

## 风险评估

## 2022年湖北省猪肝中有机磷酸酯和多氯联苯污染水平与膳食暴露风险评估

刘小方, 刘潇, 周妍, 陈海川, 程青云, 曹文成, 闻胜

(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, 湖北省疾病预防控制中心,  
湖北武汉 430079)

**摘要:**目的 调查湖北省猪肝中7种有机磷酸酯(OPEs)和6种指示性多氯联苯(PCBs)的污染水平, 评估湖北省居民通过食用猪肝摄入OPEs和PCBs的暴露风险。方法 2022年在湖北采集51份猪肝样品, 采用同位素稀释法, 分别利用超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)和高分辨气相色谱-高分辨磁质谱(HRGC-HRMS)测定猪肝样品中OPEs和PCBs的含量水平。通过分析其指纹特征, 探索污染来源。根据湖北居民每日膳食摄入量(EDI)和危害指数(HI), 评估居民通过食用猪肝摄入OPEs和PCBs的暴露风险。结果 猪肝中7种OPEs( $\sum_7$ OPEs)的浓度范围为15.6~262 ng/g, 平均数为89.7 ng/g ( $P_{50}$ =88.4 ng/g); 6种PCBs( $\sum_6$ PCBs)的浓度范围为3.67~19.5 pg/g, 平均数为9.02 pg/g ( $P_{50}$ =8.21 pg/g)。磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯(TDCPP)和PCB 52分别为猪肝中OPEs和PCBs的主要特征污染物。部分OPEs之间呈正相关( $r=0.278\sim 0.841, P<0.05$ ), 不同PCBs之间均呈正相关( $r=0.367\sim 0.942, P<0.01$ )。湖北省居民通过食用猪肝摄入 $\sum_7$ OPEs和 $\sum_6$ PCBs的平均EDI值分别为2.76 ng/kg·BW/d ( $P_{95}$ =5.83 ng/kg·BW/d)和0.28 pg/kg·BW/d ( $P_{95}$ =0.58 pg/kg·BW/d), 通过与参考剂量值比较, HI值均远小于1。结论 尽管OPEs和PCBs在猪肝中普遍检出, 但污染水平较低。湖北省居民通过食用猪肝摄入OPEs和PCBs的暴露风险相对较低。

**关键词:**有机磷酸酯; 多氯联苯; 猪肝; 膳食暴露; 风险评估; 食品安全

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2024)07-0858-06

DOI: 10.13590/j.cjfh.2024.07.012

## Levels and dietary exposure risk assessment of organophosphorus esters and polychlorinated biphenyls in pig liver from Hubei Province in 2022

LIU Xiaofang, LIU Xiao, ZHOU Yan, CHEN Haichuan, CHENG Qingyun,  
CAO Wencheng, WEN Sheng

(NHC Specialty Laboratory of Food Safety Risk Assessment and Standard Development, Hubei Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hubei Wuhan 430079, China)

**Abstract: Objective** To investigate the levels of seven organophosphorus esters (OPEs) and six indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in pig liver from Hubei Province, the risk of exposure to OPEs and PCBs in Hubei residents through dietary intake of pig liver were assessed. **Methods** A total of 51 pig liver samples were collected from Hubei Province in 2022. By isotope dilution method, OPEs and PCBs in pig liver samples were determined by ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) and high resolution gas chromatography high resolution magnetic mass spectrometry (HRGC-HRMS), respectively. The source of pollution was explored by analyzing the fingerprint characteristics. Based on the estimation dietary intake (EDI) and hazard index (HI) of Hubei residents, the risk of exposure to OPEs and PCBs through dietary intake of pig liver was assessed. **Results** The levels of seven OPEs ( $\sum_7$ OPEs) in pig liver ranged from 15.6 to 262 ng/g, with an average of 89.7 ng/g ( $P_{50}$ =88.4 ng/g). The levels

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF1104800); 湖北省卫生健康委科研(WJ2023M106); 湖北省自然科学基金(2023AFB1012)

