DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251229004
引用格式: 刘伟, 袁蕊, 王子怡, 等. 食品接触用纸和纸板材料中氯丙醇残留研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 94–100.
LIU W, YUAN R, WANG ZY, *et al*. Research progress on chloropropanol residues in paper and paperboard materials intended for food contact [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 94–100. (in Chinese with English abstract).

食品接触用纸和纸板材料中氯丙醇残留研究进展

刘 伟[1], 袁 蕊[2], 王子怡[1], 屠瑞莹[1], 赵 榕[1], 范 赛[1], 高 洁[3], 杨道远[3*], 隋海霞[3]

(1. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013; 2. 北京市东城区疾病预防控制中心/公共卫生应急管理创新中心, 北京 100050; 3. 国家食品安全风险评估中心, 北京 100022)

摘 要: 氯丙醇类物质(如 3-氯-1,2-丙二醇等)是食品接触用纸和纸板材料中的非有意添加污染物, 具有多种毒性, 其主要来源于造纸工艺中用到的聚酰胺环氧氯丙烷树脂类湿强剂在合成过程中的副反应。氯丙醇若未能被有效去除, 可能从食品包装材料迁移至食品中, 危害消费者健康。目前, 我国已建立相关食品安全国家标准, 对纸和纸板材料中残留设定了限量要求。国际上也有类似的风险管理措施。本文对纸和纸板材料中氯丙醇类物质的污染来源、形成机制和监管措施进行梳理, 并对现有食品接触用纸和纸板材料中氯丙醇残留相关研究加以综述, 旨在提高相关行业人员和公众对纸和纸板材料中污染物健康风险的认识, 以便进一步开展相关研究和风险管理, 保护消费者健康。

关键词: 氯丙醇; 纸和纸板材料; 湿强剂; 食品接触材料; 风险管理

Research progress on chloropropanol residues in paper and paperboard materials intended for food contact

LIU Wei[1], YUAN Rui[2], WANG Zi-Yi[1], TU Rui-Ying[1], ZHAO Rong[1], FAN Sai[1], GAO Jie[3], YANG Dao-Yuan[3*], SUI Hai-Xia[3]

(1. *Beijing Center for Disease Prevention and Control*, *Beijing* 100013, *China*; 2. *Beijing Dongcheng District Center for Disease Control and Prevention/Centre for Public Health Emergency Management Innovation*, *Beijing* 100050, *China*; 3. *China National Center for Food Safety Risk Assessment*, *Beijing* 100022, *China*)

ABSTRACT: Chloropropanols (*e.g.*, 3-monochloro-1,2-propanediol) are non-intentionally added contaminants in paper and paperboard materials intended for food contact. They exhibit multiple toxicological effects. These compounds primarily originate from side reactions occurring during the synthesis of wet-strength agents based on polyamide-epichlorohydrin resins, which are commonly used in papermaking processes. If not effectively removed, chloropropanols may migrate from food packaging materials into food, posing potential health risks to consumers.

收稿日期: 2025-12-29
基金项目: 北京市科技计划项目(Z231100004523002); 首都卫生发展科研专项(2024-1G-4391); 东城区卫生科技计划项目(东卫健研[2021]-17)
第一作者: 刘伟(1983—), 男, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全风险监测与评估。E-mail: liuwei_bjcdc@sina.com
***通信作者:** 杨道远(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全风险评估。E-mail: yangdaoyuan@cfsa.net.cn

China has already established relevant national food safety standards that set maximum limits for chloropropanol residues in paper and paperboard intended for food contact. Similar risk management measures have also been implemented internationally. This article reviewed the pollution sources, formation mechanisms and supervision measures of chloropropanols in paper and paperboard materials, and provided an overview of existing research on chloropropanol residues in paper and paperboard intended for food contact. The aim is to enhance awareness among industry stakeholders and the general public regarding the health risks associated with these contaminants, thereby supporting further research and improving risk management to better protect consumer health.

KEY WORDS: chloropropanols; paper and paperboard materials; wet-strength agents; food contact materials; risk management

0　引　言

在食品安全领域，以 3-氯-1,2-丙二醇(3-monochloro-1,2-propanediol, 3-MCPD)为代表的氯丙醇类物质(图 1)是典型的食品加工过程中形成的污染物[1–2]。毒理学研究显示, 3-MCPD 具有肾毒性(最敏感终点为肾小管增生)[3]、神经毒性、生殖毒性及非遗传毒性致癌性[4]; 而其同系物 1,3-二氯-2-丙醇(1,3-dichloro-2-propanol, 1,3-DCP)则具有明确的大鼠致癌性(可能通过遗传毒性机制)[5], 同时存在肝毒性、肾毒性、生殖毒性[6], 以及体外试验显示的致突变性[7]。二者皆为国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)认定的 2B 类(可能对人类致癌)物质[8]。因此, 氯丙醇类物质具有潜在的膳食暴露风险。

