

上海市市售食用植物油中氯丙醇酯的 污染状况和暴露评估

宇盛好, 李亦奇, 彭少杰

(上海市市场监督管理局信息应用研究中心, 上海 200030)

摘要:旨在为食用植物油中氯丙醇酯(MCPDE)的安全监管以及标准制定提供参考,利用2020—2024年上海市市售食用植物油中MCPDE的监测数据,结合居民植物油消费量数据,采用点评估法评估上海市居民经食用植物油摄入3-MCPDE、2-MCPDE的暴露情况。结果表明:270件食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的总体检出率分别为83.0%和74.4%,含量均值分别为1 009.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和331.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,最大值分别为18 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和9 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$;参照欧盟(EU)2023/915规定的植物油中3-氯丙醇(3-MCPD)与3-MCPDE之和的限量值进行评价,食用植物油样品中3-MCPDE的超标率为11.1%;稻米油中3-MCPDE和2-MCPDE的含量均值均最高,分别为2 957.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和1 447.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其次为芝麻油和油茶籽油,最低为橄榄油;国产食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的含量均值分别为1 067.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和350.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$,均高于进口样品;不同品牌芝麻油中3-MCPDE和2-MCPDE含量均存在显著差异($p < 0.05$);上海市不同年龄组居民每日经食用植物油摄入3-MCPDE的平均暴露量范围为0.475~1.169 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$,是欧洲食品安全局规定3-MCPD及其酯的每日耐受摄入量[TDI, 2 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$]的23.8%~58.4%;不同年龄组居民每日经食用植物油摄入2-MCPDE的平均暴露量为0.156~0.383 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。综上,上海市3岁及以上居民经食用植物油摄入3-MCPDE的健康风险较低。

关键词:食用植物油;氯丙醇酯;污染状况;暴露评估

中图分类号:TS225.1;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)06-0043-08

Contamination status and exposure assessment of chloropropanol esters in edible vegetable oils sold in Shanghai

YU Shenghao, LI Yiqi, PENG Shaojie

(Information Application Research Center of Shanghai Municipal Administration for Market Regulation, Shanghai 200030, China)

Abstract: To provide reference for the safety supervision and standard establishment for chloropropanol esters (MCPDE) in edible vegetable oils, based on the monitoring data of MCPDE in edible vegetable oils sold in Shanghai from 2020 to 2024, combined with the vegetable oil consumption data of residents, the 3-MCPDE and 2-MCPDE exposure levels of Shanghai residents through edible vegetable oil were assessed by point assessment method. The results showed that the total detection rates of 3-MCPDE and 2-MCPDE in 270 edible vegetable oils were 83.0% and 74.4%, with mean contents of 1 009.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$

and 331.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$, and maximum values were 18 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 9 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively. According to the EU 2023/915 on the maximum lever of sum of 3-MCPD and 3-MCPDE in vegetable oils, it was found that the exceeding rate of 3-MCPDE in the samples was 11.1%. The mean contents of 3-MCPDE and 2-MCPDE

收稿日期:2024-05-28;修回日期:2024-12-24

基金项目:2024年度上海市市场监督管理局科技项目(2024-51)

作者简介:宇盛好(1990),男,工程师,硕士,研究方向为食品安全风险监测与评估(E-mail)850368049@qq.com。

通信作者:彭少杰,主任医师(E-mail)pengshaojie2008@qq.com。

in rice bran oil were the highest, which were 2 957.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 1 447.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively, followed by sesame seed oil and oil - tea camellia seed oil, olive oil was the lowest. The mean contents of 3 - MCPDE and 2 - MCPDE in domestic edible vegetable oil were 1 067.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 350.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively, both higher than imported samples. The contents of 3 - MCPDE and 2 - MCPDE in sesame seed oil of different brands were significantly different ($p < 0.05$). The mean daily exposure of 3 - MCPDE from edible vegetable oils among residents of different age groups in Shanghai ranged from 0.475 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ to 1.169 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, accounting for 23.8% - 58.4% of the tolerable daily intake (TDI) of 2 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ for 3 - MCPD and its esters established by EFSA. The mean daily exposure of 2 - MCPDE from edible vegetable oils among residents of different age groups ranged from 0.156 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ to 0.383 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$. In conclusion, the health risk of 3 - MCPDE intake through edible vegetable oil in Shanghai residents aged 3 years and older is low.

