

## 风险评估

## 中国部分地区猪肉中指示性多氯联苯污染水平和膳食暴露风险评估

樊景丽<sup>1,2</sup>, 闻胜<sup>2</sup>, 刘小方<sup>2</sup>, 刘潇<sup>2</sup>, 沈海涛<sup>3</sup>, 曹文成<sup>2</sup>, 张旭丽<sup>2</sup>, 张民伟<sup>1</sup>, 周妍<sup>2</sup>

(1. 新疆大学生命科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 湖北省疾病预防控制中心, 湖北省应用毒理重点实验室, 湖北 武汉 430079; 3. 浙江省疾病预防控制中心, 浙江 杭州 310051)

**摘要:**目的 调查中国猪肉中指示性多氯联苯(PCBs)的污染水平以及我国居民膳食暴露情况和风险。方法 选取2020年中国13个省(自治区、直辖市)为监测点采集猪肉样品,采用同位素稀释-气相色谱-高分辨磁质谱联用法测定203份猪肉中7种指示性PCBs(PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153、PCB180)的含量,并分析其指纹特征。依据各省(自治区、直辖市)猪肉的消费量数据,评估居民通过猪肉暴露指示性PCBs的健康风险。结果 猪肉中7种指示性PCBs( $\sum_7$ PCBs)的平均浓度范围为0.053(广西)~0.826 ng/g脂肪(浙江), $P_{95}$ 浓度范围为0.091(广西)~2.702 ng/g脂肪(浙江)。PCB28和PCB52为主要的指纹特征。中国居民通过食用猪肉每日摄入 $\sum_7$ PCBs的平均水平和 $P_{95}$ 水平分别为(0.062±0.076)ng/kg·BW和(0.158±0.207)ng/kg·BW,暴露风险指数(ERI)均小于1。结论 中国猪肉中 $\sum_7$ PCBs的污染水平较低,居民通过猪肉膳食暴露指示性PCBs的健康风险较低。

**关键词:**猪肉;多氯联苯;膳食暴露;风险评估;食品污染物;食品安全

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2024)01-0032-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2024.01.006

### Contamination levels and dietary exposure risk assessment of indicator polychlorinated biphenyls in pork in some regions of China

FAN Jingli<sup>1,2</sup>, WEN Sheng<sup>2</sup>, LIU Xiaofang<sup>2</sup>, LIU Xiao<sup>2</sup>, SHEN Haitao<sup>3</sup>, CAO Wencheng<sup>2</sup>,  
ZHANG Xuli<sup>2</sup>, ZHANG Minwei<sup>1</sup>, ZHOU Yan<sup>2</sup>(1. College of Life Sciences and Technology, Xinjiang University, Xinjiang Urumqi 830017, China;  
2. Hubei Provincial Key Laboratory for Applied Toxicology, Hubei Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hubei Wuhan 430079, China; 3. Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Zhejiang Hangzhou 310051, China)

**Abstract: Objective** To investigate the contamination levels of indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in pork in China and the dietary exposure and risks of Chinese residents. **Methods** The concentration of seven indicator PCBs (PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 138, PCB 153, and PCB 180) in 203 pork samples from 13 provinces (autonomous regions, centrally administered municipality) in China in 2020 as monitoring sites were analyzed by combined isotope dilution-gas chromatography-high resolution mass spectrometry. The health risk of the population exposure of indicator PCBs through pork was assessed in conjunction with data on pork consumption in each province. **Results** The mean concentrations of the seven indicator PCBs ( $\sum_7$ PCBs) in pork ranged from 0.053 (Guangxi) to 0.826 ng/g fat (Zhejiang), and  $P_{95}$  concentrations ranged from 0.091 (Guangxi) to 2.702 ng/g fat (Zhejiang). PCB 28 and PCB 52 were the main fingerprint features. The mean and  $P_{95}$  levels of  $\sum_7$ PCBs ingested daily by Chinese residents through pork consumption were 0.062±0.076 (ng/kg·BW) and 0.158±0.207 (ng/kg·BW), respectively, and the exposure risk index (ERI) was less than 1. **Conclusion** The contamination level of  $\sum_7$ PCBs in pork in China, as well as the health risk of residents exposed to indicator PCBs through a pork diet was low.

收稿日期:2022-09-05

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A02009);湖北省自然科学基金计划项目(2022CFB022);湖北省医学青年拔尖人才(S2020JY23)

作者简介:樊景丽 女 硕士研究生 研究方向为生物与医药 E-mail:2499274587@qq.com

通信作者:周妍 女 副主任技师 研究方向为食品安全与理化检验 E-mail:zy\_hbcdc@163.com

张民伟 男 副教授 研究方向为食品质量与安全 E-mail:zhang78089680@sina.com

周妍和张民伟为共同通信作者

**Key words:** Pork; indicator polychlorinated biphenyls; dietary exposure; risk assessment; food contamination; food safety

