DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251009004
引用格式: 仓义鹏, 姜雪, 王小东, 等. 白酒中氨基甲酸乙酯形成机制及减控策略研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 1–9.
CANG YP, JING X, WANG XD, *et al*. Research progress on the formation mechanism and mitigation strategies of ethyl carbamate in Baijiu [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 1–9. (in Chinese with English abstract).

白酒中氨基甲酸乙酯形成机制及减控策略研究进展

仓义鹏, 姜　雪, 王小东*, 黄永军, 范明豹

(宿迁市产品质量监督检验所, 宿迁　223800)

摘　要: 氨基甲酸乙酯(ethyl carbamate, EC)是一种具有遗传毒性和致癌性的化合物, 也是发酵食品和酒精饮料的副产物。酒精饮料是人类摄入 EC 的主要途径, 因此, 许多国家都为酒精饮料制定了 EC 限值。有研究表明, 国内不同香型白酒的 EC 平均含量约为 44.48~214.00 μg/L, 而国际上包括加拿大、日本等多个国家将白酒中 EC 的最高限量设为 150 μg/L。中国白酒作为一种历史悠久的特色蒸馏酒, 凭借其独特的酒体色泽、香气和口感, 在国内消费市场占据着重要地位。因此, 控制中国白酒中的 EC 具有重要意义。中国应尽快制定白酒中 EC 的强制性标准和指导方针或控制措施, 以促进中国白酒行业的健康良性发展, 提升该行业的竞争力。本文概述了原料阶段、发酵阶段、蒸馏阶段以及储存阶段 EC 形成的途径, 并总结了白酒生产全过程中 EC 减控策略, 为白酒生产企业在生产过程中 EC 的控制提供理论指导, 同时阐述了 EC 的毒理学特征以及 EC 毒性缓解方面的最新研究进展, 为降低 EC 对人体的毒性研究提供新的思路。

关键词: 白酒; 氨基甲酸乙酯; 形成机制; 减控策略

Research progress on the formation mechanism and mitigation strategies of ethyl carbamate in Baijiu

CANG Yi-Peng, JING Xue, WANG Xiao-Dong*, HUANG Yong-Jun, FAN Ming-Bao

(*Suqian Product Quality Supervision and Testing Institute*, *Suqian* 223800, *China*)

ABSTRACT: Ethyl carbamate (EC) is a genotoxic and carcinogenic compound, as well as a byproduct of fermented foods and alcoholic beverages. Alcoholic beverages represent the primary pathway for human exposure to EC, which is why many countries have established regulatory limits for EC in these products. Research indicates that the average EC content in various aroma types of Chinese Baijiu ranges from approximately 44.48 to 214.00 μg/L. In contrast, several countries internationally, including Canada, Japan and Brazil, have set the maximum permissible limit for EC in distilled spirits at 150 μg/L. Chinese Baijiu, as a distinctive distilled spirit with a long history, holds a significant

收稿日期: 2025-10-09
基金项目: 江苏省市场监督管理局科技计划项目(KJ2024023); 江苏省市场监管技术创新中心(酒类食品)项目
第一作者: 仓义鹏(1974—), 男, 硕士, 研究员级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: yipengcang@163.com
***通信作者:** 王小东(1993—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 15720605797@163.com

position in the domestic consumer market due to its unique color, aroma and taste. Therefore, controlling EC levels in Chinese Baijiu is of great importance. China should promptly establish mandatory standards, guidelines or control measures for EC in Baijiu to promote the healthy and sustainable development of the Baijiu industry and enhance its competitiveness. This article outlined the pathways of EC formation during the raw material, fermentation, distillation and storage stages. It summarized mitigation strategies EC throughout the entire Baijiu production process, providing theoretical guidance for the control of EC in the production process of Baijiu manufacturing enterprises. Additionally, it reviewed the toxicological characteristics of EC and recent advancements in research on mitigating its toxicity, offering new perspectives for studies aimed at reducing the harmful effects of EC on human health.

KEY WORDS: Baijiu; ethyl carbamate; formation mechanism; mitigation strategies

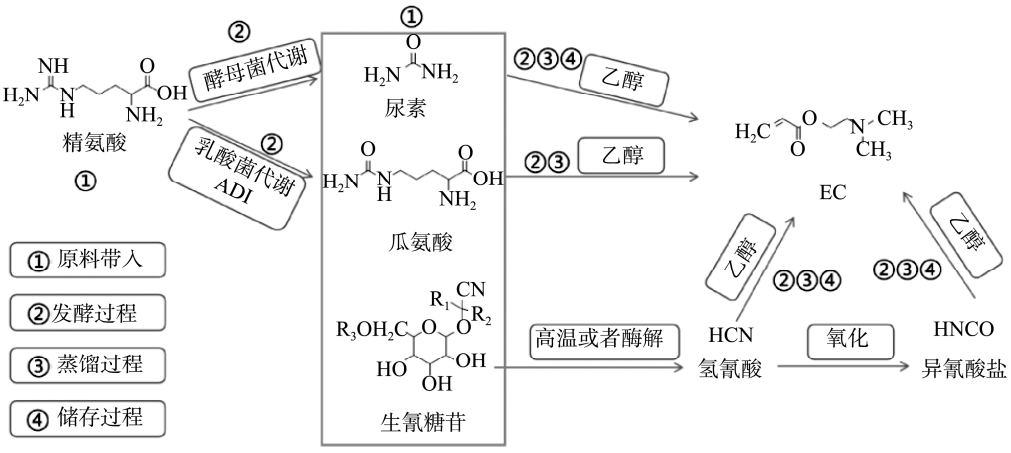
0 引 言

氨基甲酸乙酯(ethyl carbamate, EC)作为发酵类食品和酒精饮品的常见污染物, 已被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)归入2A类致癌物之列。多项毒理学实验结果显示, EC 不仅存在遗传毒性特点, 致癌性与致突变性也很明显。白酒作为中国一种独特蒸馏酒, 消费群体广泛。通过传统工艺酿造白酒时, 会产生副产物 EC。近些年, 在白酒消费量不断提高的同时, 消费者经白酒摄入 EC 的健康风险随之逐渐增大。因此, 行业内开始高度重视白酒相关的 EC 污染控制问题。对此, 国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)等诸多国际组织与国家地区提出了酒类产品中 EC 的残留限值标准。白酒酿造过程中的诸多环节都与 EC 含量存在紧密联系, 包括原料的选择、发酵、蒸馏处理等。因此, 有必要针对白酒中 EC 含量开展全流程管控。本文系统梳理了白酒酿造过程中原料、发酵、蒸馏与储存各阶段 EC 的形成途径, 总结了涵盖生产全流程的 EC 控制策略。当人体摄入白酒后, EC 也会进入到机体内部, 从而伤及人体细胞与器官等。本综述阐述 EC 毒性机制, 并探讨天然产物缓解 EC 毒性的最新研究进展, 为降低 EC 毒性相关研究给予新参考。

