

发酵食品中氨基甲酸乙酯检测技术研究进展

王 月¹ 赵永鹏² 王思琦¹ 张宿义^{3,4} 敖宗华^{3,4} 刘书亮¹ 李建龙¹

(1. 四川农业大学食品学院, 四川 雅安 625014; 2. 四川农业大学机电学院, 四川 雅安 625014;
3. 泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646003; 4. 国家固态酿造工程技术研究中心, 四川 泸州 646000)

摘要:氨基甲酸乙酯属于 2A 类致癌物, 广泛存在于发酵食品中, 其残留带来的安全风险备受关注。多个国家已对发酵食品中氨基甲酸乙酯制定了限量标准。文章阐述了发酵食品中氨基甲酸乙酯污染现状, 系统总结并对比了近年来国内外文献报道的氨基甲酸乙酯检测方法, 包括色谱法、光谱法、电化学传感器法、试纸比色法和免疫分析法等技术原理和应用场景, 并展望了发酵食品中氨基甲酸乙酯残留检测技术未来发展的方向。

关键词:氨基甲酸乙酯; 发酵食品; 快速检测; 传感器; 试纸比色法; 食品安全

Advances in the detection of ethyl carbamate in fermented foods

Wang Yue¹ Zhao Yongpeng² Wang Siqi¹ Zhang Suyi^{3,4} Ao Zonghua^{3,4} Liu Shuliang¹ Li Jianlong¹

(1. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China;
3. Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou, Sichuan 646003, China; 4. National Engineering Research Center of Solid-State Brewing, Luzhou, Sichuan 646000, China)

Abstract: Ethyl carbamate, a group 2A carcinogen, has been widely detected in fermented foods and its safety has drawn increasing attention. Many countries have established limits for ethyl carbamate in fermented foods. This article reviews the contamination situation of ethyl carbamate, systematically summarizes and compares the detection methods of ethyl carbamate reported in both domestic and international literature in recent years, including chromatography, spectroscopy, electrochemical sensor method, paper strip colorimetry, and immunoassay. Finally, this article proposes the future development directions of residual detection technology for ethyl carbamate in fermented foods.

Keywords: ethyl carbamate; fermented food; rapid detection; sensor; paper strip colorimetry; food safety

发酵食品在发酵过程中经微生物代谢会产生一系列生化反应, 从而产生具有遗传毒性和致癌性的氨基甲酸乙酯(EC)^[1-3]。经临床试验, 国际癌症研究机构(IARC)将 EC 列为 2A 类致癌物^[4-5]。EC 在人或动物体内经细胞色素 P450 催化所产生的代谢物会破坏 DNA 碱基结构, 诱发基因突变, 长期暴露还可能导致神经系统功能异常与肝损伤, 最终增加癌症风险^[6-7]。

目前关于发酵食品中 EC 的形成机制大多与乙醇和

微生物代谢有关^[8-9]。EC 主要由乙醇和氨甲酰化合物经醇解反应生成, 是白酒、泡菜、酸奶、腐乳、醋、奶酪、葡萄酒等发酵食品的过程污染物^[10-11]。相较于其他发酵食品, 酒精饮料中 EC 污染水平更高, 尤其是白酒和核果酿制成的烈酒^[12]。EC 是衡量发酵食品尤其是酒精饮料安全性的指标之一, 因此定性和定量分析发酵食品中的 EC 具有重要意义。

EC 检测方法主要有传统实验室检测方法和快速检测

基金项目:四川省自然科学基金项目(面上项目)(编号: 2026NSFSC0144); 四川省自然科学基金项目(青年基金)(编号: 2024NSFSC125); 泸州老窖博士后项目(编号: 2023HX04); 西昌市科技局农业科技创新项目(编号: 0602322359019)

通信作者:李建龙(1987—), 男, 四川农业大学副教授, 博士。E-mail: jlli999@foxmail.com

收稿日期:2025-09-22 **改回日期:**2026-06-22

引用格式:王月, 赵永鹏, 王思琦, 等. 发酵食品中氨基甲酸乙酯检测技术研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 228-235.

Citation: Wang Yue, Zhao Yongpeng, Wang Siqi, et al. Advances in the detection of ethyl carbamate in fermented foods[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 228-235.

方法。传统实验室检测方法主要有液相、气相色谱以及色谱与荧光或质谱联用的分析技术;快速检测方法主要有光谱法、电化学传感法、免疫分析法。文章将对发酵食品中EC的污染现状、限量标准以及检测方法进行阐述与评价,并对EC检测技术的未来发展趋势进行展望。

1 国内外发酵食品中氨基甲酸乙酯限量标准及污染现状

酒精饮料暴露风险高于其他发酵食品,因此部分国家规定了不同类型饮料酒中EC的最高残留限量,详见表1^[6,10]。中国关于EC的风险评估起步滞后,数据匮乏,国家限量标准尚未出台。由于发酵食品中酒类与酱油中EC含量及检出率较其他发酵食品高且消费量大,因此中国关于EC的测定方法主要是针对酒类和酱油。目前,中国现行有效的相关标准为SN/T 0285—2012《出口酒中氨基甲酸乙酯残留量检测方法 气相色谱—质谱法》、GB 5009.223—2014《食品安全国家标准 食品中氨基甲酸乙酯的测定》及GB/T 34266—2017《黄酒中氨基甲酸乙酯预防控制技术措施指南》;美国分析化学家协会(AOAC 993.04)、欧洲标准化委员会(CEN 16852:2017)等其他国家组织的标准方法均使用气相色谱—质谱联用仪(GC-MS)测定酒类中EC^[10, 13-15]。

