DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250917004
引用格式: 杨长晓, 周永杨. 四川省烧烤和煎炸肉中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的污染水平及慢性膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 238–245.
YANG CX, ZHOU YY. Contamination status and chronic dietary exposure assessment of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters in grilled and fried meat in Sichuan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 238–245. (in Chinese with English abstract).

四川省烧烤和煎炸肉中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的污染水平及慢性膳食暴露评估

杨长晓[1*], 周永杨[2]
(1. 四川省疾病预防控制中心, 成都 610041; 2. 达州市疾病预防控制中心, 达州 635002)

摘 要: 目的 调查烧烤和煎炸肉中 3-氯丙醇酯(3-monochloropropanediol esters, 3-MCPDE)和缩水甘油酯(glycidyl esters, GE)的污染水平, 并评估其慢性膳食暴露风险。**方法** 在四川省 5 个地区采集 20 份电烤肉、20 份炭烤肉和 20 份煎炸肉样品, 采用 $^{13}C_3$ 同位素稀释-气相色谱-串联质谱法测定 3-MCPDE 和 GE 的含量, 根据中国成年居民畜禽肉日消费量数据采用点估计法计算慢性每日摄入量(chronic daily intake, CDI), 并基于含量的中位值(P_{50})通过危害商(hazard quotient, HQ)和暴露边界(margin of exposure, MOE)分别对 3-MCPDE 和 GE 的慢性膳食暴露风险进行评估。**结果** 60 份样品中 3-MCPDE 和 GE 的检出率分别为 73.3%和 75.0%, P_{50} 含量水平分别为 29.3 μg/kg 和 60.4 μg/kg。炭烤、煎炸和电烤肉中 3-MCPDE 的检出率分别为 85.0%、95.0%和 40.0%, P_{50} 含量水平分别为 93.3 μg/kg、31.6 μg/kg 和未检出(not detected, ND); GE 的检出率分别为 90.0%、85.0%和 50.0%, P_{50} 含量水平分别为 1236.2、25.3 和 6.9 μg/kg。以每日 1 次的消费频率计, 成年居民通过炭烤、煎炸和电烤肉摄入 3-MCPDE 的 P_{50} CDI 分别为 0.155、0.053 和 0 μg • kg^{-1} • d^{-1}, 对应的 HQ 分别为 0.078、0.026 和 0(均小于 1); GE 的 P_{50} CDI 分别为 2.060、0.101 和 0.011 μg • kg^{-1} • d^{-1}, 对应的 MOE 值分别为 1165、23762 和 210111, 提示炭烤肉中 GE 存在一定的慢性膳食暴露风险。对炭烤肉样品中 GE 的膳食暴露风险进一步评估显示, 以每周消费 3 次、每周消费 1 次和每两周消费 1 次的频率计, 相应的 P_{50} MOE 值分别为 2718、8155 和 16310; 炭烤羊肉对炭烤肉中 GE 总暴露量的贡献比达 45%。**结论** 烧烤和煎炸肉中普遍存在 3-MCPDE 和 GE 污染, GE 的含量水平显著高于 3-MCPDE (P<0.05); 炭烤肉中 3-MCPDE 和 GE 的含量水平显著高于煎炸肉和电烤肉(P<0.05); 经烧烤和煎炸肉摄入 3-MCPDE 的慢性膳食暴露风险和经电烤和煎炸肉摄入 GE 的慢性膳食暴露风险处于可接受水平, 但经炭烤肉摄入 GE 的慢性膳食暴露风险需引起关注。合理控制消费频率、食材类型选择多样化可降低慢性膳食暴露风险。

关键词: 烧烤和煎炸肉; 3-氯丙醇酯; 缩水甘油酯; 慢性膳食暴露评估; 气相色谱-串联质谱法

收稿日期: 2025-09-17
第一作者/*通信作者: 杨长晓(1983—), 男, 副主任技师, 主要研究方向为食品理化检验。E-mail: 853533494@qq.com

Contamination status and chronic dietary exposure assessment of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters in grilled and fried meat in Sichuan Province

YANG Chang-Xiao[1*], ZHOU Yong-Yang[2]

