

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.015

魏铭, 何宏魁, 李玥, 等. 我国主要种植高粱品种蜀黍氰苷含量比较分析[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 105-110.

WEI M, HE H K, LI Y, et al. Comparative analysis on dhurrin content of main sorghum cultivars in China[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 105-110.

我国主要种植高粱品种蜀黍 氰苷含量比较分析

魏铭¹, 何宏魁², 李玥¹, 刘卓¹, 汪啸天¹, 常晓娇³, 王耀鹏¹✉

(1. 国家粮食和物资储备局标准质量中心, 北京 100834; 2. 安徽瑞思威尔科技有限公司, 安徽亳州 236800; 3. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油质量安全研究所, 北京 100037)

摘要: 酿酒用的粮食品质是白酒风味和质量安全的重要保障, 高粱籽粒中的蜀黍氰苷在发酵过程中分解产生氰化物, 氰化物进一步反应产生致癌物质氨基甲酸乙酯, 直接影响酿造白酒的安全性。从山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、河南、四川、贵州、陕西等9个高粱主产省份广泛采集173份样品(129个品种), 比较了不同品种高粱中蜀黍氰苷的含量。结果表明, 蜀黍氰苷普遍存在于酿酒高粱中, 且含量差异较大, 敖杂、禾杂158、晋杂5号等品种蜀黍氰苷含量较高, 为30.26~136.7 mg/kg; 红缨子(贵州绥阳种植)、小白粮、吉品12号、郎糯红19号和新仓8号等品种蜀黍氰苷含量较低, 均小于1 mg/kg, 更适宜作为酿酒高粱原料。非糯高粱中蜀黍氰苷平均含量普遍高于糯高粱, 东北产区和华东产区高粱中蜀黍氰苷平均含量显著高于西南产区。通过对我国主要种植高粱品种的蜀黍氰苷含量的分析比较, 以期从原料控制角度为白酒生产筛选优质原料, 为提高产品质量安全水平提供参考。

关键词: 高粱; 白酒; 蜀黍氰苷; 氨基甲酸乙酯

中图分类号: TS210.7 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)02-0105-06

网络首发时间: 2025-03-06 20:05:29

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250306.1504.004>

Comparative Analysis on Dhurrin Content of Main Sorghum Cultivars in China

WEI Ming¹, HE Hong-kui², LI Yue¹, LIU Zhuo¹, WANG Xiao-tian¹,
CHANG Xiao-jiao³, WANG Yao-peng¹✉

(1. Standards and Quality Center of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100834, China; 2. Anhui Risewell Technology Company Limited, Bozhou, Anhui 236800, China; 3. Institute of Grain and Oil Safety, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: The quality of brewing grain is an important guarantee for the flavor and quality safety of brewing liquor. In the process of fermentation, the cyanogen in sorghum grains was decomposed to produce cyanide,

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-08-01; 录用日期: 2024-08-02

基金项目: 十四五国家重点研发计划课题“大宗粮油食品适度加工危害物阻控消减关键技术研发”(2023YFF1104604); 古井酿酒用高粱品质评价研究(RSWR-2021-HT-23)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 14th five-year plan, China “Research and Development of Key Technologies for Hazardous Substance Control and Mitigation in Moderate Processing of Bulk Grain and Oil Foods” (No. 2023YFF1104604); Gujing Grain Study Institute research project (No. RSWR-2021-HT-23)

第一作者: 魏铭, 女, 1991年出生, 博士, 高级工程师, 研究方向为粮食质量安全, E-mail: bifuweiming@163.com

通信作者: 王耀鹏, 男, 1969年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮食标准质量, E-mail: gljzlc@126.com

which further reacted to produce carcinogen ethyl urethane, which directly affected the safety of liquor brewing. In this study, 173 samples (involving 129 varieties) were collected from 9 major sorghum producing provinces, including Shanxi, Inner Mongolia, Liaoning, Jilin, Heilongjiang, Henan, Sichuan, Guizhou and Shaanxi. The difference of dhurrin content in different varieties of sorghum was analyzed and compared in this study. The results showed that dhurrin was widely present in sorghum, and its content varied greatly among different varieties. Aoza, Heza 158, and Jinza 5 had higher dhurrin content, with the content ranging from 30.26 to 136.7 mg/kg. Hongyingzi, Xiaobailiang, Jipin 12, Langnuohong 19 and Xincang 8 had lower dhurrin content, with all the content less than 1 mg/kg, which were more suitable as raw materials for brewing sorghum. The average content of dhurrin in non-glutinous sorghum was generally higher than that in glutinous sorghum, and the average content of dhurrin in northeast and centra was significantly higher than that in southwest. This study compared and analysed the content difference of dhurrin in different sorghum varieties, in order to provide reference for liquor production enterprises to explore quality raw material source and improve product quality and safety from the perspective of raw material control.