作者简介: 刘小方 男 主管技师 研究方向为持久性有机污染物的检测分析与暴露评估 E-mail: 13971689391@163.com

通信作者: 曹文成 女 副主任医师 研究方向为环境与健康 E-mail: cwc79279@163.com

闻胜 男 研究员 研究方向为食品安全 E-mail: wenshengy@aliyun.com

曹文成与闻胜为共同通信作者

of six PCBs ( $\sum_6$ PCBs) ranged from 3.67 to 19.5 pg/g, with an average of 9.02 pg/g ( $P_{30}=8.21$  pg/g). Tris (1,3-Dichloro-2-Propyl) Phosphate (TDCPP) and PCB 52 was the main characteristic pollutant of OPEs and PCBs in pig liver, respectively. Some OPEs were positively correlated with each other ( $r=0.278-0.841$ ,  $P<0.05$ ), and all PCBs were positively correlated with each other ( $r=0.367-0.942$ ,  $P<0.01$ ). The average EDI values of  $\sum_7$ OPEs and  $\sum_6$ PCBs from dietary intake of pig liver was 2.76 ng/kg·BW/d ( $P_{95}=5.83$  ng/kg·BW/d) and 0.28 pg/kg·BW/d ( $P_{95}=0.58$  pg/kg·BW/d), respectively. And compared with the reference dose (RfD), the HI values were far less than 1. **Conclusion** Although OPEs and PCBs are generally detected in pig liver, the pollution level is low. The dietary exposure risk of Hubei residents is relatively low.

**Key words:** Organophosphorus; polychlorinated biphenyls; pig liver; dietary exposure; risk assessment; food safety

陆生动物肝脏作为维生素和矿物质的重要来源而被人广泛食用<sup>[1]</sup>。肝脏作为主要解毒器官,对有害化学物质具有蓄积作用,特别是新型污染物(Emerging contaminants, ECs),人群经常食用肝脏及其制品可能导致暴露于多种 ECs,如多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)、有机磷酸酯(Organophosphate esters, OPEs)等<sup>[2]</sup>。

OPEs 在各种行业中被广泛用作阻燃剂(Flame retardants, FRs),由于对人类和动物的持久性、生物累积性和毒性作用,传统的卤代 FRs,如 PCBs 以及溴代 FRs,在大多数工业化国家已被禁止<sup>[3]</sup>。作为传统 FRs 的主要替代品,截至目前全球 OPEs 的年消费量预计已达到 86 万吨<sup>[4]</sup>。尽管 PCBs 在 40 年前就已经停止生产,但由于 PCBs 的高持久性和迁移作用使 PCBs 无处不在并导致 PCBs 与其他 ECs 共存<sup>[5]</sup>。近几十年来,每年约有 2 000 万至 5 000 万吨含有 OPEs 或 PCBs 的电子垃圾被运送到亚洲,其中 90% 在中国被处理<sup>[6]</sup>。OPEs 与 PCBs 都具有神经毒性、致癌性、生殖和发育毒性以及内分泌干扰毒性,在各种环境基质(大气与灰尘、水体、沉积物和土壤)中均检测到 OPEs 和 PCBs,人体可以通过呼吸以及皮肤吸收和饮食等方式摄入 ECs,在各类人体基质如血液、头发、指甲、尿液和母乳中均有检出 ECs<sup>[7-12]</sup>。目前,在不同食品基质中已检出 OPEs 和 PCBs,我国作为 FRs 的生产和使用大国,亟须监测食品中的 OPEs 和 PCBs 污染并评估其人群暴露风险<sup>[13-14]</sup>。VAN 等<sup>[15]</sup>对 OPEs 的参考剂量值(Reference dose, RfD)进行了研究。荷兰国立公共卫生与环境研究院报道人群通过膳食摄入 PCBs 的最大允许摄入量<sup>[16]</sup>。欧盟委员会 EU No 1067/2013 规定了陆生动物肝脏中 PCBs 的限量值。目前,国内尚未制定动物肝脏中 OPEs 和 PCBs 的限量值,开展猪肝中 OPEs 和 PCBs 赋存水平调查可为食品安全品风险评估和相关物质限量标准的制定提供基础数据。

本研究通过分析湖北省猪肝中 OPEs 和 PCBs 的含量水平和指纹特征,探索污染来源,根据居民

每日膳食摄入量(Estimation dietary intake, EDI)和危害指数(Hazard index, HI),评估湖北省居民通过食用猪肝摄入 OPEs 和 PCBs 的暴露风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究依托湖北省食品安全风险监测工作于 2022 年在湖北省 17 个地市州农贸市场共采集新鲜猪肝样品 51 份(每份 $\geq 300$  g),采集的样品通过冷链运输到湖北省疾病预防控制中心实验室,经均质后储存在 250 mL 聚乙烯瓶中并置于 $-20$  °C 冰箱冷冻保存,待检。

