

上海地区留鸟麻雀中多溴联苯醚(PBDEs)空间分布特征研究

黄凯, 林匡飞

引用本文:

黄凯, 林匡飞. 上海地区留鸟麻雀中多溴联苯醚(PBDEs)空间分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1703-1709.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

排放管控前后电子垃圾回收区农业土壤中PBDEs时空分布变化动态

陈铭聪, 杨东升, 亦如瀚

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1718-1728 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0255>

BDE-209在罗非鱼体内的代谢及其在烹饪过程中的变化

李志丰, 鲍恋君, 王珍, 张莹, 曾永平

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1062-1069 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0141>

磁性活性炭原位修复养殖底泥中多溴联苯醚(PBDEs)的研究

张丽, 宣李, 黎晓宁, 于纹鉴, 李娟英, 王茜, 尹杰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1818-1827 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1172>

不同地区农田土壤多环芳烃污染特征与来源解析

刘月仙, 解小凡, 杜志伟, 邱慧, 张瑞丽, 张萌, 王伟

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2539-2547 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0448>

盐碱农田土壤铬污染特征及健康风险评价——以山东省滨州市滨城区为例

王玥, 刘莹雪, 李丹丹, 何睿, 王伟, 刘月仙, 陆兆华, 张萌

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2723-2732 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0415>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄凯, 林匡飞. 上海地区留鸟麻雀中多溴联苯醚(PBDEs)空间分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1703–1709.

HUANG K, LIN K F. Geographical distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in resident eurasian tree sparrows (*Passer montanus*) across Shanghai, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1703–1709.

上海地区留鸟麻雀中多溴联苯醚(PBDEs)空间分布特征研究

黄凯¹, 林匡飞^{2*}

(1. 上海新金桥环保有限公司, 上海 201201; 2. 华东理工大学, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237)

摘要: 为了探明上海地区留鸟麻雀中多溴联苯醚(PBDEs)污染水平、分布模式及其区域性地理分布特征, 本研究以上海为典型研究区域, 检测了不同功能区域内麻雀肌肉中PBDEs的含量。结果发现, 上海麻雀肌肉样品中 Σ_7 PBDEs含量(BDE 28、BDE 47、BDE 99、BDE 100、BDE 153、BDE 154和BDE 183含量之和, 以脂质质量计)范围为9.0~83.6 ng·g⁻¹, BDE 209最高含量达292.0 ng·g⁻¹, BDE 209平均含量是 Σ_7 PBDEs平均含量的2倍左右, 表明十溴联苯醚(Deca)商业品是上海地区麻雀中PBDEs的主要污染源。上海工业园区和城市中心地区样品中 Σ_8 PBDEs含量(Σ_7 PBDEs和BDE 209含量之和)显著高于农村地区的麻雀样品, Σ_8 PBDEs地理空间分布遵从填埋场>工业园区>城市中心地区>城郊结合部>农村的规律, 垃圾填埋场、工业园区是上海区域潜在的PBDEs的释放源。与全国其他地区相比, 上海市麻雀中PBDEs含量处于较低水平, 上海地区PBDEs的生态风险较小, 但垃圾填埋场、工业园区和中心城区的个别麻雀样品PBDEs含量水平较高, 其潜在环境风险不容忽视。

关键词: 多溴联苯醚(PBDEs); 留鸟; 麻雀; 空间分布; 上海

中图分类号: X503.224 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)08-1703-07 doi:10.11654/jaes.2022-1156

Geographical distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in resident eurasian tree sparrows (*Passer montanus*) across Shanghai, China

HUANG Kai¹, LIN Kuangfei^{2*}

(1. Shanghai Xin Jinqiao Environmental Protection Company, Shanghai 201201, China; 2. East China University of Science and Technology, State Environmental Protection, Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, Shanghai 200237, China)

Abstract: This study took Shanghai as a typical research area. Eurasian tree sparrow muscles from different functional areas were selected to analyze the levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their geographical distribution patterns in Shanghai. The concentrations of Σ_7 PBDEs (sum of BDE 28, BDE 47, BDE 99, BDE 100, BDE 153, BDE 154 and BDE 183 concentrations) ranged from 9.0 ng·g⁻¹ to 83.6 ng·g⁻¹ (lipid weight). The highest concentration of BDE 209 was 292.0 ng·g⁻¹. The average concentration of BDE 209 was about twice that of Σ_7 PBDEs. Commercial decabromodiphenyl ether products were the main source of sparrow PBDEs pollution in Shanghai. The concentrations of Σ_8 PBDEs (sum of Σ_7 PBDEs and BDE 209 concentrations) in sparrow muscle in central urban areas and