Key words: sorghum; liquor; dhurrin; ethyl urethane

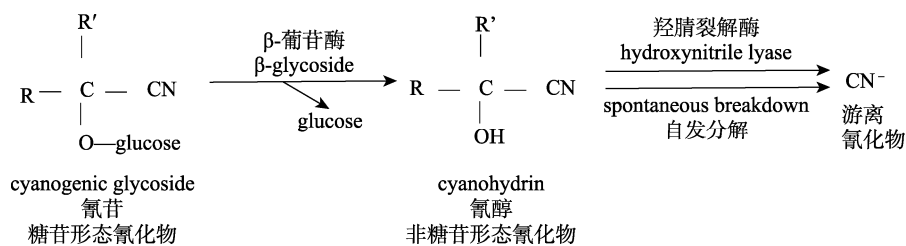
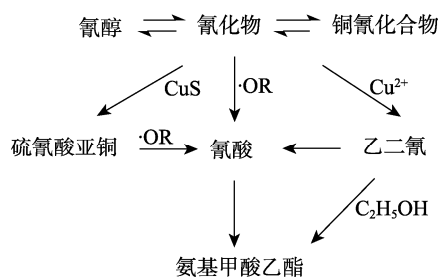
高粱 (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) 又称乌禾、蜀黍, 为禾本科一年生植物, 种植面积在世界范围内仅次于小麦、水稻、玉米和大麦, 广泛应用于食品、动物饲料、工业燃料等产业^[1-2]。我国高粱的种植范围十分广阔, 从最北端的东北地区到最南端的海南省均有种植, 其中东北地区的高粱种植面积占全国的 30% 以上, 其次是西南、华北等地。根据不同的用途, 一般将高粱品种分为籽粒高粱 (作为粮食用)、甜高粱、饲料高粱和帚高粱 4 种类型。在籽粒高粱中, 将支链淀粉含量在 80% 以上的称为糯高粱。糯高粱是酿造酱香型和浓香型白酒的主要原料, 对我国区域经济的发展发挥着重要作用。我国选育的高粱品种繁多, 但由于种植地分布广泛, 各地土壤、水分、气候等条件各有差异, 不同品种的高粱在营养品质、酿酒发酵特性上差异较大^[3-6]。

白酒属于我国传统的蒸馏酒, 是世界六大蒸馏酒之一, 以谷物为主要原料, 以大曲、小曲或麸曲及酒母等为糖化发酵剂, 经蒸煮、糖化、发酵、蒸馏等多个步骤酿造而成^[7-8]。因酿造原料、生产工艺等原因, 特别是高粱中的蜀黍氰苷在发酵过程中, 通过水解可生成氰化物, 氰化物作为白酒中氨基甲酸乙酯 (Ethyl carbamate, EC, 又称尿烷) 形成最重要的前体, 在发酵、蒸馏和贮存过程中易与乙醇反应生成氨基甲酸乙酯。氨基甲酸乙酯具有致癌性和基因毒性, 目前我国尚未

制定氨基甲酸乙酯限量标准, 但国际上多个国家和组织已经设定氨基甲酸乙酯的最高限量, 加拿大卫生与福利组织规定了蒸馏酒中氨基甲酸乙酯的最高限量为 150 $\mu\text{g/L}$ 。因此, 白酒中氨基甲酸乙酯成为影响人体健康的一个不可忽视的因素, 并严重影响到白酒的安全性^[9-10]。