1 白酒中氨基甲酸乙酯形成机制

酒精饮料中发现的 EC 前体物质主要有 5 种, 包括尿素、瓜氨酸、氰化物、氨基甲酰磷酸酯和碳酸二乙酯, 其中尿素、瓜氨酸和氰化物是白酒酿造中 EC 产生最主要的前体物质[1]。如图 1 所示, 总结了这些前体物质在白酒生产过程中生成 EC 的途径机制。

白酒酿造过程中使用的原辅料复杂多样, 包括各种原粮和大曲, 这些原料自身带有参与 EC 形成的反应前体化合物, 比如尿素、生氰糖苷和精氨酸等化合物[2]。如高粱是一种富含生氰糖苷的作物, 原料中的生氰糖苷通过酶或酸热分解作用生成 EC 前体物质氰化物。研究发现原料中的精氨酸可以被酵母和乳酸菌代谢利用产生尿素和瓜氨酸。高粱、谷壳以及糖化发酵剂大曲作为酿酒必不可少的



注: 精氨酸脱亚氨基酶途径(arginine deiminase pathway, ADI)。

图 1 白酒生产过程中 EC 形成途径机制

Fig.1 Mechanism of EC formation pathway during Baijiu production process

原辅料, 体内均含有 EC 反应前体物质, 但在含量方面存在差异, 研究发现在酱香型白酒原辅料带入的 EC 前体中, 大曲的贡献较高[3]。这些带入的前体物都可以与乙醇发生反应生成 EC, 所以原辅料带入的 EC 前体物质是酿酒过程形成 EC 不可忽视的因素[4]。

发酵阶段的 EC 主要来源于尿素与乙醇的反应。尿素主要来自高粱和酵母发酵过程中精氨酸代谢[5]。发酵后的大曲带入大量尿素后, 微生物可以利用尿素作为氮源, 同时也会有酵母菌等微生物代谢精氨酸生成尿素[3]。发酵过程中不断积累的尿素与乙醇在酸性条件下缓慢反应并积累 EC, 该反应速率随发酵温度的升高而逐渐加快, 研究表明, 酒精饮料在发酵过程中 EC 与尿素浓度的变化基本同步[6–8]。尽管尿素是白酒发酵中 EC 形成的主要前体, 但瓜氨酸途径也不容忽视。高粱是浓香型白酒的主要原料成分, 其瓜氨酸的含量几乎是其他酿造原料(大米、糯米、玉米和小麦)的两倍[9]。另一方面, 在发酵后期, 乳酸菌降解发酵谷物中剩余的精氨酸, 产生瓜氨酸。乳酸菌通过精氨酸脱亚酶途径对酿造原料中的精氨酸代谢生成瓜氨酸, 该过程称为 ADI[10], 在适宜的条件下瓜氨酸通过该途径转化为鸟氨酸、氨和二氧化碳, 同时伴随着腺苷三磷酸的生成。然而, 当发酵环境发生变化或面临压力时, 瓜氨酸的后续代谢过程会受到抑制, 导致其在细胞内积累, 促使瓜氨酸向细胞外分泌, 并与酒醅中的乙醇发生反应生成 EC[11–12]。植物原料中氰苷在受热分解或微生物代谢中的酶促作用下, 可转化为氰化物。这些氰化物以多种化学形式存在, 包括氰酸、氢氰酸以及其他含氰基的化合物, 这些形式的化合物均可以乙醇发生反应生成 EC[13–15], 氰化物进一步通过氧化反应生成氰酸盐, 氰酸盐在催化剂如光照、氧气或 Cu^{2+}等作用下与乙醇反应生成 EC[1,16]。有研究发现, 发酵过程高粱中的蜀黍氰苷经酵母细胞中 *β*-葡糖糖苷酶水解或者高温酸解之后生成 *β-D*-葡萄糖和不稳定的氰醇(对羟基扁桃腈), 随后这一中间产物在内源性 *α*-羟基裂解酶或碱性条件下进一步分解产生氰化物, 因沸点较低, 在蒸馏过程中极易进入酒体中[17–19]。张顺荣[19]研究发现发酵过程中, 相比较氰化物, 尿素往 EC 的转化率更高。林建春等[8]分析了清香型白酒中 3 种前体物质与 EC 之间的相关性, 结果显示尿素与 EC 的相关性最强, 其次是氰化物, 瓜氨酸最弱。曹帅等[20]研究还发现, 瓜氨酸和尿素是高粱固态发酵过程中形成 EC 的主要前体物质, 在整个固态发酵中, 氰化物不参与 EC 的形成。

白酒蒸馏过程馏分酒中的 EC 主要来源于两部分:(1)酒醅发酵过程形成的 EC, 也是蒸馏初期 EC 来源; (2)蒸馏过程易挥发的 EC 前体物质在高温条件下与乙醇反应生成 EC[21]。但 EC 沸点较高且不易挥发, 所以蒸馏过程会去除大量发酵过程产生的 EC。白酒中 EC 主要来自蒸馏过程和储存过程中前体物质转化而来。储存过程中 EC 前体物质尿素和氰化物都可以和乙醇发生反应产生 EC。

2　氨基甲酸乙酯减控策略

目前, 降低酒精饮料中EC的方法很多, 可以归纳为3个方面: 减少 EC 前体物质、控制反应过程以及直接降低 EC 含量[22]。根据白酒中 EC 的形成机制和复杂的生产工艺, 主要从原料控制、发酵过程、蒸馏过程、储存过程 4 个方面开展减控策略研究。