(1. *Sichuan Center for Disease Control and Prevention*, *Chengdu* 610041, *China*;
2. *Dazhou Center for Disease Control and Prevention*, *Dazhou* 635002, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the contamination levels of 3-monochloropropanediol esters (3-MCPDE) and glycidyl esters (GE) in grilled and fried meat, and assess their chronic dietary exposure risks. **Methods** The 20 electric grilled meat samples, 20 charcoal grilled meat samples and 20 fried meat samples were collected from 5 regions in Sichuan Province. The content of 3-MCPDE and GE was determined by $^{13}C_3$ isotope dilution-gas chromatography-tandem mass spectrometry. The chronic daily intake (CDI) was calculated by point estimation method based on the daily meat consumption data of Chinese adult residents. The chronic dietary exposure risks of 3-MCPDE and GE were separately evaluated by hazard quotient (HQ) and margin of exposure (MOE) based on the median contents (P_{50}) of the contaminants. **Results** Among the 60 samples, the detection rates of 3-MCPDE and GE were 73.3% and 75.0%, with P_{50} content levels of 29.3 μg/kg and 60.4 μg/kg, respectively. Among charcoal grilled meat samples, fried meat samples and electric grilled meat samples, the detection rates of 3-MCPDE were 85.0%, 95.0% and 40.0%, with P_{50} content levels of 93.3 μg/kg, 31.6 μg/kg and not detected (ND), respectively; the detection rates of GE were 90.0%, 85.0% and 50.0%, with P_{50} content levels of 1236.2, 25.3 and 6.9 μg/kg, respectively. For adult residents, calculated based on a consumption frequency of once per day for charcoal grilled meat, fried meat and electric grilled meat, the P_{50} CDI of 3-MCPDE intake were 0.155, 0.053 and 0 μg • kg^{-1} • d^{-1}, with HQ values of 0.078, 0.026 and 0 (all less than 1), respectively; the P_{50} CDI of GE intake were 2.060, 0.101 and 0.011 μg • kg^{-1} • d^{-1}, with MOE values of 1165, 23762 and 210111, respectively, indicating charcoal grilled meat posed a certain risk of chronic dietary exposure to GE. Further assessment of the dietary exposure risk of GE in charcoal grilled meat samples showed that, calculated based on a consumption frequency of 3 times per week, once per week and twice every two weeks, the P_{50} MOE values were 2718, 8155 and 16310, respectively; charcoal grilled lamb contributed to 45% of the total exposure of GE in charcoal grilled meat. **Conclusion** Grilled and fried meat is commonly contaminated with 3-MCPDE and GE, with GE levels significantly higher than 3-MCPDE levels (P<0.05); the levels of 3-MCPDE and GE in charcoal grilled meat are significantly higher than those in fried meat and electric grilled meat (P<0.05); the chronic dietary exposure risk of 3-MCPDE ingested through grilled and fried meat, and the chronic dietary exposure risk of GE ingested through electric grilled meat and fried meat are acceptable, but the chronic dietary exposure risk of GE ingested through charcoal grilled meat requires attention. Reasonable control of consumption frequency and diversified selection of food types can reduce the risk of chronic dietary exposure.

KEY WORDS: grilled and fried meat; 3-monochloropropanediol esters; glycidyl esters; chronic dietary exposure assessment; gas chromatography-tandem mass spectrometry

0 引　言

3-氯丙醇酯(3-monochloropropanediol esters, 3-MCPDE)和缩水甘油酯(glycidyl esters, GE)是油脂加工过程中产生的典型污染物[1–3], 其潜在健康危害和毒理学特性已成为国际食品安全领域的研究热点和关注焦点。3-MCPDE 和 GE 进入体消化道后, 在脂肪酶作用下可水解转化为 3-氯丙醇(3-monochloropropanediol, 3-MCPD)和缩水甘油(glycidol, Gly)[4–6]。3-MCPD 在动物模型中可诱导肾细胞线粒体损伤[7], 导致肾细胞凋亡和炎症[8], 并可显著降低精子活力[9]。Gly 在动物实验中表现出多器官致癌性, 可显著提高胃、肝、肺等组织的肿瘤发生率[10–11]。3-MCPDE 与 GE 在油脂中常呈现“共存”特征, 且在特定条件下可相互转化[12]。联合暴露实验表明 3-MCPD 和 Gly 在炎症和细

胞毒性方面具有协同作用[13]。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将3-MCPD 和 Gly 分别归为 2B 类(可能对人类致癌的物质)和 2A 类(很可能对人类致癌的物质)致癌物[14–15]。

在食品安全领域, 相关研究多聚焦于食用油[16–18]、焙烤及油炸面制品[19]、婴幼儿配方奶粉[20–22]等, 而针对烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的污染却鲜有报道。烧烤与煎炸肉的原料多为高脂、高蛋白的畜禽肉, 在加工前通常需要腌制处理, 且其加工过程中会持续高温加热, 这些因素均可能显著提升原料组分发生热化学转化的概率, 大幅增加 3-MCPDE 与 GE 的生成风险[23–24]。本研究依据 GB 5009.191—2024《食品安全国家标准 食品中氯丙醇及其脂肪酸酯、缩水甘油酯的测定》建立了 $^{13}C_3$ 同位素稀释-气相色谱-串联质谱(gas chormatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)法, 对采自四川省 5 个地区的 60 份烧烤和煎炸肉样品中 3-MCPDE 和 GE 的含量进行测定, 并结合成年居民的畜禽肉日摄入量, 分别对两种污染物的慢性膳食暴露风险进行评估, 以期为烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的安全监管和居民的合理膳食提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 样品来源

本研究检测的所有样品均为现制现售烧烤和煎炸肉类食品, 于 2025 年 6 月在四川省广元市、眉山市、自贡市、南充市及达州市的餐饮门店、农贸市场熟食摊位及社区小吃摊随机采集。5 个地区一共采集 60 份样品(每个地区 12 份), 其中电烤、炭烤和煎炸样品各 20 份, 单份样品质量约 500 g。每种加工方式对应的 20 份样品包括猪肉 4 份、牛肉 5 份、羊肉 5 份、鸡肉 5 份和鸭肉 1 份。所有样品均在烹饪完成后 30 min 内采集, 采样袋封装后立即运输至实验室, 并同步记录采样地点、采样量、加工方式、食材种类等关键信息。

1.2 仪器与试剂

7890A/7000B 气相色谱-串联质谱仪、DB-5 MS UI 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国 Agilent Technologies 公司); MSA225P-100-DA 电子天平(精度 0.01 mg, 德国 Sartorius Weighing Technology GmbH 公司); H2100R 高速冷冻离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司); MX07R-20-HD2E 冷却水循环仪、Multi Reax 涡旋振荡器(德国 Heidolph 公司); Milli-Q 超纯水机(美国 Merck Millipore 公司); HM100 刀式研磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司); DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); N-EVAP^{TM}112 氮吹仪(美国 Organomation Associates. Jnc 公司); Flex-MVP 全自动真空平行浓缩仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)。