作为白酒酿造的主要原料, 高粱含有生氰糖苷 (亦称“氰苷”), 并以蜀黍氰苷 (对羟基苯甲醛氰醇葡萄糖苷) 的形式存在^[11-12]。周韩玲等对 39 种不同产地、不同品种高粱中的蜀黍氰苷进行分析, 含量范围为 0.31~13.16 mg/kg^[13]。张顺荣等研究表明, 不同来源高粱中都检测到蜀黍氰苷, 且含量差异较大, 平均含量 4.52~19.28 mg/kg^[14]。在发酵阶段, 高粱中的蜀黍氰苷经 β -葡萄糖苷酶水解或者高温酸解之后生成 β -D-葡萄糖和不稳定的对羟基-(S)-扁桃腈, 对羟基-(S)-扁桃腈在内源性 α -羟基裂解酶或碱性条件下进一步分解生成对羟基苯甲醛和氰化物, 并在蒸馏时进入酒体中^[12,14-15] (图 1)。在白酒蒸馏及贮存过程中, 氰化物与乙醇反应, 产生氨基甲酸乙酯^[9] (图 2)。因此, 探究如何降低高粱籽粒中蜀黍氰苷含量, 将有助于白酒酿造生产中氨基甲酸乙酯的有效控制, 提升产品质量安全水平。

到目前为止, 有关高粱品质的研究很少涉及安全性指标, 对不同品种高粱蜀黍氰苷含量的研究也较少, 不能精准指导高粱品种选育与酿酒生产

图 1 氰苷的降解机制^[11,14]Fig.1 Degradation mechanism of cyanogenic glycoside^[11,14]图 2 氨基甲酸乙酯的产生机制^[16]Fig.2 The production mechanism of ethyl urethane^[16]

原料的选择和质量安全控制。本研究以 173 份高粱样品为研究对象（来自我国 9 个高粱主产省份的 129 个品种），系统比较不同品种高粱中蜀黍氰苷的含量差异，以期为高粱品种的选育、白酒生产质量安全控制，以及相关标准的制定提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、河南、四川、贵州、陕西等 9 个主产省份新收获高粱，共 129 个品种 173 份样品，来自 34 市 81 县。其中，辽宁 43 份样品，来自 5 市 12 县；吉林 39 份样品，来自 3 市 6 县；陕西 28 份样品，来自 4 市 18 县；内蒙古 19 份样品，来自 3 市 8 县；贵州 12 份样品，来自 1 市 10 县；山西 13 份样品，来自 5 市 7 县；黑龙江 10 份样品，来自 8 市 9 县；四川 6 份样品，来自 2 市 6 县；河南 3 份样品，来自 2 市 2 县。全部样品中，非糯高粱 136 份，糯高粱 37 份。蜀黍氰苷标准溶液（纯度 97%）：天津阿尔塔科技有限公司。

1.2 仪器与设备

LCMS-8050 三重四极杆液质联用仪：日本岛津公司；Milli-Q Integral-5 超纯水系统：美国 Millipore 公司；X1R 台式高速冷冻离心机：美国赛默飞公司。

1.3 实验方法

1.3.1 前处理

准确称取粉碎均匀的高粱试样 1.5 g 于 50 mL 离心管中，加入 20 mL 95% 甲醇溶液，震荡 30 min，8 000 r/min 离心 10 min，吸取上清液 0.2 mL 加入 0.6 mL 水，经 0.2 μm 滤膜过滤后（稀释倍数根据高粱中蜀黍氰苷实际含量进行稀释）进 HPLC-MS/MS 分析。

1.3.2 标准曲线

用甲醇分别配制浓度为 50、100、200、300、400、和 500 μg/L 的标准溶液（可根据实际含量进行调整）。

1.3.3 仪器条件

柱温：40 °C；进样体积：2 μL；离子源：ESI；扫描方式：正离子扫描；检测方式：多反应监测；电喷雾电压：5 000 V；雾化气压力：0.483 MPa；气帘气压力：0.138 MPa；毛细管电压：300 V；离子源温度：150 °C；流量：1 000 L/h；碰撞室流量：50 L/h；辅助加热气：0.379 MPa。

色谱柱：1.7 μm×2.1 mm×50 mm 的 C18 柱。梯度洗脱条件见表 1。

表 1 梯度洗脱条件

Table 1 Gradient elution condition

时间	流速	A/%	B/%
开始	0.3	5	95
2	0.3	20	80
2.1	0.3	40	60
3	0.3	40	60
3.1	0.3	5	95
4	0.3	5	95

注：A 液为甲醇，B 液为 0.1% 的甲酸水溶液^[17]。

Note: Liquid A is methanol, liquid B is 0.1% formic acid aqueous solution^[17].

