

滨海湿地中多溴联苯醚的污染特征及生态风险评价研究进展

张卉莲¹, 吴桐¹, 查家宝¹, 黄海鹏¹, 杨芯月¹, 韩蕊², 吴英海¹

(1. 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 辽宁大连 116023;

2. 设施渔业教育部重点实验室, 大连海洋大学, 辽宁大连 116023)

摘要:系统梳理了多溴联苯醚(PBDEs)在滨海湿地中的种类和浓度、沉积物中的分布特征、与沉积物理化因子的关系、生态风险评价等方面的研究进展,分析了滨海湿地沉积物和生物体内PBDEs的种类和浓度,总结了PBDEs在滨海湿地中的水平分布与垂向分布规律,阐述了滨海湿地沉积物理化因子对其分布影响,归纳了滨海湿地中PBDEs的生态风险评价方法。后期研究需进一步厘清滨海湿地沉积物和生物体内的PBDEs同系物及富集浓度等问题,加强滨海城市排污口附近区域的PBDEs归趋研究,解析滨海湿地沉积物理化因子(如铁、硫、氮等元素)与PBDEs的关系,探究PBDEs生态风险阈值与评价方法,为滨海湿地污染控制与评价提供技术支撑。

关键词:多溴联苯醚;滨海湿地;沉积物;污染特征;生态风险

中图分类号:X820 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)02-0159-07

多溴联苯醚(Polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)是一种溴代阻燃剂,常添加于塑料产品、家具、纺织品等,具有一定的持久性、生物累积性和潜在毒性,释放至环境中不仅会造成污染,甚至还会威胁到人体健康(李华薇和徐向荣,2022; Khan et al, 2023)。作为典型持久性有机污染物(POPs),PBDEs可通过地表径流、大气沉降、污水排放等途径进入水体,并随悬浮颗粒物沉降累积在沉积物中(刘明丽, 2018)。滨海湿地作为陆地和海洋的生态过渡带,具有重要的生态服务功能,越来越多的研究发现其中有PBDEs存在,对滨海湿地产生了较大的生态风险(Zhou et al,2019; Wang et al,2020)。

近年来,关于PBDEs的综述类文献主要涉及其在环境中的污染现状(吴玉丽等,2021)、分布特征与环境风险(王磊等,2019; Zhang et al,2021)、人体内外暴露(Jiang et al,2019)、微生物降解(Zhao et al,2018; 胥梦等,2021)、淡水中PBDEs与工程纳米颗粒的相互作用(Khan et al,

2023);缺少对滨海湿地中的PBDEs污染特征及生态风险归纳和总结,有必要对近年来的研究成果进行梳理。

1 不同介质中的PBDEs种类和浓度

1.1 滨海湿地沉积物

已发现多个国家和地区湿地沉积物中含有中、高水平浓度的PBDEs,检测到的种类主要有14种(表1)。我国多地滨海湿地沉积物中检测到PBDEs的存在(Sun et al,2017; Chen et al,2018; Da et al, 2019);张起源(2020)在湛江红树林表层沉积物中检测发现PBDEs干重含量为2.26~67.91 ng/g,平均为(23.32±18.18) ng/g。有研究发现,BDE-209是浓度占比最高的PBDEs同系物,其次是BDE-47和BDE-99(Yin et al,2020; 李华薇和徐向荣,2022);我国南方沿海地区的6个红树林沉积物中,BDE-209的干重含量为1.44~120.28 ng/g,占PBDEs总量的63.6%~99.1%(Chai et al,2019);越南中部海岸、加纳西海岸沉积物中也检测到PBDEs,干重浓度分别为11.7~311 ng/g和19.8~70.6 ng/kg(Kofied et al,2018; Tham et al,2019)。PBDEs的种类和浓度在不同研究中往往表现出一些差异,这可能是由于陆地PBDEs排放量、潮流条件以及滨海湿地自身特点不同所致。

PBDEs在自然环境中的转化主要包括光解、还原分解、生物转化等,生成副产物和过程机制较为复杂(王国庆等,2021)。Wang等(2018)发现BDE-25光解的主要脱溴产物是BDE-13,表明BDE-25上的邻溴取代基优先被去除,而BDE-29光解的主要脱溴

