DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251225002
引用格式: 邱丹萍, 杨京津, 徐碧瑶, 等. 上海市市售食品接触用纸制品中 3-氯-1,2-丙二醇的迁移水平及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 123–130.
QIU DP, YANG JJ, XU BY, *et al*. Migration levels and risk assessment of 3-chloro-1,2-propanediol in food-contact paper products sold in Shanghai [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 123–130. (in Chinese with English abstract).

上海市市售食品接触用纸制品中 3-氯-1,2-丙二醇的迁移水平及风险评估

邱丹萍, 杨京津, 徐碧瑶, 宋 夏, 张 楠, 蔡 华*, 罗宝章*

[上海市疾病预防控制中心(上海市预防医学科学院)健康危害因素监测与控制所/国家卫生健康委员会食品安全风险评估与标准研制特色实验室, 上海 201107]

摘 要: 目的 了解上海市市售食品接触用纸制品中的 3-氯-1,2-丙二醇(3-chloro-1,2-propanediol, 3-MCPD)的迁移水平, 评估其对人群的健康风险。**方法** 本研究采集了 119 件纸杯、纸碟、纸盘、纸碗等作为样品。依据《2019 年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册(中卷)》, 选择 10%乙醇、4%乙酸、橄榄油、异辛烷 4 种食品模拟物进行迁移实验, 分别采用欧盟食品接触材料的极端假设法和美国食品药品监督管理局(U.S. Food and Drug Administration, FDA)的消费因子评估法, 再结合不同迁移物的分配系数开展综合评估。**结果** 食品接触用纸制品中 3-MCPD 的检出率、超标率、迁移量在不同食品模拟物中差异均有统计学意义(χ^2=113.24, χ^2=119.58, χ^2=115.21, P<0.001), 水性(10%乙醇)和酸性(4%乙酸)模拟物中检出率分别达 71.43%、73.95%, 超标率为 68.91%、70.59%, 平均迁移量为 57.79 μg/kg、42.30 μg/kg; 油性模拟物(橄榄油和异辛烷)中检出率和迁移量相对较低。不同用途食品接触用纸制品的 3-MCPD 的检出率、超标率及迁移量差异无统计学意义(P>0.05), 仅异辛烷模拟物中检出率差异有统计学意义(χ^2=6.03, P=0.049)。不同销售环节间(农贸市场、商场、网店)纸制品的 3-MCPD 迁移无统计学意义(P>0.05)。膳食暴露评估显示, 10%乙醇、4%乙酸模拟物 3-MCPD 迁移的一般暴露人群(平均值、中位数)暴露量以及 10%乙醇、4%乙酸、异辛烷模拟物迁移的高暴露人群(P_{95})暴露量, 均超过 10%的每日耐受摄入量(tolerable daily intake, TDI), 采用 FDA 分配系数计算的综合膳食暴露量, 也均超过了 10% TDI, 很可能构成潜在健康风险。**结论** 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》实施之前市售食品接触用纸制品中的 3-MCPD 残留情况较为严重, 存在一定的人群健康风险, 作为食品接触用纸制品领域新发的高关注度污染物, 这类残留物质的风险不容忽视, 亟需进一步强化相关风险评估, 对可能来源的湿强剂采取管控措施。本研究为明确食品接触用纸 3-MCPD 迁移特征与风险, 为产业控污及健康防护提供支撑。

关键词: 食品接触用纸制品; 3-氯-1,2-丙二醇; 迁移实验; 风险评估

收稿日期: 2025-12-25
基金项目: 上海市卫生健康委卫生行业临床研究专项(202340302)

第一作者: 邱丹萍(1991—), 女, 硕士, 主管医师, 主要研究方向为食品安全风险监测与评估。E-mail: qiudanping@scdc.sh.cn
***通信作者:** 蔡华(1986—), 男, 硕士, 副主任医师, 主要研究方向为食品安全风险监测与评估。E-mail: caihua@scdc.sh.cn
罗宝章(1985—), 男, 硕士, 主任医师, 主要研究方向为食品安全风险监测与评估。E-mail: luobaozhang@scdc.sh.cn

Migration levels and risk assessment of 3-chloro-1,2-propanediol in food-contact paper products sold in Shanghai

QIU Dan-Ping, YANG Jing-Jin, XU Bi-Yao, SONG Xia, ZHANG Nan, CAI Hua*, LUO Bao-Zhang*

[*Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention* (*Shanghai Academy of Preventive Medicine*), *Division of Health Risk Factors Monitoring and Control/NHC Specialty Laboratory of Food Safety Risk Assessment and Standard Development*, *Shanghai* 201107, *China*]

