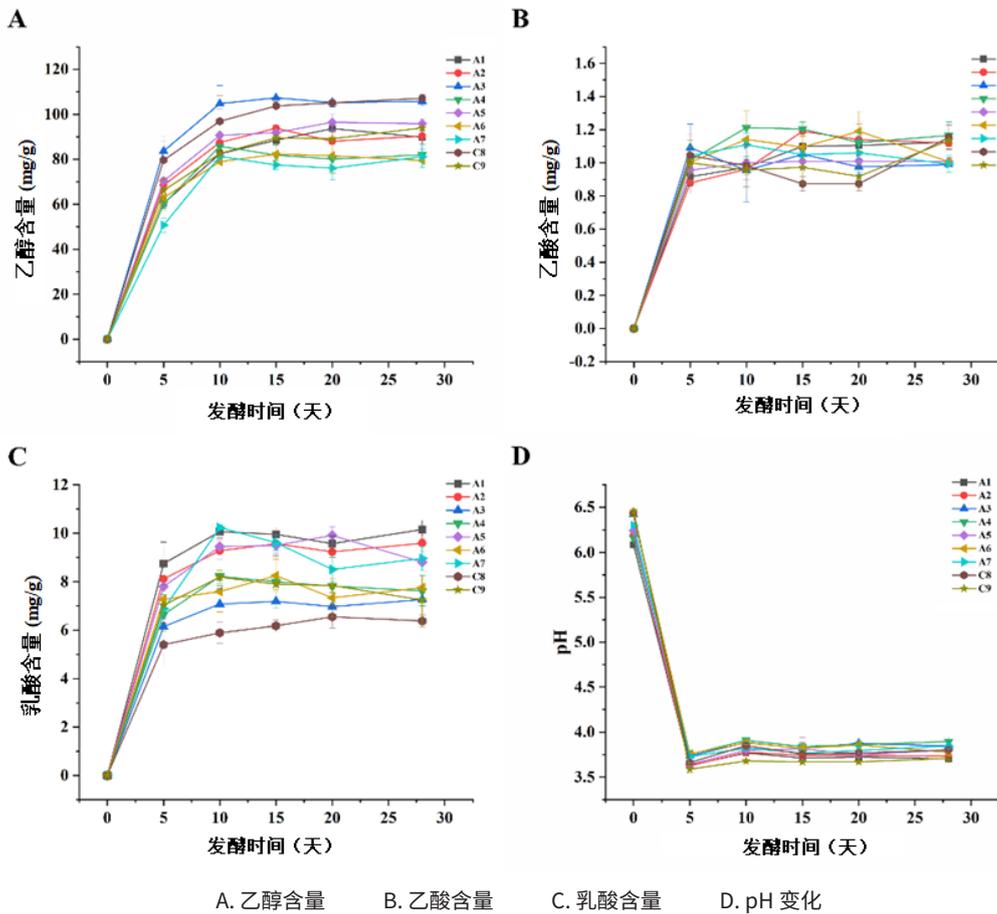


图 1-12 不同品种高粱发酵过程中酒醅理化指标

### 1.3.5.3 发酵过程挥发性化合物的变化

为了探究 9 种高粱原料对白酒发酵品质的影响，跟踪检测了 9 种高粱发酵过程的挥发性化合物。如图 1-13 所示，共检测到 49 种挥发性化合物，其中包括 23 种酯类化合物，15 种醇类化合物，3 种酸类化合物，3 种醛类化合物和 5 种酚类化合物。基于挥发性化合物含量可知，A3 高粱酒醅中产酯，产醇和产酸的能力要显著高于其他高粱，A4，A5 的产酯能力较高，A1 和 A2 具有较高产酚类化合物的能力。

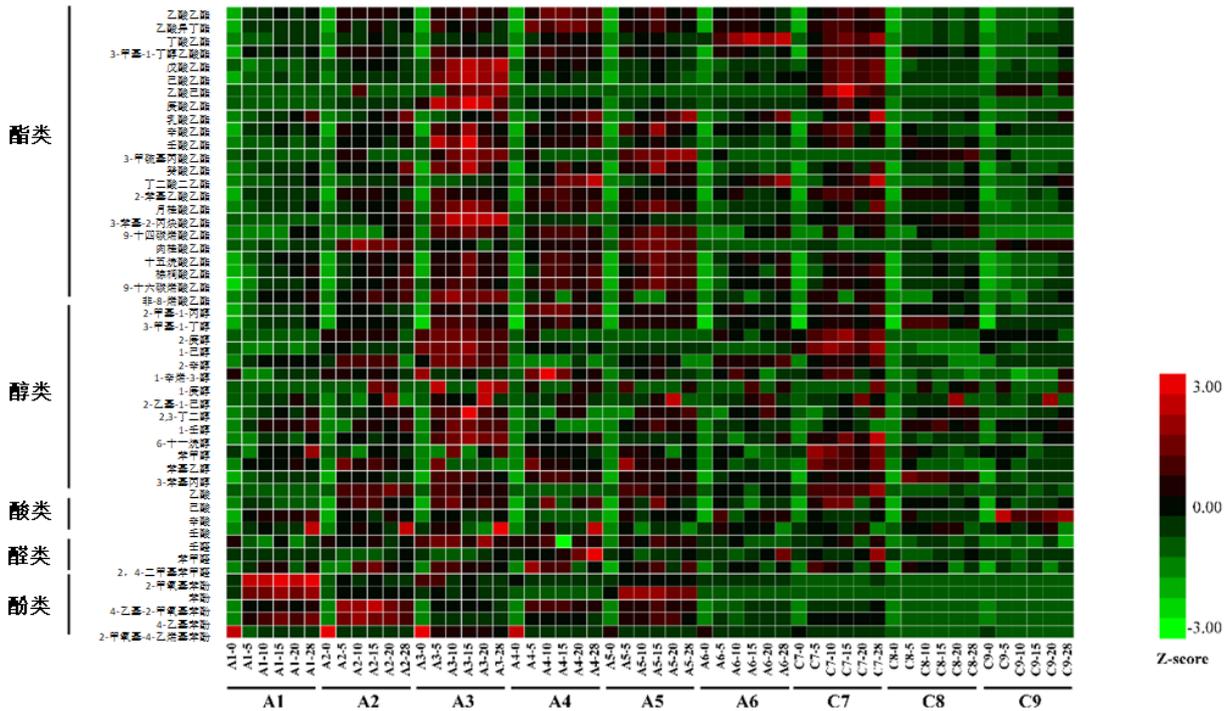


图 1-13 9 种高粱发酵过程酒醅挥发性化合物变化热图

### 1.3.5.4 酒醅理化指标和挥发性化合物主成分分析

在白酒的发酵过程中，各类代谢产物达到峰值以及后续稳定的时间对白酒品质同样具有重要影响，为了探究 9 种高粱在发酵过程中的挥发性化合物的变化趋势，对发酵过程酒醅中挥发性化合物的变化情况进行了 PCA 分析，结果如图 1-14 所示。

由发酵过程中挥发性化合物的演替路径可知，A3 与 C7 代谢产物演替路径相类似，A2、A4、A5、A6、C8、C9 代谢产物演替路径相类似，而 A1 与其他品种高粱并无明显聚集情况，表明 A1 挥发性化合物演替路径与其他品种高粱相似程度不高。

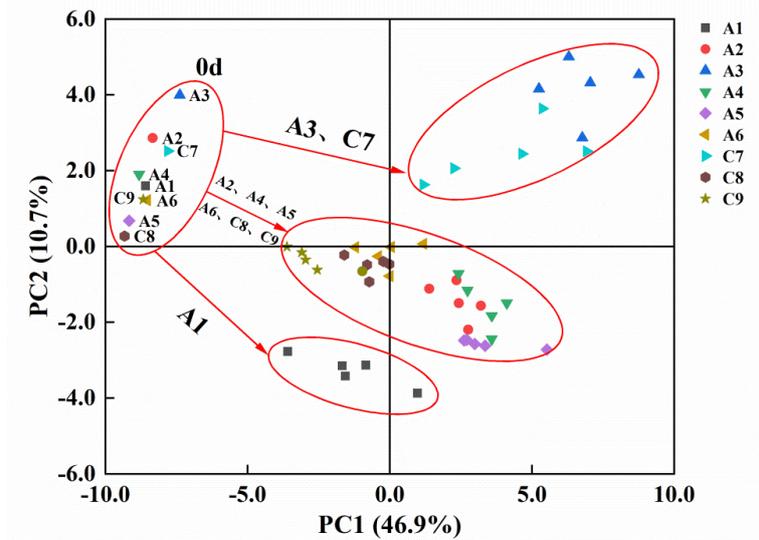


图 1-14 发酵过程酒醅挥发性化合物变化 PCA 分析

为了探究发酵终点酒醅中微生物代谢物（醇酸酯及挥发性化合物）的差异情况，将酒醅理化指标与挥发性化合物联合做 PCA 分析，由图 1-15 所示，可看出大致分为两个区域，分别为 A6 与 C8、C9 出现明显聚集，A1、A2、A4、A5 出现明显聚集，而 A3 和 C7 与两个区域均没有明显的聚集情况，因此 A6 的代谢产物含量与 C8 和 C9 较为相近，A1、A2、A4、A5 代谢产物含量较为相近。

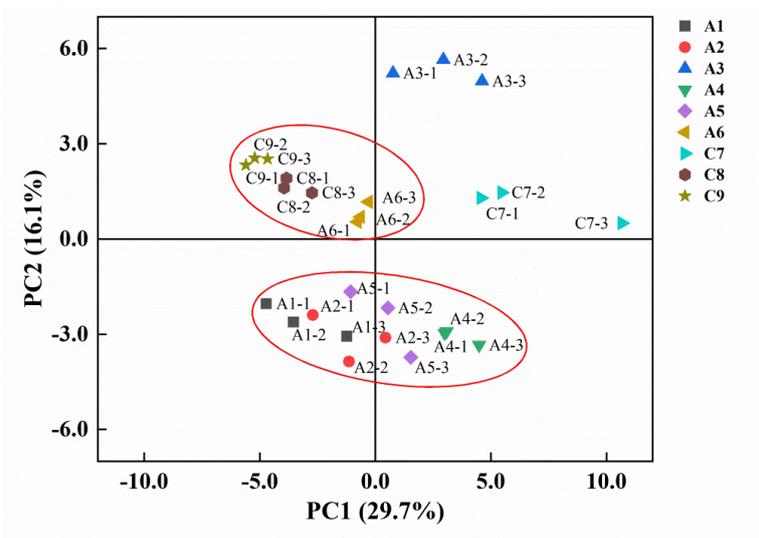


图 1-15 发酵终点酒醅微生物代谢产物 PCA 分析

### 1.3.5.5 主要差异挥发性化合物的确定

为了探究 9 种高粱在发酵完成后具有显著性差异的挥发性化合物是哪些，使用随机森林的方法对发酵末期挥发性化合物进行分析（图 1-16）。最终发现有 2 种酯类，乙酸乙酯和十五酸乙酯；4 种酚类，愈创木酚，4-乙基愈创木酚，4-乙烯基愈创木酚和 4-乙基苯酚。其中 A2 的 4-乙基愈创木酚最高，达到了 0.959  $\mu\text{g/g}$ ；A3 的 4-