空白食用油(福州勤鹏生物技术有限公司); 食用油中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯质控样(北京曼哈格生物技术有限公司); 3-氯-1,2-丙二醇棕榈酸二酯、$^{13}C_3$-3-氯-1,2-丙二醇棕榈酸二酯、缩水甘油棕榈酸酯、D_5-缩水甘油棕榈酸酯(纯度≥96%, 加拿大多伦多研究化学公司); 甲醇、丙酮、甲苯、甲基叔丁基醚(色谱纯, 德国 Sigma 公司); 异辛烷(色谱纯, 天津市康科德科技有限公司); 硫酸、氢氧化钠[优级纯, 重庆川东化工(集团)有限公司]; 溴化钠、石油醚、乙二醇(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司); 无水硫酸钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 苯硼酸(纯度 99.5%, 上海麦克林生化科技股份有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

样品送达实验室后, 剔除骨头、烧烤签等不可食用部分, 均质化处理后, 称取 10.0 g 至 50 mL 塑料离心管中, 用 50 mL 石油醚分两次提取脂肪, 每次用量 25 mL, 横向以 120 r/min 的速度振荡 2 h, 合并提取液至浓缩杯中, 减压浓缩至体积基本不变后, 用少量石油醚将脂肪转移至 15 mL 玻璃试管中, 氮吹至体积不变后, 置于 100 ℃烘箱加热 1 h, 冷却至室温后称重, 计算脂肪含量。准确称取约 0.1 g 所得脂肪至 15 mL 离心管内, 准确加入内标工作液后, 按 GB 5009.191—2024 中第二篇第一法中所描述的步骤进行水解、液-液萃取净化和衍生化, 采用 GC-MS/MS 法进行定性分析和定量测定。标准系列与样品脂肪提取物同步处理。

1.3.2 仪器条件

色谱柱: DB-5 MS UI 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样量: 1 μL, 不分流进样; 溶剂延迟时间: 5 min; 电离源: 电子轰击(electron impact, EI)离子源; 电离能量: 70 eV; 离子源温度: 250 ℃; 传输线温度: 300 ℃; 监测模式: 多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM); 进样口升温程序: 80 ℃保持 0 min, 以 300 ℃/min 升温至 165 ℃, 保持 10 min, 再以 300 ℃/min 升温至320 ℃, 保持8 min; 色谱柱升温程序: 70 ℃保持2 min, 以20 ℃/min升温至200 ℃, 再以40 ℃/min升温至300 ℃, 保持 4 min。3-MCPD、Gly 转化产物 3-溴丙醇(3-monobromopropanediol, 3-MBPD)及相应内标的 MRM 监测参数见表 1。

1.3.3 质量控制

实验前首先对分析方法进行确证。实验全过程实施严格的质量控制措施, 包括空白试验(每批次)、20%平行样检测、加标回收实验以及质控样品测定。

1.4 慢性膳食暴露评估

本研究基于通过食物摄入的 3-MCPDE 和 GE 分别完全水解为 3-MCPD 和 Gly 并 100%被吸收的最坏假设对其慢性膳食暴露风险进行评估。采用点估计法[25]按公式(1)

表 1　3-MCPD、3-MBPD 及相应内标的 MRM 监测参数
Table 1　MRM monitoring parameters for 3-MCPD, 3-MBPD and corresponding internal standards

化合物	前级离子 (m/z)	产物离子 (m/z)	碰撞电压 /eV
3-MCPD	196	147*	8
	198	147	8
	198	104	14
3-MBPD	240	147*	8
	242	147	8
$^{13}C_3$-3-MCPD	199	149*	8
	201	149	8
	203	107	14
D_5-3-MBPD	245	150*	8
	247	150	8
$^{13}C_3$-3-MBPD	243	149*	8

注: *为定量离子对。

计算 3-MCPDE 和 GE 的慢性每日摄入量(chronic daily intake, CDI)。

$$\mathrm{CDI}=\frac{c\times m}{w\times 1000} \tag{1}$$

式中: CDI 为成年个体每日每千克体重通过烧烤和煎炸肉摄入 3-MCPDE 或 GE 的量, μg • kg^{-1} • d^{-1}; c 为样品中 3-MCPDE 或 GE 的含量, μg/kg; m 为烧烤及煎炸肉的日摄入量, g/d; w 为体质量, kg; 1000 为换算系数。

鉴于欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)已制定了 3-MCPD 的每日耐受摄入量(tolerated daily intake, TDI) (2 μg • kg^{-1} • d^{-1})[26], 3-MCPDE 的慢性膳食暴露风险通过危害商(hazard quotient, HQ)[27]进行评估。HQ>1 时, 说明存在风险, 且数值越大, 表明风险越大; HQ≤1 表明风险处于可接受水平。HQ 按公式(2)计算。

$$\mathrm{HQ}=\frac{\mathrm{CDI}}{\mathrm{TDI}} \tag{2}$$

因目前尚未建立 GE 的 TDI, GE 的慢性膳食暴露风险通过暴露边界(margin of origin, MOE)值[16,20]进行评估。MOE≥10000 表示健康风险处于可接受; MOE<10000 表示健康风险需要引起关注。MOE 按公式(3)计算。

$$\mathrm{MOE}=\frac{\mathrm{BMDL_{10}}}{\mathrm{CDI}}\times 1000 \tag{3}$$

式中: $BMDL_{10}$为 2016 年联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint Food and Agriculture Organization/World Health Organization Expert Committee on Food and Additives, JECFA)制定的 Gly 的基准剂量可信区间下限值(benchmark dose lower confidence limit 10%), 取值 2.4 mg • kg^{-1} • d^{-1}[28]。