表1 国外酒饮料中EC的限量标准[†]

Table 1 Limited standards for ethyl carbamate in alcoholic beverages abroad

国家	限量标准/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)				
	葡萄酒	白兰地	蒸馏酒	强化酒	清酒
加拿大	30	400	150	100	200
美国	15	—	—	60	—
捷克	30	400	150	100	200
韩国	30	—	—	—	—
德国	—	800	—	—	—
法国	—	1 000	150	—	—
瑞士	—	1 000	—	—	—
日本	30	400	150	100	100
英国	—	1 000	—	—	—
巴西	—	—	210	—	—
欧盟	—	1 000	—	—	—

[†] —表示无此项标准。

随着分析技术的发展,不同国家和地区都对发酵食品中的EC含量进行了检测。其中发酵酒是多数人摄入EC的主要来源^[16-19]。在中国,酒类中EC检出率在98.5%以上^[20-22],同时中国开展的第6次全国总膳食(2016—2019年)研究发现发酵酒中EC平均质量分数为10.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$,低于第5次全膳食研究时的(19.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[23]。尽管全国均

值有所下降且处于较低水平,但川贵地区白酒的EC污染问题依然存在,其EC污染水平最高可达264.56 $\mu\text{g}/\text{L}$,高于加拿大、法国等国家标准限值(150 $\mu\text{g}/\text{L}$)^[24-26]。鉴于中国白酒饮用量大^[27-28],应予以关注。在国外,酒类中EC检出率在66.6%以上,核果酒EC检出率及含量远高于其他酒类^[29-31]。中国在酒类中EC检出率高于国外,应重视发酵酒中EC污染情况,同时研究EC含量,也有利于探究其形成机制及防控手段,降低发酵酒中EC污染。

2 传统检测方法

EC传统实验室检测方法大多是将液相色谱和气相色谱与不同检测器联用,并通过净化/浓缩等预处理步骤,以提升灵敏度、重复性及广泛适用性,满足不同食品基质中EC定量分析需求。传统实验室检测方法主要包括液相色谱—分光光度法、高效液相色谱—荧光检测法(HPLC-FLD)、超高相液相色谱—高分辨质谱法(UHPLC-HRMS)、气相色谱—质谱联用法(GC-MS)、全二维气相色谱/火焰离子化检测法(GC $\times$ GC/FID)。不同检测方法的对比见表2。

2.1 液相色谱法

液相色谱应用广泛,但一般涉及衍生处理,传统衍生试剂为9-占吨醇,其价格昂贵,衍生处理耗时长且乙醇会影响衍生反应,需要对高乙醇含量的酒类进行降低酒精度预处理。Sýs等^[32]采用液相色谱—分光光度法(图1)对烈酒中EC进行检测,该法以4-(二甲氨基)苯甲醛(*p*-DMAB)替换传统衍生剂,可降低检测成本并减少乙醇含量干扰,回收率高达99%,但检测限较高(174.8 $\mu\text{g}/\text{L}$)。马菊兰等^[33]采用9-占吨醇衍生—无乙醚试剂的高效液相色谱—荧光检测器(HPLC-FLD)方法对青稞酒中EC含量进行检测,结果显示,该方法避免了乙醚试剂的使用,但较为耗时。为进一步拓展方法的适用性,Šantrůčková等^[34]采用9-占吨醇衍生结合HPLC-FLD方法对果酒、醋和酱油等多种复杂食品基质中EC进行检测,该法检出限较高(250.0 $\mu\text{g}/\text{L}$),不适用于痕量样品筛查。此外,尹艳艳等^[35]采用同位素内标(氘代EC, EC-D5)-UPLC-HRMS检测方法对酒醋中EC进行检测,该法检出限为3.8 $\mu\text{g}/\text{L}$,与外标法相比,同位素内标显著抑制了酒醋复杂基质的信号抑制效应,但仪器购置与维护成本较高,且需要稳定同位素内标,对试验条件有一定要求。

2.2 气相色谱—质谱联用法(GC-MS)

GC-MS法是GB 5009.223—2014《食品安全国家标准 食品中氨基甲酸乙酯的测定》所用的EC检测方法,常用作实验室标准检测方法,该法应用广泛,但对于不同食品基质的前处理步骤有所差异。常瑞红等^[36]采用基于乙醇萃取的活性炭净化结合GC-MS方法对酒醋中EC进行检测,该法检测范围为10~800 $\mu\text{g}/\text{L}$,检出限为2.2 $\mu\text{g}/\text{L}$,

表 2 EC 的传统检测方法对比[†]

方法	食品基质	前处理	检出限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	检测范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %	分析时 间/min	参考 文献
液相色谱—分 光光度法	白兰地	4-(二甲氨基)苯甲醛(p-DMAB) 衍生处理	174.8	$5.8\times 10^2\sim 6.0\times 10^4$	99	—	[32]
HPLC-FLD	青稞酒	9-占吨醇衍生处理	—	10.0~500.0	95~114	>100	[33]
	果酒、果渣酒、醋、酱油、 蜂蜜酒等 50 种食品	9-占吨醇衍生处理	250.0	$9.0\times 10^2\sim 1.4\times 10^6$	84~104	35	[34]
UHPLC-HRMS	酒酯	超声和离心过滤	3.8	4.0~300.0	85~97	11	[35]
GC-MS	酒酯	乙醇萃取	2.2	10.0~800.0	89~117	>60	[36]
	葡萄酒	偶联基质修饰辅助顶空单滴微萃取	1.5	$2.0\sim 1.0\times 10^3$	95~100	>60	[37]
GCXGC/FID	卡莎萨酒	稀释辅助分散液—液微萃取(DA- DLLME)	37.5	145.0~415.0	102~109	7	[38]

