

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241118007

引用格式: 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. (in Chinese with English abstract).

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

宇盛好, 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: 目的 了解上海居民食用植物油中缩水甘油酯(glycidyl esters, GE)的污染水平, 评估上海居民 GE 的膳食暴露风险。**方法** 利用 2024 年上海市市售食用植物油中 GE 的监测数据, 结合 2024 年上海居民植物油消费量数据, 采用简单分布评估法计算上海居民经植物油摄入 GE 的暴露量, 并用暴露边界比(margin of exposure, MOE)法评估健康风险。**结果** 178 件食用植物油中 GE 的检出率为 94.4%, 含量均值为 360.8 $\mu\text{g/kg}$, 最大值为 5470.0 $\mu\text{g/kg}$ 。参照欧盟法规规定的植物油中 GE 的限量值进行评价, 发现样品中 GE 的超标率为 5.6%。稻米油中 GE 的含量均值(1169.3 $\mu\text{g/kg}$)最高, 其次为油茶籽油(657.8 $\mu\text{g/kg}$)和玉米油(499.0 $\mu\text{g/kg}$)。上海 ≥ 3 岁居民每日通过食用植物油摄入 GE 的平均暴露量和 P_{95} 暴露量分别为 0.208 和 0.497 $\mu\text{g/kg bw}$, MOE 值分别为 11538 和 4829, P_{95} MOE 小于 10000。3~17 岁居民经植物油摄入 GE 的平均 MOE 值小于 10000。4 个不同年龄组居民经植物油摄入 GE 的 P_{95} MOE 值均小于 10000。**结论** 上海居民经植物油摄入 GE 的健康风险总体上处于可接受水平。但对于 3~17 岁人群以及植物油高消费人群 GE 暴露的健康风险仍需重点关注。

关键词: 食用植物油; 缩水甘油酯; 污染水平; 暴露评估; 暴露边界比

Contamination level and dietary exposure assessment of glycidyl esters in edible vegetable oils sold in Shanghai

YU Sheng-Hao, PENG Shao-Jie*

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

ABSTRACT: Objective To understand the contamination level of glycidyl esters (GE) in edible vegetable oils and to evaluate the dietary exposure risk of GE in Shanghai residents. **Methods** Based on the monitoring data of GE in edible vegetable oil sold in Shanghai in 2024, combined with the vegetable oil consumption data of Shanghai residents in 2024, the GE exposure of Shanghai residents via vegetable oil was calculated by simple distribution

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 2024 年度上海市市场监督管理局科技项目(2024-51)

第一作者: 宇盛好(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要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(1968—), 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: pengshaojie2008@qq.com

assessment method, and the margin of exposure (MOE) method was used to assess the health risk. **Results** The detection rate of GE in 178 edible vegetable oils was 94.4%, with an average content of 360.8 $\mu\text{g/kg}$ and a maximum value of 5470.0 $\mu\text{g/kg}$. According to the EU regulations on the limit values of GE in vegetable oils, it was found that the exceeding standard rate of GE in vegetable oil was 5.6%. The mean content of GE in rice oil (1169.3 $\mu\text{g/kg}$) was the highest, followed by camellia seed oil (657.8 $\mu\text{g/kg}$) and corn oil (499.0 $\mu\text{g/kg}$). The mean daily exposure and 95th percentile exposure of GE from edible vegetable oils in Shanghai residents aged ≥ 3 years old were 0.208 and 0.497 $\mu\text{g/kg bw}$, the MOE values were 11538 and 4829, respectively, and P_{95} MOE was less than 10000. The mean MOE value of GE exposure through vegetable oil in residents aged 3 to 17 years old was less than 10000. The P_{95} MOE values of GE exposure through vegetable oil in 4 different age groups were all less than 10000. **Conclusion** The health risk of GE intake via edible vegetable oil in Shanghai residents is generally at an acceptable level. However, the health risks of GE exposure for individuals aged 3 to 17 year old and those with high consumption of vegetable oil still need to be focused.