Key words: edible vegetable oil; chloropropanol esters; contamination status; exposure assessment

氯丙醇酯 (Chloropropanol esters, MCPDE) 是植物油生产过程中产生的新型污染物^[1-2], 包括 3 - 氯 - 1, 2 - 丙二醇酯 (3 - MCPDE) 和 2 - 氯 - 1, 3 - 丙二醇酯 (2 - MCPDE) 等, 3 - MCPDE 和 2 - MCPDE 的水解产物分别为 3 - 氯 - 1, 2 - 丙二醇 (3 - MCPD) 和 2 - 氯 - 1, 3 - 丙二醇 (2 - MCPD)^[3-4]。3 - MCPD 具有肾脏毒性、生殖毒性、神经毒性和致癌性等^[5-9], 被国际癌症研究机构 (IARC) 列为 2B 类致癌物^[10]。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 (JECFA) 规定 3 - MCPD 及其酯的暂定每日最大耐受摄入量 (Provisional maximum tolerable daily intake, PMTDI) 为 4 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[11]; 2018 年, 欧洲食品安全局 (EFSA) 规定 3 - MCPD 及其酯的每日耐受摄入量 (Tolerable daily intake, TDI) 为 2 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[12]。目前, 关于 2 - MCPD 和 2 - MCPDE 的毒理学研究较少, 尚缺乏 2 - MCPDE 的健康指导值。

植物油以及以植物油为原料加工的食品 (如油炸食品等) 中普遍存在 3 - MCPDE 和 2 - MCPDE 污染^[13-15], 这些食品是人体摄入 3 - MCPDE 和 2 - MCPDE 的主要来源^[16-17]。2023 年, 欧盟 (EU) 2023/915《关于食品中某些污染物最高含量的条例》规定椰子油、玉米油、菜籽油、葵花籽油、大豆油、棕榈仁油、橄榄油 (包括精炼橄榄油和初榨橄榄油) 以及这几种油的混合油中 3 - MCPD 与 3 - MCPDE 之和 (以 3 - MCPD 计) 的最大限量为 1 250 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其他植物油中 3 - MCPD 与 3 - MCPDE 之和 (以 3 - MCPD 计) 的最大限量为 2 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。植物油是我国居民饮食的重要组成部分, 其质量安全直接关系到居民的饮食安全。但目前我国还缺乏植物油中 3 - MCPD 和 3 - MCPDE 的限量

标准。

本研究对上海市市售食用植物油中 3 - MCPDE 和 2 - MCPDE 的污染状况进行分析, 结合居民植物油消费量数据, 采用点评估法评估上海市居民经植物油摄入 3 - MCPDE 和 2 - MCPDE 的暴露水平, 以为植物油中 MCPDE 安全监管以及标准制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

食用植物油, 270 件, 来源于 2020—2024 年上海市市场监管部门组织开展的食品安全风险监测工作中所采集的样本, 其中 2020—2022 年共监测 92 件样品, 2023 年未监测, 2024 年监测 178 件样品。样品随机采集于上海市的超市、农贸市场、批发市场、商店、食品店和网店等场所, 种类包括芝麻油、菜籽油、植物调和油、大豆油、玉米油等 14 种植物油, 加工工艺包括压榨、浸出和水代法等, 覆盖了上海市场上销售的 118 个主要植物油品牌。国产样品的产地来自上海、江苏、安徽等 21 个省、自治区、直辖市, 进口样品来自西班牙、意大利、土耳其、新加坡、法国 5 个国家。

1.2 实验方法

1.2.1 3 - MCPDE、2 - MCPDE 的测定

食用植物油中 3 - MCPDE、2 - MCPDE 的测定委托上海市有资质的检验机构进行检验。按照 GB 5009.191—2016《食品安全国家标准 食品中氯丙醇及其脂肪酸酯含量的测定》(气相色谱 - 质谱法) 测定 2020—2022 年采集的食用植物油样品中 MCPDE、3 - MCPDE (以 3 - MCPD 计) 和 2 - MCPDE (以 2 - MCPD 计) 的检出限均为 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限均为 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。按照《2022 年国家食品污染和有害

因素风险监测工作手册(中卷)》(食品中氯丙醇酯和缩水甘油酯含量测定的标准操作程序¹³C同位素稀释-气相色谱-串联质谱法)测定2024年采集的食用植物油样品中MCPDE、3-MCPDE(以3-MCPD计)和2-MCPDE(以2-MCPD计)的检出限均为10 μg/kg,定量限均为30 μg/kg。参照欧盟(EU)2023/915关于植物油中3-MCPD与3-MCPDE之和的最大限量对样品中3-MCPDE的检测值进行评价。由于缺乏植物油中2-MCPDE的限量标准,本研究不对2-MCPDE检验结果进行评价。

1.2.2 3-MCPDE和2-MCPDE膳食暴露评估方法

采用点评估法计算上海市居民通过食用植物油摄入3-MCPDE、2-MCPDE的暴露量,计算公式如式(1)所示。

$$E = \frac{C \times F}{W \times 1000} \quad (1)$$

式中: E 为上海居民每日每千克体质量3-MCPDE、2-MCPDE的暴露量,μg/(kg·d); C 为食用植物油中3-MCPDE、2-MCPDE的含量均值,μg/kg; F 为上海市居民每日植物油的消费量平均值,g/d; W 为上海市居民的平均体质量,kg。