### 1.2 主要仪器与试剂

TQ-XS 型超高效液相色谱-串联质谱联用仪(UPLC-MS/MS,美国 Waters 公司);DFS 型高分辨气相色谱-高分辨磁质谱仪(HRGC-HRMS,美国 ThermoFisher 公司);ASE 350 型加速溶剂萃取仪(美国 ThermoFisher 公司);KQ-700DE 型超声仪(昆山市超声仪器有限公司);Vac Elut SPS 24 型固相萃取装置(美国 Agilent 公司);DEXTech16 型全自动样品净化系统、混合硅胶柱和氧化铝柱(德国 LCTech 公司);MPE 型平行真空浓缩仪(厦门睿科公司);M64 型全自动氮吹仪(北京莱伯泰科公司);BF-2000 型氮吹仪(北京八方世纪公司);Freezone<sup>®</sup> 型冷冻干燥机(美国 Labconco 公司);Minibo 型超纯水仪(美国 Merck 公司);佛罗里硅土柱(500 mg; 6 mL;上海安谱公司);纯化管(1.2 g MgSO<sub>4</sub>、400 mg PSA、400 mg C<sub>18</sub>,上海安谱公司)。

质控品糕点(MCS-40083,北京微标标物公司);鱼粉(WMF-02,加拿大 Wellington 公司);7 种 OPEs 标准原液,包括:磷酸三乙酯(Triethyl phosphate, TEP)、磷酸三丙酯(Tripopyl phosphate, TPP)、磷酸三丁酯(Tributyl phosphate, TnBP)、磷酸三(2-氯乙基)酯(Phosphoric Acid Tris (2-chloroethyl) Ester, TCEP)、磷酸三(2-氯丙基)酯(Tris (1-chloropropan-2-yl) phosphate, TCPP)、磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯(Tris (1,3-dichloropropyl) phosphate, TDCPP)、磷酸

三苯酯(Triphenyl phosphate; TPhP); 7种氘代同位素标记的 OPEs 定量内标混合溶液(D15-TEP、D21-TPP、D27-TnBP、D12-TCEP、D18-TCPP、D15-TPhP、D15-TDCPP; ≥98.0%, 英国 Cambridge 公司); 6种 PCBs 标准原液(三氯联苯: PCB 28、四氯联苯: PCB 52、五氯联苯: PCB 101、六氯联苯: PCB 138、六氯联苯: PCB 153、七氯联苯: PCB 180)和 6种 13C12 同位素标记的 PCBs 定量内标混合溶液(PCB 28、PCB 52、PCB 101、PCB 138、PCB 153、PCB 180, >98.0%, 加拿大 Wellington 公司); 乙腈(色谱级, 美国 ThermoFisher 公司); 正己烷、二氯甲烷(农残级, 美国 ThermoFisher 公司); 甲酸溶液(≥98.0%, 上海安谱公司)。

### 1.3 前处理与检测

样品前处理与检测方法参照文献[17-18]。猪肝中 OPEs 的分析方法如下: 准确称取 0.5 g 猪肝样品于 50 mL 聚丙烯离心管中, 加入  $^{13}\text{C}_{12}$  标记的 OPEs 定量内标混合溶液(100 ng/mL, 100  $\mu\text{L}$ )和 8 mL 二氯甲烷溶液经涡旋、超声萃取后在 6 000 r/min 离心 5 min(离心半径: 10 cm), 采用弗罗里硅土柱和纯化管进行净化处理后利用全自动氮吹仪在 40  $^{\circ}\text{C}$ 下吹干, 然后用 1 mL 初始流动相比例溶液复溶后经 0.22  $\mu\text{m}$  有机滤膜过滤, 采用配备 ACQUITY UPLC<sup>®</sup> BEH C18(100 mm×2.1 mm, 1.7  $\mu\text{m}$ , 美国 Waters 公司)液相色谱柱的 UPLC-MS/MS 进行检测分析。PCBs 的分析方法为: 准确称取 20.0 g 猪肝样品进行冷冻干燥, 加入  $^{13}\text{C}_{12}$  标记的 PCBs 定量内标混合溶液(1 000 ng/mL, 5  $\mu\text{L}$ ), 采用快速溶剂萃取仪在 130  $^{\circ}\text{C}$  条件下用正己烷/二氯甲烷进行提取。将提取液经真空减压浓缩至 1 mL 后采用配备混合硅胶柱和氧化铝柱的全自动净化仪进行净化, 在氮气流下转移含有 20  $\mu\text{L}$  正壬烷的进样小瓶中, 加入  $^{13}\text{C}_{12}$  标记的 PCBs 回收率混合溶液(100 ng/mL, 10  $\mu\text{L}$ ), 采用配备 DB-5 MS(60 m×0.25 mm×0.25  $\mu\text{m}$ , 美国 Agilent 公司)气相色谱柱的 HRGC-HRMS 进行检测分析。对每一组样本进行程序空白分析, 为了保证准确性, 在分析实际样本过程中扣掉了背景水平。实验过程采用质控品糕点和鱼粉进行全流程分析, 以保证分析结果的可靠性。未检出化合物以检出限的二分之一计。样品中 7 种 OPFRs 的检出限为 0.000 3~0.013 9 ng/g, 6 种 PCBs 的检出限为 0.002~0.005 pg/g, 回收率范围为 67%~89%。