多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)是首批(2001年)被列入《斯德哥尔摩公约》名单的一类持久性有机污染物<sup>[1]</sup>,具有神经毒性<sup>[2]</sup>、内分泌毒性<sup>[3]</sup>和致癌性<sup>[4]</sup>等毒性。PCBs曾被广泛应用于各种行业,主要包括电容器和变压器的绝缘流体、油漆、润滑剂以及增塑剂、阻燃剂等<sup>[5]</sup>。从20世纪80年代以来,几乎所有的国家都禁止生产和使用PCBs,但由于其持久性、高毒性和生物累积性<sup>[6]</sup>,PCBs的污染状况及其潜在健康风险至今依然存在。全球环境监测系统/食品污染监测与评估规划组织将7种PCBs(PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153、PCB180)作为PCBs污染状况的指示性PCBs,用于监测食品中PCBs的污染水平<sup>[7]</sup>。PCBs普遍存在于水、空气、沉积物和食品中<sup>[8]</sup>,研究表明人体PCBs的暴露超过90%源于膳食摄入<sup>[9]</sup>,PCBs具有脂溶性,因此动物源性食品是PCBs暴露的主要途径。目前肉类中指示性PCBs的研究相对较少。而且,在我国猪肉消费量占肉类消费量首位,脂肪含量最高,因此猪肉中指示性PCBs的污染状况和健康风险有待更多研究。

本研究采集了中国13个省(自治区、直辖市)的猪肉样品,分析猪肉中7种指示性PCBs( $\Sigma_7$ PCBs)的污染水平和指纹特征,结合居民每日膳食摄入量(Estimation daily intake, EDI)评估居民通过猪肉膳食摄入指示性PCBs的健康风险,为我国PCBs的污染状况及健康风险评估提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 猪肉样本采集方法

基于2017年中国统计年鉴中各省(自治区、直辖市)猪肉消费量数据按照高(>20 kg)、中( $\geq 10$  kg)、低(<10 kg)3个水平,结合PCBs生产和使用情况,在2020年分别抽取贵州、广西、海南、浙江和湖北5个省(自治区)作为高水平样本,内蒙古、天津、青海和河北4个省(自治区、直辖市)作为中水平样本,西藏、山西、宁夏和新疆4个省(自治区)作为低水平样本,采样地点为农贸市场和超市,采样比例为1:1。共采集了203份猪肉样品,所有样品采集后立即运输至实验室,并置于-20℃的冰箱中冷冻待检。

### 1.2 主要仪器与试剂

正己烷(纯度 $\geq 98\%$ )(美国 ThermoFisher Scientific 公司);二氯甲烷、丙酮(纯度 $\geq 99\%$ )(美国 ThermoFisher Scientific 公司);一次性商业化硅胶柱、氧化铝柱(德国 LCTech 公司); $^{13}\text{C}_{12}$ 标记的定量内标标准溶

液(P48-W-ES、P48-M-ES)(纯度 $\geq 99\%$ )(加拿大 Wellington 公司);回收率内标标准溶液(纯度 $\geq 99\%$ )(加拿大 Wellington 公司);质控样品鱼粉 WMF-02(加拿大 Wellington 公司)。

DFS 型气相色谱-高分辨磁质谱仪(美国 ThermoFisher Scientific 公司);ASE 350 型加速溶剂萃取仪(美国 ThermoFisher Scientific 公司);Freezone©型冷冻干燥机(美国 Labconco 公司);BF-2000 型氮气吹干仪(北京八方世纪公司);DEX Tech 16 型全自动净化仪(德国 LCTech 公司);MPE 型高通量真空平行浓缩仪(睿科集团股份有限公司)。

### 1.3 样品前处理

将样品放在室温下解冻,称取5~10 g的猪肉样品进行冷冻干燥,加入 $^{13}\text{C}_{12}$ 标记的PCBs定量内标标准溶液( $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB118加入1 ng,  $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB28、 $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB52、 $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB101、 $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB138、 $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB153和 $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB180加入5 ng),与硅藻土混匀,然后使用加速溶剂萃取仪在130℃条件下用正己烷-二氯甲烷(1:1, V:V)进行提取,将提取液浓缩至尽干,采用恒重法计算猪肉样品的脂肪含量。

采用配备硅胶柱和氧化铝柱的全自动净化仪进行净化和分离,收集指示性PCBs组分。将含有指示性PCBs组分洗脱液浓缩至20  $\mu\text{L}$ ,加入 $^{13}\text{C}_{12}$ 标记的PCBs回收率内标标准溶液,用GC-HRMS进行检测分析7种指示性PCBs(分别为PCB28: 2, 4, 4' - trichlorobiphenyl; PCB52: 2, 2', 5, 5' - tetrachlorobiphenyl; PCB101: 2, 2', 4, 5, 5' - pentachlorobiphenyl; PCB118: 2, 3', 4, 4', 5 - pentachlorobiphenyl; PCB138: 2, 2', 3, 4, 4', 5' - hexachlorobiphenyl; PCB153: 2, 2', 4, 4', 5, 5' - hexachlorobiphenyl; PCB180: 2, 2', 3, 4, 4', 5, 5' - heptachlorobiphenyl)。其中PCB28和PCB52为典型的低氯代多氯联苯,PCB180和PCB153为典型的高氯代多氯联苯。