[†] —表示文献未涉及。

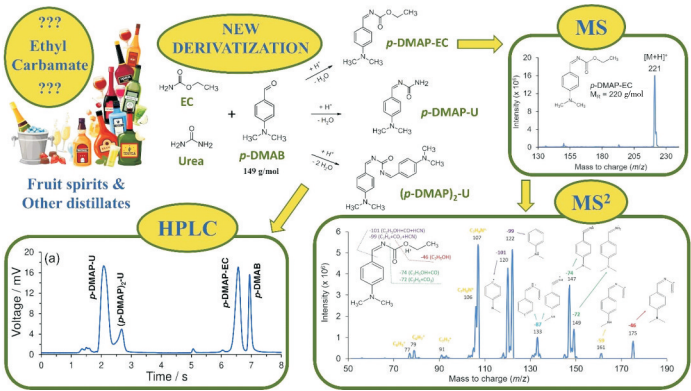


图 1 液相色谱—分光光度法检测 EC 机理图^[32]

Figure 1 Mechanism diagram of EC detection by liquid chromatography-spectrophotometry

但加标回收率(89%~117%)较差且分析时间长。Ma 等^[37]采用基于偶联基质修饰辅助顶空单滴微萃取结合 GC-MS 方法对葡萄酒样品中 EC 进行检测(图 2),该方法的线性范围为 $2.0\sim 1.0\times 10^3\ \mu\text{g/L}$,检出限为 $1.5\ \mu\text{g/L}$,回收率为 95%~100%。Neto 等^[38]采用避免大量有机溶剂的 DA-DLLME 结合 GC×GC/FID 方法对样品中 EC 进行检测,该法 LOD 为 $37.5\ \mu\text{g/L}$,无基质效应,且回收率稳定(102%~109%),但需 GC×GC 设备,成本较高。

3 快速检测方法

随着食品检测技术的发展和实际生产便捷性的需要,开发出了更加简便和快速的检测方法,基于其检测原理可分为光谱法、电化学传感法、试纸比色法和免疫分析法(表 3)。

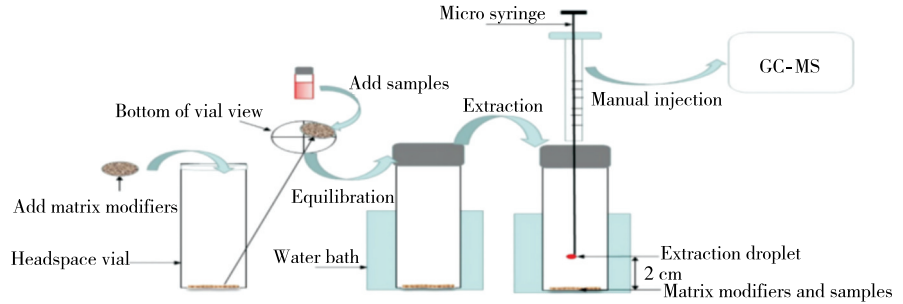


图 2 基质改性辅助的 HS-SDME(顶空单滴微萃取)提取程序^[37]

Figure 2 HS-SDME extraction procedure assisted by matrix modification

表3 EC的快速检测方法对比[†]

Table 3 Comparison of rapid detection methods for EC

方法	食品基质	前处理	检出限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	检测范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/%	分析时 间/min	参考 文献
光谱法	白酒、红酒及鸡尾酒	稀释及 $\text{Br}_2\text{-NaOH}$ 增敏	荧光1.7;比色1.7	5.5~200.0	98~103	35	[39]
	酒精饮料	稀释处理	0.6	1.0~200.0	85~109	18	[40]
	白酒	稀释处理	0.9	1.0~100.0	84~110	—	[41]
	葡萄酒	浸泡	2.9	$0.9\sim 8.9\times 10^4$	83~110	6	[42]
电化学传感器	白酒	固相萃取	0.4	$8.9\sim 4.5\times 10^4$	95~107	>10	[43]
	白酒	稀释处理	194.0	$890.9\sim 1.8\times 10^5$	93~100	<5	[44]
	白酒	稀释处理	0.9	$1.8\sim 2.1\times 10^5$	95~98	5	[45]
	黄酒	无	0.5	$35.6\sim 4.5\times 10^3$	100~103	5	[46]
	葡萄酒	稀释处理	1.0	$10.0\sim 1.0\times 10^3$	101~102	>30	[47]
	米酒	—	8.0×10^{-4}	8.9~445.5	—	>2	[48]
	伏特加、葡萄酒	稀释处理	0.2	$0.2\sim 2.2\times 10^3$	73~108	>30	[49]
试纸比色法	白酒	稀释处理	2.1	10.0~60.0	96~101	10	[50]
	白酒	无	6.4	10.0~200.0	91~101	10	[51]
	白酒	无	14.2	20.0~200.0	96~101	10	[52]
免疫分析法	葡萄酒	9-占吨醇衍生	5.4	8.7~32.0	87~94	>5	[53]