KEY WORDS: edible vegetable oil; glycidyl esters; contamination level; exposure assessment; margin of exposure

0 引 言

缩水甘油酯(glycidyl esters, GE)是植物油在精炼或者热加工过程中产生的新型污染物^[1-3]。在植物油精炼过程中, GE 和 3-氯-1,2-丙二醇酯(3-monochloropropane-1,2-diol esters, 3-MCPDE)通常一起产生,在特定条件下 GE 和 3-MCPDE 可以互相转化^[4-5]。GE 在人体中会代谢为缩水甘油(glycidol, Gly), Gly 具有神经毒性、遗传毒性和致癌性等^[6-9],并且 2000 年国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)已将 Gly 列为 2A 类致癌物^[9]。2016 年,欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)基于大鼠长期暴露 Gly 引起的 25%肿瘤发生率,建立了 Gly 的基准剂量 T_{25} 为 10.2 mg/kg bw ^[8]。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 FAO/WHO Expert Committee on Food and Additives, JECFA)制定了 Gly 的基准剂量可信区间下限值(benchmark dose lower confidence limit 10%, BMDL₁₀)为 2.4 mg/kg bw ^[10]。

食用植物油^[11-12]、油炸食品^[13-14]、熏烤食品^[13]、饼干^[15]、面包^[15]以及婴幼儿配方乳粉^[16-17]等含油脂食品中普遍存在 GE 污染。刘卿等^[5]报道了我国 2015—2017 年市售 397 件植物油中 GE 的超标率为 19.9%,含量均值为 680 $\mu\text{g/kg}$,最大值为 7360 $\mu\text{g/kg}$ 。目前,我国还缺乏植物油中 GE 的限量标准和控制规范。2023 年,欧盟(EU)2023/915《关于食品中某些污染物最高含量的条例》规定植物油中 GE(以 Gly 计)的最大限量为 1000 $\mu\text{g/kg}$,并规定生产婴儿食品和婴幼儿谷类食品的植物油中 GE 的限量值为 500 $\mu\text{g/kg}$ ^[18]。植物油作为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身体健康。

鉴于此,本研究对上海市市售食用植物油中 GE 的污染情况进行分析,结合上海居民植物油消费量数据,采用

简单分布评估法计算上海居民经植物油摄入 GE 的暴露水平,并采用暴露边界比法(margin of exposure, MOE)评估上海居民健康风险,为植物油中 GE 安全监管以及限量标准制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品来源

2024 年共监测上海市市售食用植物油样品 178 件。按照植物油的种类分类,包括玉米油、大豆油、菜籽油、花生油等 14 种。样品随机采集于上海市的超市、农贸市场、批发市场、食品店以及网店等。样品覆盖了上海市场上销售的 91 个植物油品牌。样品生产加工工艺主要包括压榨、浸出以及水代法等。按照样品产地分,包括国产和进口样品。其中,国产样品产地包括上海、江苏、安徽、山东、浙江、河南、江西等 21 个省(自治区、直辖市),进口样品产地包括西班牙、意大利、法国、新加坡 4 个国家。

1.2 检验方法

植物油样品中 GE 含量委托上海市食品药品检验研究院进行检验。植物油中 GE 检验方法为《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 ^{13}C 同位素稀释-气相色谱-串联质谱法)^[19],GE(以 Gly 计)的检出限和定量限分别为 10 $\mu\text{g/kg}$ 和 30 $\mu\text{g/kg}$ 。本研究参照欧盟关于植物油中 GE 的最大限量(1000 $\mu\text{g/kg}$)对样品中 GE 的检测值进行评价。

1.3 居民食用植物油的消费量数据

上海居民每日食用植物油的消费量数据采用 2024 年 4 月—2024 年 7 月本单位委托上海质协用户评价中心开展的上海居民食用植物油消费量调查数据。调查方法为在上海的 16 个区随机选择愿意配合消费量调查的居民,采用

食物称重法计算居民 24 h 植物油的消费量。共调查 3~93 岁居民 526 名, 平均体重为 58.5 kg。按照年龄段分, 3~17 岁、18~44 岁、45~59 岁、≥60 岁居民的调查人数分别为 113、171、124 和 118 人。按照性别分, 男性和女性分别调查了 254 和 272 人。