1.5　数据处理

本研究采用 WPS Office 2024 进行数据整理, 采用 SPSS 28.0 软件对样品中 3-MCPDE 和 GE 的检测值进行统计分析。样品中 3-MCPDE 和 GE 的含量分别以 3-MCPD 和 Gly 计。因未检出(not detected, ND) 3-MCPDE 和 GE 的样品数量占总样品数量的比例均小于 60%, 根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的数据处理原则, ND 数据以检出限(limit of detection, LOD)的 1/2 代入统计分析[29]。采用 Shapiro-Wilk 检验对含量检测数据的分布进行评价; 采用 Sperman 检验对含量水平的相关性进行分析; 采用卡方检验对 3-MCPDE 和 GE 的检出率进行比较, 但对于理论频数小于 5 的情况, 采用 Fisher 精确检验进行比较; 采用 Mann-Whitney U 检验对样本总体中两种污染物的含量水平和不同加工方式样品中每种污染物的含量水平进行比较, 以 P<0.05 为差异具有统计学意义。

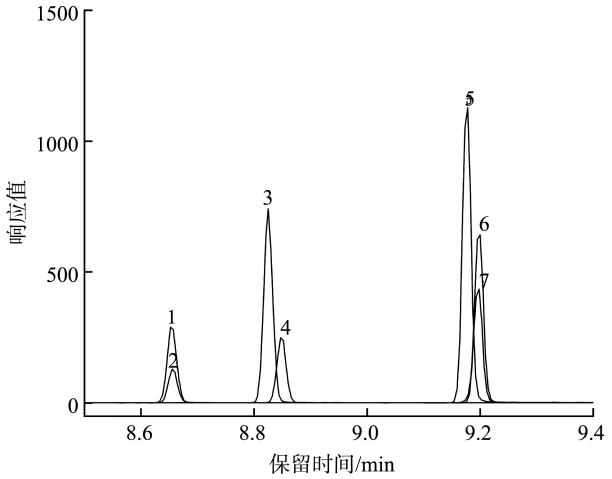
2　结果与分析

2.1　分析方法的确证

在 5.00~400 ng 范围内, 3-MCPDE 和 GE 的质量与目标物和相应内标定量离子峰面积的比值均呈现良好的线性关系, 两者的相关系数(r)均大于 0.9998。本研究以 0.1 g 的脂肪取样量为基准, 通过向阴性样品加标, 分别以信噪比(signal-to-noise ratio, S/N)≥3 和 S/N≥10 来评估方法的 LOD 和定量限(limit of quantitation, LOQ)。结果显示, 3-MCPDE 和 GE 的 LOD 均为 0.01 mg/kg 脂肪, LOQ 均为 0.03 mg/kg 脂肪。向阴性样品中添加高、中、低 3 个水平的目标物, 每个水平平行制备 6 份, 计算回收率和相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)以评估方法的准确度和精密度。3-MCPDE 在 0.20、1.00 和 3.00 mg/kg 加标水平下的回收率为 94.6%~102%, RSDs 为 0.8%~2.7%; GE 在 0.20、2.00 和 4.00 mg/kg 加标水平下的回收率为 95.3%~103%, RSDs 为 0.7%~2.8%, 表明该方法具有良好的准确度和精密度。目标物及相应内标的代表性 MRM 色谱图见图 1。

2.2　烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的总体污染状况

本次调查共检测 60 份烧烤和煎炸肉样品。样品脂肪含量范围为 3.5~45.7 g/100 g, 平均值为(19.0±11.8) g/100 g, P_{50} 为 15.6 g/100 g; 3-MCPDE 的检出率为 73.3%, 含量范围为 ND~319.9 μg/kg, 平均值为(57.6±75.8) μg/kg, P_{50} 为 29.3 μg/kg; GE 的检出率为 75.0%, 含量范围为 ND~7213.5 μg/kg, 平均值为(767.1±1710.3) μg/kg, P_{50} 为 60.4 μg/kg。样品中 3-MCPDE 和 GE 的检出率无显著差异(χ^2=0.04, P>0.05), 但 GE 的含量水平显著高于 3-MCPDE (U=1027.5, P<0.05)。样品中 3-MCPDE 和 GE 含量之间呈现一定的相关性(r^2=0.63, P<0.001), 但各自与脂肪含量之间没有明显的相关关系。



注: 1. $^{13}C_3$-3-MCPDE; 2. 3-MCPDE; 3. D_5-2-MCPDE; 4. 2-MCPDE; 5. D_5-GE; 6. GE; 7. $^{13}C_3$-3-MBPD。2-MCPDE 为 2-氯丙醇酯(2-monochloropropanediol esters), 在本研究中同步检测, 但因其毒性相对较小、检出含量较低且无毒理学参考阈值用于暴露评价, 因此在本研究中未作报告和分析。D_5-2-MCPDE 为 2-MCPDE 的内标物。

图 1 目标物及相应内标的代表性 MRM 色谱图

Fig.1 Representative MRM chromatogram of analytes and corresponding internal standards