2.1　原料控制

EC 的前体物质常存在于白酒酿造原料中, 如蜀黍氰苷普遍存在于酿酒高粱中, 不同品种中蜀黍氰苷含量不同[19,23]。魏铭等[24]全面分析我国九大高粱产区的 129 个栽培品种, 发现酿酒高粱中普遍存在蜀黍氰苷成分。但其含量因品种类型呈现显著差异, 有学者发现, 非糯高粱中蜀黍氰苷平均含量普遍高于糯高粱, 东北产区和华中产区高粱中蜀黍氰苷平均含量显著高于西南产区。这与周韩玲等[17]研究结论相符, 高粱中蜀黍氰苷的含量存在显著的地域性差异。进一步研究发现, 采用川南地区高粱作为酿酒高粱原料时, 酒体中氰化物及 EC 含量维持在较低水平。这些数据充分证实了川南地区高粱作为酿酒原料的优质特性, 同时也从实践层面验证了采用该地区高粱可以有效降低酒体氰化物及 EC 含量[17]。魏铭等[24]以同一高粱品种红缨子为研究对象, 发现在河南、陕西种植时, 籽粒中蜀黍氰苷平均含量高于在贵州种植时的含量。相同的高粱品种在辽宁(东北部)种植时, 籽粒中蜀黍氰苷含量明显高于在四川宜宾(西南部)种植时的含量, 辽宁省年均气温比四川宜宾低约 10 ℃, 宜宾的年降水量是辽宁省的 1.5~2.5 倍, 而年日照时长仅为辽宁省的一半。由此可见, 高粱籽粒中蜀黍氰苷的积累可能和种植地气候特点、自然环境、种植管理、品种、氮肥施用量等因素有关[25]。因此, 不同酒厂使用的高粱品种不同, 可能导致最终白酒中 EC 含量的差异[23]。此外, 研究发现籽粒的成熟度对蜀黍氰苷的含量也有影响, 随着籽粒成熟度的提高, 蜀黍氰苷的含量逐渐降低[26]。所以, 在高粱原料筛选方面, 可以选择氰苷含量较低的高粱, 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 EC 的产量, 又可以显著提高出酒率。可以选择成熟度高的高粱籽粒作为酿酒原料, 能够降低酒体中 EC 的含量。此外, 作物种植过程中尿素氮肥的残留物是谷物体内尿素积累的来源之一, 所以在原料培养过程中减少氮肥的施用可以降低尿素含量。有研究从基因层面通过筛选出新的大麦品系, 从源头消除羟基腈葡萄糖苷作为威士忌生产中 EC 形成的来源[27]。

酿酒原料含有 EC 前体物质会影响最终白酒中 EC 含量, 因此, 对原料进行预处理, 如精炼、洗涤、浸泡和粉碎, 有助于控制 EC 前体和 EC[28]。例如, 通过对原料进行精炼

和多次清洗，可以有效降低原料中的尿素含量。延长原料浸泡时间能够有效提高氰苷的溶出率，进而降低 EC 的形成量。同时，采用机械破碎和高温处理等方法对清除高粱中的氰苷成分同样具有积极作用。在原料预处理过程中，建议将物料研磨至更细的颗粒度。在原料蒸煮过程中，通过排气可以使生成的氢氰酸挥发。然而，目前的研究主要集中在亚麻籽和木薯中氰苷的去除，而对高粱中氰苷去除的研究尚不成熟。此外，还需深入研究原料预处理工艺对营养成分的保留效果及其对微生物发酵代谢的影响。

2.2 发酵过程

发酵是基酒生产过程中的核心步骤，也是 EC 产生的第一阶段。张莹等[29]对浓香型白酒的发酵过程进行了分析。随着发酵周期的延长，中上层发酵谷物中的 EC 含量有所下降，但在底层酒糟中下降不明显。总体而言，延长发酵周期可以降低浓香型白酒中的 EC 含量，且在 30 ℃和 34 ℃的发酵温度下，EC 含量存在显著差异。通过测量不同发酵条件下的 EC 含量，WANG 等[30]发现，在 25 ℃和初始乙醇浓度为 4%~6%的条件下发酵，可以降低酵母的精氨酸酶转录水平，从而减少 EC 含量。发酵温度越高，浓香型白酒蒸馏过程中产生的 EC 越多，这与葡萄酒和黄酒的结论一致。原因是发酵温度的升高会加速酵母分解精氨酸并产生尿素。另一方面，高粱中的氰苷在发酵加热和微生物酶反应下转化为氰酸盐，作为 EC 形成的前体物质，氰酸盐和尿素会促进 EC 的形成。因此，在发酵过程中，发酵温度不宜过高，降低发酵温度能够抑制微生物的生长并降低酶的活性，使得微生物代谢缓慢，EC 生成速率下降[31]，应尽量避免在高温季节生产浓香型白酒。

不同香型白酒中 EC 的形成机制可能存在相似性。酱香型白酒在生产过程中，原料高温积累和发酵过程中 EC 含量不断增加，越接近发酵后期，EC 形成速度越快。芝麻香型白酒中 EC 变化与酱香型相似，但在 EC 生成率是酱香型的 3 倍[32]。另一项研究表明，酿造 3 个月至 1 年的浓香型、酱香型和复合香型白酒中 EC 的含量高于酿造 1 个月的清香型和米香型白酒，表明 EC 是在酿造过程中产生的[33–34]。浓香型和酱香型白酒需要更复杂的原料和微生物，发酵时间更长，导致 EC 前体化合物含量更高。

根据 EC 的形成机制，减少尿素的生物合成是控制白酒发酵过程中 EC 的通用方法，已有众多通过降低尿素含量来减少发酵过程 EC 含量的研究。ZHAO 等[22]指出细胞外尿素是发酵葡萄酒中 EC 形成的关键因素，通过改变精氨酸摄取模式来减少葡萄酒生产中细胞外尿素的有用方法[35]。一方面尿素主要由酿酒酵母中的精氨酸酶(由 *CAR1* 编码)在发酵过程中裂解精氨酸产生，通过敲除酿酒酵母中的 *CAR1* 基因，抑制尿素的生成；另一方面尿素酰胺解酶(*DUR1*、*DUR2* 编码)或尿素通透酶(*DUR3*)过表达，两者都降低尿素和 EC 的含量。研究发现 *DUR3* 基因的过表达可以提高发酵液中尿素运输到酵母细胞中的效率，进而阻断尿素和乙醇之间的反应并最大限度地减少了 EC 的形成[36–37]。*DUR1*、*DUR2* 基因的过表达可能会产生过量的铵，进而影响酒的味道，在实际生产中的可适用性还需进一步探究。

然而，白酒的自然发酵涉及多种微生物，仅通过调控酿酒酵母的尿素代谢不足以显著降低 EC 的含量，随着高通量筛选技术的发展，筛选出多种在白酒发酵过程中能够降低尿素和 EC 含量的菌株，如解淀粉芽孢杆菌 JP21[38]、罗伊氏乳杆菌[39]、球形赖氨酸芽孢杆菌 MT33 菌株[40]以及乳酸菌[41]等，这些菌株都有应用到实际生产发酵中的可能性，进一步研究发现在模拟发酵糟醅中 JP21 对糟醅中的挥发性风味物质没有显著影响。研究表明多种微生物来源的新型氨基甲酸乙酯酶在酒类 EC 降解中展现出优异特性；来自二歧热黄菌(*Thermoflavimicrobium dichotomicum*)的具有高度热稳定的氨基甲酸酶，可以有效地去除米酒样品中的 EC[42]。乳酸球菌(*Acidisoma sylvae*)来源的新型乙醇耐受性氨基甲酸乙酯酶可以有效降解米酒中的 EC[43]。醋酸不动杆菌中分离的氨基甲酸乙酯水解酶不仅对 EC 高度特异，其固定化后，展现出优异的热稳定性、耐高盐和高乙醇浓度[44]。此外通过固定化酸性脲酶去除红葡萄酒中的尿素，进而限制葡萄酒储存过程中 EC 的形成[45]。