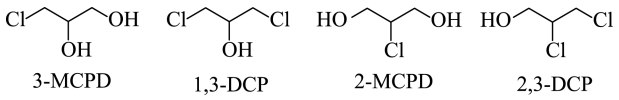


图 1　4 种氯丙醇类化合物的分子结构

Fig.1　Molecular structures of 4 kinds of chloropropanol compounds

膳食来源的氯丙醇类物质主要通过两大加工途径进入食品链。第一个途径源于酸水解植物蛋白(hydrolyzed vegetable protein, HVP)工艺[9]。该工艺可释放更多氨基酸以增强风味, 曾广泛应用于生产酱油、鸡精等食品调味品。但若过程中质量控制不到位, 会在产品中生成游离氯丙醇类物质, 浓度可高达数毫克每千克, 是早期膳食暴露的主要来源[10]。我国于 2018 年颁布了 GB 2717—2018《食品安全国家标准 酱油》, 其中明确了酱油的定义, 排除了“酸水解植物蛋白”这种非发酵配制产品的合法性。2021 年, 国家市场监督管理总局发布《关于加强酱油和食醋质量安全监督管理的公告》(2021 年第 3 号)[11], 进一步明确“酱油生产应当具有完整的发酵酿造工艺, 不得使用酸水解植物蛋白调味液等原料配制生产酱油”。这些监管措施从根本上切断了国产调味品作为氯丙醇类物质主要暴露来源。但在全球范围内, 尤其在发展中国家, 酸水解工艺仍被广泛使用, 依然可能构成健康风险[12]。第二个途径则与植物油(如棕榈油)精炼, 特别是脱臭阶段的高温处理相关[13]。在这个过程中, 油脂中的甘油三酯、部分水解产物(如甘油二酯、单甘酯或游离甘油)与体系中的氯源发生反应生成氯丙醇酯。被人体摄入后, 氯丙醇酯在胃肠道中可被脂肪酶部分水解, 释放出游离 3-MCPD, 从而被吸收并产生毒性效应。氯丙醇酯已被证实广泛存在于消费者日常膳食结构中常见的精炼植物油、烘焙食品、方便面、以及婴儿配方粉中等[14], 该途径已成为当前膳食氯丙醇暴露的主要来源[15–16]。我国在 2025 年 6 月正式实施 GB 31664—2025《食品安全国家标准 食品中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯污染控制规范》, 力求从源头和加工环节系统性降低食品中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成风险, 这是“全过程风险管理”理念的一次有益实践。

除上述两个途径之外, 食品接触材料—特别是纸和纸板材料—是氯丙醇类化合物的另一重要膳食暴露来源[17]。我国是全球最大的纸浆与造纸产品生产国和消费国, 2026 年市场规模预计将达到 1229 亿美元[18], 叠加“禁塑令”等政策的影响, 纸制品的消费量和消费场景呈现逐步扩增趋势[19]。本文将介绍纸和纸板材料中氯丙醇类物质的污染来源、形成机制和监管措施, 并对现有的纸和纸板材料中氯丙醇残留相关研究加以综述, 旨在提高公众和相关行业人员对纸和纸板材料中污染物健康风险的认识, 以便进一步开展相关研究和风险管理, 保护消费者健康。

1　纸和纸板材料中氯丙醇类物质的形成机制

纸和纸板材料中的氯丙醇类物质属于非有意添加物(non-intentionally added substances, NIAS), 其来源是造纸工艺中所添加的湿强剂中未完全去除的副产物。

1.1　湿强剂的作用和分类

湿强剂是在造纸工艺中添加的一类重要的化学助剂, 尤其是在生产耐潮湿的纸和纸板材料过程中必不可少[20]。其主要作用是能够使纸张在湿润或潮湿状态下仍能保留一

定程度的机械强度(特别是抗张强度和耐破度)，防止纸张因吸水而迅速丧失结构完整性。

纸是纤维素纤维通过氢键、机械缠结等作用形成的网络结构材料。由于纤维素具有多孔性和亲水性，遇水后，水分会渗透纤维间隙，破坏纤维间的氢键和静电作用，导致网络结构瓦解，失去干态时的强度。湿强剂通过化学修饰，在纤维之间形成耐水性结合力(如共价键、交联网络等)，抵抗水分对氢键等天然结合力的破坏[21]。

湿强剂主要分为临时湿强剂和永久性湿强剂两大类[22]，核心差异在于湿强度保留时长与作用机制。临时湿强剂[如乙二醛化聚丙烯酰胺(glyoxylated polyacrylamide, GPAM)]多为可生物降解的化学品，易再制浆，但湿强度持续性较短，适用场景多为短期需防水的纸品，如普通纸巾等[23]。而造纸行业中，80%以上采用的是永久性湿强剂[如聚酰胺-环氧氯丙烷树脂(polyamidoamine epichlorohydrin, PAE)]。特别是对于食品接触用纸和纸板材料，采用永久湿强剂能在其接触含水食物或水蒸气后仍能维持较长时间的结构稳定性。