乙烯基愈创木酚含量最高，达到了 0.043  $\mu\text{g/g}$ ，A1 的愈创木酚和 4- 乙基苯酚含量最高，分别达到了 0.088  $\mu\text{g/g}$  和 0.598  $\mu\text{g/g}$ 。A4 的乙酸乙酯含量最高，达到了 3.01  $\mu\text{g/g}$ 。4 种愈创木酚类化合物特征如表 1-5 所示。

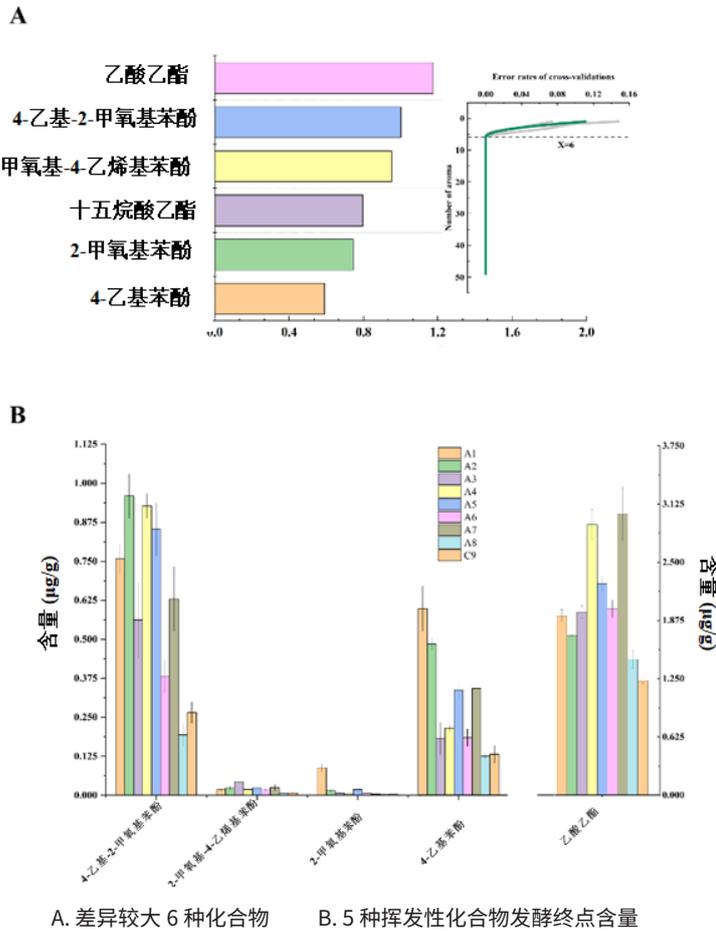


图 1-16 差异挥发性化合物分析

表 1-5 各品种高粱产地及基本特征

分类	名称	香气特征
酯类	乙酸乙酯	水果香
	2- 甲氧基苯酚	水果香
酚类	4- 乙基 -2- 甲氧基苯酚	丁香气味
	4- 乙基苯酚	烟熏味、丁香气味
	2- 甲氧基 -4- 乙烯基苯酚	花香

### 1.3.6 高粱品种与白酒香型匹配的分析

对 6 种美国高粱以及 3 种国产高粱的基本理化指标、发酵过程中的理化指标、代谢产物及挥发性化合物进行了检测与分析。这些数据显示，A2, A4, A6 可能具有较好的中国白酒酿造性能，但这些高粱适合中国哪种香型白酒的酿造，需要更进一步的筛选。

其中，酱香型白酒主要使用糯高粱，而美国 6 种高粱中只有 A3 为糯高粱，因此将 A3 与 C8 进行进一步的对比，C9 为国内浓香和清香酒厂广泛使用的高粱，因此将 A2，A4 和 A6 与 C9 进行更进一步的对比。

### 1.3.6.1 基本成分显著性分析

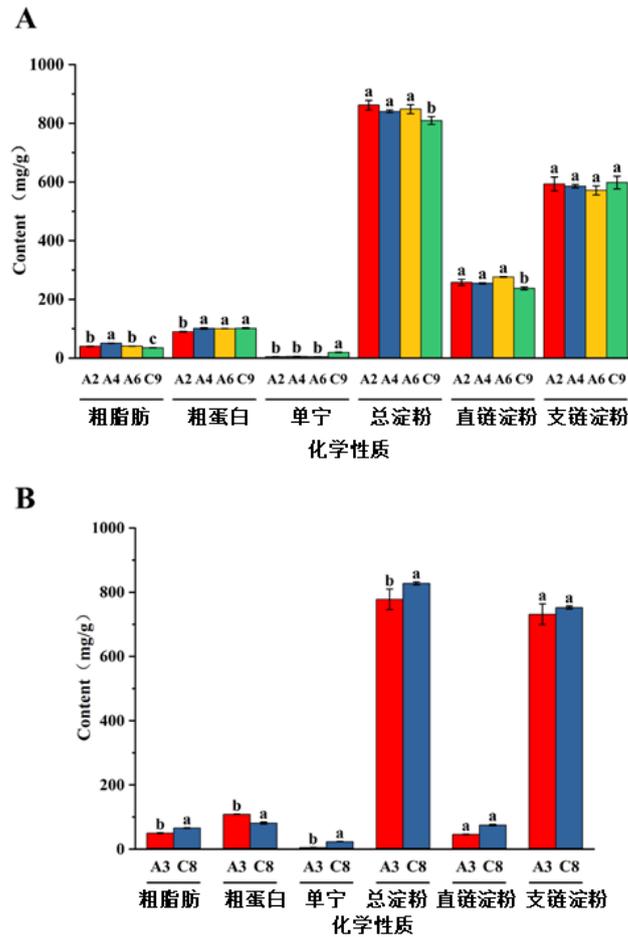


图 1-17 中美高粱理化成分差异

由图 1-17 A 得出 C9 的粗脂肪含量显著低于 A2，A4 和 A6；对于粗蛋白含量，只有 A2 要显著低于 C9；单宁含量中，C9 要显著高于 A2，A4 和 A6；A2，A4 和 A6 的总淀粉和直链淀粉含量要显著高于 C9；4 种高粱的支链淀粉含量无显著性差异。由图 B 得出 A3 和 C8 仅在直链淀粉和支链淀粉含量无显著性差异，其他成分含量上均有显著性差异。

### 1.3.6.2 发酵过程酒醅理化指标显著性分析

#### (1) 乙醇显著性分析

由图 1-18 可以看出 A6 ( $p=0.032<0.05$ ) 高粱与 C9 高粱在乙醇代谢变化中存在显著性差异，A2 ( $p=0.442$ ) 和 A4 ( $p=0.075$ ) 与 C9 相比并无显著性差异。A3 和 C8 在乙醇代谢方面也无显著性差异 ( $p=0.149$ )。

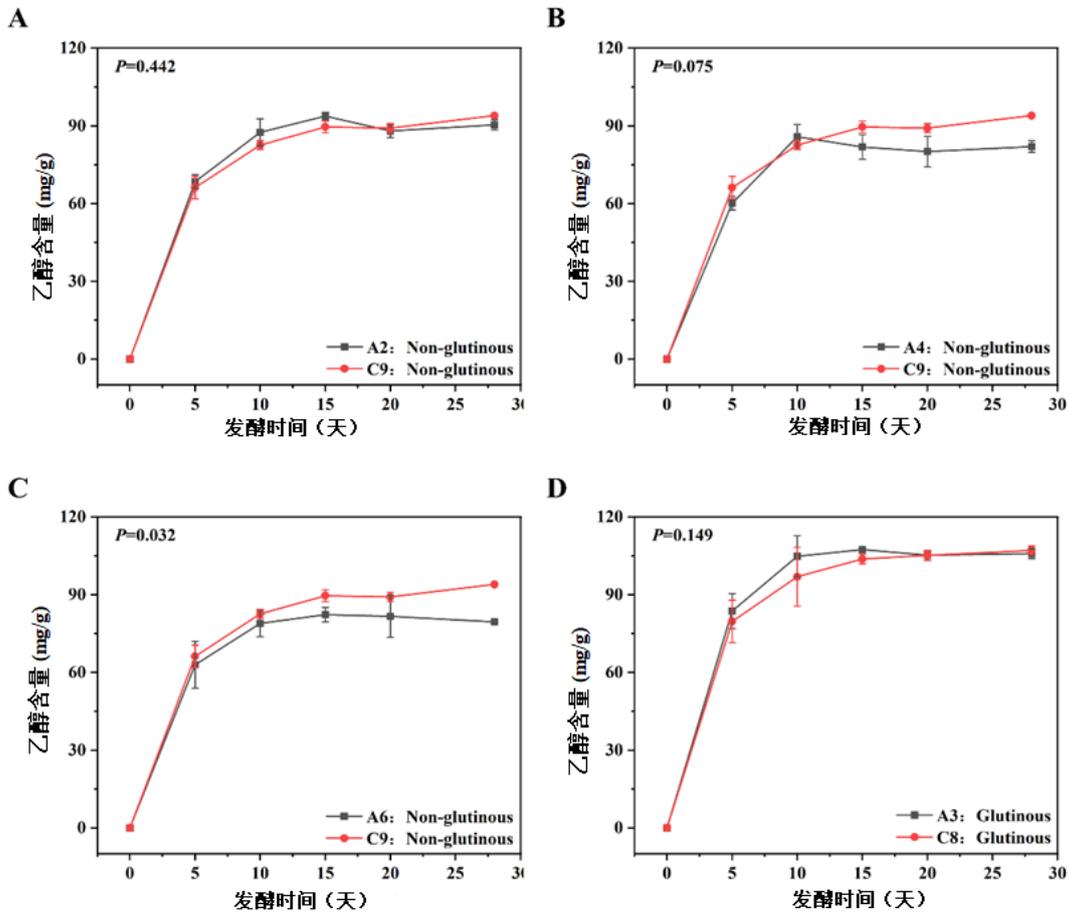
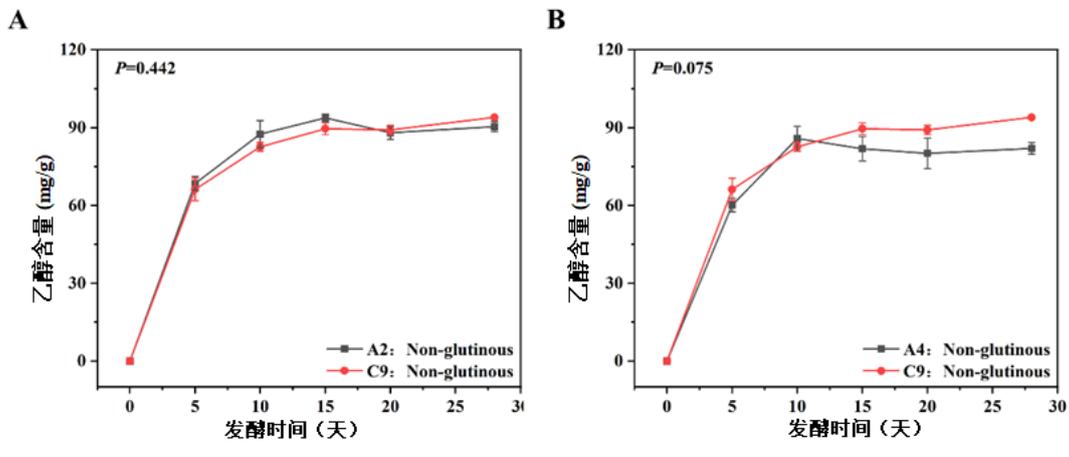