上海市居民食用植物油的消费量数据采用2017—2020年国家食品安全风险评估中心开展的中国居民食物消费状况调查结果^[18-20],其中3~5岁、6~10岁、11~17岁、18~44岁、45~59岁、≥60岁居民食用植物油消费量的平均值分别为20.72、25.30、31.79、32.95、35.18、30.36 g/d。上海市居民的体质量数据采用2023年本单位组织开展的上

海市居民主食类食物消费量调查结果,共调查3~95岁居民428名,其中3~5岁、6~10岁、11~17岁、18~44岁、45~59岁、≥60岁居民的调查人数分别为18、39、41、151、95人和84人,平均体质量分别为17.9、30.3、48.7、66.4、63.8 kg和64.5 kg。

采用EFSA规定的3-MCPDE及其酯的TDI作为3-MCPDE暴露评估的健康指导值。

1.2.3 统计学分析

采用世界卫生组织对食品中污染物的未检出(Not detected,ND)值处理原则对样品中ND值进行处理^[21],本次评估对于植物油中3-MCPDE、2-MCPDE的ND值以检出限的一半(即5 μg/kg)替代。运用SPSS 28.0软件对数据进行统计分析。样品中3-MCPDE、2-MCPDE检出率差异比较采用卡方检验(χ^2)。采用Spearman相关性分析对样品中3-MCPDE和2-MCPDE含量相关性进行检验。不同年份、不同种类、不同品牌样品中3-MCPDE、2-MCPDE的含量差异比较采用Kruskal-Wallis H 检验。不同产地样品中3-MCPDE、2-MCPDE的含量差异比较采用Mann-Whitney U 检验。 $p < 0.05$ 表明差异有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 上海市市售食用植物油中MCPDE的污染状况

2.1.1 不同年份食用植物油中MCPDE的污染状况

不同年份食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的污染状况见表1。

表1 2020—2024年上海市市售食用植物油中MCPDE的污染状况

Table 1 Contamination status of MCPDE in edible vegetable oils sold in Shanghai from 2020 to 2024

污染物	年份	样品数量	检出率/%	超标率/%	含量/(μg/kg)					
					最小值	平均值	标准差	P ₅₀	P ₉₅	最大值
3-MCPDE	2020	38	65.8	26.3	ND	1 804.8	2 886.3	808.5	7 417.0	14 200
	2021	34	79.4	23.5	ND	1 348.8	1 541.7	733.5	5 147.5	5 200
	2022	20	95.0	20.0	ND	1 916.7	2 364.3	889.5	7 767.0	7 830
	2024	178	86.0	4.5	ND	672.9	1 604.9	260.5	2 296.5	18 500
	合计	270	83.0	11.1	ND	1 009.5	1 940.9	371.0	5 130.0	18 500
2-MCPDE	2020	38	39.5	-	ND	368.7	786.5	5.0	2 171.0	3 710
	2021	34	55.9	-	ND	370.6	447.4	142.0	1 455.0	1 470
	2022	20	95.0	-	ND	312.5	337.4	153.0	966.6	969
	2024	178	83.1	-	ND	318.0	810.8	123.5	1 072.0	9 500
	合计	270	74.4	-	ND	331.3	742.2	114.5	1 429.0	9 500

注:-表示未进行评价。下同

Note: -. Not evaluated. The same below

由表1可知,2020—2024年,上海市市售270件食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的总体

检出率分别为83.0%和74.4%,含量均值分别为1 009.5 μg/kg和331.3 μg/kg,P₅₀分别为371.0

$\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 $114.5 \mu\text{g}/\text{kg}$, 最大值分别为 $18\ 500 \mu\text{g}/\text{kg}$ 和 $9\ 500 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。有 197 件样品同时检出了 3-MCPDE 和 2-MCPDE, 占比 73.0%。参考欧盟 (EU)2023/915 的限量标准, 样品中 3-MCPDE 的超标率为 11.1%。经 Spearman 相关性分析, 植物油中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 含量存在显著正相关 ($p < 0.001$, 相关系数为 0.826)。刘卿等^[22] 报道我国市售植物油中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 的含量均值分别为 $1\ 210 \mu\text{g}/\text{kg}$ 和 $390 \mu\text{g}/\text{kg}$ (2015—2017 年), 高于本研究中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 的含量均值。

不同年份食用植物油中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 的检出率总体上均存在显著差异 ($p < 0.05$), 其中 2022 年食用植物油中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 的检出率最高, 均为 95.0%, 2020 年 3-