ABSTRACT: Objective To investigate the migration levels of 3-chloro-1,2-propanediol (3-MCPD) in food-contact paper products sold in Shanghai and assess their potential health risks to the population. **Methods** A total of 119 samples including paper cups, paper plates, paper dishes and paper bowls were collected. According to the *2019 manual China national food contamination and harmful factors risk monitoring* (*volume II*), 4 kinds of food simulants (10% ethanol, 4% acetic acid, olive oil and isooctane) were selected for migration tests. The extreme assumption method for food contact materials specified by the European Union and the consumption factor evaluation method adopted by the U.S. Food and Drug Administration (FDA) were respectively applied, and a comprehensive evaluation was further conducted in combination with the partition coefficients of different migrants. **Results** Statistically significant differences were observed in the detection rate, exceeding standard rate and migration amount of 3-MCPD in food-contact paper products among different food simulants (χ^2=113.24, χ^2=119.58, χ^2=115.21, P<0.001). The detection rates in aqueous (10% ethanol) and acidic (4% acetic acid) simulants reached 71.43% and 73.95%, respectively, with exceeding standard rates of 68.91% and 70.59%, and average migration amounts of 57.79 μg/kg and 42.30 μg/kg. The detection rates and migration amounts in oily simulants (olive oil and isooctane) were relatively lower. No statistically significant differences were found in the detection rate, exceeding standard rate or migration amount of 3-MCPD among paper products for different purposes (P>0.05), except for the detection rate in isooctane simulant (χ^2=6.03, P=0.049). There was no statistically significant difference in 3-MCPD migration of paper products among different sales channels (farmers' markets, shopping malls and online stores) (P>0.05). Dietary exposure assessment showed that the general-exposure population (mean and median) exposure levels from 3-MCPD migration in 10% ethanol and 4% acetic acid simulants, as well as the high-exposure population (P_{95}) exposure levels from 10% ethanol, 4% acetic acid and isooctane simulants, exceeded 10% of the tolerable daily intake (TDI). The comprehensive dietary exposure calculated using the FDA partition coefficient also exceeded 10% of the TDI, which was likely to pose potential health risks. **Conclusion** Before the implementation of GB 4806.8—2022 *National food safety standard-Food contact paper and board materials and their products*, the residue of 3-MCPD in commercially available food-contact paper products is relatively serious, presenting certain health risks to the population. As an emerging high-concern contaminant in the field of food-contact paper products, the risks of such residues cannot be ignored. It is urgent to further strengthen relevant risk assessments and implement control measures for wet strength agents that may be the source. This study provides support for clarifying the migration characteristics and risks of 3-MCPD in food-contact paper, as well as for industrial pollution control and health protection.

KEY WORDS: food-contact paper products; 3-chloro-1,2-propanediol; migration test; risk assessment

0 引 言

随着全球"限塑令"政策的持续推进与深化落实，作为餐具等场景中应用最为广泛的食品接触材料，塑料制品因难降解、污染环境等问题，正面临被绿色环保型材料逐步替代的发展趋势。在众多塑料替代材料中，纸及纸制品凭借来源广泛、可再生性强、自然环境中易降解等突出优势，成为当前最具应用潜力的替代品类之一，市场认可度与推广力度持续提升。但是在生产加工食品接触用纸及纸制品的过程需添加各类添加剂与加工助剂，且其原料可能为原生纸浆或者回收再生纸浆，使得食品接触用纸及纸制品中可能迁移出对消费者健康构成潜在风险的化学物质[1−5]。

氯丙醇是一类同源化学物质, 由氯在甘油的 3 个羟基上取代形成, 按氯的数量可分为两类: 单氯丙醇和二氯丙醇。主要氯丙醇包括 3-氯-1,2-丙二醇(3-chloro-1,2-propanediol, 3-MCPD)、2-氯-1,3-丙二醇(2-chloro-1,3-propanediol, 2-MCPD)、1,3-二氯-2-丙醇(1,3-dichloro-2-propanol, 1,3-DCP)和 2,3-二氯-1-丙醇(2,3-dichloro-1-propanol, 2,3-DCP)。有许多研究表明氯丙醇多以脂肪酸酯的形式存在于食品中, 例如植物油、焙烤食品、婴幼儿配方奶粉等[6–8], 但是近年来在食品接触用纸制品中也发现了氯丙醇, 包括咖啡滤纸、牛奶盒、饮用吸管、厨房纸巾、松饼杯以及蔗渣盘和碗[9–13]。氯丙醇的产生主要源于纸张中广泛使用的湿强剂聚酰胺环氧氯丙烷树脂(polyaminopolyamide epichlorohydrin, PAE), 氯丙醇是其副反应产物, 而且环氧氯丙烷在纸张生产中用于助留剂和施胶剂, 也可能产生氯丙醇[14–16]。当前, 食品接触用纸及纸制品中的氯丙醇污染问题已引发国际社会的广泛关注。