PAE作为应用最为广泛的永久性湿强剂，其核心作用机制是通过树脂-纤维共价键结合与树脂分子自交联，形成抗水稳定结构，维持纸张湿态强度。首先，在造纸的干燥和加热过程中，PAE的阳离子氮丙啶鎓基团与纤维(纤维素、半纤维素)表面的阴离子羧基发生化学反应，形成酯键(共价键)。这种共价键稳定性极强，不易被水破坏，能直接锁定纤维间的连接，替代被水破坏的氢键，从而维持纸张湿态下的结构完整性。此外，PAE分子间可通过自身的氮丙啶鎓基团、羧基和胺基相互反应，发生自交联，形成三维网络结构。该网络会包裹在纤维表面，增强纤维间的连接稳定性，进一步提高湿强度[24]。

1.2 氯丙醇类物质的形成

氯丙醇类物质是在PAE的工业合成过程中产生的有害副产物(图2)[25]。PAE的生产过程包括三步关键反应[26]。第一步，聚氨基多酰胺前驱体己二酸与二乙烯三胺发生缩聚反应，生成水溶性聚氨基多酰胺。此步骤无氯参与，不产生氯丙醇类物质。第二步，聚氨基多酰胺与环氧氯丙烷(表氯醇)在20~40 ℃进行烷基化反应，生成叔胺氯醇中间体。这也是核心副反应环节。表氯醇分子结构含环氧基(三元环)和氯原子，反应中环氧基易开环与胺基结合，但部分表氯醇会发生水解副反应：环氧基被水攻击开环生成3-MCPD。同时，表氯醇分子间可能发生交联副反应，生成1,3-DCP。第三步，环化与交联反应温度升至60~80 ℃时，叔胺氯醇中间体环化生成氮丙啶鎓基团(PAE的核心活性位点)，并发生部分交联。此步骤中，未完全反应的叔胺氯醇中间体可能进一步水解，补充生成少量3-MCPD。

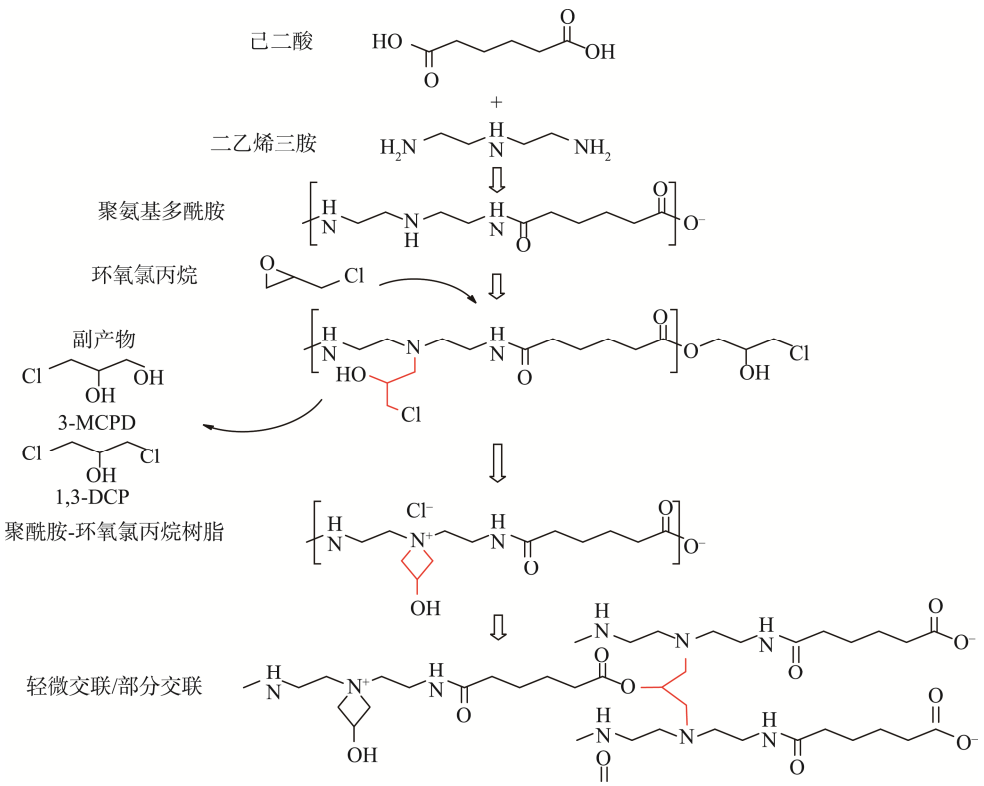


图2 PAE的生产步骤[25]