在自然发酵过程中，利用多微生物的协同作用增强尿素代谢活性，有助于有效控制 EC。固态发酵中 EC 前体的含量可通过使用乳酸菌和一些占优势的非常规酵母，如毕赤酵母和裂殖酵母来控制。文献[46–47]以中国白酒为模型体系，研究了酿酒酵母与溶血芽孢杆菌共培养的尿素代谢，发现可以增加尿素降解相关基因的转录水平，增强尿素降解能力。在模拟高粱发酵过程中，发现异常威克汉姆氏菌在尿素生产中的作用比酵母菌更大。因此，在白酒发酵过程中引入能够分解尿素或 EC 的微生物已被证明是降低白酒中 EC 含量的有效方法。但是，人工接种具有特殊功能的菌株到白酒生产微生物系统中可能会对微生物群落产生负面影响[48]，考虑到平衡 EC 控制和白酒风味的保留，这些微生物应尽可能来源于发酵谷物和土著微生物。已经研究发现在葡萄酒发酵中非酿酒酵母和酿酒酵母同时接种可以降低葡萄酒中 EC 的浓度并丰富了酒的风味特征[49]。

2.3 蒸馏过程

蒸馏过程中形成的 EC 是白酒基酒中 EC 的重要组成部分[50]。因此控制蒸馏过程中 EC 的形成对于降低基酒中的 EC 含量至关重要。白酒蒸馏初期 EC 含量的增加主要是由于蒸汽将少量 EC 从发酵谷物带入白酒中引起的。虽然 EC 是在发酵过程中产生的，但由于 EC 的高沸点，在蒸馏温度下很难达到，因此在发酵过程中产生的 EC 中只有

一小部分进入基酒。在蒸馏后期, EC 含量的增加主要是由蒸馏前驱体与乙醇的反应引起的。对浓香型白酒 EC 的研究表明, 蒸馏过程中残留氰化物含量与 EC 含量之间存在一定的相关性, 氰化物在蒸馏中的作用大于尿素[50], 并且发现基酒的头酒中氰化物含量远高于心酒和尾酒[51], 氰化物的沸点很低, 很容易通过蒸馏蒸发成蒸汽, 在高温下与乙醇反应生成 EC。

研究发现, 在白酒蒸馏过程中, EC 含量呈缓慢上升后下降, 最后再上升的趋势[50]。在白酒生产中, 监测到不同种类的白酒头酒和尾酒中EC含量较高[19], 因此, 根据上述EC蒸馏规律, 在白酒蒸馏过程中减少头酒和尾酒的流出量是降低中国白酒中 EC 含量的重要方法。此外, 发酵窖池中不同深度的蒸馏谷物可以均匀蒸馏, 馏出液也可以分阶段收集, 这有利于对不同氢氰酸含量的白酒样品进行分类, 然后通过后续技术控制氢氰酸含量高的白酒样品[39]。

目前, 世界范围内的蒸馏酒生产大多采用液态壶式蒸馏, 并进行两次或多次蒸馏。两次蒸馏有效降低了威士忌和甘蔗卡莎萨酒中的 EC 含量[52–53]。对于不同 EC 浓度的基酒, 二次蒸馏均能有效去除 EC[50]。有研究对白酒进行二次蒸馏以去除 EC[54], 然而这种方法会大幅减少白酒的产量, 并且二次蒸馏对酒的香味可能会有影响。

低温、慢速蒸馏以及增加回流均可以减少 EC 的生成。蒸馏过程中应采用低温慢馏, 这有利于减少 EC 的生成。在浓香型白酒的蒸馏过程中, 25 ℃蒸馏时 EC 或 EC 前体物质相对较少[29], 在白酒生产中可以采用这种温度蒸馏来降低 EC 含量。

2.4　储存过程

中国白酒需要数月甚至数年的长时间储存陈酿过程, 在白酒蒸馏后的储存和陈酿过程中, 中国白酒中的 EC 会随着储存时间的增加而积累。新鲜的蒸馏液经过储存后 EC 含量明显增加。研究发现在基酒的陈酿过程中, 氰化物对 EC 生成的贡献大于尿素, 这表明氰化物是白酒储存过程中形成 EC 的主要前体[55]。然而, FANG 等[9]发现, 在浓香型基酒储存的第一年中, 由尿素前体自发形成的 EC 增加了 66%, 基酒中未检测到氰化物, 这可能与不同香型白酒所使用的原料有关。浓香型白酒使用的原料是高粱和小麦, 含有较多的尿素, 这些尿素会在蒸馏过程中进入基酒, 并在储存过程中与乙醇反应生成 EC。EC 的产生与存储环境和条件有关, 如酸性环境、Fe^{3+}、高温和光照对酒中 EC 的形成具有催化作用, 目前的研究表明, 通过缩短储存时间、降低温度和避光储存可以减缓 EC 的生成[56]。有研究发现清香型白酒中 EC 快速增长的生产环节是白酒的储存阶段, 对贮存环境、温度、贮存容器等多种因素进行分析, 发现贮存温度越高, EC 上升速率越快, 15~20 ℃之间 EC 含量稳定, 超过 30 ℃ EC 含量快速增加。白酒的储存容器主要有陶坛和不锈钢罐, 储存过程中涉及到大量的金属离子, 韩海涛等[57]研究发现 Mn^{2+}、高浓度的 Fe^{3+}、低浓度的 Cu^{2+} 能够抑制白酒中的 EC 的含量。