1.4 暴露评估方法

采用简单分布评估方法计算上海居民通过食用植物油摄入 GE 的膳食暴露量, 暴露量的计算公式如式(1)所示:

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

式中: E 为上海居民个体每日每 kg 体质量 GE 的膳食暴露量, $\mu\text{g}/\text{kg bw}$; C 为植物油中 GE 的平均含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$; F 为某个体每日植物油的消费量, g/d ; W 为个体的体质量, kg 。

在得到居民个体通过植物油摄入 GE 暴露量的基础上, 最终可获得上海居民 GE 暴露量的频数分布, 可计算不同年龄段居民经植物油摄入 GE 暴露量的平均值、中位数和 P_{95} 值等。

本研究采用 MOE 法来评价 GE 的膳食暴露风险。本研究采用 JECFA 制定的 Gly 的 BMDL_{10} ($2.4 \text{ mg}/\text{kg bw}$) 来计算 GE 的 MOE 值。当 $\text{MOE} < 10000$ 时, 表示存在一定的健康风险, 需要重点关注; 当 $\text{MOE} \geq 10000$ 时, 表示健康风险处于可接受水平^[20]。MOE 的计算公式如式(2)所示。

$$\text{MOE} = \frac{\text{BMDL}_{10}}{E} \quad (2)$$

1.5 数据处理

本研究采用世界卫生组织对食品中污染物的未检出值(not detected, ND)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 GE 的 ND 值以检出限的一半(即 $5.0 \mu\text{g}/\text{kg}$)替代。运用 WPS Office 2024 和 SPSS 28.0 软件对样品监测数据进行统计分析。样品中 GE 检出率差异比较采用卡方检验(χ^2), 但对于不满足卡方检验要求的(如超过 20%单元格的理论频数 T 小于 5 或至少 1 个 T 小于 1), 则采用 Fisher 确切概率法检验。不同种类、不同品牌样品中 GE 的含量差异比较采用 Kruskal-Wallis H 检验。采用 Kruskal-Wallis H 检验比较不同年龄段居民植物油消费量的差异。采用 Kruskal-Wallis H 检验比较不同年龄段居民 GE 暴露量的差异。不同产地样品中 GE 的含量差异比较采用 Mann-Whitney U 检验。当 $P < 0.05$ 时, 表明差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 食用植物油中 GE 的污染状况

2.1.1 总体情况

2024 年上海市市售 178 件食用植物油中 GE 的总体检

出率为 94.4%(168/178), 含量均值为 $360.8 \mu\text{g}/\text{kg}$, 中位数为 $241.5 \mu\text{g}/\text{kg}$, 最大值为 $5470.0 \mu\text{g}/\text{kg}$, 植物油中 GE 含量的频数分布见图 1。若参照欧盟关于植物油中 GE 的限量标准对样品中 GE 检验结果进行评价, GE 超标率为 5.6%(10/178)。本次植物油中 GE 含量的最大值($5470.0 \mu\text{g}/\text{kg}$)出现在 1 件稻米油中, 为 GE 的最大限量值($1000 \mu\text{g}/\text{kg}$)的 5.47 倍(表 1)。