1.4 数据处理

利用 Excel 和 SPSS 软件进行数据统计、处理

与分析。所有样品取 2 个重复进行分析, 取平均值作为最终结果。

2 结果与分析

2.1 不同品种高粱蜀黍氰苷含量的比较分析

由表 2 可知, 不同品种酿酒高粱中均含蜀黍氰苷, 说明蜀黍氰苷普遍存在于酿酒高粱中, 且含量差异较大。全部高粱样品蜀黍氰苷含量平均值 6.7 mg/kg, 其中品种敖杂的蜀黍氰苷含量最高, 达 136.7 mg/kg, 其次为禾杂 158 (64.6 mg/kg)、晋杂 5 号 (41.8 mg/kg), 这与国外对高粱种子中蜀

黍氰苷的研究结果基本相符^[12]。如图 3 所示, 品种红缨子 (贵州绥阳种植) 的蜀黍氰苷含量最低, 为 0.62 mg/kg, 其次为小白粮 (0.63 mg/kg)、吉品 12 号 (0.69 mg/kg)、郎糯红 19 号 (0.70 mg/kg)、新仓 8 号 (0.76 mg/kg)、晋杂 22 号 (山西永济种植, 0.87 mg/kg) 和甜高粱 (0.87 mg/kg)。

表 2 高粱样品中蜀黍氰苷含量分析

	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数/%
含量/(mg/kg)	6.7	136.7	0.62	12.8	191

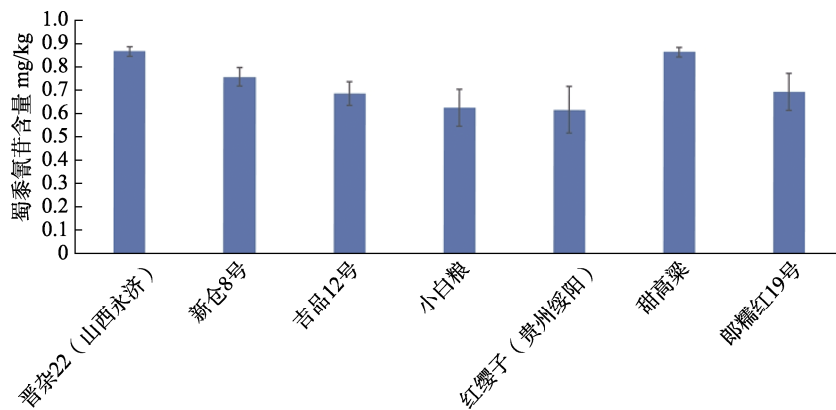


图 3 蜀黍氰苷含量较低的高粱品种

Fig. 3 Sorghum cultivars with low dhurrin content

2.2 非糯高粱和糯高粱蜀黍氰苷含量的差异

全部非糯高粱样品其蜀黍氰苷的平均含量为 6.7 mg/kg, 变幅在 0.63~136.7 mg/kg, 含量较高的品种有敖杂 (136.7 mg/kg)、禾杂 158 (64.6 mg/kg)、晋杂 5 号 (41.8 mg/kg)、沈杂 5 号 (22.5 mg/kg)、欧杂 696 (21.9 mg/kg)、本粮 3 (20.7 mg/kg) 等, 含量较低品种有小白粮 (0.63 mg/kg)、吉品 12 号 (0.69 mg/kg)、新仓 8 号 (0.76 mg/kg)。全部糯高粱样品蜀黍氰苷的平均含量为 6.5 mg/kg, 变幅在 0.62~32.7 mg/kg, 含量较高的品种有晋杂 22 号 (陕西榆阳, 32.7 mg/kg)、晋杂 25 号 (7.6 mg/kg)、晋糯 3 号 (6.95 mg/kg), 含量较低品种有红缨子 (贵州绥阳, 0.62 mg/kg)、郎糯红 19 号 (0.70 mg/kg)、甜高粱 (0.87 mg/kg)。从检测的结果分析, 非糯高粱中蜀黍氰苷平均含量高于糯高粱, 且不同品种的酿酒高粱中蜀黍氰苷含量不同。相对非糯高粱原料来说, 选择糯高粱作为酿造原料则既可控

制好发酵过程中氨基甲酸乙酯的产量, 又可以显著提高出酒率。有研究表明, 与根、茎、叶相比, 蜀黍氰苷在高粱籽粒中的含量较低, 随着籽粒成熟, 蜀黍氰苷的含量逐渐降低^[18]。由此推测选择成熟度高的高粱籽粒作为酿酒原料, 能够降低酒体中氨基甲酸乙酯的含量。