图 1-18 中美高粱发酵过程酒酩乙醇变化差异

(2) 乳酸显著性分析

由图 1-19 可以看出 A2 ( $p=0.011<0.05$ ) 与 C9 高粱在乳酸的代谢变化中存在显著性差异, A4 ( $p=0.897$ ) 和 A6 ( $p=0.994$ ) 与 C9 无显著性差异。A3 ( $p=0.010<0.05$ ) 和 C8 存在显著性差异。



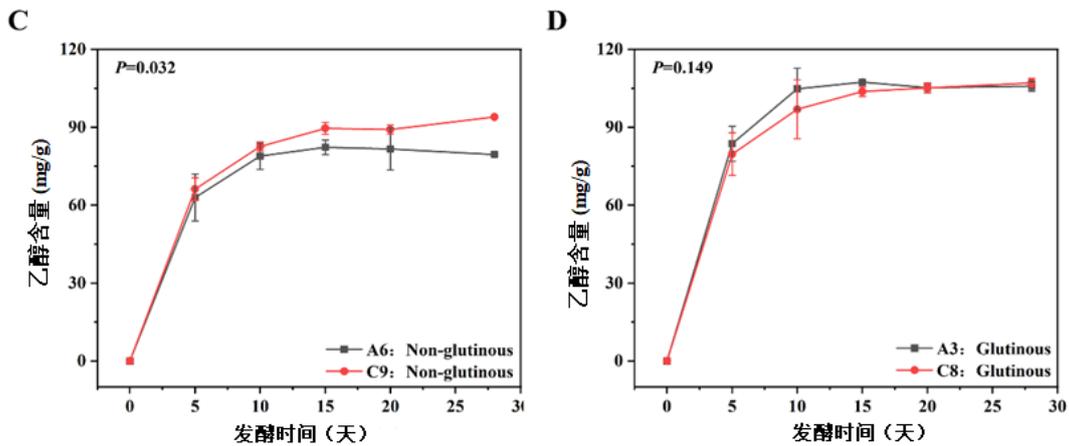


图 1-19 中美高粱发酵过程酒醅乳酸变化差异

(3) 乙酸代谢显著性分析

由图 1-20 可知 A2 ( $p=0.405$ ) , A4 ( $p=0.054$ ) , A6 ( $p=0.259$ ) 与 C9 在乙酸的代谢变化中均不存在显著差异。A3 ( $p=0.663$ ) 与 C8 也不存在显著性差异。

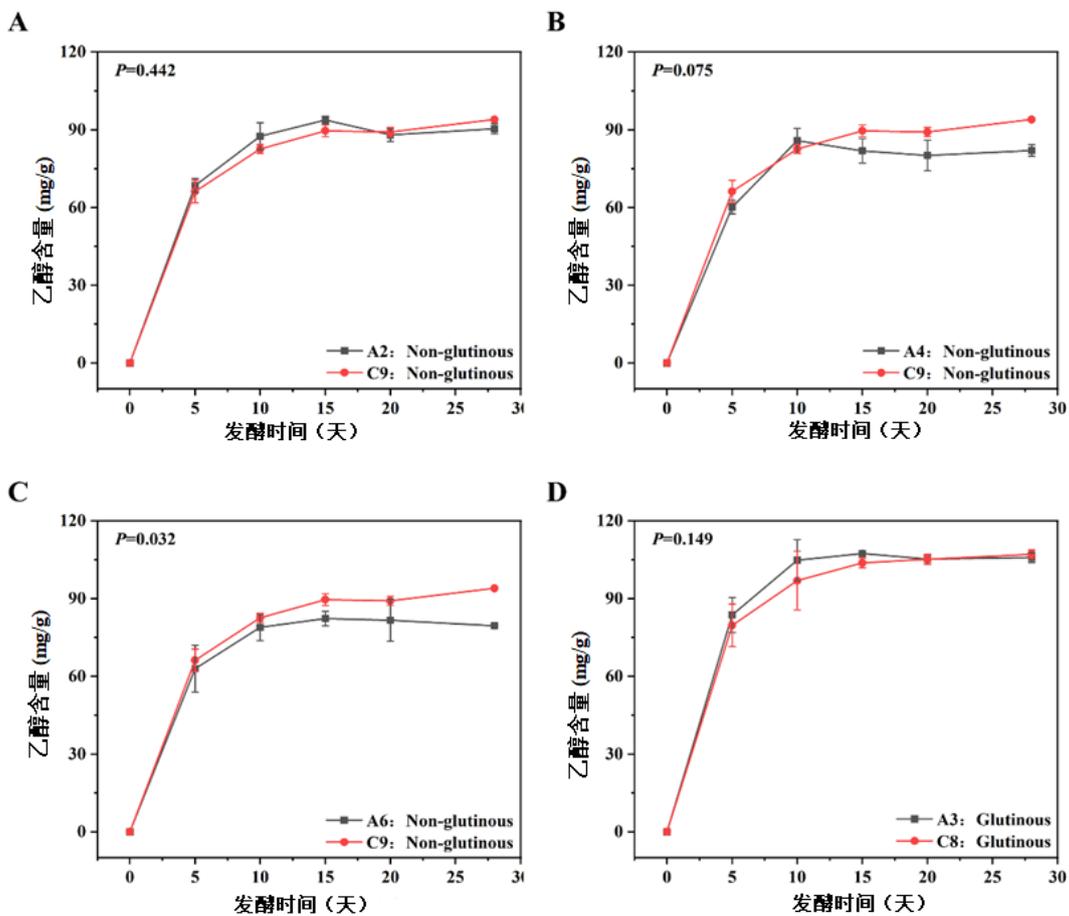


图 1-20 中美高粱发酵过程酒醅乙酸变化差异分析

### 1.3.6.3 发酵终点酒醅挥发性化合物显著性分析

将 A2, A4, A6 和 C9 以及 A3 和 C8 发酵终点酒醅中的 49 种挥发性化合物分别进行显著性差异分析, 判定他们在挥发性化合物上的差异情况, 结果如下表 1-6 所示。

表 1-6 中美高粱发酵终点酒醅挥发性化合物差异分析

香型分类	P			
	A2&C9	A4&C9	A6&C9	A3&C8
乙酸乙酯	0.001	0.003	0.004	0.029
乙酸异丁酯	0.744	0.086	0.159	0.704
丁酸乙酯	0.59	0.092	0.026	0.105
3- 甲基 -1- 丁醇乙酸酯	0.716	0.242	0.841	0.602
戊酸乙酯	0.971	0.061	0.458	0.021
己酸乙酯	0.173	0.164	0.504	0.018
乙酸己酯	0.002	0.002	0.002	0.015
庚酸乙酯	0.231	0.047	0.584	0.019
乳酸乙酯	0.034	0.079	0.165	0.031
辛酸乙酯	0.39	0.163	0.643	0.062
壬酸乙酯	0.196	0.007	0.095	0.486
3- 甲基丙酸乙酯	0.258	0.386	0.479	0.182
癸酸乙酯	0.277	0.029	0.661	0.372
丁二酸二乙酯	0.802	0.029	0.117	0.165
2- 苯基乙酸乙酯	0.833	0.214	0.936	0.657
月桂酸乙酯	0.102	0.016	0.744	0.241
3- 苯基 -2- 丙炔酸乙酯	0.037	0.769	0.071	0.014
9- 十四碳烯酸乙酯	0.018	0.009	0.005	0.827
肉桂酸乙酯	0.12	0.999	0.004	0.001
十五烷酸乙酯	0.095	0.035	0.035	0.165
棕榈酸乙酯	0.009	0	0	0.036
9- 十六碳烯酸乙酯	0.019	0.009	0.033	0.007
非 -8- 烯酸乙酯	0.126	0.961	0.25	0.017
2- 甲基 -1- 丙醇	0.855	0.05	0.082	0.696
3- 甲基 -1- 丁醇	0.992	0.023	0.056	0.372
2- 庚醇	0.996	0.687	0	0.002
1- 己醇	0.583	0.187	0.17	0.012
2- 辛醇	0.014	0.014	0.016	0.001
1- 辛烯 -3- 醇	0.434	0.853	0.496	0.162

1- 庚醇	0.02	0.036	0.562	0.031
2- 乙基 -1- 己醇	0.006	0.208	0.016	0.057
2,3- 丁二醇	0.175	0.054	0.656	0.668
1- 壬醇	0.298	0.016	0.177	0.014
6- 十一烷醇	0.867	0.255	0.663	0.01
苯甲醇	0.019	0.082	0.206	0.741
苯基乙醇	0.923	0.061	0.378	0.209
3- 苯基丙醇	0.016	0.879	0.005	0.006
乙酸	0.873	0.068	0.835	0.275
己酸	0.451	0.671	0.694	0.021
辛酸	0.034	0.049	0.06	0.081
壬酸	0.07	0.072	0.872	0.049
壬醛	0.054	0.003	0.178	0.126
苯甲醛	0.119	0.05	0.005	0.461
2, 4- 二甲基苯甲醛	0.184	0.224	0.001	0.051
2- 甲氧基苯酚	0	0.015	0.006	0.057
苯酚	0.024	0.047	0.91	0.032
4- 乙基 -2- 甲氧基苯酚	0.007	0.004	0.134	0.032
4- 乙基苯酚	0.025	0.03	0.001	0.172
2- 甲氧基 -4- 乙烯基苯酚	0.009	0.016	0.01	0.003
All (p<0.05)	31	25	32	26