MCPDE 和 2-MCPDE 检出率最低, 分别为 65.8% 和 39.5%。2024 年食用植物油中 3-MCPDE 的超标率最低, 为 4.5%, 而 2020 年食用植物油中 3-MCPDE 的超标率最高, 为 26.3%。不同年份食用植物油中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 的含量总体上均存在显著差异 ($p < 0.05$), 其中: 2022 年食用植物油中 3-MCPDE 的含量均值最高, 为 $1\ 916.7 \mu\text{g}/\text{kg}$, 2024 年食用植物油中 3-MCPDE 的含量均值最低, 为 $672.9 \mu\text{g}/\text{kg}$; 2021 年食用植物油中 2-MCPDE 的含量均值最高, 为 $370.6 \mu\text{g}/\text{kg}$, 2022 年食用植物油中 2-MCPDE 的含量均值最低, 为 $312.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。

2.1.2 不同种类食用植物油中 MCPDE 的污染状况

不同种类食用植物油中 3-MCPDE 和 2-MCPDE 的污染状况分别见表 2 和表 3。

表 2 不同种类食用植物油中 3-MCPDE 的污染状况

Table 2 Contamination status of 3-MCPDE in different edible vegetable oils

植物油	样品数量	检出率/%	超标率/%	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)					
				最小值	平均值	标准差	P ₅₀	P ₉₅	最大值
芝麻油	60	90.0	36.7	ND	2 456.9	2 686.5	1 625.0	7 035.5	14 200
菜籽油	27	55.6	3.7	ND	238.4	347.6	53.1	1 203.2	1 380
植物调和油	27	81.5	3.7	ND	461.4	431.7	406.0	1 576.0	1 720
大豆油	25	80.0	0.0	ND	196.3	196.7	188.0	784.5	942
玉米油	25	100.0	0.0	52.5	430.5	223.5	405.0	937.1	980
花生油	19	94.7	0.0	ND	463.4	405.9	290.0	1 270.0	1 270
橄榄油	18	33.3	0.0	ND	80.3	141.1	5.0	506.0	506
葵花籽油	18	83.3	5.6	ND	327.2	390.3	233.0	1 440.0	1 440
油茶籽油	16	100.0	12.5	129	1 410.8	1 375.2	1 055.0	5 550.0	5 550
稻米油	15	100.0	20.0	1 240	2 957.3	4 366.1	1 610.0	18 500.0	18 500
亚麻籽油	10	90.0	0.0	ND	158.6	243.3	98.6	831.0	831
其他食用植物油	10	90.0	0.0	ND	592.6	567.3	479.0	1 760.0	1 760
合计	270	83.0	11.1	ND	1 009.5	1 940.9	371.0	5 130.0	18 500

注: 其他食用植物油包括 5 件核桃油、2 件牛油果油和 3 件葡萄籽油。下同

Note: Other edible vegetable oils include 5 pieces of walnut oil, 2 pieces of avocado oil and 3 pieces of grapeseed oil. The same below

由表 2 可知, 不同种类食用植物油中 3-MCPDE 的检出率总体上存在显著差异 ($p < 0.05$), 其中玉米油、油茶籽油和稻米油中 3-MCPDE 的检出率较高, 均为 100.0%, 橄榄油中 3-MCPDE 的检出率最低, 为 33.3%。芝麻油中 3-MCPDE 的超标率最高 (36.7%), 其次为稻米油 (20.0%) 和油茶籽油 (12.5%)。不同种类食用植物油中 3-MCPDE 含量差异显著 ($p < 0.05$), 其中稻米油中 3-MCPDE 的含量均值最高, 为 $2\ 957.3 \mu\text{g}/\text{kg}$, 其次为芝麻油 ($2\ 456.9 \mu\text{g}/\text{kg}$) 和油茶籽油 ($1\ 410.8 \mu\text{g}/\text{kg}$), 橄

榄油中 3-MCPDE 的含量均值 ($80.3 \mu\text{g}/\text{kg}$) 最低。

由表 3 可知, 不同种类食用植物油中 2-MCPDE 的检出率总体上具有显著差异 ($p < 0.05$)。其中, 油茶籽油和稻米油中 2-MCPDE 的检出率较高, 均为 100.0%, 橄榄油中 2-MCPDE 的检出率 (22.2%) 最低。不同种类食用植物油中 2-MCPDE 含量差异显著 ($p < 0.05$), 其中稻米油中 2-MCPDE 的含量均值 ($1\ 447.5 \mu\text{g}/\text{kg}$) 最高, 其次为芝麻油 ($623.8 \mu\text{g}/\text{kg}$) 和油茶籽油 ($610.8 \mu\text{g}/\text{kg}$), 橄榄油中 2-MCPDE 的含量均值 ($19.4 \mu\text{g}/\text{kg}$) 最低。