Fig.2 Steps of PAE production[25]

在此过程中, 诸多因素可能促进氯丙醇类化合物生成。首先, 表氯醇原料中若含杂质(如盐酸、氯离子), 会加速水解副反应, 增加氯丙醇产量。其次, 在第二步烷基化反应中, 温度过高(如超过 40 ℃)或/和反应时间过长, 会促进表氯醇水解和分子间副反应, 导致氯丙醇类物质积累。另外, 反应体系中水分过多, 会增加表氯醇的水解概率, 进一步增加 3-MCPD 的生成量。

如果 PAE 成品中残留的氯丙醇类物质未能得到有效去除, 它们会吸附在纸和纸板材料纤维表面, 进而迁移到所接触的食物中, 对消费者健康产生潜在危害。

2　食品接触用纸和纸板材料中氯丙醇类物质的风险管理

PAE 自 1957 年首次被开发为永久性湿强剂以来, 历经几代更迭, 通过精准控制反应温度(如烷基化 20~40 ℃、环化 60~80 ℃)、减少表氯醇水解和副反应等合成工艺和后处理技术的优化, 3-MCPD 残留量已经可以从 1000 ppm 降低到小于 10 ppm[27]。但是, 鉴于氯丙醇类化合物的毒性, 诸多国家和权威机构都对纸和纸板材料中的氯丙醇类物质残留进行了限量规定。

我国 GB 4806.8—2022《食品安全国家标准 食品接触用纸和纸板材料及制品》是食品接触纸类产品的核心安全标准。其中, 对氯丙醇类物质(3-MCPD 和 1,3-DCP)提出了限量要求, 即水提取液中 3-MCPD 的残留量不超过 12 μg/L, 1,3-DCP 需“未检出”(检出限为 2 μg/L)。德国联邦风险评估研究所(Bundesinstitut für Risikobewertung, BfR)在其发布的食品接触材料建议书中[28], 也有同样的限量要求, 适用场景包括所有食品接触用纸和纸板(BfR XXXVI)、烹饪纸、热滤纸和过滤层(BfR XXXVI/1)、烘焙纸(BfR XXXVI/2)和纤维素吸附垫(BfR XXXVI/3)。尽管欧盟食品安全监管部门(European Food Safety Authority, EFSA)并未针对纸制品中氯丙醇类物质设定具体的残留限量要求, 但这一问题在欧盟范围内也备受关注。在实际操作中, 德国 BfR 的建议值常被相关机构引用为合规参考标准[29]。美国食品安全监管部门(U.S. Food and Drug Administration, FDA)目前没有对纸和纸板材料中 3-MCPD 或 1,3-DCP 设定直接的迁移/残留限量, 而是基于“物质许可”的监管模式, 要求所有用作湿强剂的 PAE 类树脂, 均需符合美国《联邦法规法典》(The Code of Federal Regulations, CFR)第 21 篇 176.170 条(21 CFR 176.170)的要求[30], 如仅作为湿强剂和/或助留剂使用, 在纸和纸板制造的板材成型操作之前使用, 使用水平不超过干纸和纸板纤维重量的 1.5%。

3　纸和纸板材料中氯丙醇类物质的残留研究

3.1　测定方法

与食品类似, 纸和纸板材料中氯丙醇类化合物的残留检测, 最常见的方法是采用酰基化[31–34]或硅烷化[35–36]衍生试剂将目标化合物变为易挥发、热稳定的衍生物, 在气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)[32,37]或气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)[33,35,38]平台开展仪器测定, 可以克服醇类物质分子量较小、极性高、挥发性低、热稳定性差的不足。目前, 纸和纸板材料中残留量检测的标准方法(如 GB 4806.4—2022 附录 C 和 GB/T 43011—2023《纸、纸板和纸制品氯丙醇含量的测定》)也是以此原理为基础开发的[39]。研究人员在目标物的富集和衍生化步骤方面也有一些新的探索[40–41]。

近年来, 基于化学传感器技术的非色谱-质谱测定方法, 已在食品基质中的 3-MCPD 测定中有所发展[42–43]。相关研究也延伸到纸和纸板材料基质中。如 ZHAO 等[44]开发了基于二氧化硅(SiO_2)基分子印迹聚合物复合材料的分析方法, 将分子印迹固相萃取(molecularly imprinted polymer solid-phase extraction, MISPE)的特异性与荧光传感器的快速响应优势相结合, 通过合成以丹磺酰氯为发光基团、邻苯二胺为识别基团的“开关型”荧光传感器, 搭配 SiO_2 为载体的 3-MCPD 特异性分子印迹聚合物作为固相萃取填料, 实现了对 3-MCPD 的高灵敏、高特异性检测。FANG 等[45]开发的方法基于聚多巴胺-聚乙烯亚胺(polydopamine-polyethyleneimine, PDA-PEI)共聚体的荧光传感原理, 借助 PEI 提供的碱性环境促使多巴胺与 PEI 发生迈克尔加成、席夫碱反应形成荧光共聚物, 3-MCPD 的氯原子与共聚物中的氨基发生特异性取代反应, 导致共聚物荧光强度随 3-MCPD 浓度反向线性变化, 通过荧光光谱仪直接检测荧光信号变化即可完成定量。化学传感器技术兼具可视化分析能力与简便操作特性, 从检测原理上简化了操作流程、避免了相对烦琐的衍生化操作、降低了仪器依赖、更加适合于批量筛查, 为 3-MCPD 的高效检测提供了新型技术平台。

