DOI:10.12441/spyswjs.20251105001 [文章编号] 1673-1689(2026)08-0024-09

芝麻香型白酒酿造过程中氨基甲酸乙酯及主要前体物质时空分布

程 凡[1,2] 梅 婕[2,3] 汪家胜[2] 方 程[2] 张 显[3] 刘庆涛[1] 张温清[2,3*] 薛正莲[1]

(1. 安徽工程大学生物与食品工程学院,安徽 芜湖 241000; 2. 安徽宣酒集团股份有限公司,安徽 宣城 242000; 3. 江南大学生物工程学院,江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】探究芝麻香型白酒酿造过程中氨基甲酸乙酯(ethyl carbamate, EC)及其前体物质(尿素、氰化物)的来源、变化规律与空间分布特征,明确白酒生产各环节中EC的影响因素。【方法】系统跟踪配料、堆积发酵、窖池发酵3个阶段,检测原辅料、酒曲及酒醅中EC、尿素、氰化物的质量分数等指标,结合皮尔逊相关性分析揭示各指标间的内在关联。【结果】配料阶段,原辅料中EC前体物质(尿素、氰化物)质量分数较低(<0.20 mg/kg),酒曲为配料阶段EC前体物质的主要来源,高温曲中尿素质量分数达175.69 mg/kg,中温曲中氰化物质量分数达0.33 mg/kg;堆积阶段,EC质量分数仅增长2.03 mg/kg,尿素质量分数增长了44.56 mg/kg,氰化物质量分数下降了0.70 mg/kg;窖池发酵阶段,EC和尿素的质量分数分别增长了67.77、86.97 mg/kg,氰化物质量分数呈波动性变化,发酵30 d时其质量分数最高(2.56 mg/kg)。相关性分析结果表明,EC质量分数与尿素、氰化物质量分数等指标呈正相关,EC质量分数分布特征受上述指标协同调控。空间分布上,堆积阶段中间点及中心点部位为EC前体物质富集的核心区域,窖池发酵阶段EC及其前体物质质量分数呈现“中糟>底糟>面糟”的特征。【结论】以芝麻香型白酒酿造全流程为研究对象,构建了EC形成关键节点与调控靶点体系,为优化酿造工艺、实现EC定向消减提供了理论支撑。

关键词:芝麻香型白酒;氨基甲酸乙酯;氰化物;尿素;时空演替

Temporal and Spatial Distribution of Ethyl Carbamate and Its Main Precursors in Zhimaxiangxing Baijiu Brewing

CHENG Fan[1,2] *MEI Jie*[2,3] *WANG Jiasheng*[2] *FANG Cheng*[2] *ZHANG Xian*[3] *LIU Qingtao*[1] *ZHANG Wenqing*[2,3*] *XUE Zhenglian*[1]

(1. School of Biology and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Xuanjiu Group Co., Ltd., Xuancheng 242000, China; 3. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to explore the sources, variation patterns, and spatial distribution characteristics of ethyl carbamate (EC) and its precursors (urea and cyanide) during the brewing process of Zhimaxiangxing Baijiu and to identify the influencing factors of EC in various stages of Baijiu production. [**Method**] The three stages of batching, stacking fermentation, and pit fermentation were systematically tracked, and the mass fractions of EC, urea, cyanide, and other indicators in raw and auxiliary materials, qu, and fermented grains were determined. Pearson correlation analysis was performed to reveal the intrinsic correlations between various indicators. [**Result**] During the batching stage, the mass fraction of EC precursors (urea and

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32302246);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2021A0510);安徽省博士后科研项目(2024C859)。

通信作者:张温清(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事白酒风味与酿造微生物研究。E-mail:zwq281@163.com

收稿日期:2025-11-05 **修回日期:**2026-02-21

cyanide) in raw and auxiliary materials were relatively low (<0.20 mg/kg), and qu was the main source of EC precursors during the batching stage. The mass fraction of urea in high-temperature Daqu reached 175.69 mg/kg, and that of cyanide in medium-temperature Daqu reached 0.33 mg/kg. During the stacking stage, the mass fraction of EC increased by only 2.03 mg/kg; the mass fraction of urea increased by 44.56 mg/kg; and the mass fraction of cyanide decreased by 0.70 mg/kg. During the pit fermentation stage, the mass fractions of EC and urea increased by 67.77 mg/kg and 86.97 mg/kg, respectively, while that of cyanide fluctuated, reaching its highest level (2.56 mg/kg) after 30 d of fermentation. The correlation analysis results showed that the mass fraction of EC was positively correlated with the mass fractions of urea, cyanide, and other indicators, and the concentration distribution characteristics of EC were co-regulated by these indicators. In spatial distribution, the middle and central parts of the stacking stage were the core areas enriched with EC precursors, and the mass fractions of EC and its precursors during the pit fermentation stage exhibited a pattern of middle tank>bottom tank>surface tank. [**Conclusion**] This study focuses on the entire brewing process of Zhimaxiangxing Baijiu and constructs a system of key nodes and regulatory targets for EC formation, providing theoretical support for optimizing the brewing processes and achieving targeted reduction of EC.