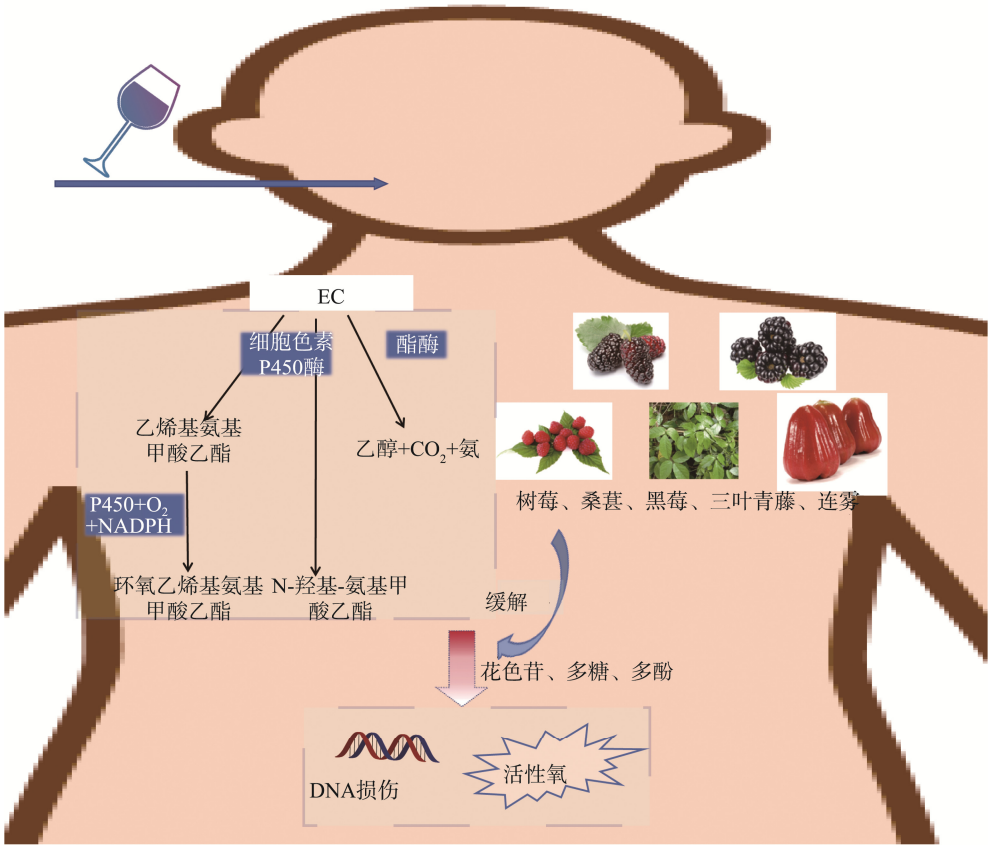
在吸附材料对白酒中 EC 的去除研究方面, 郝丽刚等[58]发现硅藻土和树脂可以去除白酒中的一些 EC, 但不同的吸附材料去除效果上存在差异, 同时也会对白酒中风味物质产生损失。有研究发现外源添加物质对 EC 的生成有抑制作用, 在热处理过程中添加槲皮素和鸟氨酸能够抑制 EC 在酱油中的积累[59], 但作用机制及其在白酒中 EC 去除的实际应用还需进一步探究。近年来, 分子印迹聚合物(molecular imprinted polymer, MIP)因为能很好地从酒精发酵饮料中提取 EC 及其前体物质, 有可能成为控制发酵酒精饮料中 EC 的新解决方案[60]。

3　氨基甲酸乙酯毒性及代谢机制

EC 在 19 世纪被用作人类和实验动物的催眠, 直到 1943 年首次被发现会导致小鼠肺腺瘤[61]。在随后的动物研究发现 EC 的长期暴露会损害神经[62], 增加癌症的风险, 如肝癌、肺腺瘤、淋巴瘤和乳腺癌[1,63], 缩短寿命。2010 年, 国际癌症研究机构将 EC 归纳为 2A 类致癌物[64]。随着分子生物技术研究的进步, 对 EC 的致癌机制逐渐有了更深入的了解。研究表明, EC 诱导的细胞癌与信号转导及转录激活因子 3、核转录因子-B 以及细胞外信号调节激酶有关[63]。近年来, EC 的毒理学研究开始转向细胞模型和人体组织。研究发现 EC 导致正常人肝细胞的活力降低、活性氧过量产生, 谷胱甘肽耗尽以及核因子 E2 相关因子 2 (nuclear factor erythroid 2-related factor 2, *Nrf2*)转录因子信号转导被抑制, 进一步触发肝细胞铁死亡, 引发细胞毒性[64–65]。EC 诱导癌症发生的机制总结为 3 个方面: (1)与核酸形成加合物, (2)诱导 DNA 脱嘌呤, (3)增加姐妹染色单体交换[66]。人体上皮组织和皮肤是 EC 通过几乎完全吸收进入体内的两个主要途径[67]。肝脏水解体内 90%的 EC 并将其排出, 而 5%通过尿液等途径排出[68]。如图 2 所示, EC 主要在细胞色素 P450 酶和酯酶的催化作用下完成体内代谢, 最终产物主要是 CO_2, 除此之外, 细胞色素 P450 可逆地将生物体内的一部分 EC 转化为 N-羟基-EC, 而另一部分则降解为乙烯基氨基甲酸乙酯, 已有研究发现乙烯基氨基甲酸乙酯可以诱导溶酶体碱化引发肝脏细胞毒性作用, 乙烯基氨基甲酸乙酯会进一步转化为环氧乙烯基氨基甲酸乙酯[66,69]。

4　天然产物缓解 EC 毒性的研究进展

近年来, 食源性功能因子因其天然、安全的特点, 成为缓解 EC 毒性的研究热点。多项研究表明, 如表 1 所示, 天然活性成分(如花色苷、多糖、多酚和胶原蛋白水解物)可通过激活基因表达、抗氧化等机制有效减轻 EC 诱导的氧化应激、细胞损伤和 DNA 损伤。



注：还原型辅酶II (nicotinamide adenine dinucleotide phoshate hydrogen, NADPH)。

图 2 EC 体内代谢及其毒性作用

Fig.2 Metabolism and toxic effects of EC *in vivo*

表 1 已报道天然产物的 EC 毒性缓解半抑制浓度、作用靶点及研究模型

Table 1 Half maximal inhibitory concentration for EC toxicity mitigation, target molecules and research models for reported natural products

天然产物	IC_{50}	作用靶点	研究模型	参考文献
锦葵素-3-O-阿拉伯糖苷(malvidin-3-O-arabinoside, M3A)	-	激活自噬过程，减少氧化损伤	人肝细胞(L02 细胞)	[70]
黑桑葚提取物(black mulberry extract, BMB)	-	减少氧化损伤，改善 DNA 损伤	人肝癌细胞(HepG2)	[71]
三叶青藤多糖(polysaccharide from *Tetrastigma hemsleyanum* vines, TVP)	-	激活 *Nrf2*、沉默信息调节因子 1 (silent information regulator 1, *Sirt1*)表达，缓解氧化损伤	人克隆结肠腺癌细胞(Caco-2)	[72]
	-	激活 *DAF-16*/*FOXO* 表达，减少氧化损伤	秀丽隐杆线虫	
莲雾多糖(wax apple polysaccharide, WAP)	-	减少活性氧和超氧根离子	人肝细胞(L02 细胞)	[73]
墨鱼胶原蛋白水解物(cuttlefish collagen hydrolysate, CCH)	$IC_{50(DPPH)}$=1.84 mg/mL; $IC_{50(ABTS)}$=1.072 mg/mL; $IC_{50(\cdot OH)}$=0.697 mg/mL;	减少氧化损伤	人肝癌细胞(HepG2)	[74]

注：-表示未找到相关文献报道数据；半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)；2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]；羟基自由基(·OH)。