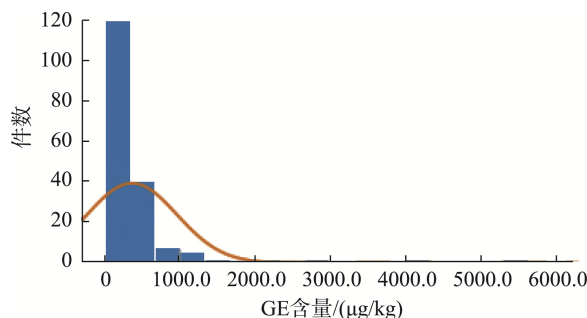


图 1 食用植物油中 GE 含量的频数分布图

Fig.1 Frequency distribution of GE content in edible vegetable oils

2.1.2 不同种类食用植物油中 GE 的污染状况

总体上, 不同种类植物油中 GE 的检出率差异有统计学意义($P < 0.05$)。其中, 玉米油、葵花籽油、芝麻油、稻米油、食用植物调和油、油茶籽油、亚麻籽油和核桃油中 GE 的检出率较高, 均为 100.0%, 橄榄油中 GE 的检出率(66.7%)最低。稻米油中 GE 的超标率(26.7%)最高, 其次为油茶籽油(15.4%)和食用植物调和油(13.3%)。总体上, 不同种类植物油中 GE 含量差异显著($H = 89.635, P < 0.05$)。其中, 稻米油中 GE 的含量均值($1169.3 \mu\text{g}/\text{kg}$)最高, 其次为油茶籽油($657.8 \mu\text{g}/\text{kg}$)和玉米油($499.0 \mu\text{g}/\text{kg}$), 橄榄油中 GE 的含量均值最低($37.7 \mu\text{g}/\text{kg}$)。具体结果见表 1。

2.1.3 不同产地食用植物油中 GE 的污染状况

国产食用植物油中 GE 的检出率(96.3%)高于进口样品(77.8%)($\chi^2 = 7.220, P < 0.05$)。国产植物油中 GE 的超标率(6.3%)高于进口样品(0.0%)。国产植物油中 GE 的含量均值($386.0 \mu\text{g}/\text{kg}$)高于进口样品($136.7 \mu\text{g}/\text{kg}$)($Z = -3.508, P < 0.05$)。具体结果见表 2。国产和进口植物油中 GE 的含量存在差异主要与不同产地植物油种类构成不同有关。本次监测的国产样品包括 14 个植物油品种, 而进口样品仅监测 5 个植物油品种(包含橄榄油 12 件、核桃油 2 件、葡萄籽油 2 件、芝麻油 1 件和牛油果油 1 件)。

2.1.4 不同品牌植物油中 GE 的污染状况

选择样本量 ≥ 6 件的 6 个植物油品牌进行统计分析。由表 3 可知: 6 个不同品牌植物油中 GE 的检出率范围为 83.3%~100.0%, 但不同品牌样品中 GE 的检出率差异没有统计学意义($P > 0.05$)。C 品牌植物油中 GE 含量均值($443.9 \mu\text{g}/\text{kg}$)在 6 个品牌中最高, 其次为 A 品牌植物油($407.6 \mu\text{g}/\text{kg}$), 最低的为 B 品牌植物油($170.0 \mu\text{g}/\text{kg}$), 但不

表 1 不同种类食用植物油中 GE 的污染水平
Table 1 Contamination levels of GE in different types of edible vegetable oils

植物油种类	总件数	检出率 /%	超标率 /%	含量/(μg/kg)					
				最小值	平均值	标准差	中位数	P ₉₅	最大值
玉米油	20	100.0	5.0	204.0	499.0	280.2	436.0	1498.4	1540.0
大豆油	20	95.0	0.0	ND	238.7	169.2	250.5	792.2	816.0
菜籽油	15	93.3	0.0	ND	102.6	75.9	79.9	299.0	299.0
花生油	15	86.7	0.0	ND	227.4	145.1	225.0	493.0	493.0
橄榄油	15	66.7	0.0	ND	37.7	27.1	40.4	82.9	82.9
葵花籽油	15	100.0	0.0	57.1	176.4	123.0	167.0	466.0	466.0
芝麻油	15	100.0	6.7	60.4	357.2	298.5	256.0	1040.0	1040.0
稻米油	15	100.0	26.7	50.7	1169.3	1599.6	347.0	5470.0	5470.0
食用植物调和油	15	100.0	13.3	76.3	413.6	348.5	318.0	1330.0	1330.0
油茶籽油	13	100.0	15.4	218.0	657.8	710.3	469.0	2870.0	2870.0
亚麻籽油	10	100.0	0.0	40.5	146.4	122.2	103.0	396.0	396.0
核桃油	5	100.0	0.0	44.0	85.7	30.1	98.3	112.0	112.0
其他食用植物油 ^a	5	80.0	0.0	ND	351.2	208.9	376.0	551.0	551.0
合计	178	94.4	5.6	ND	360.8	599.5	241.5	1040.0	5470.0

注: ^a. 其他食用植物油包括牛油果油(2 件)和葡萄籽油(3 件)。

表 2 不同产地食用植物油中 GE 的污染水平
Table 2 Contamination levels of GE in edible vegetable oils at different production locations