2.3 不同加工方式烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 污染状况

本次调查共检测煎炸肉样品、炭烤肉样品和电烤肉样品各 20 份。不同加工方式烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的检测结果见表 2。炭烤、煎炸和电烤肉中 3-MCPDE 的检出率分别为 85.0%、95.0%和 40.0%, P_{50} 含量水平分别为 93.3 μg/kg、31.6 μg/kg 和 ND; GE 的检出率分别为 90.0%、85.0%和 50.0%, P_{50} 含量水平分别为 1236.2、25.3 和 6.9 μg/kg。炭烤肉和煎炸肉样品中 3-MCPDE 和 GE 的检出率均无显著差异, 且均显著高于电烤肉样品中对应目标物的检出率(3-MCPDE: 炭烤 *vs* 煎炸: χ^2=0.89, P>0.05; 煎炸 *vs* 电烤: χ^2=11.97, P<0.05; GE: 炭烤 *vs* 煎炸: χ^2=0.29, P>0.05; 煎炸 *vs* 电烤: Fisher 精确检验, P<0.05); 炭烤肉中 3-MCPDE的含量显著高于煎炸肉(U=115, P<0.05), 而煎炸肉中 3-MCPDE 的含量显著高于电烤肉(U=102, P<0.05); 炭烤肉中 GE 的含量显著高于电烤肉(U=60, P<0.05)和煎炸肉(U=55, P<0.05), 而煎炸肉和电烤肉中 GE 的含量差异无统计学意义(U=135, P>0.05)。

2.4 不同地区烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 污染状况

本研究的样品来源于四川省内不同方位的代表性地区, 各地区烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的检测结果见表 3。因不同地区的样本量有限, 且各地区样品的食材组成差异较大, 本研究仅对 3-MCPDE 和 GE 的检测数据进行呈现, 暂未开展差异性统计分析。后续研究需进一步扩大样本采集规模, 并通过优化采样策略以提升数据的代表性与可比性, 从而系统阐明不同地区烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 含量水平的真实差异。

2.5 3-MCPDE 和 GE 慢性膳食暴露风险评估

考虑到烧烤和煎炸肉主要消费者为成年人群, 本研究仅对成年居民摄入 3-MCPDE 和 GE 的慢性膳食暴露风险进行评估, 并设定成年人的体质量为 60 kg。《中国居民膳食指南(2022)》推荐的畜禽肉日摄入量为 40~75 g[30], 但中国居民营养与健康状况监测报告显示城市居民和农村居民畜禽肉消费量分别为 98.0 g/d 和 81.1 g/d[31]。基于以上数据, 本研究在评估 3-MCPDE 与 GE 的慢性膳食暴露风险时, 假定成年居民每日畜禽肉消费量为 100 g, 且均以烧烤或煎炸的形式摄入。统计学检验结果显示 3-MCPDE 和 GE 的检测值均不符合正态分布, 因此采用 3-MCPDE 和 GE 检测值的中位数(P_{50})评估慢性膳食暴露风险。不同加工方式烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的 P_{50} CDI 及对应的 HQ 或 MOE 计算结果见表 4 和表 5。

表 2 不同加工方式烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的检测结果

Table 2 Determination results of 3-MCPDE and GE in grilled and fried meat processed using different techniques

加工方式	3-MCPDE				GE			
	检出率/%	最大值/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	P_{50}/(μg/kg)	检出率/%	最大值/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	P_{50}/(μg/kg)
炭烤	85.0	319.9	108.5±97.7	93.3	90.0	7213.5	2116.1±2441.3	1236.2
煎炸	95.0	255.9	50.9±56.9	31.6	85.0	1204.0	130.5±275.4	25.3
电烤	40.0	51.0	13.5±18.5	ND	50.0	493.7	54.7±111.2	6.9

表 3 不同地区烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 和 GE 的检测结果

Table 3 Determination results of 3-MCPDE and GE in grilled and fried meat from different regions

地区	3-MCPDE			GE		
	检出率/%	最大值/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	检出率/%	最大值/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)
达州	80.0	94.9	33.3±35.1	75.0	1364.8	330.0±530.5
广元	90.0	319.9	81.1±91.4	95.0	4132.4	845.8±1387.6
南充	90.0	296.6	64.1±102.0	100.0	7213.1	1204.0±2693.3
自贡	75.0	255.9	54.9±75.3	75.0	1777.4	292.4±531.6
眉山	85.0	180.0	54.9±63.1	85.0	6943.2	1164.4±2225.3

表 4　不同加工方式烧烤和煎炸肉中 3-MCPDE 的慢性膳食暴露评估结果

Table 4　Chronic dietary exposure assessment results of 3-MCPDE in grilled and fried meat processed using different techniques

加工方式	样品数量	CDI/(μg • kg^{-1} • d^{-1})		HQ		HQ≥1 样品占比/%
		最大值	P_{50}	最大值	P_{50}	
炭烤	20	0.533	0.155	0.267	0.078	0
煎炸	20	0.427	0.053	0.213	0.026	0
电烤	20	0.085	0	0.042	0	0

表 5　不同加工方式烧烤和煎炸肉中 GE 的慢性膳食暴露评估结果

Table 5　Chronic dietary exposure assessment results of GE in grilled and fried meat processed using different techniques

加工方式	样品数量	CDI/(μg • kg^{-1} • d^{-1})		MOE		MOE≤10000 样品占比/%
		最大值	P_{50}	最小值	P_{50}	
炭烤	20	12.022	2.060	200	1165	80.0
煎炸	20	2.007	0.101	1196	23762	25.0
电烤	20	0.823	0.011	2917	210111	10.0