在花色苷类化合物中, 树莓提取物中的 M3A 被证实能够显著缓解 EC 引发的氧化损伤[70]。而桑葚中的矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-芸香糖苷、天竺葵素-3-O-葡萄糖苷等成分也能改善EC诱导的细胞毒性[71]。此外, 桑葚果实提取物和黑莓匀浆均表现出对 EC 毒性的缓解作用, 其中经胃肠道消化后的黑莓匀浆保护效果更显著[75]。植物多糖同样展现出良好的 EC 毒性缓解潜力。例如 TVP 由甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖组成)在 Caco-2 细胞和秀丽隐杆线虫模型中均能有效减轻 EC 毒性[72]。莲雾中分离的多糖(含甘露糖、半乳糖醛酸等)则可抑制 EC 诱导的人肝细胞氧化损伤[73]。为进一步提高活性成分的递送效率, 纳米载体技术被引入 EC 毒性干预研究, 例如, 负载牛油果皮提取物的壳聚糖纳米颗粒可显著减轻 EC 对小鼠肺组织的毒性[76], 掺入壳聚糖纳米颗粒的小檗碱对 EC 诱导的小鼠肺癌具有潜在的治疗效果[77], 表明纳米包封策略能增强植物提取物的生物活性和靶向性。研究还发现动物源性墨鱼胶原蛋白水解物(CCH)能够减轻谷胱甘肽耗竭进一步缓解 EC 诱导的氧化损伤[74]。

5　结束语

EC 作为白酒生产过程中的潜在致癌物, 其形成机制涉及原料、发酵、蒸馏及储存等多个环节, 且受多种前体物质(如尿素、氰化物、瓜氨酸)和反应条件(如温度、pH、金属离子等)的影响。目前, 针对白酒 EC 的减控已在原料处理、发酵工艺优化、微生物代谢工程、蒸馏方式及储存环境控制等方面取得一定进展; 同时, 天然活性成分(如花色苷、多糖、多酚)也被证实可在体内外模型中缓解 EC 诱发的毒性效应, 具备一定的应用潜力。然而, 当前研究仍存在若干关键问题有待深入: (1)在减控策略上, 尚未有研究系统阐明不同调控维度之间的协同机制, 尤其缺乏反应“原料-发酵-蒸馏-储存”全链条协同作用的关键量化指标与评价体系; (2)天然产物缓解EC毒性的作用机制多局限于体外或动物模型, 尚未形成可推向临床转化的剂量-效应框架, 也缺乏天然产物对 EC 在人体内代谢产物转化影响研究与验证路径。

因此, 未来研究应重点从以下两方面展开: (1)构建白酒 EC 多维度协同减控模型, 通过对同一香型或工艺的白酒进行 EC 形成的全链条监控, 确立协同控制的关键参数及其量化方法; (2)针对天然活性成分的毒性缓解作用, 提出并验证参与 EC 代谢的转化路径, 包括建立基于代谢组学的剂量-效应关系、解析天然产物与 EC 及其代谢物在体内的相互作用网络, 科学推动体内降低 EC 体内毒性的天然产物开发。实现白酒 EC 的系统性防控, 保障白酒消费的安全性。

参考文献

[1] 李焱鑫, 黄晓媛, 白卫东, 等. 发酵食品中氨基甲酸乙酯的形成途径及消减策略研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(14): 4551–4558.
LI YX, HUANG XY, BAI WD, *et al*. Research progress on formation pathway and reduction strategy of ethyl carbamate in fermented food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(14): 4551–4558.

[2] CHEN Y, ZENG WZ, FANG F, *et al*. Elimination of ethyl carbamate in fermented foods [J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101725.

[3] 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.
YI ZR, ZHAO XR, DU GC. Source analysis of ethyl carbamate precursors during sauce-flavor liquor production [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 170–176.

[4] HAN BL, ZHANG SF, CHEN L, *et al*. Distribution, generation, and control of ethyl carbamate in Baijiu: A review [J]. Food Control, 2025, 168: 110951.

[5] 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.

[6] 曾婷婷, 吴生文, 林培. 特香型酒醅发酵过程中氨基甲酸乙酯和尿素变化规律的研究[J]. 酿酒, 2015, 42(6): 77–79.
ZENG TT, WU SW, LIN P. Evolvement of ethyl carbamate and urea from fermented grains in the fermentation process of the site-flavor liquor [J]. Liquor Making, 2015, 42(6): 77–79.

[7] 范文来, 徐岩, 史斌斌. 酒醅发酵过程中氨基甲酸乙酯与尿素的变化[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 171–174.
FAN WL, XU Y, SHI BB. Evolvement of ethyl carbamate and urea from fermented grains in the fermentation process of Chinese liquor [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(23): 171–174.

[8] 林建春, 吴群, 徐岩. 清香型白酒发酵过程中酵母群落结构及其与尿素代谢的关系[J]. 微生物学通报, 2017(11): 2522–2529.
LIN JC, WU Q, XU Y. Dynamic profile of yeast community associated with urea metabolism in Chinese light-aroma liquor fermentation [J]. Microbiology China, 2017(11): 2522–2529.

[9] FANG F, QIU YY, DU GC, *et al*. Evaluation of ethyl carbamate formation in Luzhou-flavor spirit during distillation and storage processes [J]. Food Bioscience, 2018, 23: 137–141.

[10] WANG PH, SUN JY, LI XM, *et al*. Contribution of citrulline to the formation of ethyl carbamate during Chinese rice wine production [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2014, 31(4): 587–592.

[11] TERRADE N, MIRA-DE-ORDUÑA R. Impact of winemaking practices on arginine and citrulline metabolism during and after malolactic fermentation [J]. Journal of Applied Microbiology, 2006, 101(2): 406–411.

[12] 焦志华, 陈启和. 发酵酒精饮品中氨基甲酸乙酯前体物的代谢调控机制研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 260–266.
JIAO ZH, CHEN QH. Progress in understanding metabolic mechanisms of ethyl carbamate precursors in fermented alcoholic beverages [J]. Food Science, 2016, 37(23): 260–266.

[13] 朱晓春, 陈双, 徐岩. 浓香型白酒酿造过程中不同形态氰化物的含量分布规律[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 239–244, 251.
ZHU XC, CHEN S, XU Y. Content distribution of different forms of cyanide in strong-flavor Baijiu production [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24): 239–244, 251.

[14] 朱晓春. 白酒酿造过程中氰化物的含量分布规律研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
ZHU XC. Study on the content distribution of cyanide in liquor fermentation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.

[15] HASHIGUCHI T, HORII S, IZU H, *et al*. The concentration of ethyl carbamate in commercial ume (*Prunus mume*) liqueur products and a

method of reducing it [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2010, 74(10): 2060–2066.

[16] 周韩玲, 安明哲, 赵东, 等. 高粱中蜀黍氰苷与浓香型白酒中氰化物及氨基甲酸乙酯关系的研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(10): 25–29.
ZHOU HL, AN MZ, ZHAO D, *et al*. Relationship between dhurrin in sorghum and cyanides and ethyl carbamate in strong-flavor Baijiu [J]. China Brewing, 2022, 41(10): 25–29.

[17] 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 HL, AN MZ, 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.