### 1.4 GC-HRMS条件

#### 1.4.1 色谱条件

DB-5 ms 气相色谱柱(Agilent Technology, 60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ );进样口温度:280℃;传输线温度280℃;升温程序:初始柱温为110℃保持1 min,以15℃/min的升温速率升至180℃保持1 min,以3℃/min的升温速率升至300℃保持2 min;载气流量:0.8 mL/min。

#### 1.4.2 质谱条件

分辨率 $\geq 10\,000$ , EI 电离源,电离能量为45 eV,

EI 电离源温度为 280 °C, 选择离子监测模式 (Selected ion monitor, SIM), 采用不分流进样, 进样量为 1 μL。

### 1.5 质量控制

严格按照美国国家环保局 EPA1668A 方法的要求对样品分析过程进行质量控制<sup>[10]</sup>。每批次 8 份样品带有 1 个空白实验和 1 份质控样品鱼粉(WMF-02)。检测结果均在标准参考值的范围内, 7 种指示性 PCBs 相对标准偏差 (Relative standard deviation, RSD) 范围为 1.1%~4.3%。7 种指示性 PCBs 内标的回收率为 51%~117%。检出限 LOD 为 0.01 pg/g 脂肪或 0.01 pg/g ww, 参照世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 对低水平食品污染物可信数据评估的要求, 未检出化合物以 1/2LOD 计算, 结果表示为 ng/g 脂肪或 ng/gww。本实验室连续多年参加了食品中指示性 PCBs 的国际比对, 结果均为合格。

### 1.6 膳食暴露评估

根据测得的猪肉中指示性 PCBs 含量数据, 结合 2017 年中国统计年鉴<sup>[11]</sup>得到的各省(自治区、直辖市)平均猪肉消费量, 计算指示性 PCBs 的每日膳食暴露量。为了便于比较, PCBs 的膳食暴露量的结果采用“标准人(质量以 63 kg 计)”进行标准化<sup>[12]</sup>。按照公式计算居民对指示性 PCBs 的 EDI。计算公式为:

$$EDI = \frac{C_i \times X_i}{BW}$$

其中 EDI 为  $\sum_7$  PCBs 每日摄入量 (ng/kg·BW);  $C_i$  为  $\sum_7$  PCBs 的含量 (ng/g ww);  $X_i$  为膳食消费量 (g/d)。

### 1.7 暴露风险评估

本研究参考美国环境保护署 (U. S. Environmental Protection Agency, EPA) 推荐的化学污染物的健康

风险评估模型<sup>[13]</sup>, 通过暴露风险指数 (Expose risk index, ERI) 作为评价指标<sup>[14]</sup>, 评估通过猪肉摄入指示性 PCBs 的长期暴露风险。

暴露风险评估的计算公式为:

$$ERI = \frac{EDI}{TDI}$$

其中, TDI (Tolerable daily intake) 为指示性 PCBs 每日耐受摄入量, 为 10 (ng/kg·BW)<sup>[15]</sup>。

评估标准: 当暴露风险指数  $ERI \leq 1$  时, 认为该污染物对人体暴露风险可接受; 当  $ERI > 1$  时, 认为该污染物可对人体产生慢性暴露风险。

### 1.8 统计学分析

猪肉中指示性 PCBs 的含量采用 Excel 2019 数据统计软件进行分析, 数据保留小数点后 3 位。采用 Origin 2019 b 数据统计软件进行主成分分析。

## 2 结果

### 2.1 猪肉样品中指示性 PCBs 的含量水平

13 个省(自治区、直辖市)  $\sum_7$  PCBs 污染范围为 0.018~7.076 ng/g 脂肪 (0.004~0.913 ng/g ww); 各省(自治区、直辖市)  $\sum_7$  PCBs 的中位值范围为 0.046~0.393 ng/g 脂肪 (0.013~0.168 ng/g ww),  $P_{95}$  范围为 0.091~2.702 ng/g 脂肪 (0.031~0.580 ng/g ww), 均低于欧盟法规 (No. 1259/2011) 规定的猪肉中  $\sum_6$  PCBs 最高限量值 40 ng/g 脂肪<sup>[16]</sup>。将猪肉样品中  $\sum_7$  PCBs 的平均值进行比较, 不同省(自治区、直辖市)猪肉样品中指示性 PCBs 的污染程度不一, 平均浓度水平从高到低依次是浙江>贵州>河北>内蒙古>天津>湖北>青海>西藏>新疆>海南>宁夏>山西>广西。见表 1。

表 1 2020 年中国 13 个省(自治区、直辖市)猪肉中  $\sum_7$  PCBs 的含量水平/(ng/g 脂肪)  
Table 1 Levels of  $\sum_7$  PCBs in pork from 13 provinces (autonomous) in China in 2020/(ng/g fat)