### 1.4 膳食暴露评估

根据猪肝中 OPEs 和 PCBs 的含量, 结合第五次中国总膳食研究湖北省居民猪肝消费量数据(1.94 g/d)<sup>[19]</sup>, 计算居民通过猪肝 OPEs 和 PCBs 的每日膳食摄入量:

$$EDI = \frac{C \times X}{bw} \quad \text{式(1)}$$

式中: EDI 为  $\sum_7$ OPEs 或  $\sum_6$ PCBs 的每日膳食摄入量 (ng/kg·BW/d); C 为  $\sum_7$ OPEs 或  $\sum_6$ PCBs 的含量 (ng/g); X 为猪肝消费量 (g/d); BW 为以营养学概念上的标准人体质量(年龄 18~45 岁, 体质量 63 kg, 从事轻体力劳动的成年男性)<sup>[14]</sup>。

危害商数(Hazard quotient, HQ)和 HI 被认为是判断 OPEs 或 PCBs 是否会对人类健康构成风险的关键指标。本研究以 RfD 为基准值, 通过分析 HI 值, 评估居民通过猪肝膳食摄入 OPEs 和 PCBs 的暴露风险<sup>[13,15]</sup>:

$$HQ = \frac{EDI}{RfD} \quad \text{式(2)}$$

$$HI = \sum HQ \quad \text{式(3)}$$

式中: RfD 为 OPEs 或 PCBs 的参考剂量(ng/kg·BW/d)。当 HI≥1 时, 认为 OPEs 或 PCBs 会对人体产生潜在的健康风险。

### 1.5 统计学分析

采用 SPSS Statistics 26 和 Origin 2019b 软件进行数据分析。采用 Spearman 相关分析猪肝中 OPEs 和 PCBs 含量之间的关系。双侧检验, 显著性水平  $\alpha=0.05$ 。P<0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 OPEs 和 PCBs 的污染水平

猪肝中 OPEs 和 PCBs 的浓度水平分布见表 1。TPP、TEP 和 TCEP 的检出率分别为 63%、96% 和 98%, 其余均全部检出。 $\sum_7$ OPEs 的浓度范围为 15.6~262 ng/g, 平均数和中位数分别为 89.7 和 88.4 ng/g, 其中 TCPP 浓度最高, 平均数为 20.6 ng/g。 $\sum_6$ PCBs 的浓度范围为 3.67~19.5 pg/g, 平均数和中位数分别为 9.02 和 8.21 pg/g, 其中 PCB 52 浓度最高, 平均数为 3.13 pg/g。

ZHAO 等<sup>[13]</sup>研究了不同种类食品中 OPEs 的污染水平, 其中肉类为 1.82 ng/g。HE 等<sup>[20]</sup>报道了澳大利亚食品中肉类 OPEs 的浓度为 2.46 ng/g。关于猪肝中 OPEs 的研究暂未见报道。对于 PCBs 来说, 欧盟规定的陆生动物肝脏中  $\sum_6$ PCBs 的限量水平(3 000 pg/g)远高于本研究所有样本。PIETRON 等<sup>[1]</sup>研究了在波兰于 2015—2022 年采集的陆生动物肝脏样本, 其中猪肝中  $\sum_6$ PCBs 的浓度范围为 36~67 pg/g(平均值 39 pg/g)。周妍等<sup>[18]</sup>也报道了河北省猪肝中  $\sum_6$ PCBs 的平均浓度为 240 pg/g 脂肪。这可能与我国 PCBs 的生产和使用历史有关, 主要来源可能是其在环境中的迁移或残留影响。



表1 2022年湖北省猪肝中OPEs和PCBs的浓度水平分布  
Table 1 Distribution of OPEs and PCBs levels in pig liver from Hubei Province in 2022