收稿日期: 2022-11-12 录用日期: 2023-01-04

作者简介: 黄凯(1986—), 男, 上海人, 博士, 主要从事环境科学与工程研究。E-mail: hkvector@126.com

*通信作者: 林匡飞 E-mail: kflin@ecust.edu.cn

基金项目: 环境保护部公益性项目(201309047, 201309030); 国家科技重大专项(2019YFC1803701)

Project supported: Public Welfare Project of the Ministry of Environmental Protection of China (201309047, 201309030); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2019YFC1803701)

industrial parks were significantly higher than that in rural areas. The geographical distribution pattern of Σ PBDEs followed the rule of landfill > industrial park > urban central area > suburban area > rural area. Shanghai waste landfills and industrial parks were potent sources of PBDEs release. Compared with other regions of China, the concentrations of PBDEs in sparrows in Shanghai were at a low level and pose relatively little ecological risk. However, the concentrations of PBDEs in individual sparrow samples from landfills, industrial parks and urban centers were relatively high, and therefore the potential environmental risk should not be ignored.

Keywords: polybrominated diphenyl ethers(PBDEs); resident bird; eurasian tree sparrow; geographical distribution; Shanghai

多溴联苯醚(Polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)是使用最广泛的有机阻燃剂之一,由于其热稳定性好、阻燃效率高,而被广泛应用于纺织、家具、建材和电子等产品,但因为环境毒理效应,其已被限制或禁用。PBDEs在环境中难以降解,具有高亲脂性,并且能随食物链产生生物富集和放大效应^[1-2]。研究表明,PBDEs是一种致癌并且具有内分泌干扰毒性的有毒物质,其生态环境效应已成为当前环境科学的研究热点^[3-5]。

鸟类^[6]作为环境指示生物工具被广泛应用于监测环境污染、维护生态平衡等环境科学领域,利用鸟类样品监测环境污染、研判环境生态风险并早期预警,已是非常有力的环境监测方式。按照迁徙特性,可以将鸟类分为留鸟、候鸟和迷鸟三类。鸪鹑和鸭类等候鸟可作为指示生物来研究亚太地区PBDEs污染情况。留鸟是指终年生活在一个地区的鸟类,大部分留鸟甚至终身不离开自己的巢区,活动范围仅限于出生区域,不随季节变化而迁徙。留鸟是当地污染的最佳指示生物。麻雀是广泛居留于全球城市的常见鸟类,多活动在有人类居住的地方,与人类的关系非常密切,其体内污染物能够反映出当地环境中的污染负荷,是很好的当地环境指示生物。已有研究采用麻

雀羽毛监测环境中的重金属物质,表明麻雀能够作为城市环境的指示物种^[7]。

在全球范围内所采集的棕鸟蛋样品作为有机卤素污染物指示的研究中发现,PBDEs含量(以脂质质量计)最大值出现在加拿大,均值为4 400 ng·g⁻¹,标准差为830 ng·g⁻¹,PBDEs含量最小值出现在西班牙,均值为3.7 ng·g⁻¹,标准差为0.1 ng·g⁻¹,该结果反映出加拿大和西班牙在环境质量、工业化和城市化方面的差异^[8]。本研究关注上海不同功能区域麻雀PBDEs含量水平,涉及到垃圾填埋场、中心城区、工业园区、城郊结合部、农村地区和偏远地区,评价上海地区不同城市化水平以及工业水平差距下,各区域留鸟麻雀中PBDEs的污染水平及其地理空间分布特征,了解上海各地PBDEs释放源与当地麻雀体内PBDEs含量之间的关系,并通过与国内外其他区域的留鸟中PBDEs含量的比较,评价上海地区环境中PBDEs的污染现状。

1 材料与方法

1.1 样品采集信息

2012年至2013年在上海市各地采集麻雀样品共37只,覆盖到上海城市地区、城郊结合部、农村和偏远地区、各工业园区和填埋场等,表1列举了各个功

表1 上海各地区麻雀样品信息
Table 1 Detailed information of eurasian tree sparrow samples in Shanghai