产地	总件数	检出率/%	超标率/%	含量/(μg/kg)					
				最小值	平均值	标准差	中位数	P ₉₅	最大值
国产	160	96.3	6.3	ND	386.0	624.8	260.0	1040.0	5470.0
进口	18	77.8	0.0	ND	136.7	180.5	59.3	551.0	551.0

表 3 不同品牌食用植物油中 GE 的污染水平
Table 3 Contamination levels of GE in different brands of edible vegetable oils

品牌	总件数	检出率/%	超标率/%	含量/(μg/kg)			
				最小值	平均值	中位数	最大值
A	15	100.0	6.7	93.5	407.6	332.0	1280.0
B	11	100.0	0.0	57.1	170.0	193.0	348.0
C	8	87.5	12.5	ND	443.9	249.5	1540.0
D	7	100.0	0.0	50.7	271.8	207.0	636.0
E	6	83.3	0.0	ND	177.0	182.4	317.0
F	6	100.0	0.0	58.4	367.1	249.0	816.0

同品牌植物油中 GE 含量差异无统计学意义($H=9.617$, $P>0.05$)。B、D、E、F 品牌植物油中 GE 含量均未超标, 而 C 和 A 品牌植物油中存在 GE 超标情况, 超标率分别为 12.5% (1/8)和 6.7% (1/15)。

2.2 食用植物油的消费量

本研究共调查上海居民 526 人, 其中有 519 人在调查当天食用了植物油, 总体消费率为 98.7% (519/526)。上海市 ≥ 3 岁居民每日食用植物油的消费量均值和 P_{95} 值分别

为 31.6 g/d 和 80.0 g/d。上海市不同年龄段居民每日植物油消费量差异有统计学意义($H=25.756$, $P<0.05$)。上海市 3~17 岁、18~44 岁、45~59 岁和 ≥ 60 岁居民植物油的消费量均值分别为 24.4、36.8、30.8 和 32.0 g/d。结果见表 4。

2.3 食用植物油中 GE 的暴露评估

由表 5 可知: 上海市 ≥ 3 岁居民每日经食用植物油摄入 GE 的平均暴露量和 P_{95} 暴露量分别为 0.208 和 0.497 $\mu\text{g/kg bw}$, 平均 MOE 值(11538)大于 10000, P_{95} MOE 值(4829)小于

表 4 上海市居民每日食用植物油的消费量
Table 4 Daily consumption of edible vegetable oil of Shanghai residents

年龄分组/岁	调查人数	消费率/%	平均体质量/kg	消费量/(g/d)				
				平均值	标准差	中位数	P_{95}	最大值
3~17	113	98.2	35.6	24.4	21.9	20.5	63.9	165.1
18~44	171	98.2	65.0	36.8	29.8	30.0	104.0	165.1
45~59	124	98.4	66.1	30.8	21.8	26.0	68.4	150.0
≥60	118	100.0	63.3	32.0	18.1	29.5	70.3	132.0
合计(≥3)	526	98.7	58.5	31.6	24.4	26.0	80.0	165.1

表 5 上海市居民每日经食用植物油摄入 GE 的膳食暴露量和 MOE 值
Table 5 Daily dietary GE exposure and MOE values of Shanghai residents through edible vegetable oil

年龄分组/岁	调查人数	膳食暴露量/($\mu\text{g/kg bw}$)			MOE		
		平均值	中位数	P_{95}	平均值	中位数	P_{95}
3~17	113	0.275	0.227	0.682	8727	10573	3519
18~44	171	0.209	0.162	0.608	11483	14815	3947
45~59	124	0.169	0.141	0.371	14201	17021	6469
≥60	118	0.183	0.167	0.372	13115	14371	6452
合计(≥3)	526	0.208	0.165	0.497	11538	14545	4829