地区	n	$\bar{x}$	最小值	$P_{50}$	$P_{95}$	最大值
广西	10	0.053(0.019)	0.029(0.010)	0.046(0.017)	0.091(0.031)	0.106(0.033)
山西	11	0.069(0.016)	0.021(0.007)	0.049(0.013)	0.183(0.032)	0.283(0.035)
宁夏	10	0.075(0.022)	0.032(0.014)	0.070(0.021)	0.125(0.034)	0.138(0.037)
海南	10	0.082(0.035)	0.048(0.019)	0.078(0.031)	0.117(0.054)	0.121(0.056)
新疆	10	0.093(0.029)	0.047(0.017)	0.084(0.027)	0.149(0.044)	0.162(0.05)
西藏	10	0.100(0.035)	0.042(0.017)	0.085(0.031)	0.216(0.067)	0.288(0.085)
青海	16	0.182(0.062)	0.080(0.036)	0.174(0.058)	0.295(0.096)	0.367(0.111)
湖北	30	0.214(0.070)	0.018(0.004)	0.113(0.030)	0.736(0.232)	1.476(0.681)
天津	11	0.222(0.049)	0.086(0.027)	0.206(0.042)	0.436(0.085)	0.475(0.094)
内蒙古	12	0.403(0.170)	0.080(0.031)	0.200(0.084)	1.245(0.519)	1.523(0.667)
河北	16	0.432(0.148)	0.251(0.057)	0.367(0.131)	0.740(0.270)	0.786(0.289)
贵州	15	0.501(0.231)	0.045(0.019)	0.393(0.168)	1.284(0.580)	1.824(0.913)
浙江	42	0.826(0.098)	0.093(0.012)	0.346(0.048)	2.702(0.370)	7.076(0.567)
平均( $\bar{x} \pm s$ )		0.250±0.230(0.076±0.068)	—	0.170±0.125(0.054±0.047)	—	—

注: 括号内为鲜重计 (ng/g ww)

将本研究中 7 种指示性 PCBs 污染水平与不同国家或地区进行比较, 见表 2。不同国家和地区中

指示性 PCBs 的污染范围为 2.40~6.80 ng/g 脂肪 (除中国外)。比利时<sup>[17]</sup>、奥地利<sup>[18]</sup>和法国<sup>[19]</sup>猪肉中

$\Sigma_6$ PCBs 污染水平均值分别约为本研究的 9.6 倍、11.3 倍和 18.4 倍,含量水平相对较高的荷兰<sup>[20]</sup>  $\Sigma_7$ PCBs 和意大利<sup>[21]</sup>  $\Sigma_6$ PCBs 约为本研究的 26.8 和 27.1 倍。可能与中国 PCBs 的生产和使用有关,20 世

纪 60 年代中期开始到 1974 年禁止,我国在这期间生产了大约 1 万吨的 PCBs,仅占全球总产量的 1%<sup>[22]</sup>。本研究中国猪肉中指示性 PCBs 的污染水平相对较低。

表2 不同国家或地区猪肉中指示性 PCBs 含量比较

Table 2 Comparison of content of indicator PCBs in pork from different countries or regions

国家	样品数量	PCBs	$\Sigma_6/\Sigma_7$ PCBs (ng/g 脂肪)		参考文献
			Mean		
中国	203	PCB 28,52,101,118,138,153,180	0.25		本研究
比利时	10	PCB 28,52,101,138,153,180	2.40		[17]
奥地利	25	PCB 28,52,101,138,153,180	2.83		[18]
法国	9	PCB 28,52,101,138,153,180	4.60		[19]
荷兰	—	PCB 28,52,101,118,138,153,180	6.70		[20]
意大利	23	PCB 28,52,101,138,153,180	6.80		[21]

在国内的一些研究中,王春雷等<sup>[23]</sup>对某市的市售猪肉中 6 种指示性 PCBs 进行分析,测得  $\Sigma_6$ PCBs 的污染水平为 0.389 ng/g 脂肪。对浙江省市场<sup>[24]</sup> 的猪肉样品分析测得  $\Sigma_6$ PCBs 的含量为 0.70 ng/g 脂肪。王惠荣等<sup>[25]</sup>调查中国代表性地区猪肉样品,测得  $\Sigma_7$ PCBs 的污染水平为 0.76 ng/g 脂肪。杭州市<sup>[26]</sup>的猪肉中  $\Sigma_6$ PCBs 的污染水平为 0.120 ng/g 脂肪。通过比较发现,与本研究一些地区的  $\Sigma_7$ PCBs 的浓度水平基本一致。

## 2.2 猪肉样品中指示性 PCBs 的指纹特征

中国 13 个省(自治区、直辖市)猪肉样品中 7 种指示性 PCBs 的指纹特征见图 1。总体而言,除贵州、湖北和浙江外,其余省(自治区、直辖市)PCB28 和 PCB52 为主要特征污染物,总占比超过 40%;所有省(自治区、直辖市)中 PCB180 占比最小。