功能区域Functional area	样品标号Sample label	活动地区Home range	栖息地类型Habitat type
城市地区	U-1、U-2、U-3	陆家嘴金融贸易区、徐汇区商圈	人工灌丛、人工草地
浦东新区城郊结合部	PD-S-1、PD-S-2、PD-S-3	浦东新区人口住宅区	人工灌丛、人工草地
闵行区城郊结合部	MH-S-1、MH-S-2	闵行区人口住宅区	人工灌丛、人工草地
嘉定区城郊结合部	JD-S-1、JD-S-2、JD-S-3、JD-S-4、JD-S-5	嘉定区人口住宅区、工业园区	人工灌丛、人工草地
松江区城郊结合部	SJ-S-1、SJ-S-2、SJ-S-3、SJ-S-4、SJ-S-5	松江区人口住宅区、工业园区	人工灌丛、人工草地
青浦区城郊结合部	QP-S-1、QP-S-2、QP-S-3	青浦区人口住宅区、工业园区	人工灌丛、人工草地
金山区城郊结合部	JS-S-1	金山区人口住宅区	人工灌丛、农田
南汇地区城郊结合部	NH-S-1、NH-S-2、NH-S-3、NH-S-4	南汇城镇住宅区、老港垃圾填埋场、工业园区	农田、人工灌丛、人工草地
农村地区	JD-R-1、JD-R-2、SJ-R-1、SJ-R-2、QP-R-1、QP-R-2、JS-R-1、NH-R-1、NH-R-2	覆盖嘉定、松江、青浦、金山、南汇农村地区	农田
偏远地区	Re-1、Re-2	覆盖南汇、奉贤区,远离城市中心地带	农田、湿地

能区域所采集到的样品信息。

1.2 预处理和前处理

1.2.1 样品预处理

经许可,采集上海市各区县麻雀样品,所有样品用干净的锡箔纸包裹严实后,盛装在聚乙烯密封袋内,在 -20°C 冰箱内避光保存。样品运回实验室清洗,分别解剖出胸脯肌肉,自然风干,纸巾擦干后冷冻干燥备用。

1.2.2 样品前处理

称取鸟类肌肉样品 $1.0\sim 5.0\text{ g}$,加入无水硫酸钠研磨以除去多余水分,加入替代回收标 $^{13}\text{C}\text{-PCB-141}$ 和 $^{13}\text{C}\text{-BDE-209}$ (美国Accustandard标准品),用 40 mL 正己烷/丙酮混合液($1/1, V/V$)索氏提取 8 h 。经真空旋转蒸发仪(Buchi,瑞士)浓缩并定容至 10.0 mL , 1 mL 浓缩液用于测定肌肉中脂肪含量,其余 9 mL 用浓硫酸除脂肪,直到上层呈现出无色透明后转移至含有正己烷的量筒中,经旋转蒸发仪浓缩至 $1.0\sim 2.0\text{ mL}$ 后再经多段硅胶柱净化,用 70 mL 二氯甲烷/正己烷混合液($1/1, V/V$)淋洗,收集洗脱液后旋转蒸发、氮吹尽干,定容至 1.0 mL 正己烷中,待气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)检测。丙酮、正己烷、二氯甲烷、浓硫酸和无水硫酸钠均为分析纯,购于上海凌峰化学试剂有限公司。混合标准样品由BDE 28、BDE 47、BDE 99、BDE 100、BDE 153、BDE 154、BDE 183和BDE 209组成,混合标准样品以及替代物标 $^{13}\text{C}\text{-PCB141}$ 、 $^{13}\text{C}\text{-BDE 209}$ 购于美国Accustandard公司。

1.3 样品分析和质量控制

使用安捷伦气质联用仪(GC-MS-NCI,负化学电离 Negative Chemical Ionization)离子源分析PBDEs,配备有Triplus自动进样器,选择离子监测模式(SIM)检测,选择离子79、81作为定性定量离子。采用色谱柱DB-5HT($15\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.10\text{ }\mu\text{m}$),载气为高纯氮气(流速为 $1.5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$),反应气为甲烷,不分流进样 $1\text{ }\mu\text{L}$,进样口温度 280°C ,离子源温度 150°C ,界面温度 280°C 。气相色谱系统(GC)升温程序为: 110°C 下保留 1 min ,然后以 $8^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 320°C ,保留 3 min ,直到样品完全流出色谱柱。

实验前进行8种PBDEs混合标准品基质加标回收率测试,肌肉样品中8种PBDEs混合标准品基质加标回收率在 $91.0\%\sim 110.5\%$ 之间,两种替代物标 $^{13}\text{C}\text{-PCB-141}$ 和 $^{13}\text{C}\text{-PBDE-209}$ 的回收率分别为 $97.5\%\pm 12.5\%$ 和 $81.0\%\pm 7.5\%$ 。每16个样品为1个批次,每个批次后跟随方法空白、空白加标和基质加标测试,