### 1.3.6.4 相关指标差异性汇总分析

将A2, A4, A6, 与C9以及A3与C8的理化成分, 代谢产物共58种指标分别进行显著性分析, 然后进行汇总, 发现A2与C9有显著性差异的共24个, 无显著性差异的共34个, 与C9的匹配度为58.62%; A4与C9有显著性差异的共28个, 无显著性差异的共30个, 与C9的匹配度为51.72%; A6与C9有显著性差异的共22个, 无显著性差异的共36个, 与C9的匹配度为62.07%; A3与C8有显著性差异的共28个, 无显著性差异的共30个, 与C8的匹配度为51.72%。C8为国内酱香型白酒普遍所用糯高粱, C9为国内浓香, 清香型白酒普遍所用粳高粱, 将与C8和C9匹配度大于60%的美国高粱挑选出, 最终确定A6(62.07%)和A2适合中国浓香/清香型白酒的酿造。

表 1-7 中美高粱发酵终点酒醅挥发性化合物差异分析

指标	高粱组别			
	A2&C9	A4&C9	A6&C9	A3&C8
粗脂肪	*	*	*	*
粗蛋白	*	N.S	N.S	*

单宁	*	*	*	*
淀粉	*	*	*	*
直链淀粉	*	*	*	N.S
支链淀粉	N.S	N.S	N.S	N.S
乙醇	N.S	N.S	*	N.S
乳酸	*	N.S	N.S	*
乙酸	N.S	N.S	N.S	N.S
香型 (N.S)	31	25	32	26
总数 (N.S)	34	30	36	30
匹配度	58.62%	51.72	62.07%	51.72%

注：N.S 表示无显著性差异，\* 表示有显著性差异

## 1.4 小结

对 6 种美国高粱以及作为对照的 3 种国内酒厂所用高粱的基本理化指标、发酵过程中的理化指标、代谢产物（如乙醇，乙酸，乳酸和风味物质等）及风味物质进行了检测与分析。A5 的氰化物含量最高，达到了 0.54 $\mu$ g/g。因此，A5 可排除。

就发酵过程中的理化指标和风味物质产生情况来看，美国 6 种高粱和对照 3 种高粱在发酵过程中代谢产物的产生趋势是一致的，仅存在含量上的差异；基于发酵过程微生物代谢产物（乙醇，乙酸，乳酸及风味物质）的 PCA 分析及终点含量的 PCA 分析，得出 A6 与 3 种对照（C7, C8, C9）发酵过程中代谢产物的变化一致性更强。对 9 种高粱发酵过程中酒醅中主要微生物（细菌，芽孢杆菌，酵母，霉菌）的变化情况分析，发现 A2, A4, A6 可能具有较好的中国白酒酿造性能；而 A3 作为 6 种高粱中唯一的糯高粱，其对酿酒的适用性也应考虑。

进一步分析高粱品种与白酒香型匹配性，将 A2, A4, A6 与 C9 以及 A3 与 C8 的理化成分，代谢产物共 58 种指标分别进行显著性分析，然后进行汇总，发现 A2 与 C9 的匹配度为 58.62%；A4 与 C9 的匹配度为 51.72%；A6 与 C9 的匹配度为 62.07%；A3 与 C8 的匹配度为 51.72%。C8 为国内酱香型白酒和芝麻香型白酒普遍所用糯高粱，C9 为国内浓香，清香型白酒普遍所用粳高粱，最终确定 A6、A2 更适合浓香 / 清香型白酒的酿造；A3 适合于酱香型白酒和芝麻香型白酒的酿造。

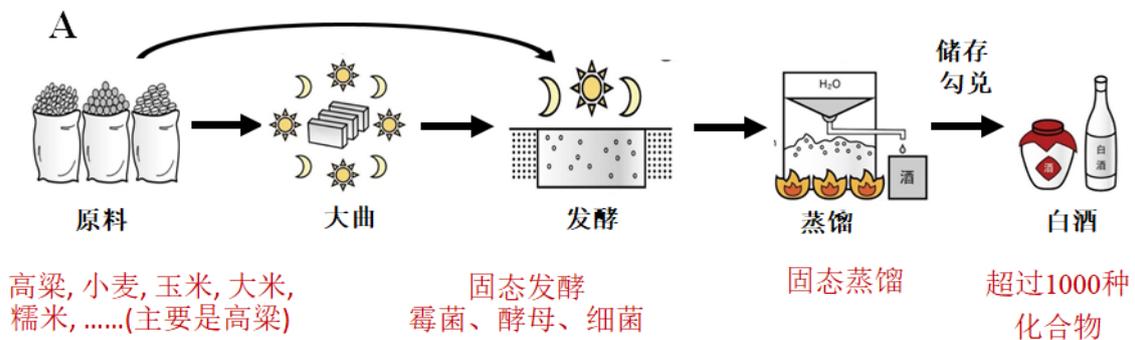
## 第 2 章 大生产规模评估美国高粱对白酒酿造的影响

### 2.1 研究背景

白酒，是以粮谷为主要原料，以大曲、小曲、麸曲、酶制剂及酵母等为糖化发酵剂，经蒸煮、糖化、发酵、蒸馏、陈酿、勾调而成的蒸馏酒。白酒和西方的威士忌（Whisky）、白兰地（Brandy）、伏特加（Vodka）、朗姆酒（Rum）、金酒（Jin）并称世界六大蒸馏酒。白酒是传统蒸馏酒，由于其独特的生产工艺形成了不同的香型风格。传统白酒按其香型可分为酱香型、浓香型、清香型、米香型、凤香型、兼香型、药香型、豉香型、芝麻香型、特香型、馥郁香型和老白干香型 12 种香型。

西方的蒸馏酒与中国的白酒在其生产发酵工艺上有很大的区别。在发酵工艺上，中国白酒采用固态发酵，而西方的蒸馏酒采用液态发酵；在原料上，中国白酒以谷物为主要原料，而西方的蒸馏酒以水果尤其是葡萄为主要原料；在微生物接种上，中国白酒属于多菌种共酿的生产方式，在发酵过程中，由丰富的酵母菌、乳酸菌、芽孢杆菌和霉菌参与，每种微生物具有不同的功能，在共同作用下完成白酒发酵，而西方蒸馏酒的酿造微生物主要是单个或多个纯种酵母完成。

中国白酒的酿造过程非常复杂且涉及多种酿造技术，主要包括：酒曲制作、酒醅发酵、蒸馏取酒、贮存老熟、勾兑调味和品质控制等工序，如图 2-1 所示。





储存



勾兑



白酒

图 2-1 白酒发酵主要流程

由前期实验室规模评估数据结果，选取了三种美国高粱品种，即 A2、A3、A6 在三个酒企进行了不同香型的工厂规模试验。

## 2.2 研究目标

对 3 种酿造白酒的美国高粱品种进行工厂规模评估，包括：（1）高粱对白酒乙醇转化率的影响；（2）高粱对白酒质量的影响，包括挥发性化合物的成分和感官品质；（3）高粱对白酒发酵的物理化学参数的影响；（4）高粱对微生物种群动态和白酒发酵成分的影响。

## 2.3 结果与分析

### 2.3.1 高粱品种及白酒香型

#### 2.3.1.1 美国高粱品种

3 种美国高粱产地与基本特征如表 2-1 所示。3 种不同品种美国高粱外观特征如表 2-2。

表 2-1 三种美国高粱具体信息

高粱种类	产地	特征
A2	Texas levelland Elevator	混合
A3	Waxy Kansas Farmer	红色
A6	Texas corpus Farmer	红色

表 2-2 三种美国高粱外观特征

高粱种类	水分 %	10 粒重 (g)	不完善粒	杂质	颜色
A2	12.50	0.296	轻微	较多	混合
A3	10.58	0.395	正常	正常	红色
A6	12.01	0.258	轻微	较脏	红色

#### 2.3.1.2 白酒香型及对应原料

(1) 安徽金种子酒业股份有限公司的应用

安徽金种子酒业股份有限公司，位于安徽省阜阳市，成立于 1998 年 7 月 23 日，前身为始建于 1949 年 7 月阜阳县酒厂。



金种子酒厂使用三种美国高粱进行三种香型白酒发酵生产，其香型与高粱品种如表 2-3 所示。

表 2-3 金种子白酒香型及对应原料

白酒香型	组别	高粱品种
清香型	对照组原料	澳粮
	试验组原料	A2
馥合香型	对照组原料	澳粮
	试验组原料	A3
浓香型	对照组原料	澳粮
	试验组原料	A6

(2) 江苏乾隆江南酒业股份有限公司的应用

江苏乾隆江南酒业股份有限公司位于江苏省宿迁市，于 2003 年 01 月 30 日成立。



乾隆江南酒厂使用 A6 品种的美国高粱进行芝麻香型白酒的发酵生产，如表 2-4 所示。

表 2-4 乾隆江南使用的高粱原料

组别	高粱品种
对照组原料	澳粮
试验组原料	A6

3) 江苏汤沟两相和酒业有限公司的应用

江苏汤沟两相和酒业有限公司前身是江苏汤沟酒厂，位于江苏省连云港市。



汤沟酒厂使用 A6 品种的美国高粱进行浓香型香型白酒的发酵生产，如表 2-5 所示。

表 2-5 汤沟使用的高粱原料

组别	高粱品种
对照组原料	东北高粱
试验组原料	A6

### 2.3.2 安徽金种子酒业股份有限公司的应用

#### 2.3.2.1 清香型白酒生产

将美国高粱应用于清香型白酒生产中，发酵现场如图 2-2 所示。



图 2-2 清香型白酒发酵现场图

##### 2.3.2.1.1 对白酒发酵的影响

对第三排次应用结果进行分析，清香型白酒发酵过程出池、入池时，其水份、酸度及淀粉情况如表 2-6 所示。试验组入池水份低于对照组，但出池水份高于对照组。试验组入池和出池酸度均高于对照组。试验组入池淀粉高于对照组，但出池淀粉低于对照组，表明试验组发酵活力强于对照组。

表 2-6 清香型白酒入池、出池情况

时间点	组别	水分 %	酸度 (mmol/10g)	淀粉 (%)
入池	对照组	62.28	1.17	18.43
	试验组	60.33	1.29	19.74
出池	对照组	65.96	4.03	8.05
	试验组	66.20	4.34	7.9