Keywords: Zhimaxiangxing Baijiu; ethyl carbamate; cyanide; urea; spatiotemporal succession

氨基甲酸乙酯（ethyl carbamate，EC）是传统发酵食品中普遍存在的内源性污染物质。2007年，国际癌症研究机构（International Agency for Research on Cancer，IARC）在危害性评估中将EC归为2A类致癌物[1-2]，对人体健康具有潜在的危害性。食品添加剂法规委员会（Codex Committee on Food Additives，CCFA）研究表明，饮用含乙醇饮料是人体摄入EC的主要途径之一[3]。多项研究证实，乙醇对EC的致癌性具有促进作用[4]。卓俊纳等[5]研究发现，中国白酒中EC检出率为100%，且多地区白酒中EC含量超过国际限量标准[6-7]，不利于我国白酒产业的国际化发展。因此，研究以白酒为代表的中国酒精饮料中EC含量的控制尤为重要。

白酒中EC的形成途径已有较为明确的解析，其主要形成于酿造、蒸馏及贮存阶段[7-11]。EC主要生成途径分为2类，其一为尿素-乙醇途径[11-13]，发酵体系内精氨酸、瓜氨酸等尿素前体物质与乙醇发生酯化反应生成EC；其二为氰化物-乙醇途径，发酵体系内氰酸、氢氰酸等含氰化合物与乙醇发生酯化反应生成EC[14-16]。此外，发酵食品中EC的研究集中在检测方法[14-15,17]和控制措施[9,12-13]等方面，多数研究停留于实验室模拟阶段，针对工业化生产的EC源头调控研究相对较少。

据统计，在中国白酒的12种主流香型里，芝麻香型白酒中EC的平均含量处于相对较高水平[18]，主要是由于芝麻香型白酒的独特生产工艺。芝麻香型白酒以优质粳高粱为主料，搭配糯米、麸皮等辅料，形成营养多元、结构丰富的发酵基质；采用大曲与麸曲协同糖化发酵，吸取了酱香型白酒的高温堆积、高温发酵以及浓香型白酒的续糟发酵工艺优点；构建了以酵母菌和细菌为主的复杂酿造微生物菌群，为独特的芝麻香风味物质的生成奠定了基础[19-20]。在这一复杂酿造过程中，丰富的含氮化合物及高温堆积、发酵和续糟工艺，不仅为白酒香气物质形成和色泽产生提供了关键物质基础与反应条件[20]，也为发酵微生物的生长繁殖创造了有利条件。在纯种酵母与麸曲的协同代谢作用下，加速了尿素、氰化物等物质的积累[21-26]，为EC的生成提供了原料基础。

作者以芝麻香型白酒为研究对象，聚焦于工业化酿造实际生产全过程，通过系统采集原辅料样本及堆积发酵、窖池发酵等关键工艺环节的酒醅样本，深入探究EC及其前体物质在时间和空间维度上的分布变化规律，旨在通过数据分析揭示芝麻香型白酒酿造过程中EC的生成规律与关键影响因素，为后续深入研究EC产生机理、精准识别关键控制点，以及有针对性地改进降EC生产工艺、提升产品安全性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

EC、D5-EC、尿素、水中氰标准溶液、对二甲氨基苯甲醛（4-dimethylaminobenzaldehyde，DMAB）：上海安谱实验科技股份有限公司；盐酸、乙酸锌、冰乙酸、无水乙醇、氢氧化钠、吡唑啉酮、氯胺T、三氯乙酸、酚酞（指示剂）：国药集团化学试剂有限公司；无水磷酸二氢钾、无水磷酸氢二钾：西陇化工股份有限公司；异烟酸：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；亚铁氰化钾：上海凌峰化学试剂有限公司；活性炭：天津光复科技发展有限公司；茚三酮溶液、氨基酸混合标准溶液（H型）：日本富士胶片和光纯药株式会社；酿酒原辅料、酒曲、酒醅样品：安徽某芝麻香型白酒生产厂家。

1.2 仪器与设备

气相色谱-质谱联用仪（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）：7890B-5977A型，美国安捷伦科技有限公司；双光束紫外-可见分光光度计：TU-1901型，北京普析通用仪器有限公司；超纯水机：Aquapro 2S型，重庆颐洋企业发展有限公司；台式高速离心机：TG16-WS型，湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；高速氨基酸分析仪：LA8080型，日立科学仪器（北京）有限公司。

1.3 方法

1.3.1 酒醅中EC的测定

酒醅中EC质量分数的测定采用GC-MS进行测定[27]。

1）样品前处理：准确称取酒醅样品20 g于150 mL三角瓶中，加入100 mL体积分数60%的乙醇，密封混匀，静置12 h后超声，再以10 000 r/min离心10 min，取5 mL上清液于10 mL刻度试管中，加入25 μL 50 mg/L的D5-EC作为内标，涡旋混匀后待测。

2）气相色谱条件：进样口温度240 ℃，进样量0.5 μL，载气为氦气，流量为1.0 mL/min，不分流进样。60 ℃保持2 min，以5 ℃/min的速度升温至180 ℃，再以10 ℃/min的速度升温至220 ℃，保持15 min。

3）质谱条件：传输线温度230 ℃，离子源温度230 ℃，离子源为EI，电子能量为70 eV，SIM模式，选择*m*/*z* 62为EC的定量离子，选择*m*/*z* 64为氘代内标D5-EC的定量离子。