在动物实验中, 3-MCPD 已被证明会导致严重的肝肾毒性和肿瘤的发生, 例如肾脏肿瘤、睾丸间质细胞瘤和乳腺肿瘤[17–19]。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将 3-MCPD 归类为 2B 类“可能的人类致癌物”[20]。2016 年, 联合国粮农组织和世界卫生组织下的食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)在第 83 次会议上将 3-MCPD 的每日暂定最大耐受摄入量(provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI)定为 4 μg/(kg bw • d)[21], 2018 年欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)确定 3-MCPD 的每日耐受摄入量(tolerable daily intake, TDI)为 2.0 μg/(kg bw • d)[22]。有研究表明水提取物含量反映的是纸制品中氯丙醇含量, 无法准确评估其在接触食品时迁移到食品中的量[23]。而且食品接触材料迁移实验能真实地反映食品接触材料及制品的组分向与之接触的食品的迁移, 是评价食品接触材料合规性最直接最重要的手段[24]。目前对于相关食品接触用纸制品 3-MCPD 的迁移量含量数据研究极少, 并且缺少相应的风险评估, 本研究拟完善国内现有研究数据。因此本研究通过检测纸制品中 3-MCPD 在不同模拟物中迁移量, 获得 3-MCPD 的迁移水平, 同时本研究采用了欧盟的极端假设法, 对食品接触材料中 3-MCPD 进行单个食品模拟物的膳食风险评估。最后还同时采用了欧盟的极端假设法和美国食品药品监督管理局(U.S. Food and Drug Administration, FDA)消费因子评估法, 结合不同模拟物的分配系数开展综合风险评估。

1　材料与方法

1.1　样品采集

2019—2023 年在上海市 16 个区的流通环节(商店、农贸市场、网店)采集纸杯、纸盘、纸碟、纸盘等 4 种纸制品, 共 119 件。所有样品采集后均未与食品接触, 且完整、无变形。

1.2　试剂与仪器

正己烷(色谱纯)、乙酸乙酯(色谱纯)、七氟丁酰基咪唑(纯度≥98%)、乙腈(色谱纯, 上海安谱实验科技股份有限公司); 乙醇(色谱纯)、乙酸、氯化钠、无水硫酸钠(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司); 3-MCPD 标准品[纯度≥98%, 曼哈格(上海)生物科技有限公司]。

BSA2202S 电子天平[精度 0.01 g, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; Agilent7890/7000D 气相色谱-质谱联用仪、HP-5 MS 色谱柱[30 m×0.25 mm, 0.25 pm, 安捷伦科技(中国)有限公司)]; THZ-300C 振荡器、DHG-9140A 电热鼓风干燥箱、LHR-150 低温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); DC-24 氮吹仪(上海安谱实验室科技股份有限公司); UPHW-IV-90T 超纯水机(四川优普超纯科技有限公司)。

1.3　检测方法与判定方法

依据《2019 年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册(中卷)》[25]中《食品接触材料纸和纸板中氯丙醇迁移量测定的标准操作程序》规定的迁移实验方法及实验条件进行迁移实验, 测定样品中的 3-MCPD 检出限(limit of detection, LOD)为 10 μg/kg。各种液态食品模拟物的密度通常以 1 kg/L 计, 迁移实验条件见表 1。

表 1　迁移实验条件
Table 1　Migration testing conditions

预期接触食品类型	食品模拟物	迁移实验温度/℃	迁移实验时间/h
水性食品	10%乙醇	40.00	2.00
酸性食品	4%乙酸	40.00	2.00
油性食品	橄榄油	60.00	2.00
	异辛烷	40.00	0.50

仪器检测条件: HP-5 MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 pm)的升温程序: 60 ℃保持 1 min, 5 ℃/min 升至 120 ℃, 30 ℃/min 升至 240 ℃保持 2 min; 进样口和色谱质谱接口温度均为 280 ℃; 载气为纯度≥99.999%的氦气, 流速 1 mL/min; 进样量 1 μL, 不分流进样; 电离方式电子电离, 电离能量 70 eV, 选择离子检测, 溶剂延迟 5 min。

本研究参照 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》中对 3-MCPD 的相关限量进行超标率判定: 食品接触用纸制品的水提取液 3-MCPD 的限量标准为 12 μg/L。

1.4　膳食暴露评估方法

本研究参考欧盟食品接触材料相关法规(EU No 10/2011)的极端假设法和 FDA 的《行业指南: 食品接触物质上市前提交的准备: 化学建议》消费因子评估法开展膳

食暴露评估[26–27]。极端假设法: 假设一个 60 kg 体重的人每天摄入 1 kg 与纸制品接触的食物; FDA 消费因子评估法: FDA 假设每人每天消耗 3 kg 食品(包括固体和液体), 纸制品(含聚合物涂层)的消费因子为 0.2, 即假设一个 60 kg 体重的人每天摄入 0.6 kg 与纸制品接触的食品。