化合物	检出率/%	$\bar{x}\pm SD$	Min	$P_{50}$	$P_{75}$	$P_{95}$	Max
TEP	96	3.48±1.99	0.00	3.69	4.48	6.59	10.6
TPP	63	0.20±0.49	0.00	0.02	0.13	1.44	2.76
TnBP	100	5.59±8.53	0.09	0.96	7.77	27.3	38.7
TCEP	98	2.90±5.38	0.00	0.56	3.31	16.0	29.2
TCPP	100	20.6±16.9	3.13	12.0	28.7	47.6	97.9
TPhP	100	2.25±1.18	0.04	2.19	2.90	5.08	6.08
TDCPP	100	54.7±33.9	1.15	57.3	75.8	106	177
$\Sigma_7$ OPEs	—	89.7±53.0	15.6	88.4	120	189	262
PCB 28	100	2.18±1.14	0.83	1.80	2.53	4.69	5.13
PCB 52	100	3.13±1.55	1.19	2.74	4.02	6.49	7.33
PCB 101	100	1.66±0.99	0.49	1.29	2.21	3.93	4.01
PCB 138	100	0.77±0.48	0.24	0.61	0.87	2.00	2.45
PCB 153	100	1.07±0.99	0.32	0.75	1.27	3.07	6.05
PCB 180	100	0.21±0.17	0.04	0.17	0.22	0.55	1.13
$\Sigma_6$ PCBs	—	9.02±4.31	3.67	8.21	10.6	18.7	19.5

注:OPEs以ng/g计,PCBs以pg/g计;—表示无数据

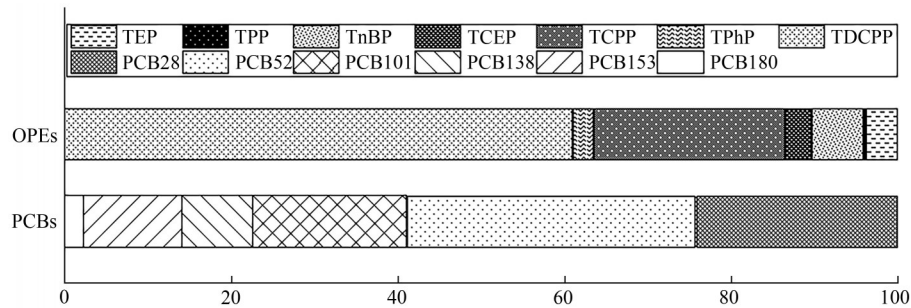


图1 2022年湖北省猪肝中OPEs和PCBs的浓度指纹特征(%)

Figure 1 The fingerprints of OPEs and PCBs in pig liver from Hubei Province in 2022 (%)

研究数据显示,OPEs随着分子量的增加, $\lg K_{ow}$ 呈现增加的趋势,即分子量越大越容易溶于脂肪(有机相)中,TDCPP和TCPP都具有较大的分子量(430.91和327.57)以及较高的 $\lg K_{ow}$ (3.65和4.03)<sup>[7]</sup>,更易在猪肝脂肪中富集,且TDCPP、TCPP、TCEP和TnBP因为阻燃效率更高,在全球范围内也被广泛生产和使用。周妍等<sup>[18]</sup>发现河北省猪肝中PCB 52为主要特征污染物,其次为PCB 28,这与本研究一致。而PIETRON等<sup>[1]</sup>报道PCB 138为波兰猪肝中的主要特征污染物,说明不同国家受PCBs污染的来源可能不同。张志等<sup>[22]</sup>通过对中国变压器和Aroclor1254中PCBs同系物组成为基础,计算中国产品同系物组成,结果显示以四氯联苯和五氯联苯为主。本研究四氯联苯和五氯联苯占比达80%以上,与我国多氯联苯生产和使用情况基本一致,说明湖北省可能有PCBs的使用历史。

### 2.3 OPEs和PCBs的相关性

猪肝中OPEs和PCBs的Spearman相关分析结果分别见表2、表3。在OPEs中,TPP、TnBP、TCEP、TCPP和TDCPP之间均呈正相关( $r=0.527\sim 0.841$ , $P<0.01$ ),TEP与TPP呈正相关( $r=0.278$ , $P<0.05$ ),