[†] —表示文献未涉及。

3.1 光谱法

光谱法可对EC进行半定量筛查,目前主要有荧光光谱法(FS)和表面增强拉曼光谱法(SERS),其中表面增强拉曼光谱法应用广泛,检测限较荧光光谱法低。Wu等^[39]采用基于荧光碳点纳米酶($\text{Ce\&Mn@CDs}$)的竞争性抑制机制的双信号(荧光和比色)检测方法对EC进行智能现场双模检测,该法检测范围为5.5~200.0 $\mu\text{g/L}$,无需大型仪器,适用于现场检测,但反应条件对温度有要求且耗时较长。还有研究制备了可与EC结合的荧光分子印迹复合微球,通过EC结合前后荧光强度的变化(猝灭或增强)间接检测EC。Han等^[40]构建了一种荧光探针(咔唑基共价有机框架修饰分子印迹聚合物,见图3),EC被吸附后荧光强度增强从而检测白酒、黄酒和果酒中的EC,该法线性范围为1.0~200.0 $\mu\text{g/L}$,检出限为0.6 $\mu\text{g/L}$,回收率为85%~109%,该法效率高、分离效果好和重现性好,但回收率有待改进。此外,Han等^[41]利用生物碳点荧光探针,与EC结合引起荧光猝灭从而检测EC,检测线性范围为1.0~100.0 $\mu\text{g/L}$,检出限为0.9 $\mu\text{g/L}$,加标回收率为84%~110%,该法检测迅速、灵敏度高、对环境友好,但在实际应用中仍需要稀释处理以降低酒精度。

赵晶蕊等^[42]采用自组装Ag-Au合金纳米球阵列SERS方法对葡萄蒸馏酒中EC进行检测,基于1442 cm^{-1} 特征峰强度与EC浓度的线性关系实现快速定量,该法在 $0.9\sim 8.9\times 10^4$ $\mu\text{g/L}$ 范围内线性尚可($R^2=0.8213$),但线性相关系数偏低,未与标准方法GB 5009.223—2014《食品

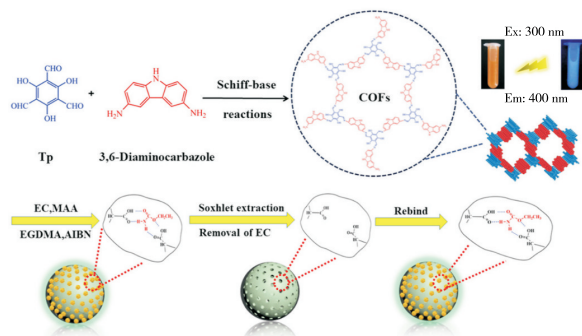


图3 咔唑基COFs和基于咔唑基COFs的分子印迹聚合物的制备工艺^[40]

Figure 3 Preparation process of the carbazole-based COFs and MIPs on carbazole-based COFs

安全国家标准《食品中氨基甲酸乙酯的测定》GC-MS法对比验证其可靠性。

3.2 电化学传感器法

3.2.1 基于分子印迹聚合物的电化学传感器 分子印迹聚合物(MIP)与抗原抗体结合相似,具有高度选择性,但制备MIP时,存在模板分子洗脱不干净的情况,同时孵育模板分子-MIP需要一定时间。Li等^[43]采用基于MIP特异性识别与MXene/ZIF-67纳米酶信号放大的电化学传感器方法对EC进行检测,检测原理为当EC存在时,EC分子占据印迹位点,阻碍电子传递,使电化学信号降低;EC不存在时,印迹位点空出,电子传递顺畅,电化学信号强,通

过这种电信号变化从而检测 EC, 该传感器检测限低至 $0.4 \mu\text{g/L}$ 且检测时间短 (约 10 min), 但材料制备复杂, 涉及 HF 刻蚀。Zheng 等^[44] 采用以 LaMnO_3/GO 为载体的分子印迹电化学传感器方法对 EC 进行检测, 检测原理为检测时电极吸附 EC 后表面发生氧化反应, 产生的电流信号强度与 EC 浓度呈线性相关, 该法检测快速、成本低, 适合现场快速筛查, 但检测限较高 ($194.0 \mu\text{g/L}$), 远高于加拿大、法国等国家标准蒸馏酒限量 ($150 \mu\text{g/L}$), 且线性范围下限偏高, 难以满足痕量检测。因此, Zheng 等^[45] 进一步使用 MoS_2 纳米片修饰钙钛矿电极材料, 提高了电极比表面积, 成功降低了检测限 ($0.9 \mu\text{g/L}$), 但 MIP 合成周期长。

3.2.2 基于酶和适配体的电化学传感器 酶和适配体传感器具有高选择性特点, 但 EC 降解酶需要筛选专门菌株, EC 适配体也需要海量筛选。Zhang 等^[46] 采用基于谷氨酸脱氢酶与 EC 降解酶的生物酶电化学传感器法对 EC 进行检测, 其原理是 EC 降解产物与 NADH/ α -酮戊二酸的氧化反应会产生随 EC 浓度线性变化的电流信号, 该传感器检测限为 $0.5 \mu\text{g/L}$, 在人工合成黄酒中加标回收率为 100%~103%, 该法操作简便, 检测迅速, 但未应用于实际样品检测。Qiu 等^[47] 采用基于谷氨酸脱氢酶和适配体的 EC 光电化学生物传感器方法对葡萄酒中 EC 进行检测 (图 4), 其检测原理为适配体识别 EC 后, 通过支链杂交链式反应 (bHCR) 聚集谷氨酸脱氢酶-脂质体催化产氨, 引起光电流变化, 该法检测限为 $1.0 \mu\text{g/L}$, 葡萄酒中回收率为 101%~102%, 但检测时间长且未与标准方法进行可靠性验证。