10000, 表明本市居民暴露于 GE 的健康风险总体上处于可接受水平, 但植物油高消费人群存在一定的健康风险。总体上, 上海市不同年龄段居民每日通过植物油摄入 GE 的暴露量差异显著($H=21.150, P<0.05$)。3~17 岁居民每日通过植物油摄入 GE 的平均暴露量为 $0.275 \mu\text{g/kg bw}$, 平均 MOE 值小于 10000, 健康风险需要重点关注。4 个不同年龄组(3~17 岁、18~44 岁、45~59 岁、≥60 岁)居民每日通过食用植物油摄入 GE 的 P_{95} 暴露量范围为 $0.371\sim0.682 \mu\text{g/kg bw}$, P_{95} MOE 值(3519~6469)均小于 10000, 表明高消费人群的健康风险需要重点关注。

3 讨论与结论

本研究分析了 2024 年上海市市售食用植物油中 GE 的污染状况, 发现 178 件植物油中 GE 的检出率为 94.4%, 表明植物油普遍存在 GE 污染。按照欧盟规定的植物油中 GE 的最大限量值进行评价, 178 件样品中 GE 的超标率为 5.6%, 并且发现稻米油中 GE 的超标率(26.7%)最高, 其次为油茶籽油和食用植物调和油。不同品种植物油中 GE 污染水平不同。其中, 稻米油中 GE 的含量均值最高, 其次为油茶籽油和玉米油, GE 含量均值最低为橄榄油。植物油中 GE 主要产生于植物油精炼的脱臭阶段, 脱臭温度和脱臭时间均会显著影响植物油中 GE 形成^[22-23]。不同种类植物油的 GE 含量差异较大可能主要与植物油加工工艺、毛油中甘油酯组成(如甘油一酯、甘油二酯等)、游离脂肪酸含量以及油料中氯离子含量不同有关^[5,22]。

本研究植物油中 GE 的含量均值为 $360.8 \mu\text{g/kg}$, 低于

刘卿等^[5]报道的我国市售 397 件植物油中 GE 的含量均值($680 \mu\text{g/kg}$), 低于 2021—2022 年天津市市售 137 件植物油中 GE 的含量均值($940 \mu\text{g/kg}$)^[24], 低于 2019—2023 年济南市市售 142 件植物油中 GE 的含量均值($1410 \mu\text{g/kg}$)^[25], 低于樊继彩等^[26]报道的市售 94 件植物油中 GE 的含量均值($710 \mu\text{g/kg}$), 低于 SHI 等^[27]报道的新加坡市售 36 件精炼植物油中 GE 的含量均值($1317.2 \mu\text{g/kg}$), 低于张波等^[28]报道的承德市市售 30 件植物油中 GE 的含量均值($550 \mu\text{g/kg}$)。

上海市≥3 岁居民每日经植物油摄入 GE 的平均暴露量为 $0.208 \mu\text{g/kg bw}$, 平均 MOE 值大于 10000, P_{95} 暴露量为 $0.497 \mu\text{g/kg bw}$, P_{95} MOE 值小于 10000, 表明植物油高消费人群存在一定的健康风险。若采用 EFSA 规定 Gly 的 T_{25} 值(10.2 mg/kg bw)来计算 GE 的 MOE 值, 发现上海居民经植物油暴露 GE 的平均 MOE 和 P_{95} MOE 值分别为 49038 和 20523, 平均 MOE 值大于 25000, 而 P_{95} MOE 值小于 25000, 表明高消费人群的健康风险需要关注。LIAO 等^[24]报道了天津市不同年龄组居民(7~10 岁、11~13 岁、14~17 岁、18~70 岁)经植物油摄入 GE 的平均暴露量范围为 $0.53\sim0.86 \mu\text{g/kg bw}$, P_{95} 暴露量范围为 $1.24\sim2.01 \mu\text{g/kg bw}$ 。不同研究中 GE 暴露量差异主要与不同研究中居民植物油消费量以及植物油中 GE 含量不同有关。

本研究评估存在一定的不确定性: (1)本次监测植物油样本量(178 件)偏少, 覆盖了 91 个植物油品牌, 但部分品牌的样本量偏少, 导致评估存在一定的不确定性; (2)本次仅考虑植物油中 GE 的暴露量, 未考虑其他含油脂食品中 GE 的膳食暴露量, 也没有植物油烹调过程中 GE 含量变化,