表 3 非糯高粱和糯高粱蜀黍氰苷含量分析

品种类型	平均值/ (mg/kg)	最大值/ (mg/kg)	最小值/ (mg/kg)	标准差/ (mg/kg)	变异 系数/%
非糯高粱	6.7	136.7	0.63	12.8	191
糯高粱	6.5	32.7	0.62	13.1	202

2.3 不同产区高粱蜀黍氰苷含量的差异

对东北地区 (内蒙古、黑龙江、吉林和辽宁)、华中产区 (山西、陕西和河南) 和西南地区 (四川和贵州) 高粱中蜀黍氰苷含量进行统计分析, 结果见表 4, 不同产区高粱蜀黍氰苷含量差异较大。东北产区高粱蜀黍氰苷含量范围在 0.63~

136.7 mg/kg, 华中产区高粱蜀黍氰苷含量范围在 0.87~41.8 mg/kg, 西南产区高粱蜀黍氰苷含量范围在 0.62~4.6 mg/kg。东北产区和华中产区高粱中蜀黍氰苷含量普遍较高, 其平均含量显著高于西南产区高粱中蜀黍氰苷平均含量。选取有代表性的品种进行聚类分析, 结果(图 4)显示, 东北产区和华中产区高粱为一类, 西南产区高粱为一类。初步推测, 高粱籽粒中蜀黍氰苷积累可能和种植地气候特点、地形地貌、种植方式、品种、氮肥施用量等因素有关^[19-20]。

表 4 不同产区高粱蜀黍氰苷含量差异分析
Table 4 Analysis on the difference of dhurrin content in sorghum from different producing areas

产区	平均值/ (mg/kg)	最大值/ (mg/kg)	最小值/ (mg/kg)	标准差/ (mg/kg)	变异 系数%
东北	6.7	136.7	0.63	12.9	192.5
华中	6.6	41.8	0.87	13.1	198.5
西南	2.2	4.6	0.62	1.2	54.5

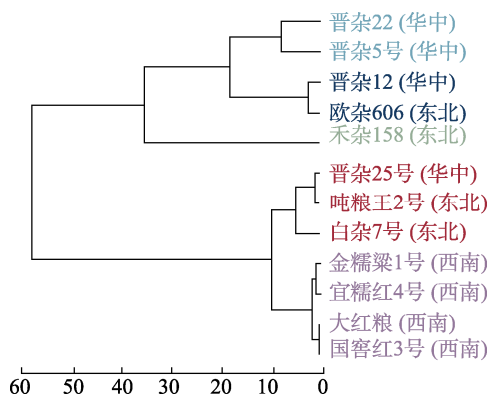


图 4 不同产区高粱聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of sorghum in different producing areas

2.4 不同产地红缨子蜀黍氰苷含量分析

分析同一品种不同产地的高粱中蜀黍氰苷含量, 结果见图 5。产地不同影响高粱中蜀黍氰苷的

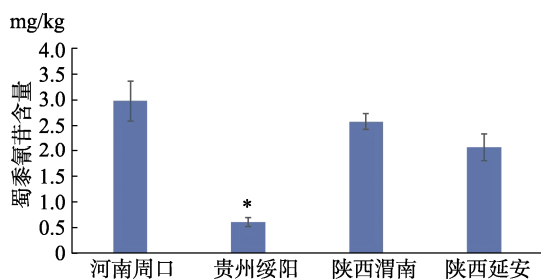


图 5 不同产地红缨子蜀黍氰苷含量比较

Fig.5 Comparison of dhurrin content in Honyingzi from different places

含量。以红缨子高粱为例, 在河南、陕西种植时, 籽粒中蜀黍氰苷平均含量显著高于在贵州种植时的含量。河南位于中国中部地区, 贵州地处中国西南部, 两地气候特征和作物种植方式等相差较大。由此可见, 不同产地高粱蜀黍氰苷含量差别与自然环境、气候变化或种植管理有一定的关系。