收稿日期:2022-06-14 修回日期:2022-11-05

基金项目:辽宁省科学技术计划项目(2021JH2/10200012);国家自然科学基金(32273186);大连市支持高层次人才创新创业项目(2020RQ0111);设施渔业教育部重点实验室开放课题(202211);大连海洋大学创新创业训练计划(X202210158025)。

作者简介:张卉莲,2000年生,女,本科生,专业方向为湿地科学。
E-mail:2823854870@qq.com

通信作者:吴英海,1979年生,男,博士,副教授,主要从事湿地科学教研工作。E-mail:wuyinghai@dlou.edu.cn

产物是 BDE-9, 说明溴取代基优先被去除。生物转化主要有脱溴还原、羟基化及甲氧基化氧化、醚键断裂等途径, 生成低溴代 PBDEs、羟基化多溴联苯醚、甲氧基化多溴联苯醚等多种产物(王国庆等, 2021)。目前, 已有研究发现的种类和含量范围已基本清晰, 今后应加强沉积物中 PBDEs 同系物监测、转化产物和途径研究以及与环境介质间的界面行为研究。

1.2 滨海湿地生物

PBDEs 具有很强的疏水性, 易聚集在有机物含量较高的沉积物和生物体中(Chou et al, 2019)。在辽河滨海湿地优势植物异翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)中检测到中高浓度的 PBDEs(1.44~12.25 ng/g); BDE-47 和 BDE-99 是 PBDEs 的主要同系物, 浓度占比分别为 19.5% 和 33.6%(Wang et al, 2020); 另有研究发现, BDE-209 是红树林植物中 PBDEs 的主要同系物, 在白骨壤(*Avicenia marina*)等 3 种植物的根、茎和叶中平均贡献率分别为 56.9%、43.2% 和 51.4%(Hu et al,

2020)。湿地动物主要通过摄取被 PBDEs 污染过的水及食物而暴露于 PBDEs 中。南海北部湿地翡翠贻贝(*Perna viridis*)体内 BDE-47、BDE-209 和 BDE-99 是 PBDEs 的主要同系物, 且不同地点的 Σ PBDEs 浓度差异较大, 湿重浓度为 6.96~55.6 ng/g(Sun et al, 2020); 此外, 从中国渤海的 11 种软体动物、印度的壮实鹿角珊瑚(*Acropora robusta*)以及突尼斯北部比塞特泻湖的 30 个青灰拟球海胆(*Paracentrotus lividus*)样本等生物中也检测出多种 PBDEs 同系物, 发现动物体内 BDE-209 占比最大的情况最多(Fu et al, 2019; Mekni et al, 2019; Paliya et al, 2021)。生物体内可能发生 PBDEs 同系物的脱溴作用, 推断 BDE-47 由 2 种生物转化机制产生(Olisah et al, 2020)。动植物物种间 PBDEs 浓度和组成上的显著差异, 说明其在动植物体内积累是一个受多种因素影响的复杂过程。PBDEs 在滨海湿地中的环境行为应结合其理化性质、沉积物中生物体摄取特性和生物转化能力等开展进一步研究。