综合评估: 参考 FDA 的分配系数[27], 根据各类食品与纸制品实际接触的比例, 对每种模拟物的迁移量进行调整, 综合迁移值计算如公式(1)所示。

$$C_{综合}=f_{水性}\times(C_{10\%乙醇})+f_{酸性}\times(C_{4\%乙酸})+f_{酒精}\times(C_{50\%乙醇})+f_{油性}\times(C_{橄榄油/异辛烷}) \quad (1)$$

式中: f为分配系数; $f_{水性}$为 0.55; $f_{酸性}$为 0.04; $f_{酒精}$为 0.01; $f_{油性}$为 0.4; C 为从纸制品迁移的 3-MCPD 的水平, 计算 $C_{综合}$ 时将橄榄油和异辛烷均作为油性食品模拟物取总平均值、中位数、P_{95}。

膳食暴露量计算如公式(2)所示。

$$EDI=\frac{C\times F}{BW} \quad (2)$$

式中: EDI 为经食品接触用纸制品摄入 3-MCPD 的膳食暴露量(exposure dietary), μg/(kg bw • d); C 为从纸制品迁移的 3-MCPD 的水平, μg/kg; F 为与纸制品接触的食品量, kg/d; BW 为体重(body weight), kg。

1.5 风险特征描述

参考 ZHONG 等[28]研究, 假设食品接触材料对每日总膳食摄入某特定化学物质的贡献比例为 10%, 基于此假设, 本研究通过将 3-MCPD 的估算 EDI 与 EFSA 提出的 TDI [2.0 μg/(kg bw • d)]的 10%进行对比, 评估了 3-MCPD 的潜在健康风险。若 EDI/TDI 比值大于 10%, 则对消费者可能存在健康危害; 反之, 若该比值小于 10%, 则不存在需关注的风险。

1.6 数据处理

采用 SAS OA 9.4 软件进行统计分析。污染物的定量描述以均数、中位数、P_{95}、最大值进行描述, 未检出值(<LOD)以 1/2LOD 计。不同食品模拟物的 3-MCPD 检出率、超标率比较采用 CMH 卡方检验, 不同食品模拟物、不同用途、不同环节间 3-MCPD 迁移量比较, 采用 Kruskal-Wallis 非参数检验。检验水准为 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 食品接触用纸制品中 3-MCPD 迁移量总体检测情况

食品接触用纸制品中 3-MCPD 在不同食品模拟物中的迁移检测结果见表 2。由表 2 可知, 3-MCPD 在各类模拟物中均有不同程度检出, 且检出率和超标率存在显著差异(χ^2=113.24, χ^2=119.58, P<0.001)。其中, 水性(10%乙醇)和酸性(4%乙酸)模拟物中 3-MCPD 的检出率较高, 分别为 71.43%和 73.95%, 超标率也处于较高水平, 依次为 68.91%和 70.59%; 而油性中 3-MCPD 的检出率和超标率较低, 橄榄油中检出率和超标率均为 3.33%, 异辛烷中检出率为 16.85%, 超标率为 10.11%。

2.2 3-MCPD 在不同食品模拟物中的迁移量水平分析

3-MCPD 在不同食品模拟物中的总体迁移量水平见表 3。由于迁移量数据呈非正态分布, 采用 Kruskal-Wallis 非参数检验。结果显示, 3-MCPD 在不同食品模拟物中的迁移量有显著差异(χ^2=115.21, P<0.001)。其中, 10%乙醇中 3-MCPD 的迁移量最高, 平均值为 57.79 μg/kg, 中位数为 35.00 μg/kg, P_{95} 达 231.00 μg/kg, 最大值为 390.00 μg/kg; 4%乙酸中迁移量次之, 平均值为 42.30 μg/kg, 中位数为 35.00 μg/kg, 最大值为 380.00 μg/kg; 而油性模拟物中迁移量较低, 橄榄油平均迁移量为 6.97 μg/kg, 异辛烷平均迁移量为 8.48 μg/kg, 两种油性模拟物的中位数均为 5.00 μg/kg。由此可见, 3-MCPD 在水性和酸性中的迁移风险远高于油性模拟物。

表 2 食品接触用纸制品中 3-MCPD 的迁移量检测情况

Table 2 Detection of migration levels of 3-MCPD in food-contact paper products

污染物	食品模拟物	样品数	检出数	检出率/%	χ^2	P	超标数	超标率/%	χ^2	P
3-MCPD	10%乙醇	119	85	71.43	113.24	<0.001	82	68.91	119.58	<0.001
	4%乙酸	119	88	73.95			84	70.59		
	橄榄油	30	1	3.33			1	3.33		
	异辛烷	89	15	16.85			9	10.11		