表3 不同种类食用植物油中2-MCPDE的污染状况

Table 3 Contamination status of 2-MCPDE in different edible vegetable oils

植物油	样品数量	检出率/%	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)					
			最小值	平均值	标准差	P ₅₀	P ₉₅	最大值
芝麻油	60	75.0	ND	623.8	756.2	316.0	2 251.5	3 710
菜籽油	27	44.4	ND	82.2	168.9	5.0	648.6	781
植物调和油	27	66.7	ND	143.2	177.1	81.6	664.6	783
大豆油	25	76.0	ND	84.8	55.1	94.1	176.8	181
玉米油	25	88.0	ND	148.4	93.3	146.0	400.5	468
花生油	19	89.5	ND	179.4	163.5	115.0	665.0	665
橄榄油	18	22.2	ND	19.4	31.2	5.0	113.0	113
葵花籽油	18	94.4	ND	118.9	125.2	81.6	561.0	561
油茶籽油	16	100.0	48.5	610.8	609.8	438.0	2 180.0	2 180
稻米油	15	100.0	565	1 447.5	2 266.4	731.0	9 500.0	9 500
亚麻籽油	10	70.0	ND	80.7	110.9	54.7	379.0	379
其他食用植物油	10	90.0	ND	192.5	194.6	142.0	698.0	698
合计	270	74.4	ND	331.3	742.2	114.5	1 429.0	9 500

本研究中稻米油的3-MCPDE和2-MCPDE的平均含量分别为2 957.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和1 447.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,高于2016—2020年浙江省市售稻米油中3-MCPDE含量均值(2 230 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[23]和2-MCPDE含量均值(690 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[24],低于2016—2020年山东省市售稻米油中3-MCPDE含量均值(11 900 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和2-MCPDE含量均值(6 330 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[25]。2016—2020年山东省市售芝麻油中3-MCPDE和2-MCPDE的含量均值分别为683 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和272 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[25],均低于本研究中芝麻油的3-MCPDE和2-MCPDE

含量均值。浙江省市售油茶籽油中3-MCPDE和2-MCPDE含量均值分别为2 530 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[23]和1 230 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[24],均高于本研究中油茶籽油的3-MCPDE和2-MCPDE含量均值。不同种类食用植物油中MCPDE含量差异较大主要与不同植物油的生产加工工艺以及油料、辅料中氯离子含量不同有关^[26-28]。

2.1.3 不同产地食用植物油中MCPDE的污染状况

不同产地食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的污染状况见表4。

表4 不同产地食用植物油中MCPDE的污染状况

Table 4 Contamination status of MCPDE in edible vegetable oils from different producing areas

污染物	样品产地	样品数量	检出率/%	超标率/%	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)					
					最小值	平均值	标准差	P ₅₀	P ₉₅	最大值
3-MCPDE	国产	250	85.2	12.0	ND	1 067.9	200.6	400.0	5 161.5	18 500
	进口	20	55.0	0.0	ND	278.8	413.4	160.2	1 702.3	1 760
2-MCPDE	国产	250	76.4	-	ND	350.0	767.0	1.5	1 444.5	9 500
	进口	20	50.0	-	ND	98.5	165.0	18.2	678.0	698

注:进口样品包括14件橄榄油、1件芝麻油、2件核桃油、2件葡萄籽油和1件牛油果油

Note: The imported samples include 14 pieces of olive oil, 1 piece of sesame seed oil, 2 pieces of walnut oil, 2 pieces of grapeseed oil and 1 piece of avocado oil

由表4可知,国产食用植物油中3-MCPDE的检出率(85.2%)显著高于进口样品(55.0%)($p < 0.05$)。国产食用植物油中3-MCPDE的超标率(12.0%)高于进口样品。国产食用植物油中3-MCPDE的含量均值(1 067.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$)显著高于进口样品(278.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$)($p < 0.05$)。国产食用植物油中2-MCPDE的检出率(76.4%)显著高于进口样品(50.0%)($p < 0.05$)。国产食用植物油中2-MCPDE的含量均值(350.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$)显著高于进口样

品(98.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$)($p < 0.05$)。国产和进口食用植物油中MCPDE的含量存在差异可能主要与不同产地植物油种类构成不同有关。

2.1.4 不同品牌芝麻油中MCPDE的污染状况

不同品牌芝麻油中3-MCPDE和2-MCPDE的污染状况见表5。

由表5可知,4种品牌的芝麻油中3-MCPDE的检出率范围为42.9%~100.0%。总体上,不同品牌芝麻油中3-MCPDE含量差异显著($p <$

0.05),其中C品牌芝麻油中3-MCPDE含量均值最高,为4 230.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。4种品牌的芝麻油中2-MCPDE的检出率范围为28.6%~100.0%。总体上,不同品牌芝麻油中2-MCPDE含量差异显著

($p < 0.05$),其中C品牌芝麻油中2-MCPDE含量均值最高,为983.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。不同品牌芝麻油中MCPDE含量不同主要与不同厂家加工工艺不同有关。