1.3.2 酒醅中尿素的测定

参照GB/T 36859—2018《饲料中尿素含量的测定》测定酒醅中尿素质量分数[28]。具体步骤为：用水提取酒醅中的尿素，经活性炭脱色后，加入乙酸锌和亚铁氰化钾使蛋白质沉淀，随后用中速滤纸过滤，取滤液与DMAB反应，生成特征黄色复合物，在420 nm波长下测定该复合物的吸光度。通过建立吸光度与尿素质量分数之间的线性回归方程，即可计算出酒醅中的尿素质量分数。

1.3.3 酒醅中氰化物的测定

参照GB 5009.36—2023《食品安全国家标准食品中氰化物的测定》的分光光度法测定酒醅中氰化物质量分数[29]，样品前处理流程与木薯粉中氰化物的测定方法一致。

1.3.4 酒醅中氨基酸和氨的测定

1）样品前处理：准确称取5 g酒醅样品于150 mL三角瓶中，加入45 mL的5 g/100 mL三氯乙酸溶液浸泡过夜，混匀后超声15 min，10 000 r/min离心15 min，取上清液过0.22 μm滤膜后转移至进样瓶，作为样品待测液。

2）色谱条件：蛋白质水解分析填充柱规格为4.6 mm×60 mm（填料为2622PH），脱氨柱规格为4.6 mm×40 mm（填料为#2650L）；检测波长分别为570 nm和440 nm，进样体积20 μL，流量0.4 mL/min，柱温57 ℃。

1.4 酒醅取样方案

芝麻香型白酒发酵分为堆积发酵和窖池发酵2个阶段。

堆积发酵是将酒醅收拢成以横断面为梯形的堆状形式，置于酿造车间地面进行开放式发酵，发酵时间2~4 d。选取堆积开始、翻堆混合、堆积结束3个时间节点，对顶层、表层、中间点、中心点、底层5个空间位点进行取样，每个空间位点取样量为200 g。堆积阶段糟醅取样时间与空间位点分布见图1（a）。

窖池发酵阶段，依据酒醅在窖池内的分布位置，将其划分为面糟、中糟和底糟，面糟和底糟厚度约20 cm，中糟厚度约100 cm。鉴于面糟与底糟

酒醅占比小、厚度薄，且不是芝麻香型白酒的主要产酒区域，因此在发酵过程中主要以中糟酒醅为试验对象，发酵结束时则分别于面糟、中糟、底糟3个空间位点取样。窖池发酵阶段的取样时间节点设定为发酵0、5、10、20、30 d及出窖（45 d），每个取样点的取样量均为200 g，取样时间与空间位点分布见图1（b）。

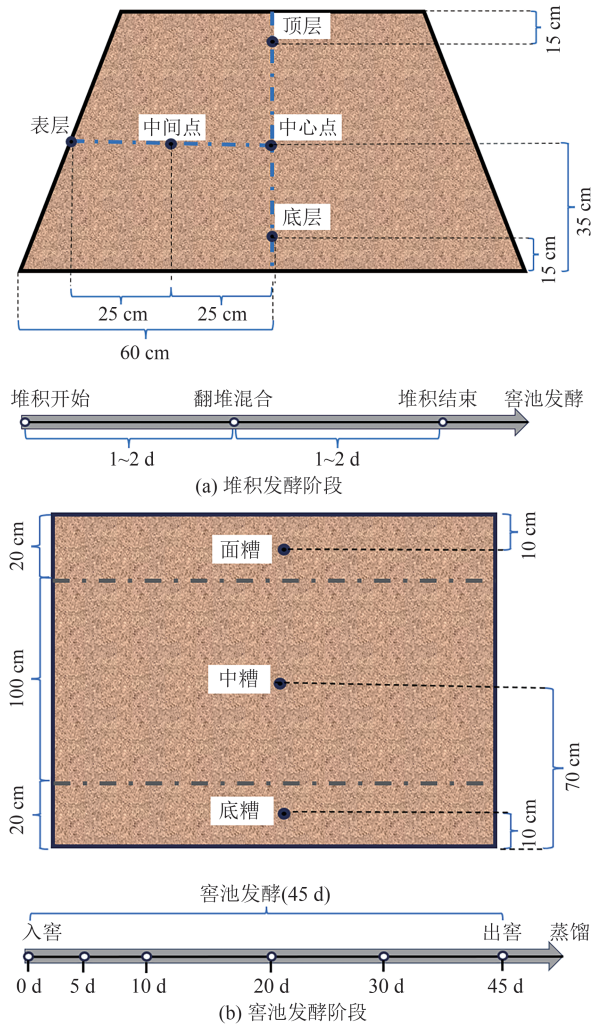

图1　堆积发酵阶段及窖池发酵阶段酒醅取样位置

Fig. 1　Sampling locations of fermented grains during the stacking fermentation stage and pit fermentation stage

1.5　数据处理

用Excel 2022对数据进行整理统计，采用Origin 2022分析作图。采用SPSS Statistics 27分析不同指标间皮尔逊相关性（双尾），R>0.7表示变量之间相关性紧密，±表示正负相关性；P<0.05表示变量间差异显著，P<0.01表示变量间差异极显著。

2　结果与讨论

2.1　配料阶段EC前体物质分布解析

针对芝麻香型白酒酿造过程中EC的主要前体物质——尿素与氰化物，作者重点分析了酿造用的5类核心原辅料（大米、糯米、高粱、小麦、麸皮）以及酿造中涉及的5种酒曲（中温曲、高温曲、白曲、酵母曲、细菌曲）中尿素与氰化物质量分数的差异，结果见图2。