从20世纪60年代中期开始到1974年禁止,我国生产了约1万吨PCBs,占全球总产量的1%<sup>[21]</sup>。事实上,大多数关于PCBs的时间趋势的研究结果也显示,在我国环境中PCBs的含量都有不同程度的下降,这也证明我国自2005年以来实施的更严格的环境法规对中国环境、食品和生物基质中的PCBs水平均产生了关键的限制影响<sup>[8]</sup>。总之,OPEs作为新型污染物,亟须更多的研究来评估其污染情况,而PCBs的污染水平虽然较低,但其残留影响仍不容忽视。

### 2.2 OPEs和PCBs的指纹特征

猪肝中OPEs和PCBs的浓度指纹特征见图1。在OPEs中,TDCPP为主要特征污染物,占61.0%,其次为TCPP和TnBP,分别占22.9%和6.2%。PCB 52为PCBs的主要特征污染物,占34.8%,其次分别为PCB 28(24.2%)和PCB 101(18.4%)。

TPhP与其他OPEs均不相关。已有研究表明,TEP、TPP、TnBP为烷基磷酸酯,TCEP、TCPP、TDCPP卤代烷基磷酸酯,TPhP为芳香基磷酸酯,在其生产和使用的过程中,不同类别的OPEs因理化性质的差异而被应用于不同的材料并释放到环境中<sup>[7]</sup>。本研究中,同类的OPEs之间均具有良好的相关性,说明同类的OPEs在猪肝中可能有相同的蓄积或代谢特点。在PCBs中,不同化合物之间均呈正相关( $r=0.367\sim 0.942$ , $P<0.01$ ),说明猪肝中PCBs可能来自相同的污染情况。虽然PCBs早在40年前已被禁止生产和使用,然而这类化合物具有高持久性以及远距离传输等特点<sup>[5]</sup>,且湖北没有PCBs的固定污染源,提示湖北猪肝中PCBs的污染可能来自PCBs的使用过程或背景污染,具体的来源还需要通过进一步的研究明确。

### 2.4 OPEs和PCBs的膳食摄入量与暴露风险评估

HI值被认为是判断OPEs或PCBs是否会对人类健康构成风险的关键指标。猪肝中 $\Sigma_7$ OPEs和 $\Sigma_6$ PCBs污染处于平均和 $P_{95}$ 水平时的EDI和HI值见表4。不管是单个OPE化合物还是 $\Sigma_7$ OPEs和 $\Sigma_6$ PCBs,其EDI值都比相应的RfD值低几个数量

表2 2022年湖北省猪肝中OPEs的Spearman相关性分析

Table 2 Spearman correlation analysis of OPEs in pig liver from Hubei Province in 2022

化合物	TEP	TPP	TnBP	TCEP	TCPP	TPhP	TDCPP
TEP	1						
TPP	0.278*	1					
TnBP	0.216	0.689**	1				
TCEP	0.026	0.527**	0.642**	1			
TCPP	0.183	0.722**	0.841**	0.676**	1		
TPhP	-0.223	0.043	0.188	-0.016	0.159	1	
TDCPP	-0.088	0.536**	0.537**	0.535**	0.613**	0.231	1

注: \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ 

表3 2022年湖北省猪肝中PCBs的Spearman相关性分析

Table 3 Spearman correlation analysis of PCBs in pig liver from Hubei in 2022

化合物	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 138	PCB 153	PCB 180
PCB 28	1					
PCB 52	0.942**	1				
PCB 101	0.923**	0.923**	1			
PCB 138	0.587**	0.653**	0.688**	1		
PCB 153	0.479**	0.527**	0.577**	0.799**	1	
PCB 180	0.367**	0.392**	0.375**	0.702**	0.628**	1

注: \*\*  $P < 0.01$ 

表4 2022年湖北居民膳食摄入猪肝中OPEs和PCBs的EDI和HI值

Table 4 EDI and HI values of OPEs and PCBs in pig liver by dietary intake of Hubei Province residents in 2022

化合物	RfD (ng/kg·BW/d)	EDI (ng/kg·BW/d)		HI ( $\times 10^{-3}$ )	
		$\bar{x}$	$P_{95}$	$\bar{x}$	$P_{95}$
TEP	125 000	0.107	0.203	0.001	0.002
TPP	7 000	0.006	0.044	0.001	0.006
TnBP	2 400	0.172	0.840	0.072	0.35
TCEP	2 200	0.089	0.493	0.041	0.224
TCPP	8 000	0.633	1.46	0.079	0.183
TDCPP	1 500	0.069	0.156	0.010	0.022
TPhP	7 000	1.69	3.26	1.12	2.17
$\Sigma_7$ OPEs	—	2.76	5.83	1.33	2.96
$\Sigma_6$ PCBs	10	0.000 28	0.000 58	0.028	0.058