2.5 不同品种酿酒高粱安全风险评价

前期研究表明, 白酒中氨基甲酸乙酯的形成主要有两个方面的因素。一是酸性环境下, 尿素与乙醇反应生成氨基甲酸乙酯, 前体物质有尿素、瓜氨酸及胍甲酰磷酸等; 二是氰化物途径, 原料中的生氰糖苷经酶解后形成的氰化物在金属离子(铜离子或铁离子)的催化下形成氰酸盐后再与乙醇反应生成^[21](图 6)。张庄英^[22]对白酒蒸馏和储存过程中氨基甲酸乙酯及其前驱物氰化物、尿素和游离氨基酸进行了研究, 并且通过双变量相关分析得出白酒中氨基甲酸乙酯与氰化物存在显著的相关性, 氰化物很可能是白酒蒸馏和储存期间氨基甲酸乙酯形成的主要前体。

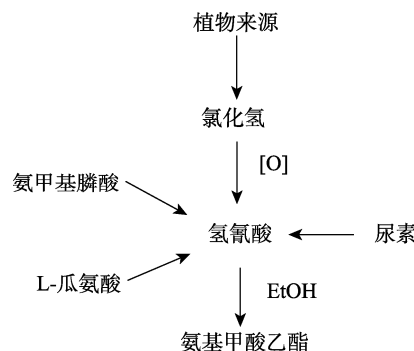


图 6 关键前体物质生成氨基甲酸乙酯的途径及其相互关系^[14]


Fig.6 The pathway of formation of ethyl urethane from key precursor substances and their relationship^[14]

我国白酒酿酒原料高粱是一种富含生氰糖苷(蜀黍氰苷)的作物之一, 由于不同酒厂使用的酿酒高粱品种不同, 其生氰糖苷的含量也不同, 使得不同白酒酿造过程中氰化物含量水平的差异, 最终可能会影响白酒中氨基甲酸乙酯的含量^[23]。为了控制白酒中氨基甲酸乙酯的含量可以选用生氰糖苷含量少的酿酒高粱原料来降低氰化物的含量。红缨子、小白粮、吉品 12 号、郎糯红 19 号、新仓 8 号、晋杂 22 号、甜高粱等品种蜀黍氰苷含量较低, 更适宜作为酿酒高粱原料。

3 结论

蜀黍氰苷普遍存在于酿酒高粱中,且含量差异较大,敖杂、禾杂158、晋杂5号、晋杂22号等品种蜀黍氰苷含量较高,为30.26~136.7 mg/kg;红缨子、小白粮、吉品12号、郎糯红19号、新仓8号、晋杂22号和甜高粱等品种蜀黍氰苷含量较低,均小于1 mg/kg,更适宜作为酿酒高粱原料。非糯高粱中蜀黍氰苷平均含量普遍要高于糯高粱,东北产区和华北产区高粱中蜀黍氰苷平均含量显著高于西南产区高粱中蜀黍氰苷平均含量。通过选择合适的高粱品种,控制由高粱原料带入氨基甲酸酯前体物质,可以有效控制白酒发酵过程中产生的氨基甲酸酯。

参考文献:

- [1] TARI I, LASKAY G, TAKÁCS Z, et al. Response of sorghum to abiotic stresses: A review[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2013, 199(4): 264-274.
- [2] 李小红, 褚毅宏, 毛育志, 等. 酿酒高粱不完善粒检测仪检测模型的研究与检验[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 129-134.
LI X H, CHU Y H, MAO Y Z, et al. Study and test of the model of unsound kernel measuring instrument for distiller sorghum [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 129-134.
- [3] 陈冰孺, 李继洪, 王阳, 等. 高粱 (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) 种质资源研究进展[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 67-72+77.
CHEN B R, LI J H, WANG Y, et al. Advances in germplasm resources of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(1): 67-72+77.
- [4] 田晓红, 谭斌, 谭洪卓, 等. 20种高粱淀粉特性[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 13-20.
TIAN X H, TAN B, TAN H Z, et al. Properties of sorghum starches from twenty varieties in China[J]. Food Science, 2010, 31(15): 13-20.
- [5] 卫永太, 张镔, 张桂香. 中国高粱品质性状的区域性差异[J]. 天津农业科学, 2016, 22(11): 138-140.
WEI Y T, ZHANG B, ZHANG G X. Regional differences analysis on quality traits of Chinese sorghum[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(11): 138-140.
- [6] 刘纯汐, 何锐, 刘伟, 等. 重庆地产高粱理化性质分析及抗消化品种筛选[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 1-8.
LIU C X, HE R, LIU W, et al. Analysis of physicochemical properties and screening of digestible resistant varieties of sorghum in Chongqing[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 1-8.
- [7] 吴继红, 黄明泉, 郑福平, 等. 健康白酒的研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(2): 17-23.
WU J H, HUANG M Q, ZHENG F P, et al. Research progress of healthy Baijiu[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(2): 17-23.
- [8] 于加乾, 袁士猛, 曾安林, 等. 酿酒行业中支链淀粉快速检测方法的研究和应用[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(2): 91-96.
YU J Q, YUAN S M, ZENG A L, et al. Research and application of rapid detection of amylopectin in wine industry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(2): 91-96.
- [9] BELAND F A, BENSON R W, MELLICK P W, et al. Effect of ethanol on the tumorigenicity of urethane (ethyl carbamate) in B6C3F1 mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2005, 43(1): 1-19.
- [10] 苏占元, 郑若欣, 杨晓军, 等. 白酒中氨基甲酸酯含量检测与分析[J]. 酿酒, 2019, 46(5): 55-57.
SU Z Y, ZHENG R X, YANG X J, et al. Determination and analysis of ethyl carbamate in liquor[J]. Liquor Making, 2019, 46(5): 55-57.
- [11] VETTER J. Plant cyanogenic glycosides[J]. Toxicon, 2000, 38(1): 11-36.
- [12] JOHANSEN H, RASMUSSEN L H, OLSEN C E, et al. Rate of hydrolysis and degradation of the cyanogenic glycoside, dhurrin, in soil[J]. Chemosphere, 2007, 67(2): 259-266.
- [13] 周韩玲, 安明哲, 赵东, 等. 不同产地及品种高粱中蜀黍氰苷含量的差异化分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(7): 209-213.
ZHOU H L, AN M Z, ZHAO D, et al. Differential analysis of dhurrin content in sorghum from different producing areas and varieties[J]. China Brewing, 2023, 42(7): 209-213.
- [14] 张顺荣. 白酒中氨基甲酸酯形成的氰化物途径研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
ZHANG S R. Research of ethyl carbamate formation in Chinese liquor from the cyanide way[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [15] BAK S, PAQUETTE S M, MORANT M, et al. Cyanogenic glycosides: a case study for evolution and application of cytochromes P450[J]. Phytochemistry Reviews, 2006, 5(2-3): 309-329.
- [16] 仇钰莹. 浓香型白酒中氨基甲酸酯形成途径解析[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
CHOU Y Y. Analysis of ethyl carbamate formation during Luzhou-flavor spirits fermentation process[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [17] 周韩玲, 安明哲, 李杨华, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定高粱中蜀黍苷的含量[J]. 酿酒科技, 2020, (5): 78-82+86.
ZHOU H L, AN M Z, LI Y H, et al. Determination of dhurrin content in sorghum by HPLC-MS/MS[J]. Liquor-making Science & Technology, 2020, (5): 78-82+86.
- [18] NIELSEN L J, STUART P, PIC MANOVÁ M, et al. Dhurrin metabolism in the developing grain of *Sorghum bicolor* (L.) Moench investigated by metabolite profiling and novel clustering analyses of time-resolved transcriptomic data[J]. BMC Genomics, 2016, 17(1): 997-1021.
- [19] ATES E, TENIKECIER H S. Hydrocyanic acid content, forage yield and some quality features of two sorghum-sudan grass hybrid cultivars under different nitrogen doses in Thrace, Turkey[J]. Curr Trend Nat Sci, 2019, 8(16): 55-62.
- [20] MANUELA M, ILARIA C, LORENZO B, et al. Metabolomic study of Sorghum (*Sorghum bicolor*) to interpret plant behavior under variable field conditions in view of smart agriculture applications[J]. J Agr Food Chem, 2021, 69(3): 1132-1145.
- [21] PEREIRA E V S, OLIVEIRA S, NÓBREGA I C C, et al. Brazilian vodkas have undetectable levels of ethyl carbamate[J]. Qu í mica Nova, 2013, 36(6): 822-825.
- [22] 张庄英. 白酒蒸馏和贮存过程中氨基甲酸酯的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 39.
ZHANG Z Y. Research of ethyl carbamate during the distillation and storage of Chinese liquors[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 39.
- [23] AKAZAWA T, MILJANICH P, CONN E E. Studies on cyanogenic glycoside of *Sorghum vulgare*[J]. Plant physiology, 1960, 35(4): 535. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。