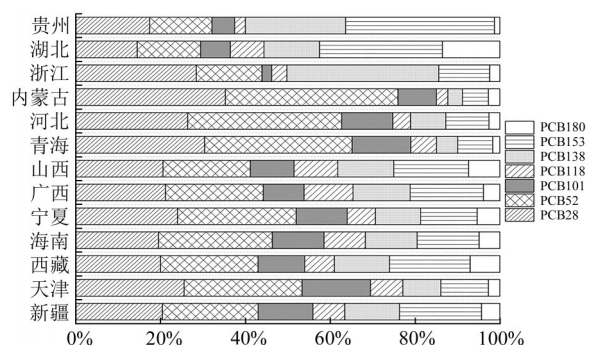


图1 各指示性 PCBs(百分比)对不同省(自治区、直辖市)  $\Sigma_7$ PCBs 总浓度的贡献

Figure 1 Contribution of the individual indicator PCBs (in percent) to the total concentration of the  $\Sigma_7$ PCBs in different provinces

对 13 个省(自治区、直辖市)的猪肉样品中 7 种指示性 PCBs 的污染水平进行主成分分析(PCA),以调查不同省(自治区、直辖市)7 种指示性 PCBs 之间分布的差异。由 PCA 图可知,沿第二主成分(PC)方向,13 个省(自治区、直辖市)的 7 种指示性 PCBs 的污染组成情况与图 1 的指纹图谱显示一致。

PCB28 和 PCB52 等低氯联苯分布在一起,PCB180 和 PCB153 等高氯联苯分布在一起。由图 2 可知,在本研究中除贵州、湖北和浙江外,其余省(自治区、直辖市)以低氯代多氯联苯(PCB28 和 PCB52)为主。

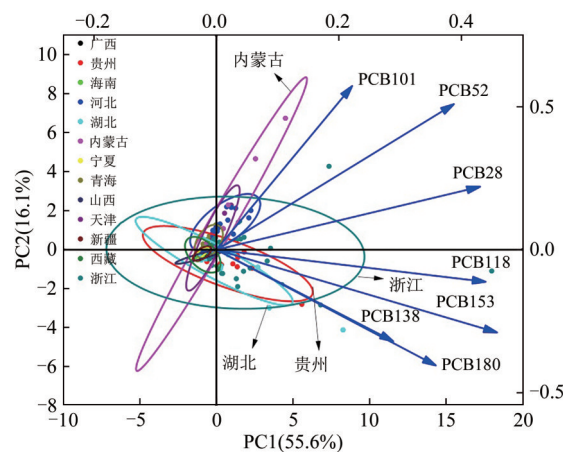


图2 被收集的猪肉样品中 7 种指示性 PCBs 的 PCA 图

Figure 2 PCA plots of the seven indicator PCBs in the collected pork samples

在中国,生产的 1 号 PCBs 类似于 Aroclor1242,主要用于变压器和电容器,以三氯联苯为主,2 号 PCBs 类似于 Aroclor1254,主要用于油漆添加剂,以五氯联苯为主。张志等<sup>[27]</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,结果显示以低氯联苯为主。因此,中国生产的 PCBs 主要以低氯代 PCBs 为主。

本研究中国猪肉中指示性 PCBs 主要以低氯联苯为主,但其中贵州、湖北和浙江是以高氯联苯为主。贵州河流处在长江和珠江两大水系交错地带,珠江入海口表层沉积物中高氯联苯(PCB138 和 PCB153)检出率较高<sup>[28]</sup>;张坤锋等<sup>[29]</sup>发现武汉饮用水以不易降解的高氯联苯为主;王晓峰等<sup>[30]</sup>发现在浙江因电子垃圾拆解导致  $\Sigma_7$ PCBs 含量较高,且脂肪含量较高的样品以高氯联苯为主,与本研究贵州、浙江和湖北地区的猪肉样品的污染特征一致。

本研究中以低氯联苯为主的省(自治区、直辖市)中,其中内蒙古地区的 PCB28 和 PCB52 总占比超过 70%,内蒙古地跨黄河、嫩江(辽河的分支)等四大水系,李亚芳等<sup>[31]</sup>发现,内蒙古是典型黄灌区,以低氯联苯为主,黄河<sup>[32]</sup>中 PCB28 和 PCB52 是优势污染物,与本研究中内蒙古地区的猪肉样品的污染特征一致。

综上,在本研究中,除贵州、湖北和浙江外,其余省(自治区、直辖市)以低氯联苯(PCB28 和 PCB52)为优势污染物,在中国各省(自治区、直辖市)指示性 PCBs 中以低氯联苯为主。

表 3 2020年中国13个省(自治区、直辖市)猪肉中指示性 PCBs 的日摄入量与暴露风险评估

Table 3 Daily intake and exposure risk assessment of indicator PCBs in pork from 13 provinces (autonomous) in China in 2020

地区	人均消费量/(g/d)	$\sum_7\text{PCBs EDI}/(\text{ng}/\text{kg}\cdot\text{BW})$		ERI	
		$\bar{x}$	$P_{95}$	$\bar{x}$	$P_{95}$
新疆	11.1	0.005	0.008	0.000 5	0.000 8
宁夏	18.2	0.006	0.010	0.000 6	0.001 0
山西	24.5	0.006	0.012	0.000 6	0.001 2
西藏	26.1	0.015	0.028	0.001 5	0.002 8
青海	33.6	0.033	0.051	0.003 3	0.005 1
天津	41.9	0.033	0.057	0.003 3	0.005 7
海南	73.3	0.041	0.063	0.004 1	0.006 3
广西	74.6	0.023	0.037	0.002 3	0.003 7
湖北	57.1	0.064	0.210	0.006 4	0.021 0
河北	33.5	0.079	0.143	0.007 9	0.014 3
浙江	59.5	0.093	0.350	0.009 3	0.035 0
内蒙古	45.3	0.122	0.374	0.012 2	0.037 4
贵州	76.5	0.282	0.708	0.028 2	0.070 8
$\bar{x} \pm s$	—	0.062±0.076	0.158±0.207	0.006 2±0.007 6	0.015 8±0.020 7