表5 不同品牌芝麻油中MCPDE的污染状况

Table 5 MCPDE contamination status in sesame seed oil of different brands

品牌	样品数量	3-MCPDE 检出率/%	3-MCPDE 含量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$				2-MCPDE 检出率/%	2-MCPDE 含量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$			
			最小值	平均值	P_{50}	最大值		最小值	平均值	P_{50}	最大值
A	10	100.0	71.2	807.2	798.0	2 140	60.0	ND	78.9	57.2	264
B	7	42.9	ND	138.8	5.0	448	28.6	ND	23.4	5.0	84.6
C	4	100.0	1 810	4 230.0	4 405.0	6 300	100.0	472	983.5	1 021.0	1 420
D	3	100.0	852	1 417.3	1 120.0	2 280	100.0	120	301.7	240.0	545

2.2 食用植物油中MCPDE的暴露评估

上海市居民每日经食用植物油摄入3-MCPDE和2-MCPDE的暴露量见表6。

表6 上海市居民每日经食用植物油摄入3-MCPDE和2-MCPDE的暴露量

Table 6 Daily exposure of residents to 3-MCPDE and 2-MCPDE through edible vegetable oil intake in Shanghai

污染物	年龄 (岁)	平均消费 量/ (g/d)	平均体 质量/ kg	平均暴露量/ $(\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d}))$	平均暴露量 与TDI的 比值/%
3-MCPDE	3~5	20.72	17.9	1.169	58.4
	6~10	25.30	30.3	0.843	42.1
	11~17	31.79	48.7	0.659	32.9
	18~44	32.95	66.4	0.501	25.0
	45~59	35.18	63.8	0.557	27.8
	≥ 60	30.36	64.5	0.475	23.8
2-MCPDE	3~5	20.72	17.9	0.383	-
	6~10	25.30	30.3	0.277	-
	11~17	31.79	48.7	0.216	-
	18~44	32.95	66.4	0.164	-
	45~59	35.18	63.8	0.183	-
	≥ 60	30.36	64.5	0.156	-

由表6可知,上海市不同年龄组居民每日经食用植物油摄入3-MCPDE的平均暴露量范围为0.475~1.169 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$,是EFSA规定的3-MCPDE及其酯的TDI的23.8%~58.4%,健康风险总体上较低。上海市不同年龄组居民每日经食用植物油摄入2-MCPDE的平均暴露量范围为0.156~0.383 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。

浙江省不同年龄组居民经食用植物油摄入3-MCPDE、2-MCPDE的平均暴露量范围分别为0.46~1.50 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ^[23]、0.21~0.69 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ^[24]。山东省不同年龄组居民经食用植物油摄入3-MCPDE的平均暴露量范围为0.466~0.926 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ^[25]。Cui等^[16]报道我国居民经食用植物油摄入3-

MCPDE的平均暴露量为0.520 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。上述3项研究中不同年龄组居民通过食用植物油摄入3-MCPDE的平均暴露量均小于EFSA规定的TDI,表明健康风险较低。不同研究中3-MCPDE暴露量差异主要与居民植物油消费量以及植物油中3-MCPDE含量不同有关。

本评估存在一定的不确定性:一是本次植物油消费量引用我国居民的植物油消费量数据,而非现阶段上海市居民植物油消费量调查数据,由于缺少居民植物油消费量的 P_{95} 值,本次未评估植物油高消费人群MCPDE的高端暴露量(P_{95} 值),可能会低估上海市植物油高消费人群的暴露风险;二是本次仅考虑植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的暴露量,未考虑其他食品(如油炸食品等)中3-MCPDE和2-MCPDE的暴露量,也未考虑植物油在烹调过程中3-MCPDE和2-MCPDE的含量变化,例如烹调温度过高、煎炸时间过长、食用盐使用量偏多等均可能会导致植物油中3-MCPDE的含量增加。因此,本研究中经食用植物油摄入的MCPDE的暴露量可能存在一定的低估。

3 结论

本研究分析了2020—2024年上海市市售食用植物油中MCPDE的污染情况,并采用点评估法评估上海市居民经食用植物油摄入MCPDE的膳食暴露水平。结果表明,270件食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的总体检出率分别为83.0%和74.4%,含量均值分别为1 009.5和331.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,并且3-MCPDE和2-MCPDE含量存在显著正相关。按照欧盟(EU)2023/915植物油中3-MCPDE与3-MCPDE之和的最大限量值对样品中3-MCPDE检测结果进行评价,3-MCPDE的超标率为11.1%,其中芝麻油中3-MCPDE的超标率(36.7%)最高。不同种类食用植物油中MCPDE污