用以监控分析过程中的背景值、仪器的稳定性和保留时间等。程序空白中均未检出待测目标物,分析检测结果未进行回收率矫正。

1.4 数据处理

在浓度定量过程中,目标检测物低于检测限的以nd表示,当0来计算。 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 为BDE 28、BDE 47、BDE 99、BDE 100、BDE 153、BDE 154和BDE 183含量之和, $\Sigma_8\text{PBDEs}$ 为 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 和BDE 209含量之和。麻雀肌肉中PBDEs含量采用单因素均值方差分析(ANOVA)LSD多重比较,使用SPSS 18.0进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 上海麻雀肌肉PBDEs含量水平与分布特征

表2统计了上海市麻雀肌肉中PBDEs同系物及 $\Sigma_8\text{PBDEs}$ 含量水平。在被检测的8种PBDEs单体中,BDE 47、BDE 99、BDE 100和BDE 209的检出率都为100%,而BDE 28、BDE 153、BDE 154和BDE 183的检出率也都在78%以上,这表明PBDEs已是上海地区麻雀肌肉组织中普遍存在的污染物。 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 含量为 $9.0\sim 83.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,中值和平均值分别为 $28.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $33.9\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。图1为 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 和BDE 209在上海地区麻雀肌肉中的空间分布图。 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 在上海地区分布并不均匀,老港填埋场和徐汇区 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 含量相对较高,为 $65.9\sim 83.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其次为松江工业园区。BDE 209在麻雀肌肉中含量为 $8.2\sim 292.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,中值和平均值分别为 $47.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $64.4\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,是 $\Sigma_7\text{PBDEs}$ 的2倍左右。老港垃圾填埋场BDE 209含量最

表2 上海各地区麻雀肌肉中PBDEs同系物含量统计结果($n=37$)

Table 2 Concentration of individual PBDEs in muscles of eurasian tree sparrow from Shanghai($n=37$)

项目 Item	中值 Median/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	最小值 Minimum/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	最大值 Maximum/ ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	检出率 Detection rate/%
BDE 28	1.6	2.5	2.2	nd	8.8	86
BDE 47	8.4	9.7	5.3	2.5	21.2	100
BDE 99	8.6	9.8	5.5	2.5	22.2	100
BDE 100	3.2	3.9	2.6	0.4	10.2	100
BDE 153	2.5	3.0	2.1	nd	8.6	97
BDE 154	2.0	2.5	2.1	nd	8.5	89
BDE 183	2.4	2.6	2.2	nd	8.5	78
$\Sigma_7\text{PBDEs}$	28.0	33.9	20.2	9.0	83.6	100
BDE 209	47.0	64.4	53.7	8.2	292.0	100
$\Sigma_8\text{PBDEs}$	78.7	98.3	70.3	25.0	375.6	100

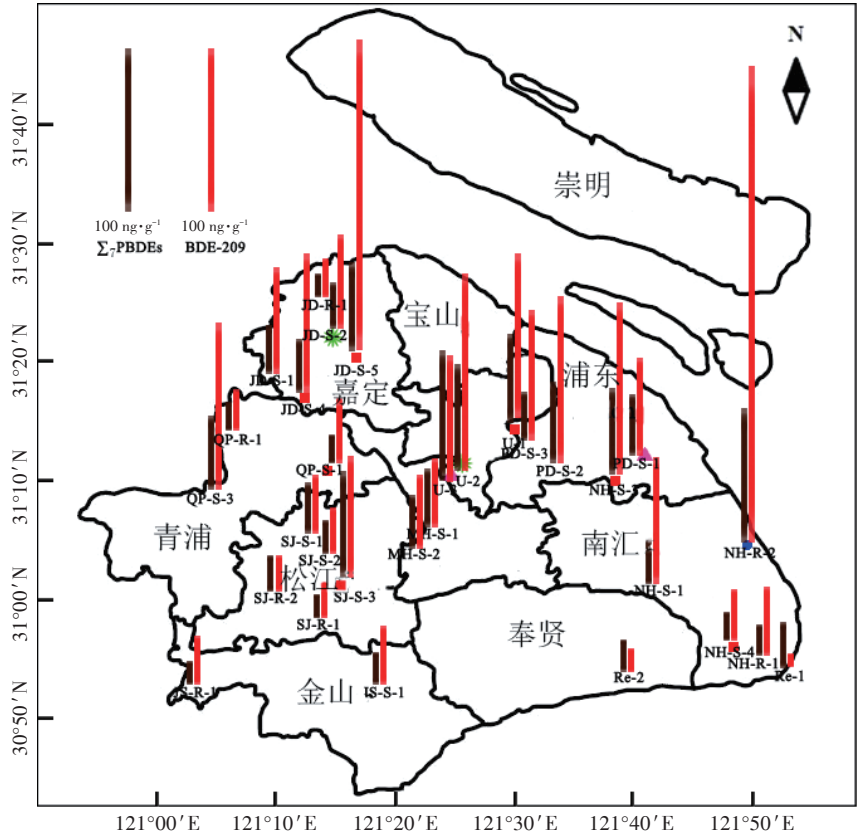


图1 上海各地区麻雀肌肉中PBDEs含量的地理分布图

Figure 1 Geographic distribution of PBDEs levels in muscles of eurasian tree sparrow in Shanghai