荷兰国家公共卫生与环境研究所提出了人体摄入指示性 PCBs 的 TDI 为  $10 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ <sup>[15,33]</sup>。13 个省(自治区、直辖市)猪肉中  $\sum_7\text{PCBs}$  以均值和  $P_{95}$  浓度计算的 EDI 值分别为  $(0.062\pm 0.076) \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$  和  $(0.158\pm 0.207) \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ , 远低于  $10 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ 。因膳食结构不同,国外通过猪肉摄入 PCBs 的数据较少,爱尔兰居民通过膳食每日摄入猪肉中  $\sum_6\text{PCBs}$  的平均值为  $0.06 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ <sup>[34]</sup>, 中国 4 个代表性地区猪肉中  $\sum_7\text{PCBs}$  平均每日膳食摄入水平为  $0.059 \text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ <sup>[25]</sup>, 与本研究中猪肉的平均膳食日摄入量基本一致。

当猪肉中  $\sum_7\text{PCBs}$  污染水平处于本研究平均值和  $P_{95}$  水平时,ERI 值分别为  $0.006 2\pm 0.007 6$ 、 $0.015 8\pm 0.020 7$ , 约为 TDI 值的 0.62% 和 1.58%, ERI 值均小于暴露风险限值 1, 居民通过猪肉膳食暴露指示性 PCBs 的健康风险较低。本研究存在一定的不确定性,受样本量限制,猪肉的消费量未能涵盖最高消费量地区,且猪肉消费量采用各省(自治区、直辖市)平均值,未涵盖猪肉高消费人群,暴露风险可能低估。

### 2.3 指示性 PCBs 的膳食暴露量和风险评估

表 3 给出了不同省(自治区、直辖市)普通人群的猪肉消费量<sup>[11]</sup>以及  $\sum_7\text{PCBs}$  污染处于平均和处于  $P_{95}$  水平的 EDI 和 ERI 值,可以看出,不同省(自治区、直辖市)份猪肉中指示性 PCBs 的每日膳食摄入量相差较大。以猪肉中  $\sum_7\text{PCBs}$  处于平均污染水平进行比较,各省(自治区、直辖市)每日摄入量贵州>内蒙古>浙江>河北>湖北>广西>海南>天津=青海>西藏>山西=宁夏>新疆。猪肉中  $\sum_7\text{PCBs}$  处于  $P_{95}$  污染水平时,EDI 值的范围为 0.008(新疆)~0.708  $\text{ ng}/\text{kg}\cdot\text{BW}$ (贵州)。

### 3 结论

本研究通过分析中国 13 个省(自治区、直辖市)的猪肉中指示性 PCBs 的污染水平,发现  $\sum_7\text{PCBs}$  的含量水平均较低,远低于欧盟法规中猪肉中指示性 PCBs 最高限量值。PCB28 和 PCB52 为主要的指纹特征。猪肉  $\sum_7\text{PCBs}$  暴露风险指数小于 1, 中国居民通过猪肉膳食摄入指示性 PCBs 的健康风险较低。

### 参考文献

- [1] WANG C, DONG S, WANG P, et al. Reevaluation on accumulation and depletion of dioxin-like compounds in eggs of laying hens: Quantification on dietary risk from feed to egg[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 801: 149690.
- [2] PESSAH I, LEIN P, SEEGAL R F, et al. Neurotoxicity of polychlorinated biphenyls and related organohalogens[J]. Acta Neuropathologica, 2019, 138(3): 363-387.
- [3] GREEN M P, HARVEY A J, FINGER B J, et al. Endocrine disrupting chemicals: Impacts on human fertility and fecundity during the peri-conception period[J]. Environmental Research, 2021, 194: 110694.
- [4] GUO J Y, WANG M Z, WANG M S, et al. The undervalued