由表 4 可知, 以每日 1 次、每次 100 g 的消费频率和消费量计, 成年居民通过炭烤、煎炸和电烤肉摄入 3-MCPDE 的 P_{50} CDI 分别为 0.155、0.053 和 0 μg • kg^{-1} • d^{-1}, 对应的 HQ 分别为 0.078、0.026 和 0; 所有样品中 3-MCPDE 对应的 HQ 值均小于 1, 提示经烧烤或煎炸肉摄入 3-MCPDE 的水平处于安全阈值以内, 不会对人体健康造成危害。由表 5 可知, 成年居民通过炭烤、煎炸和电烤肉摄入 GE 的 P_{50} CDI 分别为 2.060、0.101 和 0.011 μg • kg^{-1} • d^{-1}, 对应的 MOE 值分别为 1165、23762 和 210111。炭烤、煎炸和电烤样品中均有不同比例样品 GE 的 MOE 值小于 10000, 提示烧烤及煎炸肉中的 GE 可能具有潜在健康风险; 电烤和煎炸肉中 GE 的 P_{50} MOE 值大于 10000, 表明经电烤和煎炸肉摄入 GE 的慢性膳食暴露风险处于可接受水平, 而炭烤肉样品中 GE 的 P_{50} MOE 值远小于 10000, 表明该类制品中 GE 的潜在健康风险最值得关注。

鉴于前述评估中 CDI 的计算是基于“每日 1 次摄入 100 g 烧烤和煎炸肉”的假设场景, 与实际膳食消费情形存在一定偏差, 可能高估炭烤肉中 GE 对一般消费人群的健康风险, 本研究进一步计算了较低消费频率下炭烤肉样品中 GE 的 P_{50} CDI 及其对应的 MOE, 以期得到更贴合实际消费情况的结论。结果显示: 按每周消费 3 次、每周消费 1 次和每两周消费 1 次的频率计, 炭烤肉样品中 GE 对应的 P_{50} MOE 值分别为 2718、8155 和 16310, 表明合理控制消费频率可有效降低通过炭烤肉中 GE 的慢性膳食暴露风险。

另外, 本研究进一步量化了不同食材种类的炭烤肉对成年人群 GE 暴露量的贡献。评估结果显示, 炭烤羊肉对 GE 的总暴露量贡献最大(45%), 其次为猪肉(23%)、牛肉(17%)、鸡肉(12%)和鸭肉(3%), 表明炭烤羊肉可能是主要的风险来源。

3　讨论与结论

烧烤和煎炸食品在加工过程中可能产生多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、杂环胺(heterocyclic amines, HCAs)、3-MCPDE 和 GE 等多种具有致癌性的污染物。针对烧烤和煎炸肉中 PAHs 与 HCAs 已有较为成熟的研究[32−35], 但对于 3-MCPDE 和 GE 的污染状况及膳食暴露风险报道较少。本研究按照食品安全国家标准建立了 GC-MS/MS 法对采自四川省 5 个代表性地区的 60 份烧烤及煎炸肉样品中 3-MCPDE 和 GE 的含量水平进行检测, 并初步评估了其慢性膳食暴露风险。

检测结果显示, 烧烤和煎炸畜禽肉中普遍存在 3-MCPDE 和 GE 污染, 且 3-MCPDE 和 GE 的检出率相当, 提示两种污染物通常同时存在, 这与油炸和膨化食品[36]、婴幼儿配方食品[21]中的研究发现一致。本研究发现 3-MCPDE 和 GE 的污染水平之间存在一定的相关性, 但均与脂肪含量无显著的相关关系, 这与油炸面制品调查中的发现有所不同[19], 可能是因为油炸面制品所用油脂以植物油为主, 其甘油三酯含量较高, 为 3-MCPDE 和 GE 的生成提供了充足前体; 而烧烤及煎炸肉品中的油脂以动物油脂为主, 不仅饱和脂肪酸占比高、甘油三酯结构更稳定, 且食材本身蛋白质含量较高, 加热过程中会发生油脂与蛋白质的相互作用, 使反应体系更复杂, 一定程度上甚至可能会抑制 3-MCPDE 和 GE 的产生。

采用马弗炉模拟不同加热条件考察不同种类肉糜中 3-MCPDE 和 GE 形成规律的研究证实, 脂质氧化是热加工肉制品中这些污染物形成的关键驱动因素[37]。对油炸和烘焙过程中 3-MCPDE 和 GE 生成的研究显示, 加工温度、持续时间、前体物质存在及其协同效应与这些污染物的形成密切相关[38]; 反复加热会显著提高 3-MCPDE 的含量水平[39], 但烧烤和煎炸工艺复杂、涉及因素多, 加工过程对 3-MCPDE 和 GE 生成的影响并无明确规律[18], 初步猜测食材基质、加工温度、加热时长和氯离子含量可能是影响 3-MCPDE 和 GE 产生的主要因素。本研究发现炭烤肉中 3-MCPDE 的含量水平最高, 其次为煎炸肉和电烤肉, 三者

彼此之间的差异均具有统计学意义；炭烤肉中 GE 的含量水平显著高于电烤肉和煎炸肉($P<0.05$)，而电烤肉和煎炸肉中 GE 含量水平无显著差异($P>0.05$)。初步分析认为这可能与炭烤工艺中温度相对较高，食材受热不均匀、加热时间长有关。膳食暴露风险评估结果显示，对于一般消费人群而言，通过烧烤和煎炸肉摄入的 3-MCPDE、通过煎炸和电烤肉摄入的 GE 所带来的健康风险处于可接受范围，但炭烤肉中的 GE 污染对健康的潜在危害需加以关注。从食材角度分析，炭烤羊肉对炭烤肉中 GE 的慢性膳食暴露风险贡献比最大。

本研究中 3-MCPDE 和 GE 的含量水平测定及膳食暴露风险评估存在一定的不确定性：(1)样品数量有限，且不同种类食材数量不够均衡，可能导致含量水平比较时产生一定偏倚；(2)采样范围不够广泛，检测结果不能全面反映四川省内烧烤及煎炸制品中 3-MCPDE 和 GE 的整体污染状况；(3)膳食暴露风险评估基于假定消费场景模拟开展，与实际膳食消费模式存在偏差，可能高估或者低估 3-MCPDE 和 GE 的慢性膳食暴露风险。