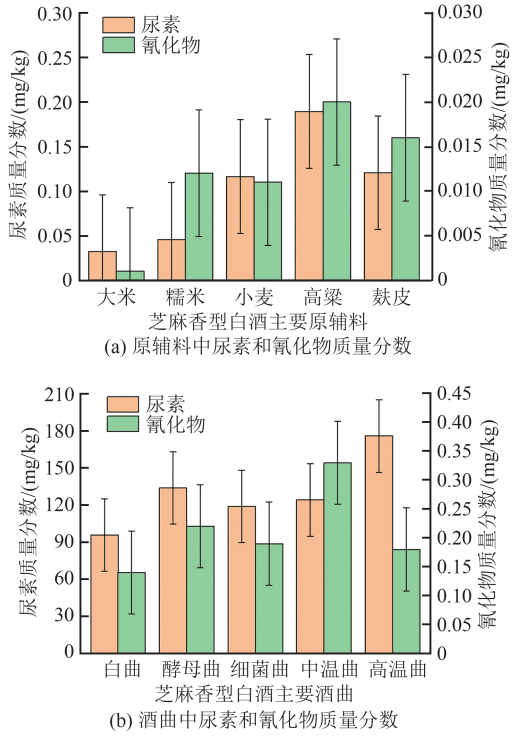

图2　芝麻香型白酒主要原辅料及酒曲中尿素和氰化物质量分数

Fig. 2　Mass fractions of urea and cyanide in main raw and auxiliary materials and qu of Zhimaxiangxing Baijiu

原辅料中尿素与氰化物质量分数均处于极低水平，且不同种类间存在显著差异。高粱中尿素质量分数最高，为0.19 mg/kg，氰化物质量分数低于0.02 mg/kg。由此推断，原辅料对酿造阶段产生EC的贡献极低。

与原辅料相比，5种酒曲样品中尿素、氰化物质量分数显著偏高，其尿素质量分数平均值达129.58 mg/kg，氰化物质量分数平均值为0.21 mg/kg。高温曲尿素质量分数高达175.69 mg/kg；中温曲氰化物质量分数为0.33 mg/kg；白曲中尿素、氰化物质量分数相对较低，但也分别达到95.67、0.14 mg/kg，

均极显著高于原辅料（P<0.01）。结果表明，酒曲是芝麻香型白酒配料阶段 EC 前体物质的主要来源。

综上所述，芝麻香型白酒酿造体系中，由原辅料带入的 EC 前体物质极少，而微生物参与的制曲过程实现了 EC 主要前体物质的初步积累，既是 EC 生成的物质基础，也是工艺全流程中调控 EC 水平的首要调控点。

2.2 堆积发酵阶段 EC 及其前体物质分布解析

高温堆积是芝麻香型白酒生产工艺中极其重要的环节，属于开放式发酵，可自然富集环境中的酵母菌和细菌，进而形成相对稳定的菌群结构[20,30]。该阶段酒醅中的EC、尿素和氰化物质量分数分布见图 3。在整个堆积发酵过程中，EC 质量分数由 83.45 mg/kg 增至 85.48 mg/kg，增长缓慢；尿素从 82.27 mg/kg 增至 126.83 mg/kg，增长了 44.56 mg/kg，增幅显著；氰化物质量分数则下降了 0.70 mg/kg。上述指标变化特征与高温堆积阶段微生物代谢特性及发酵微环境密切相关。在开放式堆积发酵过程中，体系富集了一些产蛋白酶活性较高的微生物，可有效降解酒醅中的蛋白质，生成氨基酸，并进一步通过脱氨作用转化为氨态氮，为尿素的生物合成提供充足底物，从而驱动尿素质量分数显著上升[31]。EC 质量分数在此阶段的增长速率变缓，推测其原因有 2 方面：一是由于堆积阶段乙醇浓度较低，未达到 EC 合成反应高效进行所需的条件；二是该阶段氰化物质量分数持续下降，减少了其与尿素协同生成 EC 的反应底物供给。而氰化物质量分数的降低，一方面可能与堆积过程中微生物的降解作用有关，部分功能菌群可将氰化物作为氮源或碳源代谢利用[32]；另一方面则可能源于人工翻堆、拌料等操作，使具有挥发性的氢氰酸发生物理性散失，且极少量的氰化物可能也参与了 EC 的生成，最终导致其含量下降。

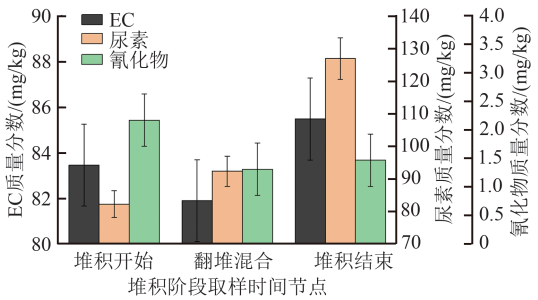

图 3 堆积发酵阶段酒醅中 EC 及其前体物质的质量分数分布

Fig. 3 Mass fraction distribution of EC and its precursors in the fermented grains during the stacking fermentation stage