### 2.3.2.1.2 对白酒酒质的影响

#### (1) 出酒率

清香型白酒三个排次出酒率如表 2-7 所示。试验组出酒率高于对照组。

表 2-7 清香型白酒出酒率

组别	出酒率
对照组	31.38%
试验组	33.04%

#### (2) 原酒四大酯分析

清香型白酒原酒中四大酯的含量如表 2-8 所示。其中，试验组的乳酸乙酯含量高于对照组，己酸乙酯和乙酸乙酯低于对照组。乙酸乙酯是清香型白酒重要的风味物质，乙酸乙酯偏低不利于酒质的提升。

表 2-8 清香型原酒中四大酯含量

组别	己酸乙酯 (g/L)	乳酸乙酯 (g/L)	丁酸乙酯 (g/L)	乙酸乙酯 (g/L)
对照组	0.24	2.92	0.03	5.86
试验组	0.21	3.63	0.03	5.60

#### (3) 感官品评

清香型白酒原酒的感官品评结果如表 2-9 所示。试验组低于对照组。

表 2-9 清香型白酒感官品评

组别	分数
对照组	90
试验组	87.3

#### (4) 原酒中的挥发性化合物

通过 GC-MS 半定量检测，在清香型白酒试验组原酒酒样中共检测出 107 种挥发性化合物，在对照组原酒酒样中共检测出 88 种挥发性化合物。其结果如图 2-3 所示，试验组风味化合物的种类和含量均高于对照组，表明清香型白酒风味化合物产生能力强于对照组。

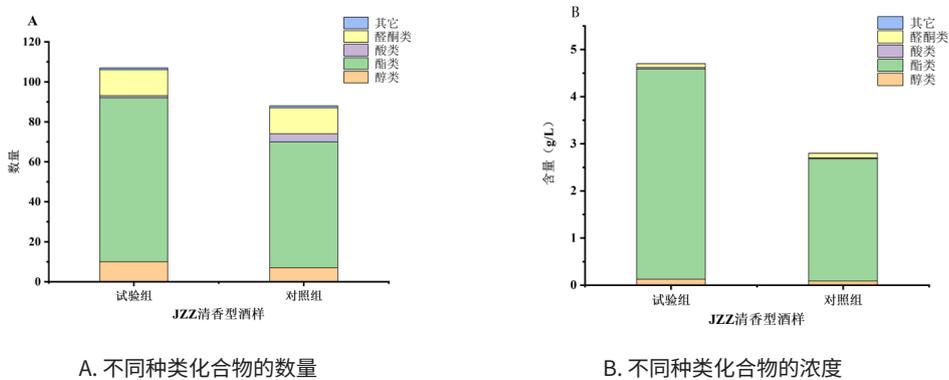


图 2-3 金种子清香型原酒酒样挥发性化合物

### 2.3.2.2 浓香型白酒生产

将美国高粱应用于浓香型白酒生产中，发酵现场如图 2-4 所示。



图 2-4 浓香型白酒发酵现场图

#### 2.3.2.2.1 对白酒发酵的影响

##### (1) 白酒发酵过程中入池及出池情况

浓香型白酒发酵过程中出池、入池时，其水份、酸度及淀粉情况如表 2-10 所示。试验组的水份与对照组接近。试验组入池和出池酸度均低于对照组。试验组入池和出池淀粉均高于对照组。表明试验组高粱发酵的代谢活力弱与对照组。

表 2-10 浓香型白酒入池、出池情况

时间点	组别	水分 %	酸度 (mmol/10g)	淀粉 (%)
入池	对照组	58.49	1.64	19.58
	试验组	58.01	1.39	20.94
出池	对照组	65.43	4.28	6.98
	试验组	65.38	4.11	7.23

## (2) 发酵过程入池酒醅中的物质情况

入池酒醅中物质情况如表 2-11 所示。

表 2-11 浓香型白酒入池酒醅物质情况

时间点	组别	葡萄糖含量	乳酸含量	乙酸含量	乙醇含量
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
入池	对照组	3.56	5.66	0.26	1.38
	试验组	4.83	4.28	0.40	1.50

### 2.3.2.2.2 对白酒酒质的影响

#### (1) 原酒等级

浓香型白酒原酒等级如表 2-12 所示。原酒分为特优级和普级。

表 2-12 浓香型白酒原酒等级

组别	原酒等级
对照组	普级
	特优级
试验组	普级
	特优级

#### (2) 原酒四大酯分析

浓香型白酒原酒中四大酯的含量如表 2-13 所示。其中，试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其它的都低于对照组。浓香型白酒中己酸乙酯是重要的风味化合物，己酸乙酯偏低不利于酒质的提升。

表 2-13 浓香型原酒中四大酯含量

组别	己酸乙酯 (g/L)	乳酸乙酯 (g/L)	丁酸乙酯 (g/L)	乙酸乙酯 (g/L)
对照组	2.99	2.47	0.48	5.42
试验组	2.68	1.99	0.53	5.03

#### (3) 出酒率与特优率

浓香型白酒出酒率如表 2-14 所示。试验组出酒率略高于对照组，但特优率低于对照组。

表 2-14 浓香型白酒出酒率与特优率

组别	出酒率	特优率
对照组	36.61%	36.87%
试验组	36.69%	35.50%

(4) 感官品评

浓香型白酒原酒的感官品评结果如表 2-15 所示。试验组的普级和特优级打分均略低于对照组。

表 2-15 浓香型白酒感官品评

组别	原酒等级	分数
对照组	普级	88
	特优级	95
试验组	普级	87.4
	特优级	94.8

(5) 原酒中的挥发性化合物

通过 GC-MS 半定量检测，浓香型白酒原酒酒样中的挥发性化合物其结果如图 2-5 所示。在试验组原酒中共检测出 94 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 99 种挥发性化合物。其中，特优级中的挥发性化合物浓度高于普级，试验组中的挥发性化合物浓度高于对照组。

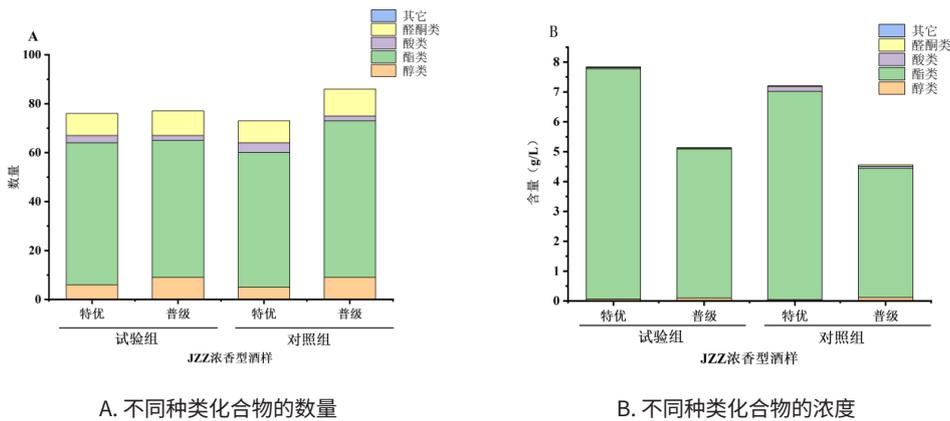


图 2-5 金种子浓香型酒样挥发性化合物

2.3.2.3 馥合香型白酒生产

将美国高粱应用于馥合香型白酒生产中，发酵现场如图 2-6 所示。



图 2-6 馥合香型白酒发酵现场图

### 2.3.2.3.1 对白酒发酵的影响

#### (1) 白酒发酵过程中入池及出池情况

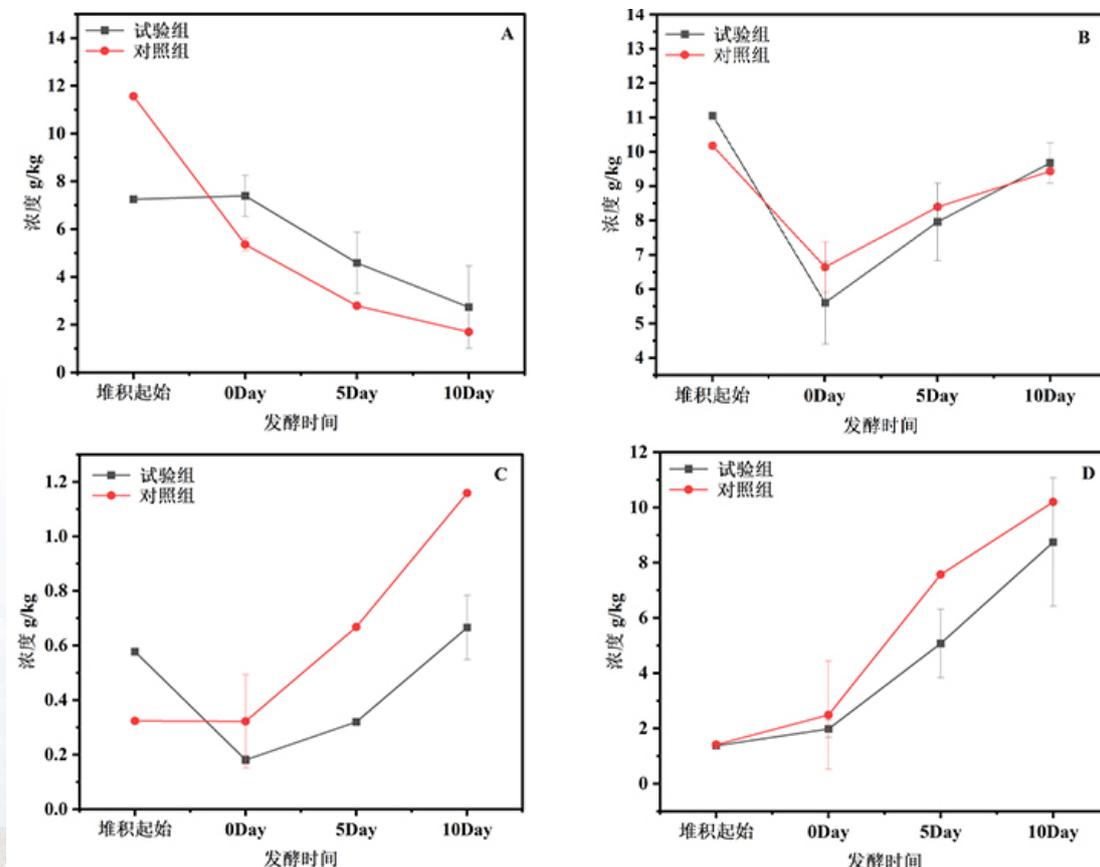
馥合香型白酒发酵过程中出池、入池时，其水份、酸度及淀粉情况如表 2-16 所示。试验组堆积样品的水份低于对照组，但入池和出池水份相近。试验组堆积酸度略低，但入池和出池酸低相近。试验组堆积淀粉高于对照组，入池和出池淀粉均略低于对照组。