表 1 滨海湿地中检测出的 PBDEs 种类与浓度

Tab.1 Types and concentrations of PBDEs detected in different coastal wetlands

种类	样品采集介质	浓度/ng·g ⁻¹	文献来源
BDE28	滨海湿地水域	ND~5.50(0.012)	Yin et al, 2020
	湛江红树林沉积物	0.02~0.32	何森华等, 2021
BDE47	突尼斯北部湿地青灰拟球海胆	3.41~6.88	Mekni et al, 2019
	南海北部湿地翡翠贻贝	0.66~2.3	Sun et al, 2020
BDE49	厦门湾表层沉积物	ND~0.64	邱涌, 2019
BDE66	红树林沉积物	0.0172±0.0028	李华薇和徐向荣, 2022
BDE85	厦门湾表层沉积物	ND~1.20	邱涌, 2019
BDE99	突尼斯北部湿地青灰拟球海胆	ND~3.01	Mekni et al, 2019
	南海北部湿地翡翠贻贝	0.63~2.8	Sun et al, 2020
BDE100	滨海湿地水域	ND~3.70(0.02)	Yin et al, 2020
	湛江红树林沉积物	0.049	张起源, 2020
BDE138	三门湾表层沉积物	0.04~0.31	邱涌, 2019
BDE153	杭州湾表层沉积物	ND~13.18	Wang et al, 2019a
	湛江红树林沉积物	0.261	张起源, 2020
BDE154	滨海湿地水域	ND~2.45(0.019)	Yin et al, 2020
	红树林沉积物	0.00879±0.00139	李华薇和徐向荣, 2022
BDE209	突尼斯北部湿地青灰拟球海胆	ND~6.48	Mekni et al, 2019
	莱州湾东部水域沉积物	24.27~36.79	牟亚南等, 2019

注: ND 表示低于检测限, 括号内为平均值。

Note: ND means below the detection limit, and average values are in parentheses.

2 PBDEs 在滨海湿地中的空间分布

2.1 水平分布

PBDEs 广泛分布于各种类型的滨海湿地环境中, 在水平方向上呈现出较宽泛的浓度变化, 这与 PBDEs 来源、潮流条件、滨海湿地底泥理化和生物性质密切相关。Lee 等(2018)调查了韩国 Tongyeong 湾滨海湿地底泥, 发现 PBDEs 的平均干重浓度为

2.18~307 ng/g, 随着远离内湾(设有污水排放口)而浓度逐渐降低; 邱涌(2019)在我国浙东三门湾和福建厦门湾表层沉积物中检出 PBDEs, 其干重浓度分别为 2.97~82.35 ng/g 和 7.86~275.95 ng/g, 2 个海湾中 PBDEs 的浓度分布均由湾内向湾外逐渐降低, 推断陆源输入是 PBDEs 的主要来源; Yin 等(2020)发现我国南方和东部的湿地沉积物中 PBDEs 浓度较东北部高, 推测主要与电子垃圾回收过程中 PBDEs 的释放有

关;Ren等(2019)发现广东汕头沿海红树林和潮滩中PBDEs浓度均值分别为35 ng/g和7.8 ng/g,表明红树林对PBDEs污染物有更强的截留作用。探究PBDEs浓度水平分布规律、不同湿地类型截留差异以及主要PBDEs同系物对于开展污染控制具有重要意义。

PBDEs溶解度非常低、亲水性弱,水体中溶解的PBDEs浓度因此普遍较低;但其与颗粒物质的亲和力较强,使得其进入水环境后容易与悬浮颗粒或沉积物结合,最终在沉积物中累积(王磊等,2019)。总体上,沉积物中的PBDEs浓度表现为距离内湾(包括污水排出口)越远其浓度下降越明显。目前,已有研究主要围绕红树林、河口等典型湿地开展PBDEs分布研究,排污行为对环境中PBDEs的增加不容忽视,应重点加强受人为影响严重的滨海湿地,特别是城市排污口附近区域PBDEs的归趋研究。

2.2 垂向分布

大多数研究发现,PBDEs在滨海湿地沉积物中垂向分布表现为自下而上呈现浓度上升趋势。Drage等(2015)从澳大利亚悉尼河口的4个地点采集了沉积物岩心和表层沉积物样品,发现代表商业十溴二苯醚的BDE-209在表层沉积物中平均干重浓度最高,达到42 ng/g(21~65 ng/g),代表五溴二苯醚和八溴二苯醚商业混合物的PBDEs同系物(Σ 6PBDEs),在表层沉积物中最高平均干重浓度为1.3 ng/g;波斯湾地区的PBDEs垂直分布在各取样站和不同深度之间差异显著,呈向地表递减趋势,最大值出现在12~20 cm, Σ PBDEs在沉积物中的干重浓度为0.42~47.14 ng/g(Jafarabadi et al, 2020);路风辉等(2014)在珠江三角洲从地表向下间隔4 cm取样,5个沉积柱样品中PBDEs干重含量为1.54~94.8 ng/g(均值15.4 ng/g),且自上而下呈下降趋势;大连滨海湿地底泥(海水深度8~30 m)中的PBDEs平均干重浓度仅为5 ng/g,但浓度变幅较大(3.98~103.00 ng/g)(赵志刚,2013)。