高,达到292.0 ng·g⁻¹。其余高含量BDE 209的麻雀样品出现在嘉定工业区(JD-S-5)、肇嘉浜路(U-2)、康桥工业园区(NH-S-3)、陆家嘴西路(U-1)和浦东一住宅区(PD-S-2)。如表3所示,上海中心城区和工业园区的留鸟麻雀中Σ₈PBDEs含量水平显著高于来自农村区域的样品(*P*<0.01),表明中心城区及工业园区所释放的PBDEs对周边环境的影响更大,这与国内外研究相一致,希腊地区城市及工业园区^[9]、科威特城市区域^[10]、中国浙江^[11]、中国东部城市工业园区^[12]也都是当地主要的PBDEs污染释放源。

从图2中可以看出,上海留鸟麻雀Σ₈PBDEs含量水平遵从填埋场>中心城区>工业园>城郊结合部>农村>偏远地区的规律,填埋场麻雀中Σ₈PBDEs含量水平是上海偏远区域的10倍,同样工业园的Σ₈PBDEs含量水平是偏远区域的3倍多。来自于广东省电子垃圾拆解地、城市中心地区、城郊结合区域和农村地区的留鸟(白头翁、棕背伯劳和鹁鸪)肌肉中的PBDEs含量为电子垃圾拆解地>城市中心地区>城郊结合地区>农村地区^[13],广东省清远地区不同功能区域鸟类样品中PBDEs的含量水平差异大,是受区域环境、鸟类生活习

表3 上海市各地区麻雀肌肉中Σ₈PBDEs含量之间的*P*检验值
Table 3 *P* values among Σ₈PBDEs levels in eurasian tree sparrow muscles from different regions in Shanghai

	工业园区 Industrial park	城郊结合区域 Suburban area	农村地区 Rural area	偏远地区 Remote area
中心城区	0.083	0.000**	0.000**	0.000**
工业园区		0.017*	0.000**	0.000**
城郊结合区域			0.020*	0.082
农村地区				0.740

注:*表示不同组间差异显著(*P*<0.05),**表示不同组间差异显著(*P*<0.01)。
Note: * and ** indicate significance differences at 0.05 and 0.01 among different test groups, respectively.

性、食物特征和迁徙行为等影响^[14]。虽然上海和广东省广州、清远有不同的城市化进程和城市发展趋势,但在留鸟体内却发现了相同的“中心城区-城郊结合部-农村”PBDEs空间分布规律,这再次证实了城市的中心城区有着更多的PBDEs污染释放源。