表 2-16 馥合香型白酒入池、出池情况

时间点	组别	水分 %	酸度 (mmol/10g)	淀粉 (%)
堆积	对照组	54.80	2.67	17.48
	试验组	52.48	1.77	21.45
入池	对照组	51.64	1.78	20.61
	试验组	51.87	1.73	20.41
出池	对照组	61.31	4.46	9.02
	试验组	61.23	4.45	8.87

#### (2) 发酵过程中酒醅中的物质随时间变化情况

发酵过程中酒醅中的葡萄糖、乙酸、乳酸及乙醇随时间变化情况如图 2-7 所示。试验组葡萄糖浓度发酵过程高于对照组，乙酸和乙醇含量均低于对照组。



A. 葡萄糖 B. 乳酸 C. 乙酸 D. 乙醇

图 2-7 发酵过程酒醅中物质随时间变化情况

(3) 发酵过程中酒醅中的微生物变化情况

如图 2-8 所示，在白酒发酵的堆积起始和白酒发酵前期，细菌中共检测出 12 个优势物种 (> 1%)，真菌共检测出 5 个优势物种 (> 1%)，分别是 *Lichtheimia*, *Saccharomyces*, *Saccharomycopsis*, *Thermomyces* 和 *Torulaspora*。

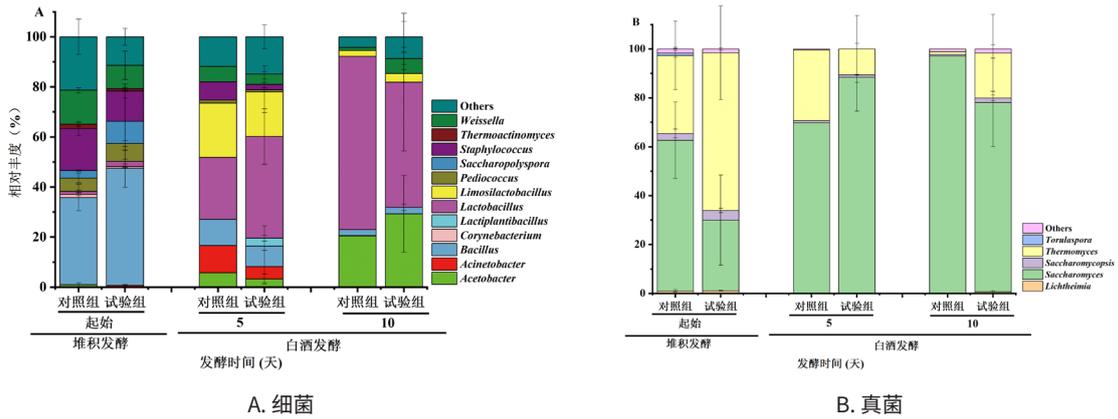


图 2-8 白酒发酵过程微生物群落变化情况

### 2.3.3 江苏乾隆江南酒业股份有限公司的应用

#### 2.3.3.1 对白酒发酵的影响

将美国高粱应用于芝麻香型白酒生产中，发酵现场如图 2-10 所示。



图 2-10 芝麻香型白酒发酵现场图

### (1) 白酒发酵过程中温度变化

白酒发酵过程中试验组与对照组温度随时间变化如图 2-11 所示。发酵前期，对照组温度略高于试验组，后期试验组温度略高于对照组。

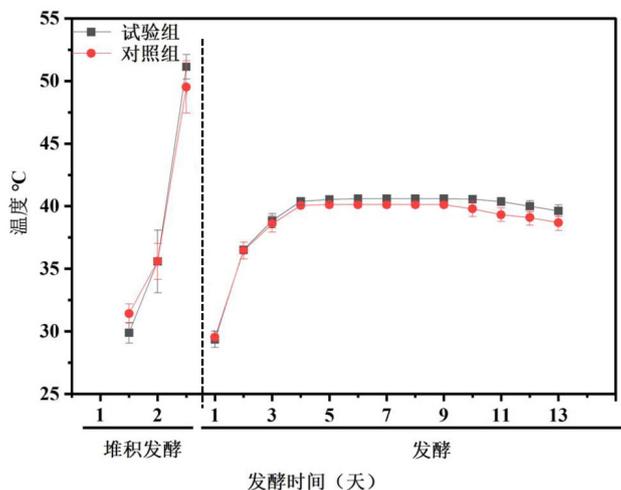


图 2-11 芝麻香型白酒试验组与对照组发酵过程中温度随时间变化

### (2) 白酒发酵过程中入池及出池情况

芝麻香型白酒发酵过程中出池、入池时，其水份、酸度及淀粉情况如表 2-21 所示。试验组入池水份略高于对照组，但出池水份低于对照组。试验组入池和出池酸度均高于对照组。试验组入池和出池淀粉均高于对照组。表明试验组发酵活性弱于对照组。

表 2-21 芝麻香型白酒入池、出池情况

时间点	组别	水分 %	酸度 (mmol/10g)	淀粉 (%)
入池	对照组	50.05	2.05	20.02
	试验组	50.52	2.12	22.73
出池	对照组	56.97	3.6	11.25
	试验组	54.54	3.72	18

### (3) 发酵过程中酒醅中的物质随时间变化情况

发酵过程中酒醅中的葡萄糖、乙酸、乳酸及乙醇随时间变化情况如图 2-12 所示。葡萄糖含量随时间变化逐渐减少，乙酸、乳酸及乙醇含量随时间变化逐渐增加。其中，乙酸含量较少，乳酸含量较多，发酵末期达到 18.18 g/kg。

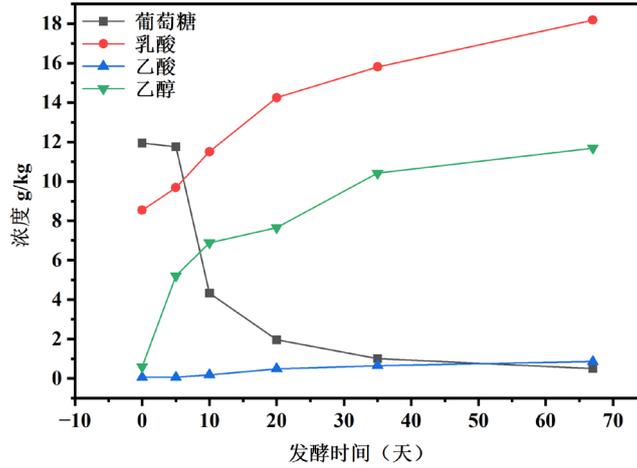


图 2-12 乾隆江南试验窖池酒醅中葡萄糖、乙酸、乳酸及乙醇含量随时间变化情况

(4) 发酵过程中酒醅中的微生物变化情况

如图 2-13 所示，在白酒发酵过程中，细菌中共检测出 8 个优势物种 (> 1%)，真菌共检测出 6 个优势物种 (> 1%)，分别是 Lichtheimia, Millerozyma, Saccharomyces, Saccharomycopsis, Thermomyces 和 Torulaspora。

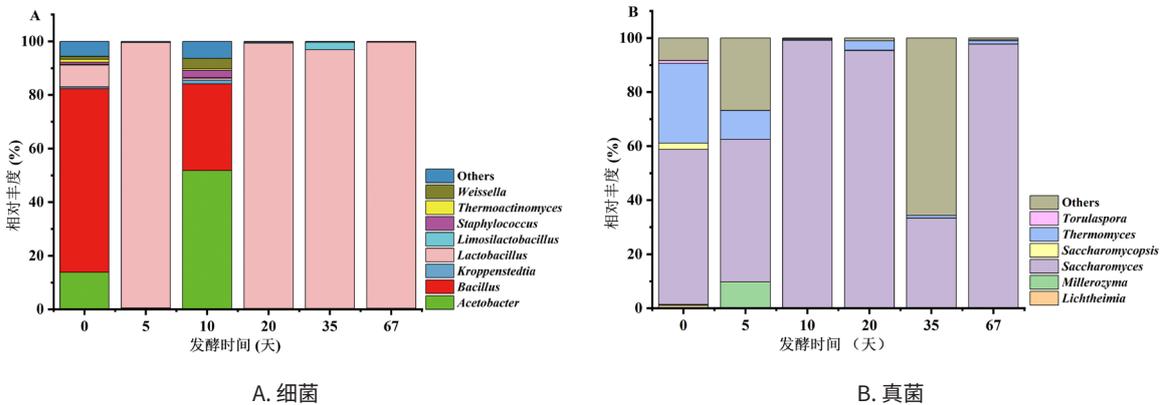


图 2-13 白酒发酵过程微生物群落变化情况

2.3.3.2 对白酒酒质的影响

(1) 出酒率

乾隆江南芝麻香型白酒出酒率如表 2-22 所示。试验组出酒率略低于对照组。

表 2-22 乾隆江南芝麻香型出酒率

组别	出酒率
对照组	42.19%
试验组	41.18%

### (2) 原酒四大酯分析

芝麻香型白酒原酒中四大酯的含量如表 2-23 所示。其中，试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其他的都低于对照组。

表 2-23 原酒中四大酯含量

组别	己酸乙酯 (g/L)	乳酸乙酯 (g/L)	丁酸乙酯 (g/L)	乙酸乙酯 (g/L)
对照组	2.62	1.26	0.45	5.34
试验组	2.42	1.02	0.48	5.25

### (3) 感官品评

乾隆江南芝麻香型原酒感官品评如表 2-24 所示。

表 2-24 乾隆江南芝麻香型原酒品评

组别	评语
对照组	清亮无色透明，焦香突出，浓郁，酒体绵甜，余味长，风格典型
试验组	清亮无色透明，焦香突出，酒体甘冽，余味长，风格典型

### (4) 原酒中的挥发性化合物

通过 GC-MS 半定量检测，芝麻香型白酒原酒酒样中的挥发性化合物其结果如图 2-14 所示。在芝麻香型白酒试验组原酒酒样中共检测出 103 挥发性化合物，在对照组原酒酒样中共检测出 100 种挥发性化合物。其中，试验组的化合物数量高于对照组，但试验组的挥发性化合物浓度低于对照组。