表 3 食品接触用纸制品中 3-MCPD 的迁移量水平

Table 3 Migration levels of 3-MCPD in food-contact paper products

污染物	食品模拟物	样品数	平均值/(μg/kg)	χ^2	P	标准差	中位数/(μg/kg)	P_{95}/(μg/kg)	最大值/(μg/kg)
3-MCPD	10%乙醇	119	57.79	115.21	<0.001	74.20	35.00	231.00	390.00
	4%乙酸	119	42.30			47.70	35.00	120.00	380.00
	橄榄油	30	6.97			10.77	5.00	5.00	64.00
	异辛烷	89	8.48			18.78	5.00	17.00	180.00

2.3　不同用途食品接触用纸制品中 3-MCPD 迁移量分析

不同用途食品接触用纸制品(纸杯、纸碟、纸盘、纸碗)中 3-MCPD 迁移量检测结果见表 4。在 10%乙醇中, 各类制品的 3-MCPD 检出率介于 66.67%~77.27%之间, 超标率介于 64.71%~72.73%之间, 不同用途制品间的检出率和超标率差异均无统计学意义(P>0.05)。迁移量平均值方面, 纸盘最高(72.33 μg/kg), 纸碟次之(66.71 μg/kg), 纸杯(29.60 μg/kg)和纸碗(36.94 μg/kg)较低, 不同用途制品间迁移量差异无统计学意义(P>0.05)。

在 4%乙酸中, 各类制品的 3-MCPD 检出率为 66.67%~81.82%, 超标率为 64.71%~77.27%, 不同用途制品间检出率和超标率(P>0.05)差异无统计学意义; 迁移量平均值以纸碟最高(48.77 μg/kg), 纸盘次之(46.24 μg/kg), 纸杯(31.81 μg/kg)和纸碗(33.06 μg/kg)较低, 各类制品间迁移量差异无统计学意义(P>0.05)。

在橄榄油中, 仅纸盘有 1 例检出 3-MCPD(检出率 14.29%), 其余用途制品均未检出, 不同用途制品间检出率、超标率及迁移量差异均无统计学意义(均 P>0.05)。在异辛烷中, 纸碗的检出率最高(29.63%), 纸盘次之(16.22%), 纸碟最低(4.00%), 不同用途制品间检出率差异有统计学意义(χ^2=6.03, P=0.049); 迁移量平均值以纸盘最高(11.24 μg/kg), 纸碗次之(7.63 μg/kg), 纸碟最低(5.32 μg/kg), 但不同用途制品间迁移量差异无统计学意义(P>0.05)。

2.4　不同销售环节食品接触用纸制品中 3-MCPD 迁移量分析

不同销售环节(农贸市场、商场、网店)食品接触用纸制品中 3-MCPD 迁移量检测结果见表 5。在 10%乙醇中, 商场销售制品的 3-MCPD 检出率最高(74.47%), 农贸市场最低(66.67%)。在 4%乙酸中, 商场销售制品的检出率最高(78.72%), 网店最低(70.59%), 在橄榄油模拟物中, 仅商场销售制品有 1 例检出(检出率 10.00%)。在异辛烷中, 商场销售制品的检出率最高(24.32%), 网店次之(17.14%), 农贸市场未检出。4 种模拟物的不同销售环节间检出率、超标率和迁移量差异均无统计学意义(均 P>0.05)。

2.5　3-MCPD 膳食暴露评估和风险特征描述

采用极端假设法, 选用 4 种不同的食品模拟物(10%乙醇、4%乙酸、橄榄油、异辛烷)的 3-MCPD 迁移量平均值、中位数分别计算一般暴露人群(平均值)、一般暴露人群(中

表 4　不同用途食品接触用纸制品中 3-MCPD 迁移量的检测结果

Table 4　Detection results of 3-MCPD migration in food-contact paper products for different purposes

食物模拟物	用途	样品数	检出数	检出率/%	χ^2	P	超标数	超标率/%	χ^2	P	平均值/(μg/kg)	χ^2	P	标准差	中位数/(μg/kg)	P_{95}/(μg/kg)	最大值/(μg/kg)
10%乙醇	纸杯	12	8	66.67	1.18	0.757	8	66.67	0.60	0.896	29.60	2.63	0.453	18.95	37.55	51.40	51.40
	纸碟	34	23	67.65			22	64.71			66.71			87.45	28.00	280.00	390.00
	纸盘	44	34	77.27			32	72.73			72.33			87.44	38.50	260.00	388.00
	纸碗	29	20	68.97			20	68.97			36.94			32.95	28.30	99.00	130.00
	合计	119	85	71.43			82	68.91			57.79			74.20	35.00	231.00	390.00
4%乙酸	纸杯	12	8	66.67	2.46	0.483	8	66.67	1.63	0.654	31.81	2.67	0.446	21.06	39.00	57.50	57.50
	纸碟	34	23	67.65			22	64.71			48.77			69.49	26.00	130.00	380.00
	纸盘	44	36	81.82			34	77.27			46.24			40.73	39.00	96.00	220.00
	纸碗	29	21	72.41			20	68.97			33.06			31.04	29.00	96.00	130.00
	合计	119	88	73.95			84	70.59			42.30			47.70	35.00	120.00	380.00
橄榄油	纸杯	12	0	0.00	3.29	0.350	0	0.00	3.29	0.350	5.00	3.29	0.350	0.00	5.00	5.00	5.00
	纸碟	9	0	0.00			0	0.00			5.00			0.00	5.00	5.00	5.00
	纸盘	7	1	14.29			1	14.29			13.43			22.30	5.00	64.00	64.00
	纸碗	2	0	0.00			0	0.00			5.00			0.00	5.00	5.00	5.00
	合计	30	1	3.33			1	3.33			6.97			10.77	5.00	5.00	64.00
异辛烷	纸碟	25	1	4.00	6.03	0.049	1	4.00	1.68	0.431	5.32	5.54	0.063	1.60	5.00	5.00	13.00
	纸盘	37	6	16.22			4	10.81			11.24			28.82	5.00	23.00	180.00
	纸碗	27	8	29.63			4	14.81			7.63			4.46	5.00	17.00	20.00
	合计	89	15	16.85			9	10.11			8.48			18.78	5.00	17.00	180.00