综上所述，高温堆积阶段虽然不是 EC 大量合成的关键时期，但该阶段通过富集功能菌群、积累尿素等过程，为后续窖池发酵阶段 EC 的生成奠定了物质与菌群基础。同时，氰化物质量分数的下降表明其在酿造体系中可被降解，为后续 EC 调控工艺的设计提供了关键数据支撑。

为明确堆积酒醅 EC 及其前体物质空间分布规律，按 1.4 节所述方法于堆积结束前对各取样点进行质量分数测定与差异分析。如图 4 所示，三者质量分数差异显著。堆积中间点部位的尿素质量分数最高，达 154.2 mg/kg，而表层部位的最低，仅为 76.7 mg/kg；氰化物质量分数在堆积中心点部位达到峰值（6.65 mg/kg），是表层（0.26 mg/kg）的 25.58 倍；EC 质量分数分布与尿素一致，中间点部位最高（28.3 mg/kg），显著高于其他部位（P<0.05）。

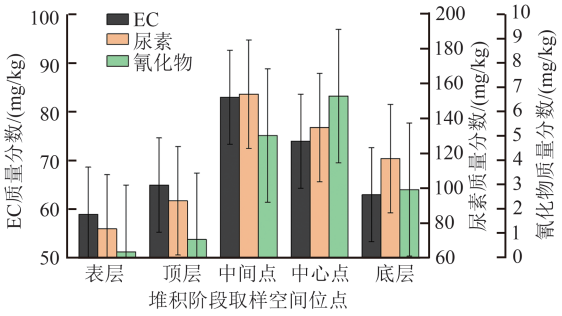

图 4 堆积发酵阶段不同空间部位酒醅中 EC 及其前体物质质量分数分布

Fig. 4 Mass fraction distribution of EC and its precursors in fermented grains at different spatial locations during the stacking fermentation stage

皮尔逊相关性分析结果见表 1。堆积阶段酒醅中 EC 质量分数与尿素质量分数显著相关（P<0.05）；EC 质量分数与氰化物质量分数相关系数（R）>0.7，但相关性不显著（P>0.05）。结果表明，在堆积发酵阶段，尿素质量分数与 EC 质量分数呈显著正相关，说明尿素是该阶段调控 EC 质量分数变化的重要前体物质。此外，酒醅酸度与尿素质量分数和氰化物质量分数均呈正相关，说明可通过调控酒醅酸度间接调控 EC 的空间分布。该阶段酒醅中氨基酸总量与各指标无显著相关性（P>0.05），说明在堆

表1　堆积发酵阶段酒醅中EC等指标的相关性分析

Table 1　Correlation analysis of EC and other indicators in the fermented grains during the stacking fermentation stage

	EC质量分数	水分质量分数	酸度	淀粉质量分数	尿素质量分数	氰化物质量分数	氨基酸总量	精氨酸水平	氨水平	乙醇质量分数
EC质量分数		0.963	0.485	0.872	0.027	0.106	0.431	0.230	0.450	0.643
水分质量分数	0.029		0.085	0.039	0.568	0.719	0.206	0.386	0.994	0.465
酸度	0.417	0.825		0.169	0.165	0.171	0.368	0.610	0.461	0.989
淀粉质量分数	0.101	−0.897	−0.722		0.788	0.753	0.270	0.494	0.675	0.261
尿素质量分数	0.919	0.346	0.726	−0.167		0.039	0.386	0.607	0.421	0.614
氰化物质量分数	0.797	0.222	0.720	−0.195	0.897		0.697	0.684	0.113	0.498
氨基酸总量	0.464	0.680	0.521	−0.615	0.505	0.240		0.681	0.976	0.252
精氨酸水平	0.655	−0.504	−0.311	0.409	0.314	0.251	0.253		0.636	0.943
氨水平	0.448	0.005	0.438	−0.258	0.473	0.789	0.019	0.290		0.804
乙醇质量分数	−0.285	0.435	−0.008	−0.624	−0.308	−0.405	0.633	0.045	−0.155	

注：表格左下三角形区域为相关性系数（R）；右上三角形区域为显著性系数（P）。

积发酵阶段，酒醅中的氨基酸总量对EC生成的影响不明显。该结果精准定位了堆积阶段EC前体物质富集酒糟空间分布的核心区域，为针对性优化堆积工艺提供了数据支撑。

2.3　发酵阶段EC及其前体物质分布解析

如图5所示，尿素质量分数整体呈上升趋势，并伴有局部回落，发酵45 d时，尿素质量分数达173.80 mg/kg，较发酵初始增加了86.97 mg/kg；氰化物质量分数呈波动变化，发酵30 d达最大值（2.56 mg/kg）；EC的质量分数呈上升趋势，0~20 d缓慢增长，20~30 d增长速率显著提升，45 d达最大值（152.04 mg/kg），较初始值增加67.77 mg/kg。由此可知，窖池发酵的第20~30天为EC快速合成的关键时期。

对窖池发酵阶段酒醅各指标进行相关性分析，见表2。EC质量分数与酒醅酸度、尿素质量分数、氰化物质量分数、氨基酸总量、精氨酸水平、氨水平及乙醇质量分数均呈强正相关，且EC质量分数与尿素质量分数、精氨酸水平、氨水平在95%的置信度下显著相关（P<0.05）；尿素质量分数与水分质量分数、酸度、精氨酸水平、氨水平、乙醇质量分数等呈显著正相关（P<0.05）；氰化物质量分数与氨基酸总量、精氨酸水平、氨水平等呈正相关。结果表明，窖池发酵阶段EC的生成是尿素、氰化物及含氮物质代谢协同作用的结果。尿素作为核心前体物质，其阶段性上升直接促进了EC积累；精氨酸、氨等含氮组分可通过参与尿素合成代谢，调控EC前体物质的供给水平，进而间接影响EC的生成效率；氰化物质量分数的波动则说明其代谢受到发酵环境多重因素的影响。