2.2 上海麻雀中PBDEs同系物的分布模式

上海地区麻雀肌肉中8种PBDEs同系物的分布见图3,总体上看,在所有分析的37份麻雀样品中,BDE 209均占比最高,其含量占22.6%~80.1%,平均

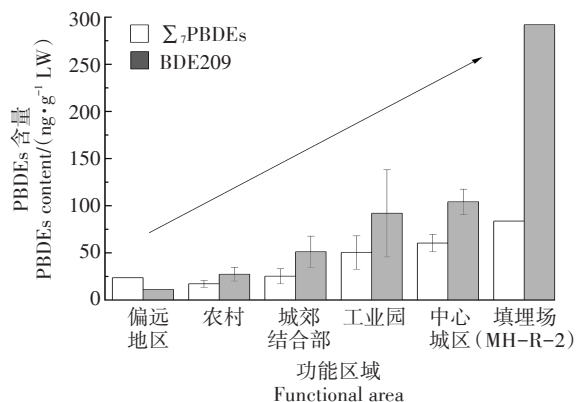


图2 上海不同地区麻雀肌肉中PBDEs含量水平

Figure 2 PBDEs levels in muscles of eurasian tree sparrow in Shanghai

为62.8%,表明Deca商业品是上海地区麻雀的主要污染源。BDE 47和BDE 99的含量分别占5.5%~22.6%(平均为11.0%)和5.2%~28.2%(平均为11.2%),表明五溴联苯醚(Penta)商业品也是上海地区麻雀的污染源之一。BDE 28、BDE 100、BDE 153、BDE 154和BDE 183的平均含量占比仅为2.5%、4.3%、3.2%、2.5%和2.7%。除去SJ-S-5、SJ-R-2、Re-1和Re-2,其余地区麻雀样品中BDE 209占比都超过50%。SJ-S-5中BDE 47和BDE 99占比为14.2%和15.0%,其余两只松江工业园区的麻雀样品中BDE 47和BDE 99的比例都超过了13%,这表明该园区中有Penta商业品组成成分的释放。在松江的城镇和农村住宅区周边的麻雀样品中也发现了较高比例的BDE 47和BDE 99,其中SJ-R-2样品中BDE 47、BDE 99和BDE

100三者相加的比例已达到43.4%,这可能来源于居民生活使用的如电器、建材和装饰产品,也可能来源于松江工业园区Penta商业品组成成分的扩散。在Re-1和Re-2样品中,即南汇嘴和奉贤农场的麻雀中3~6溴代PBDEs同系物之和分别占到72.3%和57.8%,BDE 209仅占22.6%和42.2%,其PBDEs总含量水平是所有麻雀样品中最低的,表明上海南汇嘴和奉贤农场没有明显的PBDEs污染源,PBDEs主要来源于大气中PBDEs的迁移和沉降。PBDEs具有长距离迁移能力,且四溴代和五溴代PBDEs同系物比高溴代同系物具有更强的迁移能力^[15]。

PBDEs的环境污染问题引起了广泛关注,区域PBDEs污染状况研究及风险评价是PBDEs研究的重要方面。本研究结果表明上海各地区都在普遍使用Deca商业品,其他城市化程度较高的香港、厦门和泉州三地的鹭类鸟蛋中都检测出BDE 209,厦门和香港(>20%)样品中BDE 209的百分比要高于泉州(<10%),其中厦门地区的牛背鹭和中国池鹭鸟蛋中分别超过了30%和70%^[16]。另外,广东省贵屿镇和浙江省台州地区两大进口电子废弃物回收区域的鸟类PBDEs污染状况研究也是关注焦点。清远龙塘白胸苦恶鸟(*Amaurornis phoenicurus*)、蓝胸秧鸡(*Gallinago striatus*)、红胸田鸡(*Porzana fusca*)、扇尾沙锥(*Gallinago gallinago*)肌肉中都有BDE 209检出,蓝胸秧鸡肌肉中BDE 209为主要同系物,该地区的PBDEs含量水平在世界范围内处于前列^[17]。浙江台州温岭镇的三黄鸡脂肪、血液、肠、肌肉、肝、肾、肺和睾丸样品中

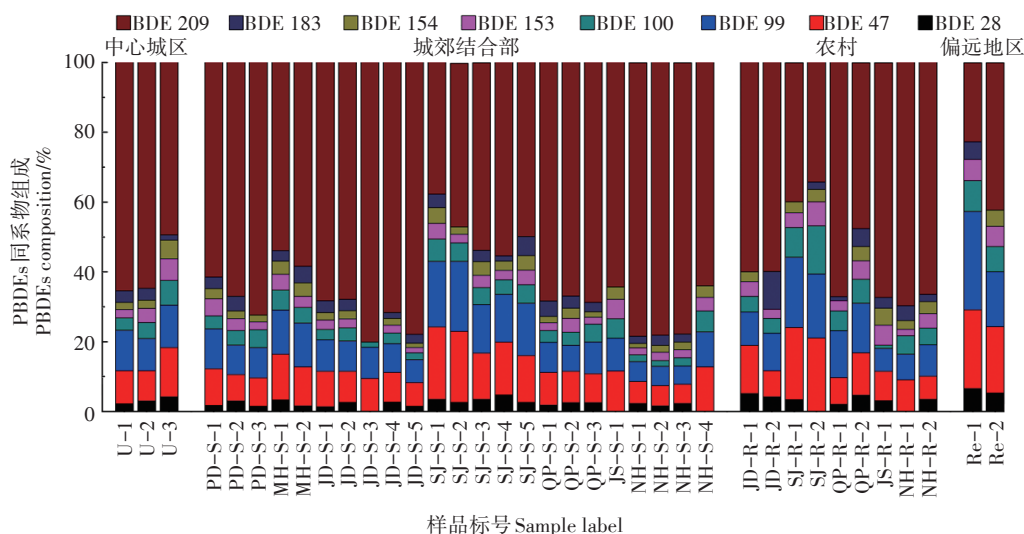


图3 上海地区麻雀肌肉中8种PBDEs同系物的分布

Figure 3 Compositional profiles of eight PBDEs congeners in muscles of eurasian tree sparrow in Shanghai