3.2　残留和迁移研究

上世纪 90 年代, BODÉN 等[46]开发了同时测定 PAE 湿强树脂纸张中 3-MCPD 和 1,3-DCP 的 GC-MS 分析方法, 该方法适用于含碳酸钙填料、水分含量小于等于 10%的纸张样品, 可有效解决碱性条件下 1,3-DCP 与表氯醇的平衡干扰问题, 用于食品级湿强纸的生产监测。研究中实际纸质样品的 3-MCPD 和 1,3-DCP 残留量分别是 0.63 mg/kg 和 0.42 mg/kg。随后, PACE 等[47]研究了聚乙烯(polyethylene, PE)挤出涂布纸板食品包装中 3-MCPD 的迁移特性。通过比较水溶液萃取和迁移池单面萃取两种实验, 验证了 PE 涂层可作为纸板材料中 3-MCPD 的有效功能屏障, 阻止其向水、3%乙酸、10%乙醇等 4 种食品模拟物迁移(<0.005 mg/kg), 而纸板的水溶液萃取结果显示 3-MCPD 含

量最高达 9.87 mg/kg。MEZOUARI 等[37]的研究发现，第一代 PAE 湿强树脂纸板(3-MCPD 含量为 3.62~23.82 mg/kg、1,3-DCP 含量为 0.47~3.44 mg/kg)与第二代 PEA 湿强树脂纸板(3-MCPD≤0.53 mg/kg、1,3-DCP 未检出)的氯丙醇污染水平差异显著，证实通过优化树脂生产工艺可有效控制污染物生成。同时，研究者提示无涂层边缘会增加污染物迁移风险，需优化涂层工艺。

BECALSKI 等[48]在对加拿大和德国市场多种纸和纸板材料中氯丙醇污染进行检测时，关注了 3-MCPD 的同分异构体 2-MCPD。结果发现在 3-MCPD 普遍存在的前提下，2-MCPD 残留量仅为 3-MCPD 的 0.5%~10%。尽管食品接触用纸来源的氯丙醇占人体总膳食暴露量的比例并不高，但对于某些特定人群，如频繁使用某款高迁移量(最高达 5700 ng/张)咖啡滤纸的消费者，这一来源的 3-MCPD 摄入量在总膳食暴露中所占比例不容忽视。KORTE 等[36]调查了德国市场采集的 674 个纸制品样品。其中，纸吸管的 3-MCPD 超标率(约 55%)和 1,3-DCP 超标率(约 20%)均是最高。研究人员对比了冷水萃取(cold water extraction, CWE)和热水萃取(hot water extraction, HWE)两个条件下氯丙醇的迁移量，发现 HWE 结果显著低于 CWE 结果。这一结果出乎意料，因为 HWE 通常被认为萃取效率更高，是更严格的测试条件。基于此，BfR 在其 XXXVI 系列建议中，将 CWE 列为所有纸和纸板材料中 3-MCPD 和 1,3-DCP 迁移量的标准检测方法。ZHONG 等[49]的研究也进一步验证了 CWE 效率高于 HWE。所不同的是，KORTE 等[36]认为 HWE 萃取量低可能非单纯源于氯丙醇发生水解，更可能是通过未知机制与纸样品中的某种成分发生反应，或被纸纤维吸附、滞留；而 ZHONG 等[49]则认为 80 ℃及以上高温会造成氯丙醇类化合物挥发而导致 HWE 萃取效率低。ZHONG 等[50]的另一项研究调查了食品接触用纸和纸板材料中 4 种氯丙醇类化合物的污染情况。结果表明，纸制品总体检出率为 65.1%，其中 3-MCPD 为 65.1%、1,3-DCP 为 30.2%、2,3-DCP 为 5.6%、2-MCPD 为 0.8%。值得注意的是，之前鲜有关注的 2,3-DCP 在咖啡滤纸、烘焙用纸和一次性包装纸等样品中偶有检出。所有类别中，厨房用纸污染最严重，其氯丙醇检出率 95.0%、3-MCPD 均值 201.9 μg/L，最高值达 728 μg/L。研究人员分析主要原因是厨房用纸需添加大量 PAE 树脂提升湿强度，且质地疏松、接触面积大，易释放氯丙醇。YUAN 等[38]和 WÄLCHLI 等[35]的研究均聚焦直接接触液体食品的纸吸管类产品。总的来说，纸吸管样品中的氯丙醇类化合物残留(以 3-MCPD 和 1,3-DCP 为主)有不同程度的检出。这两项研究中均发现酸性模拟物中氯丙醇的迁移量高于含醇的食品模拟物，提示可能需要评估纸吸管在实际使用时的风险(饮料类通常呈酸性)。对于吸管这类没有聚合物涂层纸制食品接触材料，冷水提取结果可合理估算实际使用中的氯丙醇暴露量，为风险评估提供可靠数据。