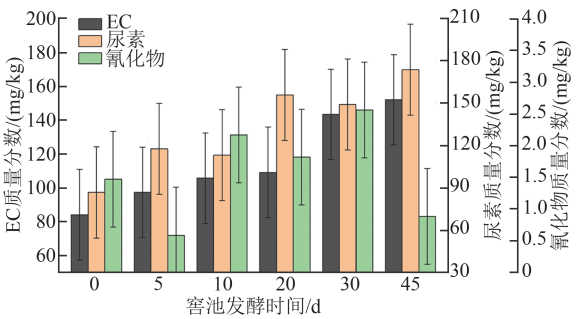

图5　窖池发酵阶段酒醅中EC及其前体物质质量分数分布

Fig. 5　Mass fraction distribution of EC and its precursors in the fermented grains during the pit fermentation stage

基于此，可针对性制定窖池发酵阶段的EC水平调控策略：在20~30 d关键时期，通过调控酸度、添加尿素降解菌剂降低前体物质浓度；优化发酵条件抑制含氮物质向EC前体物质转化，实现EC合成的精准干预。

2.4　发酵结束EC及其前体物质分布解析

依据酒醅在窖池内的分布位置，将窖内酒醅分为面糟、中糟和底糟。芝麻香型白酒面糟、中糟、底糟在生产工艺上有显著区别，这直接决定了三者在窖池发酵阶段的微环境与物质代谢特征。面糟是以蒸馏后的上一轮次发酵的中糟作为主要基质，添加少量原辅料和酒曲配制而成，位于窖池的最上

表 2 窖池发酵阶段酒醅中 EC 等指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of EC and other indicators in the fermented grains during the pit fermentation stage

	EC 质量分数	水分 质量分数	酸度	淀粉 质量分数	尿素 质量分数	氰化物 质量分数	氨基酸 总量	精氨酸 水平	氨水平	乙醇 质量分数
EC 质量分数		0.408	0.175	0.079	0.031	0.183	0.057	0.022	0.045	0.169
水分质量分数	0.485		0.092	0.054	0.034	0.656	0.216	0.191	0.088	0.052
酸度	0.715	0.816		0.085	0.018	0.350	0.030	0.070	0.056	0.199
淀粉质量分数	−0.835	−0.872	−0.826		0.012	0.393	0.085	0.033	0.009	0.006
尿素质量分数	0.866	0.907	0.938	−0.954		0.479	0.070	0.025	0.026	0.046
氰化物质量分数	0.706	0.273	0.537	−0.498	0.422		0.089	0.274	0.185	0.558
氨基酸总量	0.867	0.670	0.914	−0.825	0.847	0.820		0.003	0.020	0.214
精氨酸水平	0.888	0.809	0.930	−0.967	0.975	0.726	0.997		0.031	0.098
氨水平	0.871	0.821	0.869	0.963	0.922	0.704	0.934	0.969		0.044
乙醇质量分数	0.722	0.876	0.689	0.969	0.885	0.355	0.672	0.902	0.888	

注：表格左下三角形区域为相关性系数（R）；右上三角形区域为显著性系数（P）。

层，通常不作为主要产酒糟醅，厚度约 20 cm；中糟是位于窖池中层的核心酒醅，精准搭配新鲜高粱、大曲、麸曲等，远离窖底水和窖顶空气，是白酒发酵的核心区域，厚度约 100 cm；底糟位于窖池的最下层，同样以上一轮次发酵的中糟为基础，配以少量高粱和大曲等原辅料，该区域低氧、高湿，且酸度偏高，酿出的基酒品质欠佳，厚度约 20 cm[6-7]。

在芝麻香型白酒发酵过程中，面糟、中糟、底糟在工艺条件与发酵微环境上存在显著的垂直差异，直接导致不同层次酒醅中 EC 及其前体物质的空间分布呈现“中糟>底糟>面糟”的特征，见图 6。结合上述 EC 质量分数与尿素、氰化物质量分数呈正相关的结论，推断在芝麻香型白酒窖池发酵阶段，中糟是 EC 生成的主要区域，底糟次之，面糟的 EC 生成量最低。该结果为发酵后段的糟醅分层管控提供了依据，可对中糟强化降

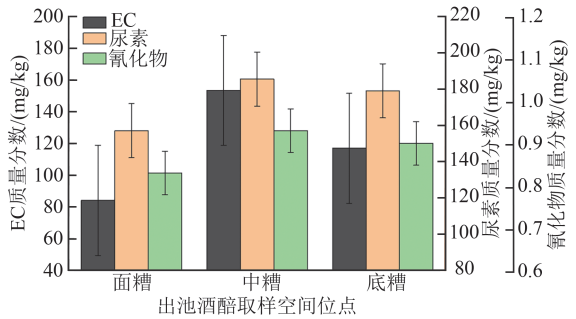

图 6 出池面糟、中糟和底糟中 EC 及其前体物质质量分数分布

Fig. 6 Mass fraction distribution of EC and its precursors in the surface, middle, and bottom of the effluent tank