- effects of polychlorinated biphenyl exposure on breast cancer [J]. *Clinical Breast Cancer*, 2020, 20(1): 12-18.
- [ 5 ] LIN S, ZHAO B F, YING Z T, et al. Residual characteristics and potential health risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in seafood and surface sediments from Xiangshan Bay, China (2011—2016)[J]. *Food Chemistry*, 2020, 327: 126994.
- [ 6 ] HUANG Z F, QADEER A, ZHENG S S, et al. Fatty acid profile as an efficient bioindicator of PCB bioaccumulation in a freshwater lake food web: A stable isotope guided investigation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423(4): 127121.
- [ 7 ] WEBER R, HEROLD C, HOLLERT H, et al. Life cycle of PCBs and contamination of the environment and of food products from animal origin [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(17): 16325-16343.
- [ 8 ] LIU W, ZHAO J, XU S, et al. Concentrations, sources, and potential human health risks of PCDD/Fs, dl-PCBs, and PAHs in rural atmosphere around chemical plants in Jiangsu Province, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 104(6): 846-851.
- [ 9 ] SUN S, CAO R, LU X, et al. Levels and patterns of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and polychlorinated biphenyls in foodstuffs of animal origin from Chinese markets and implications of dietary exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 273: 116344.
- [ 10 ] United States Environmental Protection Agency. Method 1668, Revision A Chlorinated Biphenyl Congeners in Water, Soil, Sediment, Biosolids, and Tissue by HRGC/HRMS [M]. Washington: United States Environmental Protection Agency, 1999: 1-112. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi? Dockey=P100IJHQ.txt>.
- [ 11 ] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- National Bureau Of Statistics China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [ 12 ] 张磊. 我国居民二噁英类物质膳食暴露及机体负荷研究 [D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2014.
- ZHANG L. Study on dietary exposure and body burden of dioxin-like substances among Chinese residents [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2014.
- [ 13 ] USEPA. Ecological risk assessment guidance for superfund: Process for designing and conducting ecological risk assessments [J]. 1997.
- [ 14 ] 刘芸, 于维森, 吕晓静, 等. 青岛市市售贝类中多环芳烃与多氯联苯的含量水平、组成特征及居民健康影响风险评估 [J]. *现代预防医学*, 2018, 45(23): 4269-4272.
- LIU Y, YU W S, LYU X J, et al. Residues, distributions characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls of shellfish in Qingdao [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2018, 45(23): 4269-4272.
- [ 15 ] AFSSA. Opinion of the French Food Safety Agency (Afssa) on the establishment of relevant maximum levels for non dioxin-like polychlorobiphenyls (NDL-PCB) in some foodstuffs [J]. AFSSA-Request No.2006-SA-0305, 2007: 1-27.
- [ 16 ] Commission Regulation (EU). Commission Regulation (EU) No 1259/2011 of 2 December 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for dioxins, dioxin-like PCBs and non dioxin-like PCBs in foodstuffs [J]. *Official Journal of the European Union*, 2011: 18-23.
- [ 17 ] CIMENCI O, VANDEVIJVERE S, GOSCINNY S, et al. Dietary exposure of the Belgian adult population to non-dioxin-like PCBs [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 59: 670-679.
- [ 18 ] MIHATS D, MOCHE W, PREAN M, et al. Dietary exposure to non-dioxin-like PCBs of different population groups in Austria [J]. *Chemosphere*, 2015, 126: 53-59.
- [ 19 ] ARNICH N, TARD A, LEBLANC J C, et al. Dietary intake of non-dioxin-like PCBs (NDL-PCBs) in France, impact of maximum levels in some foodstuffs [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2009, 54(3): 287-293.
- [ 20 ] BAARS A J, BAKKER M I, BAUMANN R A, et al. Dioxins, dioxin-like PCBs and non-dioxin-like PCBs in foodstuffs; Occurrence and dietary intake in The Netherlands [J]. *Toxicology Letters*, 2004, 151(1): 51-61.
- [ 21 ] FATTORE E, FANELLI R, DELLATTE E, et al. Assessment of the dietary exposure to non-dioxin-like PCBs of the Italian general population [J]. *Chemosphere*, 2008, 73(1): S278-S283.
- [ 22 ] ZHAO S Z, JONES K C, 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.
- [ 23 ] 王春雷, 杨大成, 张建清, 等. 某市市售畜肉类食品中多氯联苯污染水平研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(11): 978-980.
- WANG C L, YANG D C, ZHANG J Q, et al. Study on contamination level of polychlorinated biphenyls in retail livestock food in a city [J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(11): 978-980.
- [ 24 ] SHEN H T, GUAN R F, DING G Q, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Zhejiang foods (2006-2015): Market basket and polluted areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574(1): 120-127.
- [ 25 ] 王惠荣, 蒋友胜, 周健, 等. 中国代表性地区典型动物源性食品指示性多氯联苯污染水平和人群膳食风险评估 [J]. *中国公共卫生*, 2022, 38(4): 444-448.
- WANG H R, JIANG Y S, ZHOU J, et al. Contamination and human health risk assessment of indicative polychlorinated biphenyls (PCBs) in meats and eggs in five provincial-level regions across China [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2022, 38(4): 444-448.
- [ 26 ] 朱淑怡, 张露艺, 陈晨, 等. 杭州市售食品中持久性有机污染物膳食暴露评估 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(11): 4439-4444.
- ZHU S Y, ZHANG L Y, CHEN C, et al. Preliminary assessment of dietary exposure to persistent organic pollutants in retailed foods from Hangzhou [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(11): 4439-4444.
- [ 27 ] 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. Congener and homologue profiles of polychlorinated biphenyls (PCBs) produced in China

[J]. Journal Natural Science of Heilongjiang University, 2009, 26(6):809-815.