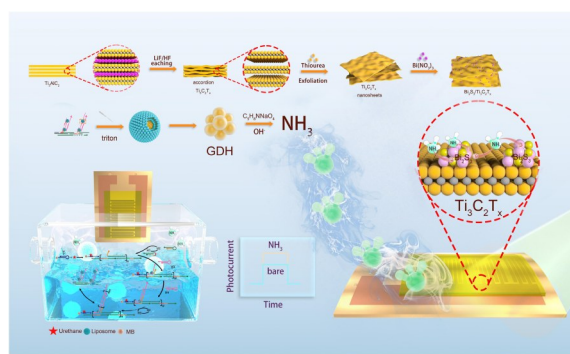


图 4 基于分层 MXene/ Bi_2S_3 纳米片的非接触式光电化学生物传感器检测 EC 示意图^[47]

Figure 4 Schematic diagram of contactless photoelectrochemical biosensors toward ethyl carbamate detection based on hierarchical MXene/ Bi_2S_3 nanosheets

3.2.3 其他 除了结合酶、适配体和分子印迹聚合物的传感器, 还有电化学阻抗传感器。Jiang 等^[48] 采用基于 pH 响应式的电化学阻抗传感器方法对米酒中 EC 及其前体

物进行同时检测, 该传感器对 EC 的检测线性范围为 $8.9\sim 445.5 \mu\text{g/L}$, EC 检出限为 $8.0\times 10^{-4} \mu\text{g/L}$, 该法操作简单, 检测时间短, 无需对样品进行富集 EC 预处理, 但是该类传感器对酒精饮料的灵敏度远低于纯标准品, 因此需要进一步研究提高传感器在酒精饮料中灵敏度的方法。此外, Wu 等^[49] 采用基于固定化 BSA (牛血清蛋白)-EC 抗原和碱性磷酸酶 (ALP)-抗坏血酸 (AA)- $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ 级联反应的电化学免疫传感器方法对 EC 进行检测, 该法将传统竞争 ELISA 的吸光度信号转变为电化学信号, 从而使灵敏度提高, 检测限低至 $0.2 \mu\text{g/L}$, 但回收率不高且耗时长。

3.3 试纸比色法

将 EC 适配体与纳米材料结合, 再以试纸条为载体, 通过智能手机拍照及 Image J 灰度分析可以实现 EC 快速定量。Xia 等^[50] 采用基于 Capture-SELEX 筛选的高亲和力 EC 适配体 (EC1-34) 和 AuNPs 的试纸检测法对白酒中 EC 进行检测, 该法灵敏度高, 适合白酒中 EC 的快速筛查, 但检测范围较窄, 适合低浓度样品初筛。为此, Xia 等^[51] 进一步改进了纳米材料, 采用 Ag_2O 纳米酶修饰的比色试纸法对 EC 进行检测, 该法检测范围扩大 ($10.0\sim 200.0 \mu\text{g/L}$), 但检测限升高 ($6.4 \mu\text{g/L}$)。此外, Yang 等^[52] 采用基于 V_6O_{13} 纳米带与适配体的比色纳米酶试纸法对 EC 进行检测, 同样扩大了检测范围 ($20.0\sim 200.0 \mu\text{g/L}$), 还提高了回收率 (96%~101%), 但检测限仍偏高。

3.4 免疫分析法

免疫分析法是基于抗原与抗体特异性结合反应的一类检测技术。Fu 等^[53] 采用基于计算机辅助模拟的非竞争性免疫测定法对葡萄酒中 EC 进行检测, 结果显示 EC 氧杂蒽衍生物的黄二醇基团与抗体轻链的 Asn-32 和 Asn-92 残基结合, 基于该机制该法灵敏度提高了 17 倍, 但检测线性范围窄, 不适于高浓度样品。

4 传统检测方法与快速检测方法对比

传统检测方法应用广泛, 适用于多种液体与固体食品基质, 但存在以下缺点: ① 耗时。传统方法涉及固相萃取、液液萃取以及 9-占吨醇衍生化等前处理过程, 步骤繁琐、耗时, 不适于大规模快速筛查工作。② 对于非酒、非酱油食品回收率不高。传统实验室检测方法 (如 GB 5009.223—2014《食品安全国家标准 食品中氨基甲酸乙酯的测定》的 GC-MS 法) 虽应用广泛, 但该标准方法是基于酒类和酱油基质建立的, 当用于成分差异显著的非酒、非酱油液体食品 (如酒醪) 时, 直接套用会导致回收率偏低, 因此需针对特定基质优化前处理与检测条件, 以保证结果可靠性。相比之下, 快速检测方法弥补了传统检测方法包括 GC-MS 法的一些局限性, 如仪器简便, 可在现场进行大规模快速检测、前处理简单且耗时短, 检测时间可低至 2 min。然而由于酒类 EC 暴露风险高于其他发酵