EC 处理，同时优化底糟水分、酸度条件，以减少 EC 前体物质积累，实现不同层次酒醅的精准调控。

3 结论

本研究聚焦于芝麻香型白酒酿造全流程，对其中的氨基甲酸乙酯（EC）及其前体物质的分布特征、变化规律与内在机制进行了系统解析与探讨，初步明确了关键调控节点与核心路径，为工业化生产中靶向降解 EC 提供了理论依据。研究发现，原辅料中尿素与氰化物处于痕量水平，对 EC 生成的贡献低，而酒曲是配料阶段 EC 前体物质的主要来源，因此可将 EC 调控移至制曲环节，从源头减少 EC 前体物质初始积累。全流程关联分析结果表明，EC 质量分数与尿素、氰化物质量分数始终呈强正相关，其时空分布受两者共同调控。堆积发酵阶段，EC 及其前体物质积累缓慢，堆积中间点及中心点部位为核心富集区域；窖池发酵阶段是 EC 的主要增长期，20~30 d 为快速合成期，中糟为核心生成区，发酵结束时 EC 空间分布均呈“中糟>底糟>面糟”的特点，该研究结果可为分层处理与工艺优化提供理论依据。

本研究揭示了芝麻香型白酒酿造过程中 EC 及其前体物质的主要来源及时空分布规律，明确了各环节的核心调控靶点与潜在的可操作路径。此外，本研究也存在检测方法灵敏度有限、微生物作用机制研究尚不深入等不足，后续将开发高灵敏检测技术，结合多组学微生物机制，构建 EC 生

成预测模型，进一步优化调控方案，实现芝麻香型白酒酿造过程中EC的精准、高效控制，兼顾产品安全性与风味稳定性。

参考文献

[1] 郝丽刚，胡建祥，胡景辉，等．白酒中氨基甲酸乙酯研究进展概述[J]．中国酿造，2024，43(9)：14-20．
Hao L G，Hu J X，Hu J H，et al．Overview of research progress of ethyl carbamate in Baijiu[J]．China Brewing，2024，43(9)：14-20．(in Chinese)

[2] Cheng F，Mei J，Wang J S，et al．Screening and application of degraded ethyl carbamate yeast in the brewing microecology of Zhimaxiangxing Baijiu [J]．Systems Microbiology and Biomanufacturing，2025，5(4)：1491-1502．

[3] JECFA Joint FAO/WHO Food Standards Programme [R]．Beijing：Codex Committee on Contaminants in Foods，2007：16-20．

[4] Park S R，Ha S D，Yoon J H，et al．Exposure to ethyl carbamate in alcohol-drinking and nondrinking adults and its reduction by simple charcoal filtration [J]．Food Control，2009，20(10)：946-952．

[5] 卓俊纳，赵金松，吴卫宇，等．白酒相关安全指标的研究进展[J]．酿酒科技，2021(9)：58-64．
Zhuo J N，Zhao J S，Wu W Y，et al．Research progress in safety indicators of Baijiu[J]．Liquor-Making Science & Technology，2021(9)：58-64．(in Chinese)

[6] 辛茜，贾少杰，郑欣欣，等．白酒中氨基甲酸乙酯的研究进展[J]．酿酒科技，2022(1)：42-46．
Xin X，Jia S J，Zheng X X，et al．Research progress in ethyl carbamate in Baijiu[J]．Liquor-Making Science & Technology，2022(1)：42-46．(in Chinese)

[7] 李拥军，陈雯，皮小弟，等．芝麻香型与浓香型白酒固态发酵过程中氨基甲酸乙酯的形成研究[J]．现代食品科技，2021，37(8)：67-74．
Li Y J，Chen W，Pi X D，et al．Ethyl carbamate formation during solid-state fermentation of sesame-flavored and strongly flavored Baijiu[J]．Modern Food Science and Technology，2021，37(8)：67-74．(in Chinese)

[8] 尹子瑞，赵鑫锐，堵国成．酱香型白酒酿造过程中氨基甲酸乙酯前体来源解析[J]．食品与发酵工业，2025，51(4)：170-176．
Yin Z R，Zhao X R，Du G C．Source analysis of ethyl carbamate precursors during sauce-flavor liquor production [J]．Food and Fermentation Industries，2025，51(4)：170-176．(in Chinese)

[9] 狄宇航．白酒发酵和蒸馏过程中氨基甲酸乙酯形成的机制解析和控制策略[D]．无锡：江南大学，2023：2-4．

[10] 贾红婕．白酒生产过程中氨基甲酸乙酯的形成机理及检测策略研究[J]．中外食品工业，2024(22)：48-50．
Jia H J．Study on the formation mechanism and detection strategy of ethyl carbamate in liquor production [J]．Global Food Industry，2024(22)：48-50．(in Chinese)

[11] 吴莉，沈永祥，文尚瑜，等．酱香型白酒氨基甲酸乙酯及其前体物质主要来源迁移规律研究[J]．酿酒科技，2024(5)：134-138．
Wu L，Shen Y X，Wen S Y，et al．Main sources and migration rules of ethyl carbamate and its precursors in Jiangxiang Baijiu [J]．Liquor-Making Science & Technology，2024(5)：134-138．(in Chinese)