[28] 李秀丽, 赖子尼, 穆三姐, 等. 珠江入海口表层沉积物中多氯联苯残留与风险评价[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 135-140.

LI X L, LAI Z N, MU S N, et al. Residual characteristics and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the surface sediments of the outlets of the Pearl River Estuary [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1):135-140.

[29] 张坤峰, 付青, 涂响, 等. 武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5836-5847.

ZHANG K F, FU Q, TU X, et al. Pollution characteristics and risk assessment of typical POPs in typical drinking water sources in Wuhan[J]. Environmental Science, 2021, 42(12):5836-5847.

[30] 王晓峰, 蔡建民, 任丽华, 等. 电子垃圾拆解地区多氯联苯经口暴露健康风险评估[J]. 中国公共卫生, 2015, 31(6): 734-738.

WANG X F, CAI J M, REN L H, et al. Health risk assessment of oral exposure to polychlorinated biphenyls among residents in an e-waste dismantling areas [J]. Chinese Journal of Public Health, 2015, 31(6):734-738.

[31] 李亚芳, 裴国霞, 张琦, 等. 内蒙古河套灌区耕作层土壤中 PCBs 的污染特征和健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 114-122.

LI Y F, PEI G X, ZHANG Q, et al. Pollution characteristics and health risk of polychlorinated biphenyls in cultivated soil in the Hetao irrigation areas, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(1):114-122.

[32] 卢双, 张旭, 裴晋, 等. 黄河中下游流域表层土壤中多氯联苯的残留特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2741-2748.

LU S, ZHANG X, PEI J, et al. Residual characteristics of polychlorinated biphenyls in surface soil of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River [J]. China Environmental Science, 2016, 36(9):2741-2748.

[33] BAARS A J, THEELEN RMC, JANSSEN PJCM, et al. Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels[R]. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2001.

[34] TLUSTOS C, ANDERSON W, FLYNN A, et al. Exposure of the adult population resident in Ireland to dioxins and PCBs from the diet[J]. Food Additives & Contaminants : Part A, 2014, 31(6): 1100-1113.

## 《中国食品卫生杂志》顾问及第五届编委会名单

顾问:陈君石、黄璐琦、江桂斌、李林、沈建忠、吴清平、Jianghong Meng(美国)、Patrick Wall(爱尔兰)、Samuel Godefroy(加拿大)、Gerald Moy(美国)、Paul Brent(澳大利亚)、Marta Hugas(比利时)、Yukikko Yamada(日本)、Tom Heilandt(德国)、Andreas Hensel(德国)、Christopher Elliott(英国)、Christine Nelleman(丹麦)

主任委员:卢江

副主任委员:王竹天、李宁、孙长颢、王涛、谢剑炜、应浩、丁钢强、张峰、张永慧

主编:吴永宁

编委(按姓氏笔画排序)

丁钢强(中国疾病预防控制中心营养与健康所)  
 于洲(国家食品安全风险评估中心)  
 于维森(青岛市疾病预防控制中心)  
 马宁(国家食品安全风险评估中心)  
 马会来(中国疾病预防控制中心)  
 马群飞(福建省疾病预防控制中心)  
 王君(国家食品安全风险评估中心)  
 王茵(浙江省医学科学院)  
 王涛(浙江清华长三角研究院)  
 王硕(南开大学医学院)  
 王慧(上海交通大学公共卫生学院)  
 王永芳(国家卫生健康委员会卫生监督中心)  
 王竹天(国家食品安全风险评估中心)  
 王松雪(国家粮食和物资储备局科学研究院)  
 王晓英(中国动物疫病预防控制中心)  
 计融(国家食品安全风险评估中心)  
 邓小玲(广东省疾病预防控制中心)  
 卢江(国家食品安全风险评估中心)  
 匡华(江南大学食品学院)  
 朱心强(浙江大学医学院)  
 刘弘(上海市疾病预防控制中心)  
 刘长青(河北省疾病预防控制中心)

应浩(中国科学院上海营养与健康所)  
 张丁(河南省疾病预防控制中心)  
 张峰(中国检验检疫科学研究院)  
 张卫兵(南通市疾病预防控制中心)  
 张立实(四川大学华西公共卫生学院)  
 张永慧(广东省疾病预防控制中心)  
 张旭东(国家卫生健康委员会医院管理研究所)  
 张剑峰(黑龙江省疾病预防控制中心)  
 张朝晖(中国海关科学技术研究中心)  
 张惠媛(中国海关科学技术研究中心)  
 张遵真(四川大学华西公共卫生学院)  
 陈波(湖南师范大学化学化工学院)  
 陈颖(中国检验检疫科学研究院)  
 陈卫东(广东省市场监督管理局)  
 邵兵(北京市疾病预防控制中心)  
 武爱波(中国科学院上海营养与健康所)  
 赵舰(重庆市疾病预防控制中心)  
 赵云峰(国家食品安全风险评估中心)  
 赵贵明(中国检验检疫科学研究院)  
 钟凯(科信食品与营养信息交流中心)  
 姜毓君(东北农业大学食品学院)  
 聂俊雄(常德市疾病预防控制中心)