食品^[10],当前应用多集中于酒类,同时由于特异性识别元件(分子印迹聚合物、EC降解酶、抗体抗原)未商业化生产,对于其他基质复杂的食品的效能有待验证。此外,在抗干扰方面,得益于特异性识别元件,其在液体复杂基质中表现良好,但对于高体积分数乙醇食品(40%vol以上)以及固体基质,其直接应用的效能仍有待验证;在适用性方面,快速检测方法中电化学传感器法和试纸比色法展现出较高回收率与便携式潜力,为实现现场大规模快速检测提供可靠的方案。

5 结论与展望

目前国内外研究者已开发多种氨基甲酸乙酯检测方法,其中,传统色谱法应用广泛,覆盖液体、固体等多种食品基质,具有检测准确、灵敏度高、稳定性强等优点,常作为快速检测方法可靠性的参考依据。此外,一些研究通过与其他检测器(荧光检测器、高分辨质谱等)联用优化传统色谱法,简化了前处理并缩短检测时长,但该类仪器设备体积过大且价格昂贵,不适于现场大规模快速检测,对中小企业以及消费者也不友好,因此,开发更便捷、更稳定的氨基甲酸乙酯快速检测方法具有较好的前景。而其中电化学传感器和试纸条比色法是最具有商业化潜力的技术方向,二者皆可开发为便携式设备,能够适应现场大规模筛查需求以及满足消费者、基层企业使用要求。然而,这两种方法仍有改进的空间:①未来的研究应聚焦于改进复合纳米材料的合成工艺,以解决其批次性能差异问题,并着力开发氨基甲酸乙酯特异性识别元件(如酶、抗体、分子印迹聚合物等)的稳定、规模化制备技术,实现商业化生产;②现有快速检测方法局限于酒类,因此,迫切需要开发非酒类发酵食品的新型检测方法,以实现各类发酵食品中氨基甲酸乙酯含量的有效动态监控;③中国应加速推进发酵食品中氨基甲酸乙酯的限量标准制定工作,以保障发酵食品产业的健康发展。

参考文献

- [1] Diez-Ozaeta I, Astiazaran O J. Fermented foods: an update on evidence-based health benefits and future perspectives[J]. Food Research International, 2022, 156: 111133.
- [2] Shalamitskiy M Y, Tanashchuk T N, Cherviak S N, et al. Ethyl carbamate in fermented food products: sources of appearance, hazards and methods for reducing its content[J]. Foods, 2023, 12 (20): 3 816.
- [3] 王根杰, 李德美, 张亚东, 等. 不同产区葡萄酒中氨基甲酸乙酯产量的比较[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(1): 93-98.
Wang G J, Li D M, Zhang Y D, et al. Comparative analysis of ethyl carbamate content in the wines from different areas[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(1): 93-98.
- [4] 马晓驰, 金诺, 刘佳萌, 等. 发酵食品中氨基甲酸乙酯检测方法的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(5): 13-18.
- Ma X C, Jin N, Liu J M, et al. Research advancements on detection methods of ethyl carbamate in fermented food[J]. Food and Nutrition in China, 2021, 27(5): 13-18.
- [5] 周雪燕, 石森, 康宁, 等. 氨基甲酸乙酯降解酶的固定化研究[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(6): 65-75.
Zhou X Y, Shi M, Kang N, et al. Study on immobilization of urethanase[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(6): 65-75.
- [6] Wang C, Wang M, Zhang M P. Ethyl carbamate in Chinese liquor (Baijiu): presence, analysis, formation, and control[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(11): 4 383-4 395.
- [7] Chen Y, Zeng W Z, Fang F, et al. Elimination of ethyl carbamate in fermented foods[J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101725.
- [8] Jung S, Kim S, Kim I, et al. Risk assessment of ethyl carbamate in alcoholic beverages in Korea using the margin of exposure approach and cancer risk assessment[J]. Food Control, 2021, 124: 107867.
- [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] Abt E, Incorvati V, Robin L P, et al. Occurrence of ethyl carbamate in foods and beverages: review of the formation mechanisms, advances in analytical methods, and mitigation strategies[J]. Journal of Food Protection, 2021, 84(12): 2 195-2 212.
- [11] 周凯, 唐冰娥, 徐振林, 等. 发酵食品中氨基甲酸乙酯形成机理和快速检测方法研究进展[J]. 生物加工过程, 2018, 16(2): 31-41.
Zhou K, Tang B E, Xu Z L, et al. Research progress in formation and rapid detection of ethyl carbamate in fermentation foods[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2018, 16(2): 31-41.
- [12] Lim H S, Lee K G. Development and validation of analytical methods for ethyl carbamate in various fermented foods[J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 1 373-1 379.
- [13] GB/T 34266—2017 黄酒中氨基甲酸乙酯预防控制措施指南[S].
GB/T 34266—2017 Guidelines for the prevention and reduction of ethyl carbamate contamination in Chinese rice wine[S].
- [14] GB 5009. 223—2014 食品中氨基甲酸乙酯的测定[S].
GB 5009.223—2014 Determination of ethyl carbamate in food[S].
- [15] SN/T 0285—2012 出口酒中氨基甲酸乙酯残留量检测方法 气相色谱—质谱法[S].
SN/T 0285—2012 Determination of ethyl carbamate residues in alcohol for export—GC-MS[S].
- [16] 吴天侯, 刘珊, 王宗义, 等. 盐辅助分散液微萃取/GC-MS/MS检测腐乳、酸乳和面包中的氨基甲酸乙酯[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 302-306.