然而,也有研究发现滨海湿地中PBDEs总浓度从深处向上呈现先上升、后下降的趋势。周鹏等(2016)发现表层0~3 cm沉积物中PBDEs干重总浓度为2.58 ng/g,随着深度继续加深,3~6 cm、6~9 cm、9~12 cm、12~15 cm沉积物中PBDEs干重总浓度依次为3.04 ng/g、1.81 ng/g、0.74 ng/g、0.33 ng/g。总的说来,近年来关于滨海湿地中PBDEs不同深度分布的研究较少,沉积物不同深度上的浓度差异尚不清楚;今后在进行滨海湿地中PBDEs水平分布规律研究的同时,应同时解析其垂向分布规律。

3 理化因子对沉积物PBDEs归趋的影响

3.1 总有机碳、溶解氧和温度

有机碳可产生吸附作用,因此总有机碳(TOC)是影响环境中痕量有机物分布和组成的重要因素之一,有研究发现了TOC与PBDEs归趋的关系。沉积物中PBDEs同系物一般与TOC成正相关(鞠婷等,2017;Chai et al,2019),说明TOC显著影响PBDEs在滨海湿地沉积物中的含量与分布,主要原因是PBDEs在海水中溶解度很小,PBDEs易被富含有机碳的颗粒物吸附而累积在沉积物中。针对红树林湿地的研究也发现,总有机质(TOM)与BDE-209呈正相关,而粒度组成(粘土、淤泥和沙子)与BDE-209不存在相关性(Sun et al,2017)。滨海湿地中的TOC含量通常受滨海湿地类型、潮流特征、人类排放污水的影响而不同。因此,针对受PBDEs污染的不同典型区域需进行单独研究。

除TOC外,溶解氧(DO)也影响微生物对PBDEs的降解过程,从而影响其在滨海湿地中的浓度(Wang et al,2022);此外,温度是影响滨海湿地沉积物中PBDEs分布和组成的另外一个重要因素。高温会加速PBDEs的扩散并促进其挥发,当温度从25°C升高到45°C时,其土壤分配系数值下降54.36%~77.60%(Deng et al,2022)。由于滨海湿地与淡水湿地在环境条件上的不同,针对滨海湿地中TOC、DO和温度等因素对PBDEs分布的影响研究需要进一步加强。

3.2 金属和非金属元素

痕量有机物在滨海湿地中的归趋行为还与氧化还原能力较强的金属和非金属矿物有关,往往与其他元素发生耦合转化,这个转化可能是纯化学或耦合生物过程的。目前研究主要集中在铁、锰、锌、纳米颗粒等氧化还原性高的金属元素如何影响PBDEs在沉积物中的归趋(吴洋等,2018;Tang et al,2018;Khan et al,2023)。关于铁氧化物在有氧和厌氧条件下的价态和晶型转化及其如何影响卤代有机物是当前的研究热点,尤其是生物地球化学作用(周礼洋,2018)。值得关注的是,高溴代PBDEs降解产生低溴代PBDEs可能具有更大的环境风险(吴洋等,2018);滨海湿地环境中的活性重金属会影响到PBDEs的归趋行为。研究发现,重金属镉(II)对氧化铁的脱钝化是PBDEs去除效率高的主要原因(Wei et al,2021)。这为PBDEs与重金属复合污染的滨海湿地修复提供了启发,值得深入研究。除了金属元素,滨海湿地沉积物中的含氮、含硫化合物及其离子也活性较高,与PBDEs也可能发生化学或耦合生物作用的反应,但相关机理较为复杂。

总体而言,目前研究主要关注 TOC 与 PBDEs 分布特征的关系,其他如铁、硫、氮等元素与 PBDEs 含量、转化产物等的关系尚不清晰,特别是耦合生物过程的相关研究较少。因此,应加强 PBDEs 同系物种类、含量与滨海湿地沉积物理化因子关系的研究,需要特别关注影响 PBDEs 转化途径的化学机制和耦合生物过程。