基于本研究的发现，提出以下针对性建议：(1)在制作烧烤和煎炸食品的过程中，可以通过控制加热温度、缩短加工时长、降低食盐用量等手段，减少 3-MCPDE 和 GE 的污染；(2)消费者应尽量减少炭烤肉的食用频次，优先选择电烤或煎炸制品；同时，在食材选择上应保持多样化，以降低慢性膳食暴露风险。(3)开展更为深入的研究，如扩大样品覆盖范围以明确不同地区、不同加工方式下相关食品的污染特征，同时开展污染物联合暴露风险评估等，为烧烤和煎炸肉的安全监管提供科学依据和技术支撑。

参考文献

[1] JI YR, LAN DM, WANG WF, *et al*. The formation of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters during heat-induced processing using an olive-based edible oil [J]. Foods, 2022, 11(24): 4073.

[2] WANG SJ, LIU GQ, CHENG WW. Chloride-mediated co-formation of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters in both model vegetable oils and chemical model systems [J]. Food Research International, 2021, 140: 109879.

[3] 王风艳, 程倩, 陈焱, 等. 食用油加工过程中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯生成及脱除研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 48–52.
WANG FY, CHENG Q, CHEN Y, *et al*. Generation and removal of 3-monochloropropane-1,2-diol fatty acid esters and glycidyl esters in oil processing [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(5): 48–52.

[4] MATTHÄUS B, SCHOLZ A, BÜSCHER A, *et al*. Occurrence and dietary exposure of 3-MCPD esters and glycidyl esters in domestically and commercially prepared food in Singapore [J]. Foods, 2023, 12(23): 4331.

[5] 郝宇, 马艺荧, 于立涛, 等. 气相色谱-串联质谱法测定婴幼儿配方乳粉中的 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯及其风险评估[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 337–344.
HAO Y, MA YY, YU LT, *et al*. Determination and health risk assessment of 3-chloropropanol and glycidyl esters in infant formula milk powder by gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Science, 2023, 44(8): 337–344.

[6] ONAMI S, CHO YM, TOYODA T, *et al*. Orally administered glycidol and its fatty acid esters as well as 3-MCPD fatty acid esters are metabolized to 3-MCPD in the F344 rat [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2015, 73(3): 726–731.

[7] GUAN S, WANG Z, ZHANG R, *et al*. 3-MCPD induced mitochondrial damage of renal cells via the rhythmic protein BMAL1 targeting SIRT3/SOD2 [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(39): 14351–14364.

[8] ZHANG R, GUAN S, MENG Z, *et al*. Ginsenoside Rb1 alleviates 3-MCPD-induced renal cell pyroptosis by activating mitophagy [J]. Food and Chemical Toxicology, 2024, 186: 114522.

[9] XING H, CHEN S, WANG X, *et al*. 3-Monochloropropane-1,2-diol causes spermatogenesis failure in male rats via Sertoli cell dysfunction but not testosterone reduction [J]. Toxicology Letters, 2022, 360: 1–10.

[10] National Center for Biotechnology Information. Glycidol [EB/OL]. (2021-12-07) [2025-09-15]. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK590789/?report=reader

[11] AASA J, GRANATH F, TÖRNQVIST M. Cancer risk estimation of glycidol based on rodent carcinogenicity studies, a multiplicative risk model and *in vivo* dosimetry [J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 128: 54–60.

[12] 李荷丽, 程雅晴, 贝君, 等. 食品中氯丙醇脂肪酸酯风险及应对措施概述[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 7043–7051.
LI HL, CHENG YQ, BEI J, *et al*. Review on risk and countermeasures of chloropropanol esters in foodstuffs [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(17): 7043–7051.

[13] LIU PW, LI CL, HUANG KC, *et al*. 3-MCPD and glycidol coexposure induces systemic toxicity and synergistic nephrotoxicity via NLRP3 inflammasome activation, necroptosis, and autophagic cell death [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 405: 124241.

[14] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some chemicals present in industrial and consumer products, food and drinking-water [J]. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013, 101: 9–549.

[15] IARC. Some industrial chemicals [J]. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2000, 77: 9–529.

[16] 宇盛好, 彭少杰. 上海市市售食用植物油中缩水甘油酯的污染水平和膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 52–58.
YU SH, PENG SJ. Contamination level and dietary exposure assessment of glycidyl esters in edible vegetable oils sold in Shanghai [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 52–58.

[17] 刘卿, 周萍萍, 杨大进. 2015—2017 年中国市售食用植物油中氯丙醇酯和缩水甘油酯的污染状况[J]. 卫生研究, 2021, 50(1): 75–78.
LIU Q, ZHOU PP, YANG DJ. Chloropropanol and glycidyl esters content in edible vegetable oils in China in 2015—2017 [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(1): 75–78.

[18] AHMAD-TARMIZI AH, KUNTOM A. The occurrence of 3-monochloropropane-1,2-diol esters and glycidyl esters in vegetable oils during frying [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022,

62(12): 3403–3419.

[19] 宋迎春, 周鸿, 袁娅, 等. 江西省焙烤及油炸食品中氯丙醇酯污染调查及暴露风险评估[J]. 应用预防医学, 2022, 28(3): 237–240.
SONG YC, ZHOU H, YUAN Y, *et al*. Investigation and exposure risk assessment of chloropropanol ester contamination in baked and fried foods in Jiangxi Province [J]. Journal of Applied Preventive Medicine, 2022, 28(3): 237–240.