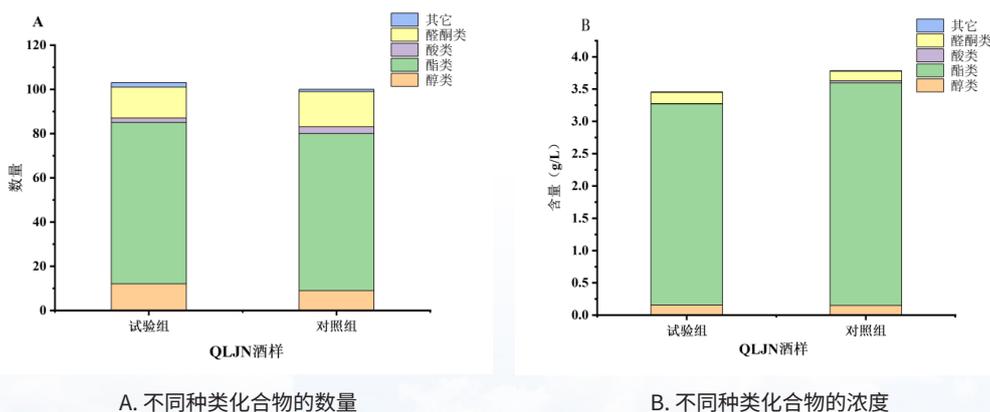


图 2-14 乾隆江南芝麻香型酒样挥发性化合物

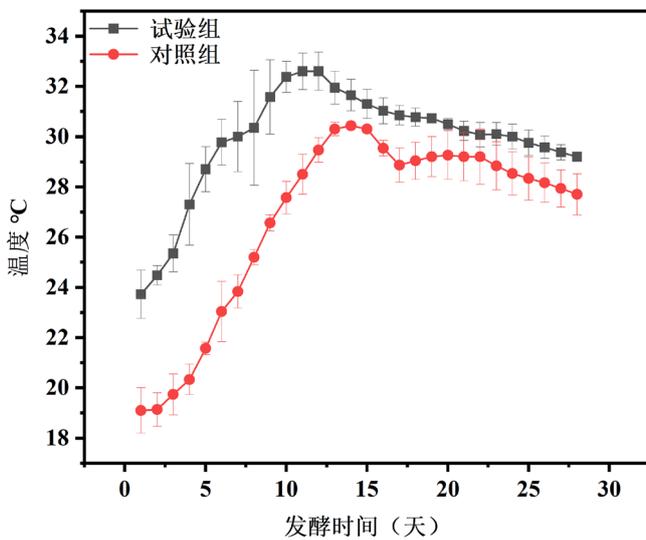
## 2.3.4 江苏汤沟两相和酒业有限公司的应用

将美国高粱应用于浓香型白酒生产中，发酵现场如图 2-15 所示。



图 2-15 浓香型白酒发酵现场图

### 2.3.4.1 对白酒发酵的影响



#### (1) 白酒发酵过程中温度变化

白酒发酵过程中温度随时间变化如图 2-16 所示。如图所示，为浓香型白酒发酵过程中试验组及对照组温度随发酵时间变化情况，总体变化趋势趋于一致，但试验组温度一直高于对照组。

图 2-16 浓香型白酒发酵过程中酒醅温度随时间变化

#### (2) 白酒发酵过程中入池及出池情况

浓香型白酒发酵过程中试验组出池、入池时，其水份、酸度情况如表 2-25 所示。试验组入池和出池水份、酸度均与对照组相近。

表 2-25 浓香型白酒入池、出池情况

时间点	组别	水分 %	酸度 (mmol/10g)
入池	对照组	56	1.41
	试验组	57	1.45
出池	对照组	62	3.68
	试验组	63	3.59

#### (3) 发酵过程中物质随时间变化情况

发酵过程中酒醅中的葡萄糖、乙酸、乳酸及乙醇随时间变化情况如图 2-17 所示。试验组与对照组指标无显著性差异。

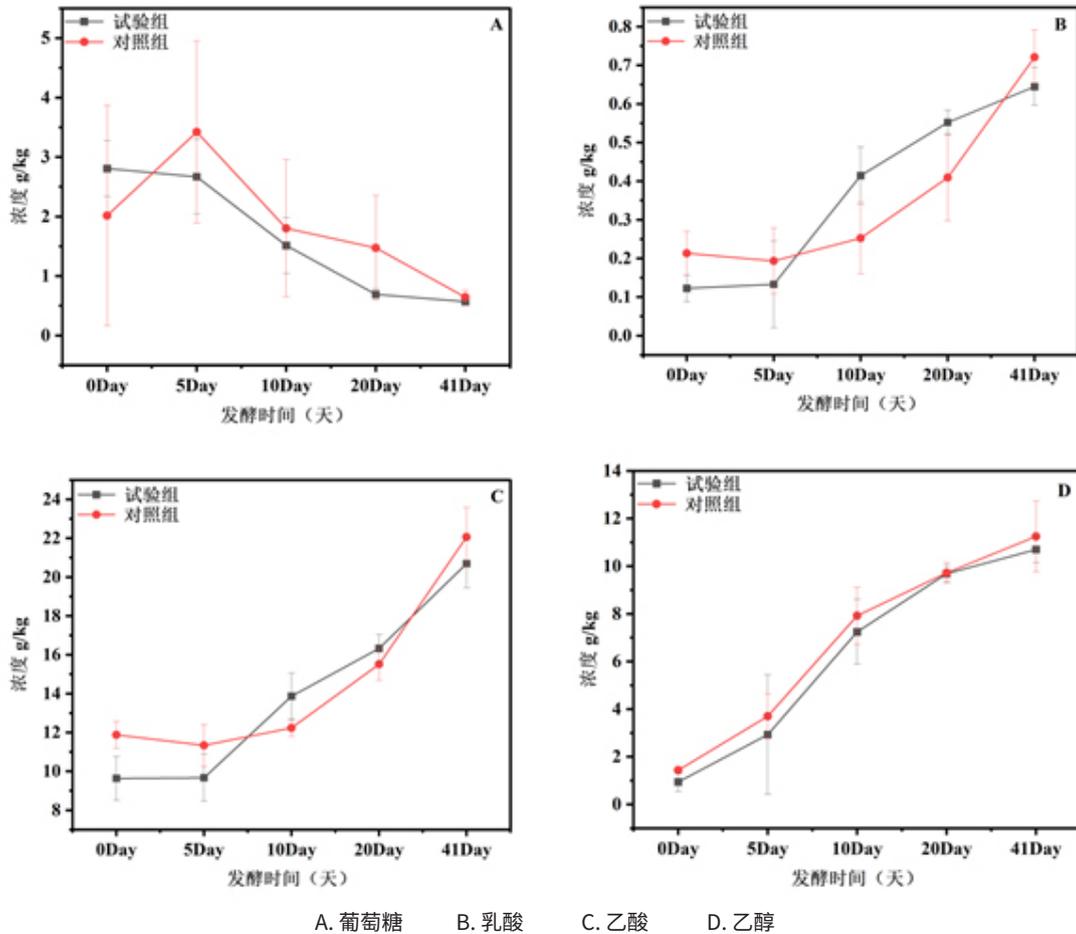


图 2-17 发酵过程酒醅中物质随时间变化情况

(4) 发酵过程中微生物变化情况

如图2-18所示,在白酒发酵过程中,细菌中共检测出28个优势物种(>1%),真菌共检测出7个优势物种(>1%),分别是 Aspergillus, Rhizopus, Saccharomyces, Saccharomycopsis, Thermomyces, Torulaspora 和 Yueomyces。试验组发酵比对照组发酵更快,发酵更快不利于浓香型白酒品质的提升。

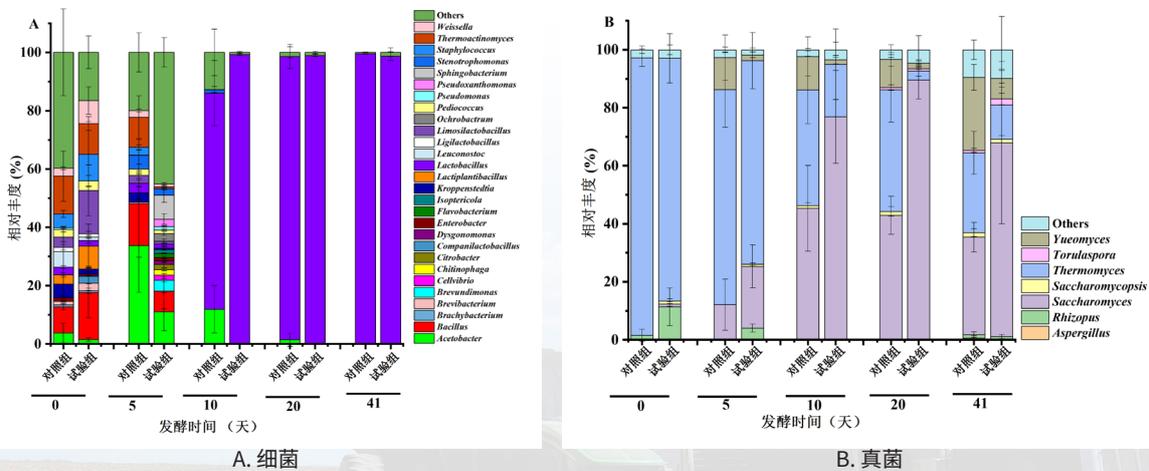


图 2-18 白酒发酵过程微生物群落变化情况

### 2.3.4.2 对白酒酒质的影响

#### (1) 原酒等级

浓香型白酒原酒等级分为特一级、特二级和优级三个等级。汤沟浓香型白酒原酒等级如表 2-26 所示。

表 2-26 浓香型白酒原酒等级

组别	原酒等级
对照组	特一
	特二
	优级
试验组	特一
	特二
	优级

#### (2) 原酒四大酯分析

浓香型白酒原酒中四大酯的含量如表 2-27 所示。试验组特一级己酸乙酯含量低于对照组，但特二级和优级酒己酸乙酯含量高于对照组；试验组特一级乳酸乙酯含量与对照组接近，但特二级和优级酒乳酸乙酯含量高于对照组；试验组乙酸乙酯含量高于对照组。己酸乙酯是浓香型白酒的重要风味物质，己酸乙酯越高，乙酸乙酯和乳酸乙酯浓度越低有利于浓香型白酒品质提升。

表 2-27 浓香型白酒入池酒醅物质情况

组别	原酒等级	己酸乙酯 (g/L)	乳酸乙酯 (g/L)	丁酸乙酯 (g/L)	乙酸乙酯 (g/L)
对照组	特一	7.15	2.94	1.90	4.15
	特二	5.18	4.25	0.61	2.10
	优级	1.31	1.72	0.14	3.20
试验组	特一	5.64	2.93	1.70	5.51
	特二	5.16	4.71	0.72	3.71
	优级	2.60	2.71	0.17	4.80