- Wu T Y, Liu S, Wang Z Y, et al. Determination of ethyl carbamate in fermented bean curd, yoghurt and bread by GC-MS/MS with salt assisted liquid microextraction[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 302-306.
- [17] 王军喜, 何一龙, 刘晓艳, 等. 市售高盐稀态酱油中氨基甲酸乙酯含量的调查分析[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 226-229.
- Wang J X, He Y L, Liu X Y, et al. Investigation and analysis on the content of ethyl carbamate in soy sauce[J]. The Food Industry, 2020, 41(11): 226-229.
- [18] 黄海. 四川浓香型原酒中氨基甲酸乙酯含量的测定以及氨基化磁珠富集白酒中氨基甲酸乙酯的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023: 13-34.
- Huang H. Investigation of ethyl carbamate content in Sichuan Nongxiangxing original wine and amino groups modified magnetic beads for the ethyl carbamate enrichment from the liqueur[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023: 13-34.
- [19] 卓俊纳, 吴卫宇, 陈静, 等. 三种香型白酒中氨基甲酸乙酯的研究及聚类分析[J]. 酿酒科技, 2021(8): 22-27.
- Zhuo J N, Wu W Y, Chen J, et al. GC-MS and cluster analysis of ethyl carbamate in Baijiu of three flavor types[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2021(8): 22-27.
- [20] 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.
- [21] 董文静, 何啸峰, 沈洁, 等. 固相萃取—气相色谱串联质谱法测定梅州地区客家娘酒中的氨基甲酸乙酯及其食用风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(9): 3 508-3 513.
- Dong W J, He X F, Shen J, et al. Determination of ethyl carbamate in Hakkaniang wine in Meizhou region by solid phase extraction-gas chromatography tandem mass spectrometry and its edible risk assessment[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(9): 3 508-3 513.
- [22] 王雅楠, 郭欣然, 王宗义, 等. 盐辅助分散液液微萃取—气相色谱—串联质谱法检测葡萄酒中的氨基甲酸乙酯[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(5): 1 364-1 368.
- Wang Y N, Guo X R, Wang Z Y, et al. Determination of ethyl carbamate in wine by salt-assisted dispersive liquid-liquid microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(5): 1 364-1 368.
- [23] Wang Z F, Qu P F, Zhao Y F, et al. A nationwide survey and risk assessment of ethyl carbamate exposure due to daily intake of alcoholic beverages in the Chinese general population[J]. Foods, 2023, 12(16): 3 129.
- [24] 熊晓通, 胡峰, 尤小龙, 等. 超高效液相色谱—高分辨质谱测定白酒中氨基甲酸乙酯含量[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 283-287.
- Xiong X T, Hu F, You X L, et al. Determination and quantitation of ethyl carbamate in Chinese Baijiu by ultra-high performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry[J]. Food Science, 2021, 42(8): 283-287.
- [25] 黄雄伟, 李文祥, 曾宪峰, 等. 湘产浓香型白酒酿造过程中氨基甲酸乙酯含量变化规律[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 28-31.
- Huang X W, Li W X, Zeng X F, et al. Variation of ethyl carbamate content in the brewing process of strong-flavour liquor in Hunan Province[J]. Food & Machinery, 2022, 38(12): 28-31.
- [26] 王开宇, 左惠君, 于欣欣, 等. 同位素稀释—气质法测定白酒中氨基甲酸乙酯的测量不确定度评定[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 66-72.
- Wang K Y, Zuo H J, Yu X X, et al. Evaluation of uncertainty in the determination of ethyl carbamate in Chinese spirits by isotope dilution GC-MS method[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 66-72.
- [27] 张云霞, 余佑, 李运通, 等. 基于近红外光谱法的馥郁香型白酒基酒中 4 种主要有机酸检测模型构建[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 72-80.
- Zhang Y X, Yu J, Li Y T, et al. Detection modelling of four major organic acids in the base wine of Fuyuxiangxing crude Baijiu based on near-infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 72-80.
- [28] 黄河鸥, 吴成, 杨少娟, 等. 酱香型白酒窖泥中乳酸菌的分离鉴定及全基因组测序分析[J]. 食品与生物技术学报, 2025, 44(8): 87-96.
- Huang H O, Wu C, Yang S G, et al. Isolation, identification, and whole genome sequencing of lactic acid bacteria from pit mud of Jiangxiangxing Baijiu[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(8): 87-96.
- [29] Kusonić D, Bijelić K, Kladar N, et al. Health risk assessment of ethyl carbamate in fruit spirits[J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2023, 16(4): 393-403.
- [30] Deák E, Gyepes A, Stefanovits-Bányai É, et al. Determination of ethyl carbamate in pálinka spirits by liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry after derivatization[J]. Food Research International, 2010, 43(10): 2 452-2 455.
- [31] 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.
- [32] Sýs M, Dejmeková H, Toušková M, et al. A novel derivatization method for the determination of ethyl carbamate in spirits by liquid chromatography with spectrophotometric detection[J]. Microchemical Journal, 2024, 200: 110447.
- [33] 马菊兰, 李晓婷, 刘墩福, 等. 青稞酒中氨基甲酸乙酯含量的检测方法[J]. 酿酒, 2023, 50(2): 112-114.
- Ma J L, Li X T, Liu D F, et al. Detection method of ethyl carbamate content in highland barley wine[J]. Liquor Making, 2023, 50(2): 112-114.