[18] JOHANSEN H, RASMUSSEN LH, OLSEN CE, *et al*. Rate of hydrolysis and degradation of the cyanogenic glycoside-dhurrin-in soil [J]. Chemosphere, 2007, 67(2): 259–266.

[19] 张顺荣. 白酒中氨基甲酸乙酯形成的氰化物途径研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
ZHANG SR. Research of ethyl carbamate formation in Chinese liquor from the cyanide way [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.

[20] 曹帅, 吴群, 徐岩. 白酒固态发酵过程中不同品种高粱原料对氨基甲酸乙酯形成的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2016(7): 677–683.
CAO S, WU Q, XU Y. Effects of different sorghum cultivars on the formation of ethyl carbamate in the solid-state fermentation process of Chinese liquor [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016(7): 677–683.

[21] 张庄英. 白酒蒸馏和贮存过程中氨基甲酸乙酯的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
ZHANG ZY. Research of ethyl carbamate during the distillation and storage of Chinese liquors [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.

[22] ZHAO XR, DU GC, ZOU HJ, *et al*. Progress in preventing the accumulation of ethyl carbamate in alcoholic beverages [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 32(2): 97–107.

[23] AKAZAWA T, MILJANICH P, CONN EE. Studies on cyanogenic glycoside of sorghum vulgare [J]. Plant physiology, 1960, 35(4): 535–538.

[24] 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 HK, 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.

[25] MANDRONE M, CHIOCCHIO I, BARBANTI L, *et al*. Metabolomic study of sorghum (*Sorghum bicolor*) to interpret plant behavior under variable field conditions in view of smart agriculture applications [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(3): 1132–1145.

[26] NIELSEN LJ, STUART P, PICMANOVA M. 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): 1021.

[27] JRGENSEN ME, HOUSTON K, JRGENSEN HJL, *et al*. Disentangling hydroxynitrile glucoside biosynthesis in a barley (*Hordeum vulgare*) metabolon provides access to elite malting barleys for ethyl carbamate-free whisky production [J]. Plant Journal, 2024, 119(1): 364–382.

[28] WANG C, WANG M, ZHANG MP. Ethyl carbamate in Chinese liquor (Baijiu): Presence, analysis, formation, and control [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(11): 4383–4395.

[29] 张莹, 樊云, 孙跃鹏, 等. 浓香型白酒中氨基甲酸乙酯含量及控制方法的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(4): 191–194.
ZHANG Y, FAN Y, SUN YP, *et al*. Contents and control method of EC for strong-flavour liquor [J]. The Food Industry, 2018, 39(4): 191–194.

[30] WANG C, ZHANG MP, WANG M. Regulation of ethyl carbamate of saccharomyces cerevisiae in Chinese Luzhou-flavor liquor fermentation [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2020, 14(5): 670–675.

[31] HASNIP S, CAPUTI A, CREWS C, *et al*. Effects of storage time and temperature on the concentration of ethyl carbamate and its precursors in wine [J]. Food Additives and Contaminants, 2004, 21(12): 1155–1161.

[32] 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 WL, 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 & Quality, 2019, 10(15): 4811–4829.

[33] LI GH, ZHONG QD, WANG DB, *et al*. Determination and formation of ethyl carbamate in Chinese spirits [J]. Food Control, 2015, 56: 169–176.

[34] 李园子, 黄世永, 郭学武, 等. 双水相萃取法在白酒中氨基甲酸乙酯检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2651–2657.
LI YZ, HUANG SY, GUO XW, *et al*. Application of liquid/liquid extraction in determination of ethyl carbamate in liquor [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(7): 2651–2657.

[35] ZHANG P, HU X. Metabolic engineering of arginine permeases to reduce the formation of urea in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2018, 34(3): 47.

[36] COULON J, HUSNIK JI, INGLIS DL, *et al*. Metabolic engineering of saccharomyces cerevisiae to minimize the production of ethyl carbamate in wine [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2006, 57(2): 113–124.

[37] GUO XW, LI YZ, GUO J, *et al*. Reduced production of ethyl carbamate for wine fermentation by deleting CAR1 in Saccharomyces cerevisiae [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2016, 43(5): 671–679.

[38] 丁霞, 李巧玉, 刘凡, 等. 降解浓香型白酒中氨基甲酸乙酯菌株的筛选及产酶特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(7): 29–36.
DING X, LI QY, LIU F, *et al*. Isolation of microbial strains for degradation of ethyl carbamate in Luzhou-flavour spirit and characterization of corresponding enzymes [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(7): 29–36.

[39] 孟庆达, 周新虎, 陈翔, 等. 白酒酿造过程酒醅中尿素的控制与减少[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(8): 33–39.
MENG QD, ZHOU XH, CHEN X, *et al*. Reduction of urea in fermented grains during Chinese liquor brewing process [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(8): 33–39.

[40] CUI KX, WU Q, XU Y. Biodegradation of ethyl carbamate and urea with *Lysinibacillus sphaericus* MT33 in Chinese liquor fermentation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(6): 1583–1590.

[41] DU H, SONG ZW, XU Y. Ethyl carbamate formation regulated by lactic acid bacteria and nonconventional yeasts in solid-state fermentation of Chinese Moutai-flavor liquor [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(1): 387–392.

[42] LIU QT, WANG H, LI X, *et al*. A highly thermostable ethyl carbamate-degrading urethanase from *Thermoflavimicrobium dichotomicum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307(4): 142245.

[43] LIU QT, WANG H, ZHU SB, *et al*. Biocatalytic detoxification of ethyl carbamate in fermented beverages using a novel high-ethanol-tolerant urethanase from acidisoma silvae [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 225: 117951.

[44] DONG NH, XUE SY, GUO H, *et al*. Genetic engineering production of ethyl carbamate hydrolase and its application in degrading ethyl carbamate in Chinese liquor [J]. Foods, 2022, 11(7): 937.

[45] TAVILLI E, ESTI M, FIDALEO M. Effective ethyl carbamate prevention

in red wines by treatment with immobilized acid urease [J]. Foods, 2024, 13(16): 2476.

[46] WU Q, LIN JC, CUI KX, *et al*. Urea production by yeasts other than saccharomyces in food fermentation [J]. FEMS Yeast Research, 2017, 17(7). DOI: 10.1093/femsyr/fox072

[47] WU Q, LIN JC, CUI KX, *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.

[48] ZHANG LQ, QIU Y, ZHANG YQ, *et al*. Decoding the formation and elimination mechanism of ethyl carbamate in strong-aroma Baijiu [J]. Foods, 2024, 13(23): 3743.

[49] ZHAO YXW, DU YG, DONG NH, *et al*. Effect of simultaneous inoculation of ethyl carbamate-degrading non-saccharomyces yeast and saccharomyces cerevisiae on the quality and flavor of wine [J]. Food Bioscience, 2025, 66: 106236.