[20] 秦璐昕, 罗宝章, 蔡华, 等. 上海市婴幼儿配方乳粉中 3-氯丙醇酯污染的暴露风险评估[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(6): 700–704.
QIN LX, LUO BZ, CAI H, *et al*. Risk assessment of dietary exposure to 3-monochloropropane-1,2-diol esters in infant formula powders in Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(6): 700–704.

[21] 何华丽, 樊继彩, 汪大方, 等. 婴幼儿配方奶粉中氯丙醇酯和缩水甘油酯污染状况及暴露风险评估[J]. 卫生研究, 2025, 54(1): 136–140.
HE HL, FAN JC, WANG DF, *et al*. Detection and exposure risk assessment of chloropropanol ester and glycidyl ester in infant formula milk powder [J]. Journal of Hygiene Research, 2025, 54(1): 136–140.

[22] 袁蕊, 崔霞, 刘平, 等. 2021 年北京市售婴幼儿配方奶粉中氯丙醇酯和缩水甘油酯污染状况及暴露风险初步评估[J]. 卫生研究, 2022, 51(4): 645–649, 679.
YUAN R, CUI X, LIU P, *et al*. Contamination characteristics and preliminaery exposure risk assessment of chloropropanol esters and glycidyl esters in infant formula sold in Beijing in 2021 [J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(4): 645–649, 679.

[23] HUANG ZX, XIE D, CAO ZY, *et al*. The effects of chloride and the antioxidant capacity of fried foods on 3-chloro-1,2-propanediol esters and glycidyl esters during long-term deep-frying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 45: 111511.

[24] ZHANG JL, ZHANG WD, ZHANG YZ, *et al*. Effects of food types, frying frequency, and frying temperature on 3-monochloropropane-1,2-diol esters and glycidyl esters content in palm oil during frying [J]. Foods, 2021, 10(10): 2266.

[25] 罗祎, 吴永宁. 食品安全风险分析化学危害评估[M]. 北京: 中国标准出版, 2012.
LUO Y, WU YN. Food safety risk analysis chemical hazard assessment [M]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

[26] EFSA Scientific Committee. Update: Guidance on the use of the benchmark dose approach in risk assessment [J]. EFSA Journal, 2017, 15(1): 4658–4741.

[27] 符文卓, 朱泽婷, 屠嘉欣, 等. 我国食品全氟化合物的污染及人群膳食暴露风险评估研究进展[J]. 环境与职业医学, 2025, 42(1): 30–37.
FU WZ, ZHU ZT, TU JX, *et al*. Per- and polyfluoroalkyl substances in China: Food contamination and human dietary exposure risk assessment [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(1): 30–37.

[28] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Evaluation of certain contaminants in food: Eighty-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (WHO Technical Report Series 1002) [R]. Rome: WHO, 2017.

[29] GEMS/Food-EURO. Second workshop on reliable evaluation of low-level contamination of food-report of a workshop in the frame of GEMS/Food- EURO [Z]. Kulmbach (Germany): WHO, 1995.

[30] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
Chinese Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents (2022) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.

[31] 赵丽云, 何宇纳. 2015—2017 年中国居民与营养健康状况监测报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
ZHAO LY, HE YN. Monitoring report on Chinese residents and nutritional health status from 2015 to 2017 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.

[32] 曾庆红, 朱茱, 王珺冀, 等. 烧烤肉中多环芳烃和杂环胺的污染水平及健康风险评估[J]. 微量元素与健康研究, 2025, 42(3): 9–13.
ZENG QH, ZHU Z, WANG JJ, *et al*. Contamination levels and health risk assessment of PAHs and HAs in grilled meat products [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2025, 42(3): 9–13.

[33] 薛桂中, 乔明武, 黄现青, 等. 烧烤肉加工中多环芳烃和杂环胺形成途径及其防控方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(2): 293–301.
XUE GZ, QIAO MW, HUANG XQ, *et al*. Progress of polycyclic aromatic hydrocar-bons and heterocyclic amines generation and preventions in grilled meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(2): 293–301.

[34] DU W, JIANG S, LEI Y, *et al*. Occurrence, formation mechanism, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled food [J]. Ecotoxicological and Environmental Safety, 2025, 293: 118046.

[35] HE X, LI B, YU X, *et al*. Inhibiting effects of ginger and rosemary on the formation of heterocyclic amines, polycyclic aromatic hydrocarbons, and trans fatty acids in fried pork balls [J]. Foods, 2022, 11(23): 3767.

[36] 杨秋月, 孙仕萍, 陈琪, 等. 油炸和膨化食品中氯丙醇酯及缩水甘油酯污染调查研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(3): 252–257.
YANG QY, SUN SP, CHEN Q, *et al*. Contamination analysis of chloropropanol esters and glycidyl esters in fried food and puffed food [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(3): 252–257.

[37] XUAN TC, CHANG YH, WANG SC, *et al*. Effects of oven heating on the formation of glycidyl esters and 3-monochloropropanediol esters in various meats [J]. Food Chemistry, 2025, 489: 145068.

[38] GOH KM, WONG YH, TAN CP, *et al*. A summary of 2-, 3-MCPD esters and glycidyl ester occurrence during frying and baking processes [J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 460–469.

[39] NAMBIAR VK, MUDLIAR V, SALABABA I. Analysis of oral cancer carcinogens in repeatedly heated cooking oils [J]. Heliyon, 2025, 11(2): e41858.

(责任编辑: 安香玉　韩晓红)