染水平不同,其中稻米油中3-MCPDE和2-MCPDE的含量均值最高,其次为芝麻油和油茶籽油,MCPDE含量均值最低的是橄榄油。国产食用植物油中3-MCPDE和2-MCPDE的含量均值均显著高于进口样品。不同品牌芝麻油中3-MCPDE和2-MCPDE的含量均存在显著差异。上海市不同年龄组居民每日经食用植物油摄入3-MCPDE的平均暴露量范围为0.475~1.169 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$,均小于EFSA规定的TDI,总体健康风险较低。上海市不同年龄组居民每日通过食用植物油摄入2-MCPDE的平均暴露量范围为0.156~0.383 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。

针对植物油中MCPDE的污染现状,提出以下建议:一是植物油生产企业加强生产全过程控制,降低植物油中MCPDE含量。严格把控油料、辅料以及包装材料质量,降低其中MCPDE前体物质(如氯离子、甘油二酯和甘油一酯等)的含量,加强生产加工过程控制,采取降低脱臭温度和时间、增加不含氯离子的脱色剂(如活性白土、活性炭等)使用量、控制生产用水中氯离子的浓度、使用分子蒸馏法脱除样品中MCPDE等措施,进一步降低植物油中MCPDE的含量,同时,强化成品植物油中MCPDE含量的出厂检测,确保产品符合相关标准。二是政府部门要加强对植物油(尤其是稻米油、芝麻油和油茶籽油等)中MCPDE的监管、风险监测和风险评估,制定科学的控制规范和限量标准来降低植物油中MCPDE含量。三是加大植物油中MCPDE的科普宣传,建议居民均衡饮食,降低植物油的煎炸温度和时间,减少食盐的使用量和植物油以及油炸食品的摄入量。

参考文献:

- [1] OEY S B, VAN DER FELS - KLERX H J, FOGLIANO V, et al. Mitigation strategies for the reduction of 2- and 3-MCPD esters and glycidyl esters in the vegetable oil processing industry[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2019, 18(2): 349-361.
- [2] HRNCIRIK K, VAN DUIJN G. An initial study on the formation of 3-MCPD esters during oil refining[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2011, 113(3): 374-379.
- [3] PUDEL F, BENECKE P, FEHLING P, et al. On the necessity of edible oil refining and possible sources of 3-MCPD and glycidyl esters[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2011, 113(3): 368-373.
- [4] BUHRKE T, WEIBHAAR R, LAMPEN A. Absorption and metabolism of the food contaminant 3-chloro-1,2-propanediol (3-MCPD) and its fatty acid esters by human intestinal Caco-2 cells[J]. *Arch Toxicol*, 2011, 85(10): 1201-1208.
- [5] 李荷丽,罗季阳,管蔚东,等.食品中氯丙醇酯的毒性及代谢动力学研究进展[J]. *食品科技*, 2018, 43(10): 357-361.
- [6] ONAMI S, CHO Y M, TOYODA T, et al. A 13-week repeated dose study of three 3-monochloropropane-1,2-diol fatty acid esters in F344 rats[J]. *Arch Toxicol*, 2014, 88(4): 871-880.
- [7] 齐丽娟,宋雁,张晓鹏,等.基于系统文献检索的3-MCPD及其酯类经口暴露的危害评估[J]. *毒理学杂志*, 2019, 33(6): 432-438.
- [8] Risks for human health related to the presence of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPD), and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food[J/OL]. *EFSA J*, 2016, 14(5): 4426 [2024-05-28]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4426>.
- [9] JIN C, MIN F, ZHONG Y, et al. Nephrotoxicity evaluation of 3-monochloropropane-1,2-diol exposure in Sprague-Dawley rats using data-independent acquisition-based quantitative proteomics analysis[J]. *Toxicol Lett*, 2022, 356:110-120.
- [10] Some chemicals present in industrial and consumer products, food and drinking water[J]. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, 2013,101: 9-549.
- [11] 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.
- [12] Update of the risk assessment on 3-monochloropropanediol and its fatty acid esters[J/OL]. *EFSA J*, 2018, 16(1): 5083 [2024-05-28]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5083>.
- [13] 程莉,李莉,甘源,等.食品中氯丙醇脂肪酸酯的健康风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2020, 30(6): 745-750.
- [14] 宇盛好,李亦奇,张露菁,等.上海市市售婴幼儿配方乳粉中氯丙醇酯和缩水甘油酯的监测及膳食暴露评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(11): 1605-1611.
- [15] 郭蓉,王玮,李敏,等.陕西省市售食用植物油及油脂类食品中脂肪酸氯丙醇酯的污染水平调查与暴露风险评估[J]. *卫生研究*, 2019, 48(3): 493-498, 503.
- [16] CUI X, ZHANG L, ZHOU P, et al. Dietary exposure of general Chinese population to fatty acid esters of 3-monochloropropane-1,2-diol (3-MCPD) from edible oils and oil-containing foods[J]. *Food Addit Contam A*, 2021, 38(1): 60-69.