注: 纸杯未做异辛烷的迁移。

表 5 不同环节食品接触纸制品中 3-MCPD 迁移量的检测结果

Table 5 Detection results of 3-MCPD migration in food-contact paper products at different stages

食物模拟物	环节	样品数	检出数	检出率/%	χ^2	P	超标数	超标率/%	χ^2	P	平均值/(μg/kg)	χ^2	P	标准差	中位数/(μg/kg)	P_{95}/(μg/kg)	最大值/(μg/kg)
10%乙醇	农贸市场	21	14	66.67			14	66.67			43.85			43.79	31.50	116.00	160.00
	商场	47	35	74.47	0.46	0.795	32	68.09	0.13	0.937	69.38	0.27	0.872	89.36	33.80	260.00	388.00
	网店	51	36	70.59			36	70.59			52.85			68.16	40.00	140.00	390.00
	合计	119	85	71.43			82	68.91			57.79			74.20	35.00	231.00	390.00
4%乙酸	农贸市场	21	15	71.43			15	71.43			41.01			33.71	46.80	94.00	103.00
	商场	47	37	78.72	0.92	0.632	33	70.21	0.01	0.995	38.04	0.21	0.900	34.85	31.00	120.00	130.00
	网店	51	36	70.59			36	70.59			46.75			61.31	37.00	120.00	380.00
	合计	119	88	73.95			84	70.59			42.30			47.70	35.00	120.00	380.00
橄榄油	农贸市场	4	0	0.00			0	0.00			5.00			0.00	5.00	5.00	5.00
	商场	10	1	10.00	2.00	0.368	1	10.00	2.00	0.368	10.90	2.00	0.368	18.66	5.00	64.00	64.00
	网店	16	0	0.00			0	0.00			5.00			0.00	5.00	5.00	5.00
	合计	30	1	3.33			1	3.33			6.97			10.77	5.00	5.00	64.00
异辛烷	农贸市场	17	0	0.00			0	0.00			5.00			0.00	5.00	5.00	5.00
	商场	37	9	24.32	4.87	0.088	5	13.51	2.42	0.298	11.68	4.79	0.091	28.73	5.00	23.00	180.00
	网店	35	6	17.14			4	11.43			6.80			4.26	5.00	17.00	20.00
	合计	89	15	16.85			9	10.11			8.48			18.78	5.00	17.00	180.00

位数)的膳食暴露量时, 这 2 种人群的 10%乙醇、4%乙酸模拟物的迁移暴露均超过 10%的 TDI, 很可能构成潜在健康风险。当选用 4 种食品模拟物的 3-MCPD 的 P_{95} 值来计算高暴露人群的膳食暴露量时, 该人群的 10%乙醇、4%乙酸、异辛烷模拟物的迁移暴露均超过 10%的 TDI, 尤其是 10%乙醇迁移暴露显示, 3-MCPD 很可能构成潜在健康风险。具体食品接触用纸制品中 3-MCPD 的单种食品模拟物的风险评估结果见表 6。

采用极端假设法和 FDA 消费因子评估法, 结合不同迁移条件的分配系数分别进行综合评估时, 2 种方法均显示一般暴露人群(平均值)、一般暴露人群(中位数)和高暴露人群的 3-MCPD 膳食暴露量均超过 10%的 TDI, 可能构成潜在健康风险。具体食品接触用纸制品中 3-MCPD 的综合风险评估结果见表 7。

表 6 食品接触用纸制品中 3-MCPD 的单种食品模拟物的风险评估

Table 6 Risk assessment of single food simulants of 3-MCPD in food-contact paper products