注: —表示无数据

级, HI值均远小于1。

因研究的膳食结构不同,国内外报道通过食用猪肝摄入OPEs和PCBs的数据较少。本研究中 $\Sigma_7$ OPEs的EDI(0.482~8.08 ng/kg·BW/d)显著低于建议的指导值40 000 ng/kg·BW/d<sup>[9]</sup>。虽然OPEs存在于环境中及其可能在生物体内蓄积,人类面临着不同的OPEs暴露途径<sup>[7]</sup>,但是LIU等<sup>[23]</sup>研究发现,膳食摄入是人体暴露OPEs的主要途径,成人通过膳食摄入OPEs的EDI值普遍高于吸入室内灰尘的EDI值。ZHAO等<sup>[13]</sup>报道了中国成人通过总膳食暴露 $\Sigma_9$ OPEs的总平均EDI为44.3 ng/kg·BW/d,平均EDI范围为1.3~23.1 ng/kg·BW/d。GBADAMOSI等<sup>[24]</sup>综述了不同国家成人对15类膳食食品中 $\Sigma_6$ OPEs暴露的EDI情况,平均范围为6.21~383 ng/kg·BW/d。不同研究报道的食品种类和OPEs种类都不同,而本研究湖北省居民通过食用猪肝摄入 $\Sigma_7$ OPEs的暴

露风险相对较低。

欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)的风险评估报告显示欧洲人群通过膳食摄入 $\Sigma_6$ PCBs的EDI从2005年的10~45 ng/kg·BW/d下降到2012年的4.3~25.7 ng/kg·BW/d<sup>[25]</sup>,均高于本研究水平(0.000 1~0.000 6 ng/kg·BW/d)。该研究还对其暴露水平进行了健康风险评估,基于动物实验中单个PCB化合物的毒理学研究,认为欧洲人群膳食暴露PCBs的水平处于极低风险。裴紫薇等<sup>[14]</sup>综述了不同国家或地区人群通过总膳食暴露 $\Sigma_6$ PCBs总平均EDI范围为1.38~10.9 ng/kg·BW/d<sup>-1</sup>。相比之下湖北省居民通过猪肝膳食暴露PCBs的风险则更低。

本研究也存在一定的局限性,一方面是采集的样本量较少,不能全面地反映出湖北省的污染水平,而猪肝的消费量为湖北平均水平,未能精准评估猪肝高消费人群,膳食暴露风险可能低估。另一方面是只考虑了猪肝摄入的暴露风险,鉴于OPEs和PCBs在其他不同食品中普遍存在,需进一步研究其他类食品的污染情况,综合评估湖北人群对其暴露风险。

### 3 结论

本研究中,TDCPP和PCB 52分别为猪肝中OPEs和PCBs的主要特征污染物。猪肝中OPEs的浓度高于PCBs,湖北省居民通过食用猪肝摄入OPEs和PCBs的暴露风险相对较低。但本研究猪肝中OPEs和PCBs普遍检出,强调了对猪肝及其他动物肝脏进一步研究和监测的必要性。

### 参考文献

- [1] PIETRON W J, WARENK-BANY M. Terrestrial animal livers as a source of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the diet [J]. Science of The Total Environment, 2023, 867: 161508.
- [2] AMUTOVA F, DELANNOY M, BAUBEKOVA A, et al. Transfer of persistent organic pollutants in food of animal origin - Meta-analysis of published data [J]. Chemosphere, 2021, 262: 128351.