#### (3) 出酒率

汤沟浓香型白酒出酒率如表 2-28 所示。试验组出酒率略低于对照组。

表 2-28 汤沟浓香型出酒率

组别	出酒率
对照组	34.02%
试验组	33.41%

#### (4) 感官品评

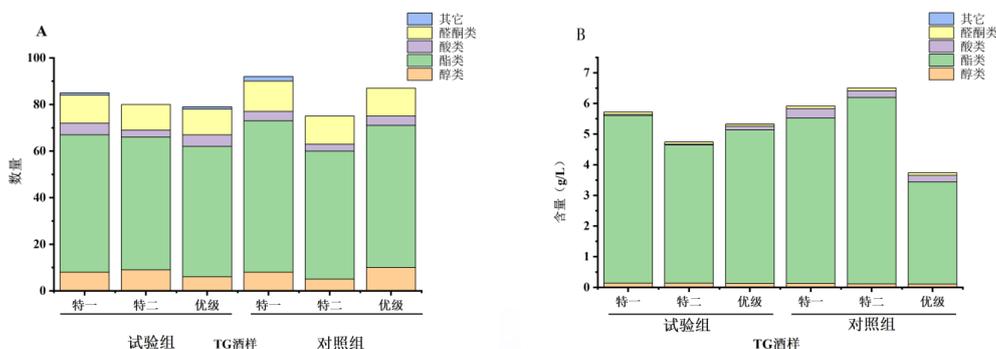
浓香型白酒原酒感官品评结果如表 2-29 所示。试验组感官评分与对照组接近。

表 2-29 浓香型白酒原酒感官品评结果

组别	原酒等级	评语	分数
对照组	特一	窖香浓郁，香气舒适，入口醇厚， 诸味协调，绵甜，尾净	90.5
	特二	香气舒适，入口爽净，诸味协调，醇正，干净	88
	优级	窖香浓郁，协调，粮糟香，入口涩，后味欠爽净	81
试验组	特一	无色透明，窖香舒适，入口浓厚，绵甜优雅， 余味悠长，后味干净，风格典型。	92
	特二	无色透明，窖香较浓，入口浓厚，酒体爽口干净， 丰满协调，后味较长。	88
	优级	无色透明，香气较一般，入口醇厚， 酒体协调，后味干净。	81.5

#### (5) 原酒中的挥发性化合物

通过 GC-MS 半定量检测，浓香型白酒原酒酒样中的挥发性化合物其结果如图 2-19 所示。在试验组原酒中共检测出 105 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 124 种挥发性化合物。



A. 不同种类化合物的数量

B. 不同种类化合物的浓度

图 2-19 汤沟浓香型酒样挥发性化合物

## 2.4 小结

为了探究不同高粱品种对白酒发酵的影响，选取了 3 个美国高粱品种（A2、A3、A6）在国内三个酒厂进行了不同香型的工厂规模试验，以及使用酒厂常规生产作为对照组。

将选取的 3 个美国高粱品种（A2、A3、A6）在安徽金种子酒业股份有限公司分别进行 3 个香型的试验。以 A2 为原料酿造的清香型白酒，试验组入池淀粉高于对照组，但出池淀粉低于对照组。试验组出酒率为 33.04%，对照组出酒率为 31.38%，**试验组出酒率高于对照组**。试验组的乳酸乙酯含量高于对照组，己酸乙酯和乙酸乙酯低于对照组。清香型白酒感官品评结果试验组得分 87.3，对照组得分 90，**试验组感官评分低于对照组**。在试验组原酒中共检测出 107 种挥发性化合物，在对照组原酒酒样中共检测出 88 种挥发性化合物，试验组风味化合物的种类和含量均高于对照组。

以 A6 为原料酿造的浓香型白酒，试验组入池和出池酸度均低于对照组，试验组入池和出池淀粉均高于对照组。原酒分为特优级和普级，试验组出酒率为 36.69%，特优率为 35.50%，对照组出酒率为 36.61%，特优率为 36.87%，**试验组出酒率略高于对照组，但特优率略低于对照组**。试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其它三大酯都低于对照组。试验组普级原酒感官品评得分 87.4，特优级原酒感官品评得分 94.8；对照组普级原酒感官品评得分 88，特优级原酒感官品评得分 95，**试验组的普级和特优级打分均略低于对照组**。在试验组原酒中共检测出 94 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 99 种挥发性化合物，特优级中的挥发性化合物浓度高于普级，试验组中的挥发性化合物浓度高于对照组。

以 A3 为原料酿造的馥合香型白酒，试验组堆积样品的水分低于对照组，但入池和出池水份相近。试验组堆积酸度略低，但入池和出池酸低相近。试验组堆积淀粉高于对照组，入池和出池淀粉均略低于对照组。原酒分为普级和特级，试验组出酒率为 38.34%，特优率为 32.97%，对照组出酒率为 40.17%，特优率为 29.32%，**试验组出酒率略低于对照组，但特优率高于对照组**。试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其他三大酯都略低于对照组。在试验组原酒中共检测出 103 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 95 种挥发性化合物，优级中的挥发性化合物浓度高于普级，试验组中的挥发性化合物浓度低于对照组。

选取美国高粱 A6 在江苏乾隆江南酒业股份有限公司酿造芝麻香型白酒。发酵前期，对照组温度略高于试验组，后期试验组温度略高于对照组。试验组入池和出池酸度均高于对照组。试验组入池和出池淀粉均高于对照组。试验组出酒率为 41.18%，对照组出酒率为 42.19%，**试验组出酒率略低于对照组**。试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其他三大酯都低于对照组。在试验组原酒中共检测出 103 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 100 种挥发性化合物。其中，试验组的化合物数量高于对照组，但试验组的挥发性化合物浓度低于对照组。

选取美国高粱 A6 在江苏汤沟两相和酒业有限公司酿造浓香型白酒。原酒等级分为特一级、特二级和优级，试验组出酒率为 33.41%，对照组出酒率为 34.02%，**试验组出酒率略低于对照组**。试验组感官评分与对照组接近。在试验组原酒中共检测出 105 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 124 种挥发性化合物，试验组中的化合物数量低于对照组。

## 第 3 章 结果与讨论

(1) 对 6 种美国高粱以及作为对照的 3 种国内酒厂所用高粱的基本理化指标、发酵过程中的理化指标、代谢产物及风味物质进行了分析。A3 是糯高粱，其余 5 种为粳高粱。美国高粱 A5 的氰化物含量最高，达到了 0.54 $\mu\text{g/g}$ ，排除 A5。

(2) 美国 6 种高粱和对照 3 种高粱在发酵过程中代谢产物的产生趋势是一致的，仅存在含量上的差异；基于发酵过程微生物代谢产物（乙醇，乙酸，乳酸及风味物质）的 PCA 分析及终点含量的 PCA 分析，得出 A6 与 3 种对照发酵过程中代谢产物的变化一致性更强。对 9 种高粱发酵过程中酒醅中主要微生物的变化情况分析，发现 A2, A4, A6 可能具有较好的中国白酒酿造性能。

(3) 分析高粱品种与白酒香型匹配性，通过代谢产物组成分析，发现 A2 与 C9 的匹配度为 58.62%；A4 与 C9 的匹配度为 51.72%；A6 与 C9 的匹配度为 62.07%；A3 与 C8 的匹配度为 51.72%。因此，确定 A6、A2 更适合浓香 / 清香型白酒的酿造；A3 适合于酱香型白酒的酿造。

(4) 将选取的 3 个美国高粱品种（A2、A3、A6）在安徽金种子酒业股份有限公司分别进行 3 个香型的试验。以 A2 为原料酿造的清香型白酒，试验组入池淀粉高于对照组，但出池淀粉低于对照组。试验组出酒率为 33.04%，对照组出酒率为 31.38%，试验组出酒率高于对照组。试验组的乳酸乙酯含量高于对照组，己酸乙酯和乙酸乙酯低于对照组。清香型白酒感官品评结果试验组得分 87.3，对照组得分 90，试验组感官评分低于对照组。在试验组原酒中共检测出 107 种挥发性化合物，在对照组原酒酒样中共检测出 88 种挥发性化合物，试验组风味化合物的种类和含量均高于对照组。

以 A6 为原料酿造的浓香型白酒，试验组入池和出池酸度均低于对照组，试验组入池和出池淀粉均高于对照组。原酒分为特优级和普级，试验组出酒率为 36.69%，特优率为 35.50%，对照组出酒率为 36.61%，特优率为 36.87%，试验组出酒率略高于对照组，但特优率略低于对照组。试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其它三大酯都低于对照组。试验组普级原酒感官品评得分 87.4，特优级原酒感官品评得分 94.8；对照组普级原酒感官品评得分 88，特优级原酒感官品评得分 95，试验组的普级和特优级打分均略低于对照组。在试验组原酒中共检测出 94 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 99 种挥发性化合物，特优级中的挥发性化合物浓度高于普级，试验组中的挥发性化合物浓度高于对照组。

以 A3 为原料酿造的馥合香型白酒，试验组堆积样品的水分低于对照组，但入池和出池水份相近。试验组堆积酸度略低，但入池和出池酸低相近。试验组堆积淀粉高于对照组，入池和出池淀粉均略低于对照组。原酒分为普级和特级，试验组出酒率为 38.34%，特优率为 32.97%，对照组出酒率为 40.17%，特优率为 29.32%，试验组出酒率略低于对照组，但特优率高于对照组。试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其他三大酯都略低于对照组。在试验组原酒中共检测出 103 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 95 种挥发性化合物，优级中的挥发性化合物浓度高于普级，试验组中的挥发性化合物浓度低于对照组。

(5) 选取美国高粱 A6 在江苏乾隆江南酒业股份有限公司酿造芝麻香型白酒。发酵前期，对照组温度略高于试验组，后期试验组温度略高于对照组。试验组入池和出池酸度均高于对照组。试验组入池和出池淀粉均高

于对照组。试验组出酒率为 41.18%，对照组出酒率为 42.19%，试验组出酒率略低于对照组。试验组的丁酸乙酯含量高于对照组，而其他三大酯都低于对照组。在试验组原酒中共检测出 103 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 100 种挥发性化合物。其中，试验组的化合物数量高于对照组，但试验组的挥发性化合物浓度低于对照组。

(6) 选取美国高粱 A6 在江苏汤沟两相和酒业有限公司酿造浓香型白酒。原酒等级分为特一级、特二级和优级，试验组出酒率为 33.41%，对照组出酒率为 34.02%，试验组出酒率略低于对照组。试验组感官评分与对照组接近。在试验组原酒中共检测出 105 种挥发性化合物，在对照组原酒中共检测出 124 种挥发性化合物，试验组中的化合物数量低于对照组。

总之，在比较的 6 种美国高粱中，A3 为糯高粱，可用于酱香型白酒和芝麻香型白酒的酿造；A2 和 A6 为粳高粱，可用于浓香型和清香型白酒的酿造。



美国谷物协会