食物模拟物	消费者群体	EDI/[μg/(kg bw·d)]	10% TDI/[μg/(kg bw·d)]	评估
10%乙醇	一般暴露人群(平均数)	0.96	0.20	可能存在健康风险
	一般暴露人群(中位数)	0.58	0.20	可能存在健康风险
	高暴露人群(P_{95})	3.85	0.20	可能存在健康风险
4%乙酸	一般暴露人群(平均数)	0.71	0.20	可能存在健康风险
	一般暴露人群(中位数)	0.58	0.20	可能存在健康风险
	高暴露人群(P_{95})	2.00	0.20	可能存在健康风险
橄榄油	一般暴露人群(平均数)	0.12	0.20	无健康风险
	一般暴露人群(中位数)	0.08	0.20	无健康风险
	高暴露人群(P_{95})	0.08	0.20	无健康风险
异辛烷	一般暴露人群(平均数)	0.14	0.20	无健康风险
	一般暴露人群(中位数)	0.08	0.20	无健康风险
	高暴露人群(P_{95})	0.28	0.20	可能存在健康风险

表 7　食品接触用纸制品中 3-MCPD 的综合风险评估

Table 7　Comprehensive risk assessment of 3-MCPD in food contact paper products

食物模拟物	消费者群体	EDI /[μg/(kg bw・d)]	10% TDI /[μg/(kg bw・d)]	评估
综合评估 1	一般暴露人群(平均数)	0.61	0.20	可能存在健康风险
	一般暴露人群(中位数)	0.38	0.20	可能存在健康风险
	高暴露人群(P_{95})	2.31	0.20	可能存在健康风险
综合评估 2	一般暴露人群(平均数)	0.37	0.20	可能存在健康风险
	一般暴露人群(中位数)	0.23	0.20	可能存在健康风险
	高暴露人群(P_{95})	1.39	0.20	可能存在健康风险

注: 综合评估 1 采用极端假设法, 消费量为 1 kg; 综合评估 2 采用 FDA 消费因子评估法, 消费量为 0.6 kg。50%乙醇食品模拟物的 3-MCPD 迁移量未做, 所以在计算综合评估 2 时, 其迁移量按 0 μg/kg 计算。

3　讨论与结论

本研究系统揭示了食品接触用纸制品中 3-MCPD 的迁移污染特征, 3-MCPD 其迁移情况呈现明显的食品模拟物依赖性。水性(10%乙醇)和酸性(4%乙酸)食品模拟物的 3-MCPD 的迁移明显大于油性模拟物(橄榄油、异辛烷), 这一差异与 3-MCPD 含有羟基和卤原子, 具有较强的极性, 易溶于高极性的水中相关[29]。ZHONG 等[28]的研究采用水提取物后检测发现食品接触用纸及纸制品中 3-MCPD 检出率 65.1%, 超标率为 44.4%, 杜恣闲等[30]研究采用水提取物后检测发现表明 3-MCPD 的检出率 66.3%, 超标率为 40.0%, 两个研究的检出率与本研究中采用 10%乙醇和 4%乙酸模拟物的迁移实验检出率相近, 超标率略低于本研究, 说明食品接触用纸制品中的 3-MCPD 向食品中迁移具有一定普遍性, 而本研究中超标率较高可能是 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》相较于 GB 4806.8—2016 中增加了 3-MCPD 的限值, 该标准于 2023 年 6 月 30 日实施, 而本研究样本的采集主要在标准实施之前。本研究中部分样品 3-MCPD 在水性模拟液中迁移量最大值达 390 μg/kg, 远超 GB 4806.8—2022 的限量要求 12 μg/kg, 长期摄入此类超标产品将对人体健康构成潜在威胁。

本研究存在一定局限性: 我国 GB 4806.8—2022 中已明确规定热水提取和冷水提取下 3-MCPD 迁移限量, 但是本研究中采用 4 种更接近于纸制品多种使用环境的不同食品模拟物进行迁移实验。在测定食品接触用纸中氯丙醇类物质的释放量时, 水提液所模拟的条件比迁移实验更为严苛[29], 鉴于本研究参照该国家标准进行判定, 或会导致低估迁移结果。

本研究为监管部门提供了科学依据, 助力监管部门精准抽检、聚焦 PAE 湿强剂合规性核查; 为企业指明工艺优化方向, 推动无氯/低氯替代技术推广, 从源头控污; 为消费者提供安全使用指导, 避免食品接触用纸制品长时间盛放酸性、水性食品, 减少污染物迁移, 减少污染物摄入风险, 同时其迁移实验方法可为同类研究提供参考, 丰富食品接触材料安全评估体系。未来将进一步优化检测评估方法, 开展水提取法与迁移实验法对比验证, 结合本土饮食数据构建精细化暴露评估模型。

参考文献

[1] SELIN E, WÄNN M, SVENSSON K, *et al*. Hazardous chemicals in non-polar extracts from paper and cardboard food packaging: An effect-based evaluation [J]. Environmental Sciences Europe, 2022, 34: 85.