4 结束语

食品接触用纸和纸板材料中氯丙醇残留问题已经受到关注。无论是造纸行业还是食品安全领域，都已经采取措施来控制相关污染。现阶段，相关行业要严格执行 GB 4806.4—2022 中氯丙醇类物质的残留限量要求，并继续开发低氯丙醇的环保湿强剂材料。已有研究表明，除 3-MCPD 和 1,3-DCP 外，2-MCPD 和 2,3-DCP 在纸和纸板材料中亦有残留。因此，相关的标准检测方法可考虑将 4 种氯丙醇类物质同步检测。

随着世界范围内限塑令的逐步实施，纸质食品接触材料的应用场景将进一步扩大。因此，建议未来从两个方面更加系统性防范食品接触材料来源的氯丙醇污染。首先，依据氯丙醇的产生机制，进一步研究其他涉及环氧氯丙烷的相关食品接触材料添加剂或加工助剂的使用场景中，氯丙醇副产物的潜在风险，进而优化生产工艺，做好质量控制。其次，随着氯丙醇类物质检测技术的发展，探索基于化学传感器技术的、更加便捷高效的检测方法，以便服务于食品接触材料的监管。

参考文献

[1] The 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: 1002 [R]. Malta: The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2017.

[2] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (Contam), KNUTSEN HK, ALEXANDER J, *et al*. Update of the risk assessment on 3-monochloropropane diol and its fatty acid esters [J]. EFSA Journal, 2018, 16(1): e05083.

[3] CHO WS, HAN BS, NAM KT, *et al*. Carcinogenicity study of 3-monochloropropane-1,2-diol in Sprague–Dawley rats [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(9): 3172–3177.

[4] EISENREICH A, MONIEN BH, GÖTZ ME, *et al*. 3-MCPD as contaminant in processed foods: State of knowledge and remaining challenges [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134332.

[5] RESEARCH & CONSULTING CO (RCC). 104-week chronic toxicity and oncogenicity study with 1,3-dichlor-propan-2-ol in the rat: 017820 [R]. Switzerland: Research & Consulting Co. AG, 1986.

[6] WILLIAMS G, LEBLANC JC, SETZER RW. Application of the margin of exposure (MoE) approach to substances in food that are genotoxic and carcinogenic: Example: (CAS No.96-23-1) 1,3-dichloro-2-propanol (DCP) [J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(1): S57–S62.

[7] ANDRES S, APPEL KE, LAMPEN A. Toxicology, occurrence and risk characterisation of the chloropropanols in food: 2-monochloro-1,3-propanediol, 1,3-dichloro-2-propanol and 2,3-dichloro-1-propanol [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 58: 467–478.

[8] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some chemicals present in industrial and consumer products, food and drinking-water: 101 [R/OL]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2012. https://publications.iarc.fr/125

[9] LEE BQ, KHOR SM. 3-chloropropane-1,2-diol (3-MCPD) in soy sauce: A review on the formation, reduction, and detection of this potential carcinogen [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(1): 48–66.

[10] SYED-PUTRA SS, BASIRUN WJ, ELGHARBAWY AAM, *et al*. 3-Monochloropropane-1,2-diol (3-MCPD): A review on properties, occurrence, mechanism of formation, toxicity, analytical approach and mitigation strategy [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(4): 3592–3615.

[11] 国家市场监督管理总局. 市场监管总局关于加强酱油和食醋质量安全监督管理的公告 [EB/OL]. (2021-06-29) [2025-12-15]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxxgk/fdzdgknr/spscs/art/2023/art_a080738bd2dd457aa30d4a4fbdf53a98.html
State Administration for Market Regulation. Announcement of the state administration for market regulation on strengthening the quality and safety supervision and administration of soy sauce and vinegar. (2021-06-29) [2025-12-15]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxxgk/fdzdgknr/spscs/art/2023/art_a080738bd2dd457aa30d4a4fbdf53a98.html

[12] JI C, PETCHKONGKAEW A, VAN-RUTH S, *et al*. The crucial importance of soy sauce authenticity: Global trade, adulteration risks, and analytical challenges [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 152: 104666.