- [34] Šantrůčková V, Fischer J, Klikarová J. A rapid and improved method for the determination of ethyl carbamate in foodstuffs of different matrices[J]. *Analytical Methods*, 2024, 16(28): 4 733-4 742.
- [35] 尹艳艳, 黎露露, 杨军林, 等. 同位素内标—超高效液相色谱—高分辨质谱法测定酒醋中氨基甲酸乙酯[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(23): 7 807-7 814.
- Yin Y Y, Li L L, Yang J L, et al. Determination of ethyl carbamate in fermented grains by isotope internal standard-ultra performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13 (23): 7 807-7 814.
- [36] 常瑞红, 刁亚琴, 郭亚飞, 等. 气相色谱—质谱联用法检测酒醋中氨基甲酸乙酯的方法研究[J]. *酿酒科技*, 2022(8): 131-134.
- Chang R H, Diao Y Q, Guo Y F, et al. Determination of ethyl carbamate in fermented grains by GC-MS[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2022(8): 131-134.
- [37] Ma Z X, Zhao T Y, Cui S Y, et al. Determination of ethyl carbamate in wine by matrix modification-assisted headspace single-drop microextraction and gas chromatography-mass spectrometry technique[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131573.
- [38] Neto P S, Bispo De Oliveira J, Magalhães Alvarenga F B, et al. Development of a new dispersive liquid-liquid microextraction method to ensure the conformity of cachaça for ethyl carbamate by GCxGC/FID[J]. *Food Control*, 2025, 172: 111187.
- [39] Wu G J, Qiu H M, Du C X, et al. Intelligent onsite dual-modal assay based on oxidase-like fluorescence carbon dots-driven competitive effect for ethyl carbamate detection[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 474: 134707.
- [40] Han L X, Meng C, Zhang D W, et al. Fabrication of a fluorescence probe via molecularly imprinted polymers on carbazole-based covalent organic frameworks for optosensing of ethyl carbamate in fermented alcoholic beverages[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1 192: 339381.
- [41] Han L X, Zhu P, Liu H L, et al. Molecularly imprinted bulk and solgel optosensing based on biomass carbon dots derived from watermelon peel for detection of ethyl carbamate in alcoholic beverages[J]. *Microchimica Acta*, 2022, 189(8): 286.
- [42] 赵晶蕊, 王亚敏, 袁雨汛, 等. 葡萄蒸馏酒中氨基甲酸乙酯的 SERS 检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(9): 2 467-2 475.
- Zhao J R, Wang Y M, Yuan Y X, et al. Study on SERS detection of ethyl carbamate in grape spirit[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(9): 2 467-2 475.
- [43] Li C, Zhang X A, Tang Q Y, et al. Molecularly imprinted electrochemical sensor for ethyl carbamate detection in Baijiu based on "on-off" nanozyme-catalyzing process[J]. *Food Chemistry*, 2024, 453: 139626.
- [44] Zheng W Q, Yao M C, Leng Y J, et al. Direct detection of ethyl carbamate in Baijiu by molecularly imprinted electrochemical sensors based on perovskite and graphene oxide[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101752.
- [45] Zheng W Q, Xiong R, Yu X, et al. Molecularly imprinted electrochemical sensor based on functionalized MoS₂ nanosheets modified LaMnO₃ nanocubes for the detection of ethyl carbamate in Baijiu[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 139: 107126.
- [46] Zhang Z W, Lu X X, Tian Y P, et al. High-sensitive electrochemical determination of ethyl carbamate using urethanase and glutamate dehydrogenase modified electrode [J]. *Electroanalysis*, 2017, 29(2): 481-488.
- [47] Qiu Z L, Lin X T, Lei Y F, et al. Contactless photoelectrochemical biosensors based on hierarchical MXene/ Bi₂S₃ nanosheets with the branched hybridization chain reaction[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 243: 115764.
- [48] Jiang X Y, Xie Y Q, Wan D J, et al. Simultaneously detecting ethyl carbamate and its precursors in rice wine based on a pH-responsive electrochemical impedance sensor[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1 126: 124-132.
- [49] Wu L, Wang Y S, Zhou S H, et al. Enzyme-induced Cu²⁺/Cu⁺ conversion as the electrochemical signal for sensitive detection of ethyl carbamate[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2021, 1 151: 338256.
- [50] Xia L, Yang Y X, Yang H Q, et al. Screening and identification of an aptamer as novel recognition molecule in the test strip and its application for visual detection of ethyl carbamate in liquor[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1 226: 340289.
- [51] Xia L, Zheng J, Su J, et al. Portable paper-based sheet for visual detection of ethyl carbamate in Chinese Baijiu based on aptamer recognition and laccase-like activity of cubic Ag₂O nanoparticles[J]. *Food Bioscience*, 2025, 63: 105594.
- [52] Yang H L, Xia L, Li L T, et al. Design an aptamer-recognized visual nanozyme sheet for rapid detection of ethyl carbamate in liquor[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 128: 106077.
- [53] Fu H J, Chen Z J, Wang H, et al. Development of a sensitive non-competitive immunoassay via immuno complex binding peptide for the determination of ethyl carbamate in wine samples[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 406: 124288.