- [ 3 ] ZHANG L, NI L, WANG H, et al. Higher ecological risks and lower bioremediation potentials identified for emerging OPEs than legacy PCBs in the Beibu Gulf, China[J]. *Environmental Research*, 2023, 231(3): 116244.
- [ 4 ] WEI G L, LI D Q, ZHUO M N, et al. Organophosphorus flame retardants and plasticizers: Sources, occurrence, toxicity and human exposure[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 196: 29-46.
- [ 5 ] ZHANG D D, DANG H, LI Z, et al. Redox characteristics of humins and their coupling with potential PCB dechlorinators in southern Yellow Sea sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 296-304.
- [ 6 ] TANG D, LIU X, HE H, et al. Distribution, sources and ecological risks of organochlorine compounds (DDTs, HCHs and PCBs) in surface sediments from the Pearl River Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 152: 110942.
- [ 7 ] 李晓辉, 刘嘉颖, 邵兵. 有机磷酸酯阻燃剂健康危害研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(17): 5595-5603.  
LI X H, LIU J Y, SHAO B. Research progress on health hazards of organophosphate flame retardants[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(17): 5595-5603.
- [ 8 ] ZHU M H, YUAN Y B, YIN H, et al. Environmental contamination and human exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) in China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150270.
- [ 9 ] SUNDKVIST A M, OLOFSSON U, HAGLUND P. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in marine and fresh water biota and in human milk [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(4): 943-951.
- [ 10 ] HOU M, SHI Y, JIN Q, et al. Organophosphate esters and their metabolites in paired human whole blood, serum, and urine as biomarkers of exposure [J]. *Environment International*, 2020, 139: 105698.
- [ 11 ] 刘小方, 周妍, 刘满, 等. 2013年武汉市部分育龄期男性血清多氯联苯水平及其影响因素[J]. *卫生研究*, 2022, 51(4): 610-616.  
LIU X F, ZHOU Y, LIU X, et al. Serum polychlorinated biphenyls levels in some reproductive aged men in Wuhan and the influencing factors in 2013 [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2022, 51(4): 610-616.
- [ 12 ] LIU L, HE K, HITES R A, et al. Hair and nails as noninvasive biomarkers of human exposure to brominated and organophosphate flame retardants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(6): 3065-3073.
- [ 13 ] ZHAO L, JIAN K, SU H, et al. Organophosphate esters (OPEs) in Chinese foodstuffs: Dietary intake estimation via a market basket method, and suspect screening using high-resolution mass spectrometry [J]. *Environmental International*, 2019, 128: 343-352.
- [ 14 ] 裴紫薇, 李玉白, 张小燕, 等. 我国居民指示性多氯联苯膳食暴露分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2022, 34(5): 962-967.  
PEI Z W, LI Y B, ZHANG X Y, et al. Exposure assessment of dietary intake for marker polychlorinated biphenyls in China [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2022, 34(5): 962-967.
- [ 15 ] VAN DEN EEDE N, DIRTU A C, NEELS H, et al. Analytical developments and preliminary assessment of human exposure to organophosphate flame retardants from indoor dust [J]. *Environmental International*, 2011, 37(2): 454-461.
- [ 16 ] RIVM. Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels [R/OL]. National Institute for Public Health and the Environment, 2001.
- [ 17 ] PENG Q, PENG L, LIU J, et al. Exposure, bioaccumulation, and risk assessment of organophosphate flame retardants in crayfish in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 912: 168859.
- [ 18 ] 周妍, 刘小方, 李锦, 等. 河北省动物源性食品中指示性多氯联苯的暴露水平研究[J]. *公共卫生与预防医学*, 2021, 32(1): 32-35.  
ZHOU Y, LIU X F, LI J, et al. Investigation on exposure levels of indicator polychlorinated biphenyls in animal-derived foods from Hebei Province [J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2021, 32(1): 32-35.
- [ 19 ] 吴永宁, 赵云峰, 李敬光. 第五次中国总膳食研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
WU Y N, ZHAO Y F, LING J G. The Fifth China Total Diet Study [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [ 20 ] HE C, WANG X, TANG S, et al. Concentrations of organophosphate esters and their specific metabolites in food in Southeast Queensland, Australia: is dietary exposure an important pathway of organophosphate esters and their metabolites? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(21): 12765-12773.
- [ 21 ] ZHAO S, JONES KC, LI J, et al. Evidence for major contributions of unintentionally produced PCBs in the air of China: Implications for the national source inventory [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(4): 2163-2171.
- [ 22 ] 张志, 齐虹, 刘丽艳, 等. 中国生产的多氯联苯(PCBs)组分特征[J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2009, 26(6): 809-815.  
ZHANG Z, QI H, LIU L Y, et al. Characterization of the components of polychlorinated biphenyls (PCBs) produced in China [J]. *Journal Natural Science of Heilongjiang University*, 2009, 26(6): 809-815.
- [ 23 ] LIU Y, LUO X, HUANG L, et al. Organophosphorus flame retardants in fish from Rivers in the Pearl River Delta, South China [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 663: 125-132.
- [ 24 ] GBADAMOSI MR, ABDALLAH MA, HARRAD S. Organophosphate esters in UK diet; exposure and risk assessment [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 849(158368): 1-11.
- [ 25 ] European Food Safety Authority. Update of the monitoring of levels of dioxins and PCBs in food and feed [J]. *EFSA Journal*, 2012, 10(7): 2832.