[2] 刘伟, 隋海霞, 赵榕, 等. 食品接触用纸与纸制品中全氟和多氟烷基化合物的检测研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(9): 1090–1098.
LIU W, SUI HX, ZHAO R, *et al*. Research progress in the detection of per- and polyfluoroalkyl substances in food contact paper and paperboard [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(9): 1090–1098.

[3] 袁娅, 周颖, 熊丽, 等. 江西省食品接触用纸制品和竹木制品中五氯酚的污染状况调查[J]. 现代预防医学, 2021, 48(14): 2538–2541.
YUAN Y, ZHOU Y, XIONG L, *et al*. Investigation on pollution of pentachlorophenol in products made of paper, bamboo and woods for food contact in Jiangxi Province [J]. Modern Preventive Medicinev, 2021, 48(14): 2538–2541.

[4] 谢苍昊, 陈燕芬, 刘易烨, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定食品接触用纸制品中 42 种无机元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4602–4607.
XIE CH, CHEN YF, LIU YY, *et al*. Determination of 42 kinds of inorganic elements in food contact paper articles by microwave digestion-inductively coupled plasma massspectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(11): 4602–4607.

[5] 马迎辉, 韩聪瑞, 赵喜梅, 等. 纸吸管中铅、砷、铝元素含量和迁移量变化的规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 309–314.
MA YH, HAN CR, ZHAO XM, *et al*. Regularity of changes in the content and migration of lead, arsenic, and aluminum elements in paper straws [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 309–314.

[6] ALMAIMAN L, ALAMIR J, ALBUHAYJAN F, *et al*. Preliminary risk assessment of exposure to 3-monochloropropanediol and glycidyl fatty acid esters from infant formula and baby food products on the Saudi market [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2024, 41(11): 1406–1418.

[7] FAN J, LUO BZ, QIU DP, *et al*. Dietary exposure of general population to

3-monochloropropane-1,2-diol esters from edible oils and oil-containing foods in Shanghai, China [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 144: 107717.

[8] SHI RRS, SHEN P, YU WZ, *et al*. Occurrence and dietary exposure of 3-MCPD esters and glycidyl esters in domestically and commercially prepared food in Singapore [J]. Foods, 2023, 30; 12(23): 4331.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 贺江, SUQIN S, 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.

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

[15] RIEHLE R. Kymene® G3-X wet-strength resin: Enzymatic treatment during microbial dehalogenation [J]. Polymer Biocatalysis and Biomaterials, 2005: 302–316. DOI: 10.1021/bk-2005-0900.ch021

[16] 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.

[17] HWANG M, YOON E, KIM J, *et al*. Toxicity value for 3-monochloropropane-1,2-diol using a benchmark dose methodology [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2009, 53(2): 102–106.

[18] 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.

[19] BAROCELLI E, CORRADI A, MUTTI A, *et al*. Comparison between 3-MCPD and its palmitic esters in a 90-day toxicological study [J]. EFSA Supporting Publications, 2011, 8(9): 187.

[20] IARC. 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: 349–374.

[21] 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) [R]. Italy: JECFA, 2016.

[22] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Update of the risk assessment on 3-monochloropropane diol and its fatty acid esters [J]. EFSA Journal, 2018, 16(1): e05083.

[23] 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.

[24] 朱蕾, 张俭波. 食品接触材料及制品迁移实验标准实施指南[M]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
ZHU L, ZHANG JB. Implementation guide for migration test standards of food contact materials and articles [M]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[25] 国家食品安全评估中心. 2019 年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册(中卷)[M]. 北京: 国家食品安全评估中心, 2019.
China National Center for Food Safety Risk Assessment. 2019 Manual China National Food Contamination and Harmful Factors Risk Monitoring [M]. Beijing: China National Center for Food Safety Risk Assessment, 2019.

[26] 张泓, 李倩云, 陈少鸿, 等. 食品接触用铝和铝合金材料及制品中铝元素的迁移及风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022(1): 92–97.
ZHANG H, LI QY, CHEN SH, *et al*. Study of migration and safety assessment of aluminum in food contact aluminum and aluminum alloy materials and articles in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022(1): 92–97.

[27] FDA. Guidance for industry: Preparation of premarket submissions for food contact substances (chemistry recommendations) [EB/OL]. (2018-09-20) [2026-01-25]. https: //www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/guidance-industry-preparation-premarket-submissions-food-contact-substances-chemistry#aivti

[28] 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.

[29] 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.

[30] 杜恣闲, 郑建莉, 谢恺, 等. 龙岩市市售食品接触用纸制品氯丙醇残留情况调查[J]. 海峡预防医学杂志, 2023, 29(3): 76–78.
DU ZX, ZHENG JL, XIE K, *et al*. Survey on chloropropanol residues in commercial food-contact paper products in Longyan City [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2023, 29(3): 76–78.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)