4 PBDEs 的生态风险评价方法

评价滨海湿地中 PBDEs 的生态风险对于保护滨海湿地系统和人类健康具有重要意义。目前其生态风险评价方法主要有风险熵法(Risk Quotient,RQ)、物种敏感度分布曲线法、AQUATOX 模型法等(表 2)。

4.1 风险熵法

风险熵法(RQ)在评价滨海环境 PBDEs 生态风险评价中最为常用(沈洪艳和胡小敏,2018;Wang et al,2019b)。RQ 法中采用的是加拿大环境部联邦环境质量标准(FEQG),其中 FEQG 对于三、四、五、六和十溴二苯醚同系物归一化为 1% 总有机碳的干重取值分别为 44、39、0.4、440 和 19 ng/g (Environment Canada,2013;刘明丽,2018)。根据 RQ 值可将 PBDEs 的风险水平划分为 3 级: $0.01 \leq RQ < 0.1$ 表示风险水平较低, $0.1 \leq RQ < 1$ 表示具有中等风险水平, $RQ \geq 1$ 表示风险水平较高(Wang et al,2015)。很多学者采用该方法进行了不同地区不同类型滨海湿地中 PBDEs 生态风险评价(牟亚南等,2019;Olisah et al,2020;何森华等,2021);但也有学者认为该方法可能导致 PBDEs 生态风险被高估(Chai et al,2019)。FEQG 取值与生物物种耐受程度有关,而不同地区的物种差异可能导致该值有显著差异,我国尚缺乏 PBDEs 毒性数据库,值得进一步加强研究。

4.2 物种敏感度分布曲线法

当不同分类生物物种有足够的生态毒理学数据可用时,则可使用物种敏感度分布曲线法替代 RQ 法(Valsecchi et al,2017)。物种敏感度分布法是一种累积概率分布,适用于生态系统单个物种的一组毒性阈值,该方法假设可接受效应水平遵循某种分布作为化学品浓度的函数(例如正态、逻辑、三角),并且有限数量的受试物种是整个生态系统的随机样本(Gredelj et al,2018)。Lu 等(2018)使用该评价方法得出 5 种溴化阻燃剂的毒性等级为:四溴双酚 A > 五溴联苯醚 > 八溴联苯醚 > 十溴苯醚 > 六溴环十二烷。

4.3 AQUATOX 模型法

RQ 法和物种敏感度分布曲线法均预测直接毒性效应,未考虑受污染环境种群之间的相互生态作用以及非生物因素的影响,可能导致 PBDEs 浓度低于安全阈值。AQUATOX 模型法可弥补此不足,该模型不仅可以预测直接毒性效应,还可预测由食物网引起的间接生态效应(沈洪艳和胡小敏,2018;Gredelj et al,2018);但该模型使用较复杂,各个种群的生理参数主要来源于 AQUATOX 模型数据库或文献资料。

在评价方法选择上,Gredelj 等(2018)建议最谨慎的方法是使用 RQ 法,接着是物种敏感度分布曲线法,然后是 AQUATOX 模型法;此外,还有地积累指数法、Hakanson 潜在生态风险指数法,但这 2 种方法较多用于重金属生态风险评价,在 PBDEs 生态风险评价方面鲜见报道。由于滨海湿地沉积物环境的复杂性,PBDEs 的生态风险不可能受到单一因素的控制,目前选择合适的评价方法尚处于探索阶段。今后应加强 PBDEs 同系物、转化产物对滨海湿地动植