BDE 209 都是主要同系物,占比为 84.5%~94.7%^[18]。这些结果都表明 BDE 209 污染普遍存在于我国大城市及废弃电子电器拆解地。

2.3 上海市麻雀中 PBDEs 污染水平

目前,鸟类中 PBDEs 研究主要集中于北美、欧洲和亚洲的沿海水域,有关城市留鸟中 PBDEs 的相关研究相对较为缺乏,而且已有的 PBDEs 鸟类方面的研究主要集中在猛禽和大型水生鸟类,较少关注到低营养级的小型鸟类,如本研究中的麻雀。表 4 列出了近年来有关城市小型留鸟中 PBDEs 的相关研究报道。

Van den Steen 等^[19-20]在欧洲各国城市地区 2000 年到 2002 年采集到大山雀(*Parus major*)和蓝山雀(*Parus caeruleus*)的鸟蛋样品,大山雀和蓝山雀和本文中的麻雀属于同一类型留鸟,为鸟纲雀型目,其结果同样发现欧洲城市地区的样品中 PBDEs 含量要明显高于农村和偏僻地区,最高含量达到 136 ng·g⁻¹,这与上海中心城区的 3 个麻雀样品 U-1、U-2 和 U-3 (158~187 ng·g⁻¹)的含量水平相当。同时,上海地区麻雀样品 PBDEs 含量水平稍高于 Dauwe 等^[21]在 2006 年采集到的比利时大山雀的鸟蛋样品中 PBDEs 总含量(中值:49 ng·g⁻¹;浓度范围:24~117 ng·g⁻¹)。广东省电子垃圾拆解区域的白头翁、棕背伯劳和鹊鸂肌肉中 PBDEs 含量与广东省农村地区差别较大^[13],拆解区最高含量达到 15 000 ng·g⁻¹,农村地区仅为 35 ng·g⁻¹。Yu 等^[22]发现北京麻雀肌肉样品中 PBDEs 含量范围为 100~2 600 ng·g⁻¹(中值:250 ng·g⁻¹)。与全球留鸟以及我国其他地区相比,上海地区麻雀中 PBDEs 含量水平较低,显示出上海整体上 PBDEs 生态风险较小,但局部地区如上海垃圾填埋场、工业园等地的高含量样点应当引起重视。

3 结论

(1)上海市各地 37 只麻雀肌肉样品 Σ₇PBDEs 含量范围为 9.0~83.6 ng·g⁻¹,BDE 209 含量范围为 8.20~292.0 ng·g⁻¹。来自于中心城区、工业园和垃圾填埋场

的麻雀肌肉样品中 Σ₈PBDEs 含量水平显著高于农村地区。

(2)上海麻雀肌肉中 Σ₈PBDEs 含量顺序为老港垃圾填埋场>城市中心地区>工业园区>城郊结合区域>农村地区>偏远地区,垃圾填埋场、工业园区是上海地区潜在的多溴联苯醚(PBDEs)的释放源。

(3)上海市 37 份麻雀肌肉样品中均以 BDE 209 为主,其含量占 22.6%~80.1%,平均为 62.8%,BDE 209 含量是 Σ₇PBDEs 的 2 倍左右,表明十溴联苯醚商业品是上海地区麻雀的主要污染源。

(4)与全球及我国其他地区相比,上海地区麻雀中 PBDEs 含量水平较低,显示出上海整体 PBDEs 生态风险较小,但特定功能区域麻雀中 PBDEs 含量水平相对较高,表明上海垃圾填埋场和工业园等地区的生态风险仍应引起重视。

参考文献:

- [1] WU X D, CHEN L Q, LI X Y, et al. Trophic transfer of methylmercury and brominated flame retardants in adjacent riparian and aquatic food webs: ¹³C indicates biotransport of contaminants through food webs[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119433.
- [2] WU X D, ZHEN X B, YU L H, et al. Biomagnification of persistent organic pollutants from terrestrial and aquatic invertebrates to songbirds: associations with physiochemical and ecological indicators[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(17): 12200-12209.
- [3] LESLIE H A, BRANDSMA S H, BARBER J L, et al. Decabromodiphenylether trends in the European environment: bird eggs, sewage sludge and surficial sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 774: 1-9.
- [4] TURNER A. PBDEs in the marine environment: sources, pathways and the role of microplastics[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 301: 118943.
- [5] CAI K H, SONG Q B, YUAN W Y, et al. Human exposure to PBDEs in e-waste areas: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115634.
- [6] FU J, ZHOU Q, LIU J, et al. High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical e-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(7): 1269-1275.