可能存在一定的不确定性; (3)本次上海居民的食用植物油消费量调查的人数(526 人)偏少, 并且仅调查居民一天的植物油消费量, 存在一定的不确定性。

针对食用植物油中 GE 的污染现状, 本研究提出以下建议: (1)植物油生产企业要强化油料的把控, 降低毛油中前体物质(如甘油一酯、甘油二酯)的含量^[22,29-30], 加强脱色、脱臭等生产加工环节的过程控制(如降低精炼温度和缩短精炼时间, 植物油的脱臭温度不宜超过 230 °C)^[30], 加强生产用水中氯离子浓度的控制, 还可以采用分子蒸馏^[23]、短程蒸馏、物理吸附(如活性炭、活性白土、硅胶、凹凸棒土等)^[23,31]、添加抗氧化剂(如丁基羟基茴香醚、二丁基羟基甲苯、迷迭香提取物、茶多酚等)^[32]等方法降低植物油中 GE 含量, 加强植物油中 GE 的出厂检验, 通过采取综合措施降低植物油中 GE 的含量; (2)政府部门要加强重点植物油品种(如稻米油、油茶籽油和玉米油等)中 GE 的安全监管、抽检监测和风险评估, 制定限量标准或控制规范来进一步降低植物油中 GE 含量。(3)加大植物油中 GE 的科普宣传力度, 建议居民食用不同种类的植物油, 并减少食用植物油的消费总量(如成人每天食用油摄入量不要超过 30 g)。

参考文献

- [1] 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]. *Food Chemistry: X*, 2022, 17: 100529.
- [2] OEY SB, VANDER-FELS-KLERX HJ, 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]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(2): 349–361.
- [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]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2011, 113: 368–373.
- [4] 李荷丽, 程雅晴, 贝君, 等. 食品中氯丙醇酯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.
- [5] 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.
- [6] ARISSETO AP, SILVA WC, TIVANELLO RG, *et al.* Recent advances in toxicity and analytical methods of monochloropropanediols and glycidyl fatty acid esters in foods [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 24: 36–42.
- [7] SHIMAMURA Y, INAGAKI R, OIKE M, *et al.* Glycidol fatty acid ester and 3-monochloropropane-1,2-diol fatty acid ester in commercially prepared foods [J]. *Foods*, 2021, 10(12): 2905.
- [8] European Food Safety Authority. 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]. *EFSA Journal*, 2016, 14(5): 4426.
- [9] IARC. Some industrial chemicals [J]. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 2000, 77: 9–529.
- [10] 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.
- [11] 张家枫, 刘玉兰, 孙国昊, 等. 不同食用油的甘油酯组成、3-MCPD 酯和 GE 含量研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(12): 38–43.
ZHANG JF, LIU YL, SUN GH, *et al.* Glyceride composition and 3-MCPD ester and GE contents of different edible vegetable oil products [J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(12): 38–43.
- [12] 侯靖, 卢跃鹏, 周晓婷, 等. 市售植物油中氯丙醇酯和缩水甘油酯污染水平研究[J]. *中国油脂*, 2024, 49(9): 85–91.
HOU J, LU YP, ZHOU XT, *et al.* Pollution level of chloropropanol esters and glycidyl esters in vegetable oil on the market [J]. *China Oils and Fats*, 2024, 49(9): 85–91.
- [13] YABANI DS, OFOSU IW, ANKAR-BREWOO GM, *et al.* 3-monochloropropanediol and glycidyl esters in heat-processed oil-based food products: Exposure and risk [J]. *Applied Food Research*, 2024, 4(1): 100393.
- [14] QUEK WP, ONG YH, YAP MKK, *et al.* The effects of quality changes in vegetable oils on the formation and absorption of monochloropropanediol esters (MCPDE) and glycidyl esters (GE) during deep-frying of potato chips [J]. *Food Control*, 2023, 149: 109699.
- [15] CHANG YH, LIAO KW, LIN ZE, *et al.* Preliminary assessments of population exposure to glycidyl esters and 3-monochloropropane-1,2-diol esters from miscellaneous oil-containing packaged foods in Taiwan [J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 137055.
- [16] 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.
YU SH, LI YQ, ZHANG LJ, *et al.* Monitoring and dietary exposure assessment of chloropropanol esters and glycidyl esters in infant formula sold in Shanghai City [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(11): 1605–1611.
- [17] 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 preliminary 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.
- [18] European Commission. Commission Regulation(EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006 [EB/OL]. (2023-05-05) [2024-09-04]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>