表 2 常见的 PBDEs 生态风险评价方法

Tab.2 Common ecological risk assessment methods for PBDEs

方法名称	计算式	参数含义	文献来源
风险熵法 (熵值法)	$RQ = EEC/FEQG$	EEC 为 PBDEs 暴露水平,FEQG 为加拿大环境部对 PBDEs 规定的联邦环境质量标准	Wang et al,2019a
物种敏感度分布曲线法	横坐标: $\ln S_{MAV}$ 纵坐标: $P = r/(n+1)$	SMAV 为物种平均急性值,是死亡率或其他严重影响(如固定)的单个测量 EC_{50} 值,或者在 2 个或多个可接受的急性试验可用时,计算为 EC_{50} 的几何平均值, r, n 为 SMAV 从最低到最高排序,并分配一个秩 r ,从最低的 $r=1$ 到最高的 $SMAV \ r=n, P$ 为累积概率	Valsecchi et al,2017
AQUATOX 模型法	-	-	Gredelj et al,2018
地积累指数法	$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)]$	I_{geo} 为地积累指数, C_n 为元素 n 在沉积物中的浓度, B_n 为元素 n 的环境背景值, k 为考虑各地岩石差异或成岩作用可能引起环境背景值的变动而选取的修正指数	沈洪艳和胡小敏,2018
Hakanson 潜在生态风险指数法	$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \cdot C_f^i$	RI 为综合潜在生态风险指数, E_r^i 为沉积物中单个污染物的潜在生态风险参数, T_r^i 为某一污染物的毒性系数, C_f^i 为某一污染物的污染参数	Ferreira et al,2022

注: - 表示计算式和参数较复杂而未列出。

Note: - indicates that the calculation formula and parameters are complex and not listed.

物、微生物群落的生态毒理学研究,获得更为准确的PBDEs生态阈值和毒性数据库,建立更加科学的滨海湿地生态风险评价方法。

5 问题及展望

PBDEs种类繁多,降解过程和产物复杂,同时受滨海环境条件和人类排污影响,因此PBDEs在滨海湿地中的环境行为非常复杂。当前的研究对PBDEs在水平和深度上的分布规律尚解析得不够清晰,滨海湿地沉积物理化因子如何影响PBDEs的归趋需要进一步深入研究,生态风险评价如何选择适合的方法仍处于探索阶段。今后,可重点从以下几个方面着手:

(1)加强滨海湿地沉积物中PBDEs同系物监测和其转化产物分析,加强与环境介质间的界面行为研究,结合PBDEs理化性质与沉积物中生物体的特性,加强动植物体内中富集机制研究。

(2)排污口对滨海市湿地环境中PBDEs的贡献显著,应重点加强受工业发展影响严重的滨海湿地研究,特别是滨海城市排污口附近区域的PBDEs归趋研究,注重滨海中PBDEs的垂向上分布规律研究。

(3)加强滨海湿地沉积物理化因子(铁、硫、氮等)与PBDEs含量、转化产物的关系、特别是耦合生物过程的研究。

(4)加强PBDEs同系物、转化产物对滨海湿地动植物、微生物群落的生态毒理学研究,获得更为准确的生态阈值,建立更加科学的环境风险评价方法。

参考文献

何森华,张起源,郭洁,等,2021. 湛江红树林湿地沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的污染特征与生态风险评价[J]. 生态环境学报, 30(2):368-375.

鞠婷,葛蔚,柴超,2017. 胶州湾沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 36(4):839-848.

李华薇,徐向荣,2022. 中国典型红树林沉积物中多溴联苯醚和替代型溴系阻燃剂污染特征[J]. 热带海洋学报, 41(1):117-130.

刘明丽,2018. 长江流域水相、沉积相中多溴联苯醚及有机氯农药的污染特征和风险评价[D]. 北京:北京交通大学.

路风辉,陈满英,陈纪文,等,2014. 珠江三角洲沉积物钻孔中多溴联苯醚的垂直变化规律研究[J]. 环境科学学报, 34(9):2362-2366.

牟亚南,王金叶,张艳,等,2019. 莱州湾东部海域多溴联苯醚的污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 38(1):131-141.

邱涌,2019. 多卤代呋啉和多溴联苯醚在不同海湾表层沉积物中的污染特征[D]. 广州:暨南大学.

沈洪艳,胡小敏,2018. 不同环境介质中污染物生态风险评价方

法的国内研究进展[J]. 河北科技大学学报, 39(2):176-182.