(下转第79页)

- [2024 - 05 - 17]. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115586>.
- [12] ZHANG C, XU Y, WU S, et al. Fabrication of astaxanthin - enriched colon - targeted alginate microspheres and its beneficial effect on dextran sulfate sodium - induced ulcerative colitis in mice[J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 205: 396 - 409.
- [13] DUBASHYNSKAYA N V, GASILOVA E R, SKORIK Y A. Nano - sized fucoidan interpolyelectrolyte complexes; Recent advances in design and prospects for biomedical applications[J/OL]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(3):2615 [2024 - 05 - 17]. <https://doi.org/10.3390/ijms24032615>.
- [14] 闫紫玮,郭瑞阳,王小雪,等. 玉米醇溶蛋白/果胶稳定的肉桂精油皮克林乳液制备工艺的优化[J]. *中国食品学报*,2023,23(3):260 - 270.
- [15] TAVERNIER I, WIJAYA W, VAN DER MEEREN P, et al. Food - grade particles for emulsion stabilization[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2016, 50: 159 - 174.
- [16] CHERHAL F, COUSIN F, CAPRON I. Structural description of the interface of Pickering emulsions stabilized by cellulose nanocrystals[J]. *Biomacromolecules*, 2016, 17(2): 496 - 502.
- [17] DAI L, SUN C, WEI Y, et al. Characterization of Pickering emulsion gels stabilized by zein/gum arabic complex colloidal nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 74: 239 - 248.
- [18] XU Y, CHU Y, FENG X, et al. Effects of zein stabilized clove essential oil Pickering emulsion on the structure and properties of chitosan - based edible films[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 156: 111 - 119.
- [19] PIRIYAPRASARTH S, JUTTULAPA M, SRIAMORNSAK P. Stability of rice bran oil - in - water emulsions stabilized by pectin - zein complexes; Effect of composition and order of mixing[J]. *Food Hydrocolloid*, 2016, 61:589 - 598.
- [20] MWANGI W W, HO K W, TEY B T, et al. Effects of environmental factors on the physical stability of Pickering - emulsions stabilized by chitosan particles [J]. *Food Hydrocolloid*, 2016, 60: 543 - 550.
- [21] ZHANG T, GUO J, CHEN J F, et al. Heat stability and rheological properties of concentrated soy protein/egg white protein composite microparticle dispersions[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 100: 105449 [2024 - 05 - 17]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105449>.
- [22] ZHU Q, LU H, ZHU J, et al. Development and characterization of Pickering emulsion stabilized by zein/corn fiber gum (CFG) complex colloidal particles [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 91: 204 - 213.
-
- (上接第 49 页)
- [17] FAN J C, HE H L, REN R, et al. Monochloropropanediol in edible vegetable oils from Hangzhou market in China: Occurrence and exposure risk assessment[J]. *Food Addit Contam A*, 2021, 38(11): 1867 - 1874.
- [18] 赵方蕾,张彤薇,潘峰,等. 2017—2020 年中国 3 ~ 17 岁儿童青少年烹调油消费状况分析[J]. *中国食物与营养*, 2023, 29(11): 52 - 57.
- [19] 赵方蕾,张彤薇,潘峰,等. 2017—2020 年中国 18 ~ 59 岁成年居民烹调油消费状况[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(6): 909 - 914.
- [20] 赵方蕾,张彤薇,潘峰,等. 2017—2020 年中国老年居民烹调油消费状况[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(11): 1644 - 1650.
- [21] 王绪卿,吴永宁,陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. *中华预防医学杂志*, 2002, 36(4): 278 - 279.
- [22] 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.
- [23] 张荷香,陈江,陈莉莉,等. 2016—2020 年浙江省市售 9 种食用油中 3 - 氯丙醇酯污染状况[J]. *卫生研究*, 2022, 51(2): 302 - 307.
- [24] 张荷香,陈江,陈莉莉,等. 2016—2020 年浙江省市售食用植物油中 2 - 氯丙醇酯污染状况和暴露评估[J]. *卫生研究*, 2023, 52(4): 618 - 622.
- [25] 朱丽君,王立友,王楷,等. 2016—2020 年山东省食用植物油中氯丙醇酯污染水平及人群暴露评估[J]. *卫生研究*, 2022, 51(5): 823 - 828.
- [26] 刘壮,刘莹,罗日明,等. 植物油精炼过程中缩水甘油酯和 3 - 氯丙醇酯的形成及脱除研究进展[J]. *中国油脂*, 2023, 48(3): 64 - 70.
- [27] 武德银,李媛,王满意,等. 食用油中氯丙醇酯污染及检测方法研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(10): 69 - 73, 92.
- [28] SUN C, WU N, KOU S, et al. Occurrence, formation mechanism, detection methods, and removal approaches for chloropropanols and their esters in food: An updated systematic review [J/OL]. *Food Chem X*, 2023, 17: 100529 [2024 - 05 - 28]. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100529>.