[50] WU HP, YANG HW, WEI Y, *et al*. Determination of ethyl carbamate in white spirit by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. China Brewing, 2015, 43(12): 266–270.

[51] DING XF, HUANG J, WU CD, *et al*. Effects of different distillation patterns on main compounds of Chinese Luzhou-flavour raw liquors [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2017, 123(3): 442–451.

[52] ALCARDE AR, SOUZA LMD, BORTOLETTO AM. Ethyl carbamate kinetics in double distillation of sugar cane spirit [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2012, 118(4): 27–31.

[53] RIFFKIN HL, WILSONIL R, HOWIE D, *et al*. Ethyl carbamate formation in the production of pot still whisky [J]. Journal of the Institute of Brewing, 1989, 95(2): 115–119.

[54] 吴晨岑, 范文来, 徐岩. 不同二次蒸馏方式对浓香型白酒中氨基甲酸乙酯去除率的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015(6): 1–7.
WU CC, FAN WL, XU Y. Influence of different types of double distillation on removal efficiency of ethyl carbamate in Chinese strong aroma type liquor [J]. Food and Fermentation Industries, 2015(6): 1–7.

[55] ARESTA M, BOSCOLO M, FRANCO DW. Copper (II) catalysis in cyanide conversion into ethyl carbamate in spirits and relevant reactions [J]. Journal Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(6): 2819–2824.

[56] 秦辉, 李涵, 熊燕飞, 等. 蒸馏酒中氨基甲酸乙酯合成途径及控制措施的研究进展及其对中国白酒的借鉴[J]. 酿酒科技, 2018(5): 110–113.
QIN H, LI H, XIONG YF, *et al*. Research progress in the formation & control of ethyl carbamate in distilled liquor and its references for Chinese Baijiu [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2018(5): 110–113.

[57] 韩海涛, 辛茜. 金属离子对白酒中氨基甲酸乙酯含量变化的影响[J]. 酿酒, 2022, 49(4): 60–63.
HAN HT, XIN Q. Effect of metal ions on the change of ethyl carbamate content in Baijiu [J]. Liquor Making, 2022, 49(4): 60–63.

[58] 郝丽刚, 张万众, 胡景辉, 等. 不同吸附材料对凤香型白酒中氨基甲酸乙酯去除的影响研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(3): 36–41.
HAO LG, ZHANG WZ, HU JH, *et al*. Influence of difference adsorption materials on the removal of ethyl carbamate from Feng-flavor Baijiu [J]. China Brewing, 2025, 44(3): 36–41.

[59] ZHOU K, PATRIGNANI F, SUN YM, *et al*. Inhibition of ethyl carbamate accumulation in soy sauce by adding quercetin and ornithine during thermal process [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128528.

[60] CHEN M, LIU HL, SUN BG. Molecularly imprinted polymers: A new solution for controlling ethyl carbamate in fermented alcoholic beverages [J]. Separation & Purification Reviews, 2025, 54(1): 17–36.

[61] HÜBNER P, GROUX PM, WEIBEL B, *et al*. Genotoxicity of ethyl carbamate (urethane) in *Salmonella*, yeast and human lymphoblastoid cells [J]. Mutation research, 1997, 390(1-2): 11–19.

[62] COMFORT JJ, CHOMYSHEN SC, WADDELL BM, *et al*. Molecular characterization of ethyl carbamate toxicity in *Caenorhabditis elegans* [J]. Toxicology Reports, 2022, 9: 619–627.

[63] KUMAR A, NARAYAN C. Constitutive over expression of IL-1*β*, IL-6, NF-*κ*B, and Stat3 is a potential cause of lung tumorgenesis in urethane (ethyl carbamate) induced Balb/c mice [J]. Journal of Carcinogenesis, 2012, 11: 9.

[64] XU Y, LI YT, LI JX, *et al*. Ethyl carbamate triggers ferroptosis in liver through inhibiting GSH synthesis and suppressing Nrf2 activation [J]. Redox Biology, 2022, 53: 102349.

[65] LI YT, YE X, ZHENG XD, *et al*. Transcription factor EB (TFEB)-mediated autophagy protects against ethyl carbamate-induced cytotoxicity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 364: 281–292.

[66] 李玉婷. 氨基甲酸乙酯引发肝脏的毒性效应及其作用机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
LI YT. Study on hepatotoxicity and its underlying mechanisms of ethyl carbamate [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[67] ZHANG JR, FANG F, CHEN J, *et al*. The arginine deiminase pathway of koji bacteria is involved in ethyl carbamate precursor production in soy sauce [J]. FEMS Microbiology Letters, 2014, 358(1): 91–97.

[68] SHALAMITSKIY MY, TANASHCHUK TN, CHERVIAK SN, *et al*. Ethyl carbamate in fermented food products: Sources of appearance, hazards and methods for reducing its content [J]. Foods, 2023, 12(20): 3816.

[69] GOWD V, SU HM, KARLOVSKY P, *et al*. Ethyl carbamate: An emerging food and environmental toxicant [J]. Food Chemistry, 2018, 248: 312–321.

[70] LI Y, XU Y, XIE J, *et al*. Malvidin-3-O-arabinoside ameliorates ethyl carbamate-induced oxidative damage by stimulating AMPK-mediated autophagy [J]. Food & Function, 2020, 11: 10247–10982.

[71] LI YT, BAO T, CHEN W. Comparison of the protective effect of black and white mulberry against ethyl carbamate-induced cytotoxicity and oxidative damage [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 65–73.

[72] 贾若一. 三叶青藤多糖分离鉴定及其对氨基甲酸乙酯毒性的缓解作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
JIA RY. Isolation and identification of polysaccharide from *Tetrastigma hemsleyanum* vines and mitigation effects of TVP on EC-induced toxicity [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[73] BAO T, KARIM N, KE H, *et al*. Polysaccharide isolated from wax apple suppresses ethyl carbamate-induced oxidative damage in human hepatocytes [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2023, 24(7): 574–586.

[74] DU BW, DENG GY, ZAMAN F, *et al*. Antioxidant cuttlefish collagen hydrolysate against ethyl carbamate-induced oxidative damage [J]. RSC Advances, 2021, 11(4): 2337–2345.

[75] CHEN W, XU Y, ZHANG L, *et al*. Blackberry subjected to *in vitro* gastrointestinal digestion affords protection against ethyl carbamate-induced cytotoxicity [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 620–627.

[76] SAHYON HA, EL-SHAFAI NM, ELNAJJAR N, *et al*. Avocado peel extract loaded on chitosan nanoparticles alleviates urethane toxicity that causes lung cancer in a mouse model [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 234: 123633.

[77] MAHMOUD MA, EL-BANA MA, MORSY SM, *et al*. Synthesis and characterization of berberine-loaded chitosan nanoparticles for the protection of urethane-induced lung cancer [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2022, 618: 121652.

(责任编辑：安香玉　冯东慧)