[13] YUNG YL, LAKSHMANAN S, CHU CM, *et al*. Simultaneous mitigation of 3-monochloropropane 1,2 diol ester and glycidyl ester in edible oils: A review [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2023, 40(9): 1164–1182.

[14] HUANG D, XU X, LYU B, *et al*. Preplanned studies: Exposure to chloropropanols and their fatty acid esters and glycidyl fatty acid esters in the sixth total diet study-China, 2016–2019 [J]. China CDC Weekly, 2024, 6(24): 563–567.

[15] FAN J, ZHANG J, GAO X, *et al*. The food contaminants chloropropanols and chloropropanol esters: A review [J]. Journal of Food Biochemistry, 2025, 2025(1): 4846670.

[16] PERESTRELO S, SCHWERBEL K, HESSEL-PRAS S, *et al*. Occurrence levels of chloropropanols and glycidyl esters in German diets: Data from the first total diet study [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 148: 108144.

[17] KREUZER K, TIETZ T. P26-07 chloropropanols in paper food contact material-a health risk? [J]. Abstracts of the 59th Congress of the European Societies of Toxicology (EUROTOX 2025) Toxicology Addresses Society's Real Life Risks for Sustainable Health and Well Being, 2025, 411: S327–S327b.

[18] Fortune Business Insights. Pulp and paper market size, share & industry analysis, by category [Wrapping & Packaging (Food & Beverage Packaging, Healthcare Packaging, Personal Care Packaging, and Others), Printing & Writing (Books and Publishing, News Print, & Others), Sanitary, and Others], and Regional Forecast, 2025—2035 [EB/OL]. (2025-11-10) [2025-12-01]. https://www.fortunebusinessinsights.com/pulp-and-paper-market-103447

[19] 马迎辉, 杜建章, 陈坤, 等. 食品用纸容器产品质量安全风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 19(15): 244–251.
MA YH, DU JZ, CHEN K, *et al*. Quality and safety risk analysis of food paper containers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 19(15): 244–251.

[20] ESPY HH. The mechanism of wet-strength development in paper: A review [J]. TAPPI Journal, 1995, 78(4): 90–99.

[21] HUANG H, XU C, ZHU X, *et al*. Lignin-enhanced wet strength of cellulose-based materials: A sustainable approach [J]. Green Chemistry, 2023, 25(13): 4995–5009.

[22] SINGH V, BACHALA SK, MADAN M, *et al*. A comprehensive comparison between synthetic and bio-based wet-strength additives for paper manufacturing [J]. Cellulose, 2024, 31(8): 4645–4679.

[23] CHEN Z, ZHANG L, HE Z. Rethinking the determination of wet strength of paper [J]. BioResources, 2018, 13(2): 2184–2186.

[24] FRANCOLINI I, GALANTINI L, REA F, *et al*. Polymeric wet-strength agents in the paper industry: An overview of mechanisms and current challenges [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(11): 9268.

[25] NTIFAFA Y, JI Y, HART PW. Polyamidoamine epichlorohydrin (PAAE) wet-strength agent: Generations, application, performance, and recyclability in paperboard and linerboard [J]. BioResources, 2024, 19(2): 3895–3920.

[26] NTIFAFA Y, JI Y, HART PW. Understanding polyamidoamine epichlorohydrin (PAAE) retention in paper [J]. BioResources, 2024, 19(3): 4568–4589.

[27] CRISP MT, RIEHLE RJ. Regulatory and sustainability initiatives lead to improved polyaminopolyamide-epichlorohydrin (PAE) wet-strength resins and paper products [J]. TAPPI Journal, 2018, 17(9): 519–532.

[28] Federal Institute for Risk Assessment of Germany. BfR recommendation XXXVI on paper and board for food contact as of 01.02.2023.[Z]. 2002.

[29] The European Consumer Organisation. Towards safe and sustainable food packaging: European consumer organisations call for action on single-use tableware made of alternatives to plastic: BEUC-X-2021-050 [R]. Brussels: The European Consumer Organisation (BEUC), 2021.

[30] The Code of Federal Regulations. Title 21 food and drugs, chapter I food and drug administration, department of health and human services, subchapter B food for human consumption, part 176-indirect food additives: Paper and paperboard components [EB/OL]. (2025-12-16) [2025-12-01]. https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-176

[31] 曾坤, 王东旭, 王新财, 等. 盐析辅助液液萃取结合气相色谱-质谱法测定酱油中 4 种氯丙醇[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(11): 182–188.
ZENG K, WANG DX, WANG XC, *et al*. Determination of 4 kinds of chloropropanols in soy sauce by salting-out assisted liquid-liquid extraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(11): 182–188.