- [19] 国家食品安全风险评估中心. 2022 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册(中卷)[Z]. 2022.
- China National Center for Food Safety Risk Assessment. National work manual on risk monitoring of food contaminants and harmful factors 2022 (medium volume) [Z]. 2022.
- [20] European Food Safety Authority. Opinion of the Scientific Committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic [J]. EFSA Journal, 2005, 3(10): 282.
- [21] GEMS/Food-EURO. Second workshop on reliable evaluation of low-level contamination of food: Report on a workshop in the frame of GEMS/Food-EURO [R]. Kulmbach: GEMS/Food-EURO, 1995.
- [22] 刘壮, 刘萱, 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.
- LIU Z, LIU X, LUO RM, *et al.* Research progress on formation and removal of glycidyl esters and 3-monochloropropane fatty acid esters in vegetable oil refining [J]. China Oils and Fats, 2023, 48(3): 64–70.
- [23] 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.
- [24] LIAO ZY, GAO ZB, YANG QW, *et al.* Occurrence and exposure evaluation of 2- and 3-monochloropropanediol (MCPD) esters and glycidyl esters in refined vegetable oils marketed in Tianjin of China [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 130: 106150.
- [25] 孙婷, 焦海峰, 郭培玉, 等. 济南市市售食用植物油中氯丙醇酯和缩水甘油酯污染状况分析[J/OL]. 中国油脂, 1–10. [2024-04-19]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240150>
- SUN T, JIAO HF, GUO PY, *et al.* Contamination characteristics of chloropropanol esters and glycidyl esters in edible vegetable oil marketed in Jinan City [J/OL]. China Oils and Fats, 1–10. [2024-04-19]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240150>
- [26] 樊继彩, 胡琰, 何华丽, 等. 市售食用植物油和婴幼儿配方奶粉中缩水甘油酯污染水平及其暴露风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(4): 504–507.
- FAN JC, HU Y, HE HL, *et al.* Contamination detection and exposure risk assessment of glycidyl esters in edible vegetable oils and infant formula milk powder [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 32(4): 504–507.
- [27] 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, 12(23): 4331.
- [28] 张波, 曾凡刚. 承德市食用植物油中氯丙醇酯和缩水甘油酯污染水平与暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(4): 1261–1265.
- ZHANG B, ZENG FG. Contamination and dietary exposure assessment of chloropropanol esters and glycidol esters in edible vegetable oils in Chengde City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(4): 1261–1265.
- [29] 冯兆寒, 周燕霞, 孙尚德. 酶催化酯化法降低模型油中甘油一酯和甘油二酯以防控 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的研究[J/OL]. 中国油脂, 1–18. [2024-04-23]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240061>
- FENG ZH, ZHOU YX, SUN SD. Study on reducing monoglyceride and diglyceride of model oil by enzyme esterification to control 3-monochloropropane-1,2-diol esters and glycidyl esters [J/OL]. China Oils and Fats, 1–18. [2024-04-23]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240061>
- [30] 李利君, 李加辛, 马传国. 脱臭温度下油脂成分对 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯形成的影响及其形成机理的推测[J]. 中国油脂, 2021, 46(5): 97–102.
- LI LJ, LI JX, MA CG. Influence of oil components on the formation of 3-monochloropropane-1, 2 -diol esters and glycidyl esters and speculation about the formation mechanism under the simulated deodorization temperature [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(5): 97–102.
- [31] RESTIAWATY E, MAULANA A, UMI-CULSUM NT, *et al.* The removal of 3-monochloropropane-1,2-diol ester and glycidyl ester from refined-bleached and deodorized palm oil using activated carbon [J]. RSC Advances, 2021, 11(27): 16500–16509.
- [32] 安浩. 葵花籽油加工过程中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成及抑制研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- AN H. Formation and inhibition of 3-chloro-1,2-propanediol fatty acid esters and glycidyl esters during processing in sunflower oil [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)