表 4 雀型目鸟体内 PBDEs 含量水平

Table 4 Comparison of PBDEs in passeriformes between this study with other studies

种类/组织 Specy/Tissue	年份 Sampling year	地点 Location	PBDEs 含量总和 Sum-PBDEs/(ng·g ⁻¹)	来源 Reference
大山雀和蓝山雀/蛋	2000—2002	14 个欧洲国家	范围:4.0~136	[19-20]
大山雀/蛋	2006	比利时	中值:49(范围:24~117)	[21]
白头翁、棕背伯劳和鹊鸂/肌肉	2009—2011	广东省广州、清远等地	范围:35~15 000	[13]
麻雀/肌肉	1993—2000	北京	中值:250(范围:100~2 600)	[22]
麻雀/肌肉	2012	上海	平均值:98(范围:25~376)	本研究

- [7] 潘超, 郑光美, 张正珏, 等. 北京城区麻雀体内污染物的研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 820-824. PAN C, ZHENG G M, ZHANG Z J, et al. Studies on contaminations in tree sparrow (*Passer montanus*) in Beijing[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2001, 37(6): 820-824.
- [8] EENS M, JASPERS V L B, STEEN E V D, et al. Can starling eggs be useful as a biomonitoring tool to study organohalogenated contaminants on a worldwide scale? [J]. *Environment International*, 2012, 51(5): 141-149.
- [9] BESIS A, VOUTSA D, SAMARA C. Atmospheric occurrence and gas-particle partitioning of PBDEs at industrial, urban and suburban sites of Thessaloniki, northern Greece: implications for human health[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 215: 113-124.
- [10] GEVAO B, GHADBAN A N, UDDIN S, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in soils along a rural-urban-rural transect: sources, concentration gradients, and profiles[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3666-3672.
- [11] WANG J X, LIN Z K, LIN K F, et al. Polybrominated diphenyl ethers in water, sediment, soil, and biological samples from different industrial areas in Zhejiang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 197: 211-219.
- [12] QIN Y, LIU Y, WANG J, et al. Emission of PAHs, PCBs, PBDEs and heavy metals in air, water and soil around a waste plastic recycling factory in an industrial park, eastern China[J]. *Chemosphere*, 2022, 294: 133734.
- [13] SUN Y X, LUO X J, MO L, et al. Brominated flame retardants in three terrestrial passerine birds from south China: geographical pattern and implication for potential sources[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 381-388.
- [14] LING M, ZHENG X B, SUN Y X, et al. Selection of passerine birds as bio-sentinel of persistent organic pollutants in terrestrial environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633(4): 1237-1244.
- [15] WANIA F, DUGANI C B. Assessing the long-range transport potential of polybrominated diphenyl ethers: a comparison of four multimedia models[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22(6): 1252-1261.
- [16] LAM J C, KAJIWARA N, RAMU K, et al. Assessment of polybrominated diphenyl ethers in eggs of waterbirds from south China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(1): 258-267.
- [17] LUO X J, ZHANG X L, LIU J, et al. Persistent halogenated compounds in waterbirds from an e-waste recycling region in south China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 43(2): 306-311.
- [18] QIN X, QIN Z, LI Y, et al. Polybrominated diphenyl ethers in chicken tissues and eggs from an electronic waste recycling area in southeast China[J]. *Journal of Environment Science(China)*, 2011, 23(1): 133-138.
- [19] VAN DEN STEEN E, PINXTEN R, JASPERS V L, et al. Brominated flame retardants and organochlorines in the European environment using great tit eggs as a biomonitoring tool[J]. *Environment International*, 2009, 35(2): 310-317.
- [20] VAN DEN STEEN E, PINXTEN R, COVACI A, et al. The use of blue tit eggs as a biomonitoring tool for organohalogenated pollutants in the European environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(6): 1451-1457.
- [21] DAUWE T, VAN DEN STEEN E, JASPERS V L, et al. Interspecific differences in concentrations and congener profiles of chlorinated and brominated organic pollutants in three insectivorous bird species[J]. *Environment International*, 2009, 35(2): 369-375.
- [22] YU L H, LUO X J, WU J P, et al. Biomagnification of higher brominated PBDE congeners in an urban terrestrial food web in north China based on field observation of prey deliveries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(12): 5125-5131.

(责任编辑:李丹)