[32] 贺江, SHAO SUQIN, 邓爱华, 等. 纸质吸管中氯丙醇含量检测及其向饮料迁移情况研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 132–137.
HE J, SHAO S, DENG AIH, *et al*. The determination of chloropropanols in paper straws and its migration to beverages [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(14): 132–137.

[33] 韩陈, 吴亚平, 孙多志. 气相色谱-串联质谱法测定食品接触用纸制品中 2 种氯丙醇的残留量及其释放规律探讨[J]. 理化检验-化学分册, 2025, 61(7): 824–829.

HAN C, WU YP, SUN DZ. Determination of residues of 2 chloropropanols in food contact paper products by gas chromatography-tandem mass spectrometry and investigation of their release patterns [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2025, 61(7): 824–829.

[34] 曾莹, 陈燕芬, 黄巧, 等. 气-质联用测定食品接触用纸制品中氯丙醇的迁移量[J]. 现代食品科技, 2021, 37(6): 312–319.
ZENG Y, CHEN YF, HUANG Q, *et al*. Determination of migration of chloropropanols from food contact paper products by GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 312–319.

[35] WÄLCHLI C, DANIEL J, BOHNI N. Migration of chloropropanols 3-MCPD and 1,3-DCP from paper straws into food simulants in comparison with cold water extraction [J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2024, 19(4): 377–381.

[36] KORTE R, SCHULZ S, BRAUER B. Chloropropanols (3-MCPD, 1,3-DCP) from food contact materials: GC-MS method improvement, market survey and investigations on the effect of hot water extraction [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(6): 904–913.

[37] MEZOUARI S, LIU WY, PACE G, *et al*. Development and validation of an improved method for the determination of chloropropanols in paperboard food packaging by GC-MS [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2015, 32(5): 768–778.

[38] YUAN R, DING W, SUI H, *et al*. Migration studies of chloropropanols from paper straws: An improved method using GC-MS/MS [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2024, 104(2): 277–290.

[39] Federal Office of Consumer Protection and Food Safety of Germany. Analytical procedure as per §64 LFGB: Bestimmung von 1,3-dichlor-2-propanol und 3-monochlor-1,2-propandiol im wasserextrakt von papier, karton und pappe: B 80.56-2 [Z]. 2002.

[40] HÜBSCHEN M, BRENZ F, SCHMIDT TC. Automated vortex-assisted-liquid-liquid microextraction with injector-based derivatization for GC-MS/MS analysis of 1,3-dichloropropan-2-ol and 3-chloropropane-1,2-diol in food contact paper products [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025, 417(28): 6413–6425.

[41] ZHAO J, WANG X, LI J, *et al*. Factors affecting the leaching of chloropropanols from pulp used in the manufacture of paper food packaging [J]. Foods, 2022, 11(15): 2284.

[42] SAPUTRA HA, ANDREA S, KARIM MM, *et al*. Chemical sensor technology for detection of 3-monochloropropane-1,2-diol in foodstuffs [J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2025, 1: 1–20.

[43] SUTANTI E, MARTOPRAWIRO MA, HARMESA H, *et al*. Designing a high-performance electrochemiluminescence sensor for 3-MCPD using molecularly imprinted polyaniline and computational interaction energy analysis [J]. Microchemical Journal, 2026, 221: 116781.

[44] ZHAO J, XU T, LIU B, *et al*. SiO_2-based molecularly imprinted polymer composites and its application in fluorescence sensor analysis of 3-chloro-1,2-propanediol in paper food contact materials [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 8(1): 33.

[45] FANG M, WANG Z, FU Q, *et al*. Simple and rapid determination of 3-monochloropropane-1,2-diol in food contact papers based on polydopamine-polyethyleneimine copolymerization [J]. Talanta, 2025, 284: 127228.

[46] BODÉN L, LUNDGREN M, STENSIÖ KE, *et al*. Determination of 1,3-dichloro-2-propanol and 3-chloro-1,2-propanediol in papers treated with polyamidoamine-epichlorohydrin wet-strength resins by gas chromatography-mass spectrometry using selective ion monitoring [J]. Journal of Chromatography A, 1997, 788(1): 195–203.

[47] PACE GV, HARTMAN TG. Migration studies of 3-chloro-1,2-propanediol (3-MCPD) in polyethylene extrusion-coated paperboard food packaging [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2010, 27(6): 884–891.

[48] BECALSKI A, ZHAO T, BRETON F, *et al*. 2- and 3-monochloropropanediols in paper products and their transfer to foods [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2016, 33(9): 1499–1508.

[49] ZHONG HN, ZENG Y, YANG DY, *et al*. Investigation of factors influencing the release of chloropropanols (3-MCPD and 1,3-DCP) from food contact paper [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(12): 2036–2044.

[50] ZHONG HN, ZENG Y, ZHU L, *et al*. The occurrence of mono/di-chloropropanol contaminants in food contact papers and their potential health risk [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 101002.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)