[12] 丁霞．酒醅中氨基甲酸乙酯及其前体的控制与消除[D]．无锡：江南大学，2018：1-2．

[13] 李加友，陆筑凤，吴丹，等．发酵食品中氨基甲酸乙酯的形成与控制[J]．食品科技，2013，38(6)：310-312．
Li J Y，Lu Z F，Wu D，et al．Formation and control of ethyl carbamate in fermented foods [J]．Science and Technology，2013，38(6)：310-312．

[14] Di Y H，Li J H，Chen J，et al．Simulation and control of the formation of ethyl carbamate during the fermentation and distillation processes of Chinese Baijiu[J]．Foods，2023，12(4)：821．

[15] 尤小龙，程平言，胡峰，等．白酒中氨基甲酸乙酯形成机制、检测技术及控制研究进展[J]．酿酒科技，2022(12)：103-109．
You X L，Cheng P Y，Hu F，et al．Research progress in the formation mechanism，detection technology and control of ethyl carbamate in Baijiu[J]．Liquor-Making Science & Technology，2022(12)：103-109．(in Chinese)

[16] 路瑞，马龙，唐云，等．白酒中氨基甲酸乙酯形成途径及影响因素的研究进展[J]．酿酒科技，2023(12)：101-109．
Lu R，Ma L，Tang Y，et al．Research progress in formation pathways and influencing factors of ethyl carbamate in Baijiu [J]．Liquor-Making Science & Technology，2023(12)：101-109．(in Chinese)

[17] 陈艳，刘冲，张国宇，等．UPLC-MS/MS法同时测定白酒中氨基甲酸甲酯和氨基甲酸乙酯[J]．酿酒科技，2023(9)：47-52．
Chen Y，Liu C，Zhang G Y，et al．Simultaneous determination of methyl carbamate and ethyl carbamate in Baijiu by UPLC-MS/MS[J]．Liquor-Making Science & Technology，2023(9)：47-52．(in Chinese)

[18] 范文来，王栋．近10年我国传统饮料酒白酒和黄酒品质安全研究现状与展望[J]．食品安全质量检测学报，2019，10(15)：4811-4829．
Fan W L，Wang D．Current practice and future trends of alcoholic beverages safety of China traditional Baijiu and Huangjiu in recent decades[J]．Journal of Food Safety and Quality，2019，10(15)：4811-4829．(in Chinese)

[19] 张温清．芝麻香型白酒四甲基吡嗪形成及其高产TTMP酿造工艺研究[D]．合肥：合肥工业大学，2020：7-9．

[20] 高传强．芝麻香型白酒的典型工艺特征[J]．酿酒，2022，49(2)：3-15．
Gao C Q．Typical technological characteristics of sesame flavor Baijiu：a review[J]．Liquor Making，2022，49(2)：3-15．(in Chinese)

[21] Wang Y L，Liu Y X，Huang X H，et al．A review on mechanistic overview on the formation of toxic substances during the traditional fermented food processing[J]．Food Reviews International，2023，39(3)：1275-1292．

[22] Gowd V，Su H M，Karlovsky P，et al．Ethyl carbamate：an emerging food and environmental toxicant[J]．Food Chemistry，2018，248：312-321．

[23] Bruno S N F，Vaitsman D S，Kunigami C N，et al．Influence of the distillation processes from Rio de Janeiro in the ethyl carbamate formation in Brazilian sugar cane spirits[J]．Food Chemistry，2007，104(4)：1345-1352．

[24] Weber J V，Sharypov V I．Ethyl carbamate in foods and beverages：a review[J]．Environmental Chemistry Letters，2009，7(3)：233-247．

[25] 沈婷．浓香型白酒中氨基甲酸乙酯前体氰化物产生规律及其控制研究[D]．无锡：江南大学，2021：2-4．

[26] Li G H，Zhong Q D，Wang D B，et al．Determination and formation of ethyl carbamate in Chinese spirits[J]．Food Control，2015，56：169-176．

[27] 张温清，司冠儒，刘凤茹，等．小窖芝麻香型白酒蒸馏过程中氨基甲酸乙酯的研究[J]．酿酒科技，2016(1)：53-55，59．
Zhang W Q，Si G R，Liu F R，et al．Ethyl carbamate in Zhimaxiang Baijiu in small pits during distillation[J]．Liquor-Making Science & Technology，2016(1)：53-55，59．(in Chinese)

[28] GB/T 36859—2018 饲料中尿素含量的测定[S]．

[29] GB 5009.36—2023 食品安全国家标准 食品中氰化物的测定[S]．

[30] 罗小芹，范奇高．酱香型白酒高温堆积工艺的研究进展[J]．酿酒科技，2025(5)：92-95．
Luo X Q，Fan Q G．Research progress in high-temperature stacking process of Jiangxiang Baijiu[J]．Liquor-Making Science & Technology，2025(5)：92-95．(in Chinese)

[31] Wu Q，Lin J C，Cui K X，et al．Effect of microbial interaction on urea metabolism in Chinese liquor fermentation [J]．Journal of Agricultural and Food Chemistry，2017，65(50)：11133-11139．

[32] Shen T，Wu Q，Xu Y．Biodegradation of cyanide with *Saccharomy cescerevisiae* in Baijiu fermentation [J]．Food Control，2021，127：108107．