王国庆,许学慧,李跃进,2021. 多溴联苯醚及其衍生物在土壤中的分布、转化和生物效应研究进展[J]. 环境科学研究, 34(3):755-765.

王磊,李晓晓,陶秀成,等,2019. 多溴联苯醚分布特征及环境风险研究进展[J]. 生态毒理学报, 14(4):31-42.

吴洋,王玉,仇荣亮,等,2018. 应用零价铁基材料还原和催化氧化降解多溴联苯醚[J]. 化学进展, 30(4):420-428.

吴玉丽,肖羽堂,王冠平,等,2021. 多溴联苯醚、六溴环十二烷和四溴双酚A在环境中污染现状的研究进展[J]. 环境化学, 40(2):384-403.

胥梦,王继华,李梓维,等,2021. 多溴联苯醚的微生物降解机理研究进展[J]. 环境科学与技术, 44(S2):172-181.

张起源,2020. 湛江红树林湿地沉积物微塑料和三种有机污染物污染状况研究[D]. 广州:暨南大学.

赵志刚,2013. 大连海域底泥环境多溴联苯醚生态风险分析研究[D]. 大连:大连海事大学.

周礼洋,2018. 铁还原菌强化还原钝化零价铁降解地下水中氯代烃[D]. 上海:华东理工大学.

周鹏,林匡飞,于慧娟,等,2016. 东海沉积物中多溴联苯醚的分布特征研究[J]. 中国环境科学, 36(1):149-156.

Chai M W, Ding H, Shen X X, et al, 2019. Contamination and ecological risk of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surface sediments of mangrove wetlands: A nationwide study in China[J]. Environmental Pollution, 249:992-1001.

Chen J, Wang P F, Wang C, et al, 2018. Spatial distribution and diversity of organohalide-respiring bacteria and their relationships with polybrominated diphenyl ether concentration in Taihu Lake sediments[J]. Environmental Pollution, 232:200-211.

Chou T H, Ou M H, Wu T Y, et al, 2019. Temporal and spatial surveys of polybromodiphenyl ethers (PBDEs) contamination of soil near a factory using PBDEs in northern Taiwan [J]. Chemosphere, 236:124117.

Da C N, Wu K, Ye J S, et al, 2019. Temporal trends of polybrominated diphenyl ethers in the sediment cores from different areas in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 171:222-230.

Deng Y, Xu W, Zeng Q H, et al, 2022. Effects of temperature and relative humidity on soil-air partition coefficients of organophosphate flame retardants and polybrominated diphenyl ethers[J]. Chemosphere, 291:132716.

Drage D, Mueller J F, Birch G, et al, 2015. Historical trends of PBDEs and HBCDs in sediment cores from Sydney estuary, Australia[J]. Science of the Total Environment, 512/513:177-184.

Environment Canada, 2013. Canadian Environmental Protection Act, 1999, Federal Environmental Quality Guide-

- lines: Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs)[R]. Gattineau: Environment Canada.
- Ferreira S L C, da Silva J B, dos Santos I F, et al, 2022. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments - Practical aspects[J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 35:e00169.
- Fu L F, Pei J, Zhang Y Y, et al, 2019. Polybrominated diphenyl ethers and alternative halogenated flame retardants in mollusks from the Chinese Bohai Sea: Levels and inter-specific differences[J]. Marine Pollution Bulletin, 142: 551-558.
- Gredelj A, Barausse A, Grechi L, et al, 2018. Deriving predicted no-effect concentrations (PNECs) for emerging contaminants in the river Po, Italy, using three approaches: Assessment factor, species sensitivity distribution and AQUATOX ecosystem modelling[J]. Environment International, 119:66-78.
- Hu Y X, Sun Y X, Pei N C, et al, 2020. Polybrominated diphenyl ethers and alternative halogenated flame retardants in mangrove plants from Futian National Nature Reserve of Shenzhen City, South China[J]. Environmental Pollution, 260: 114087.
- Jafarabadi A R, Dashtbozorg M, Raudonytė-Svirbutavičienė E, et al, 2020. First report on polybrominated diphenyl ethers in the Iranian Coral Islands: Concentrations, profiles, source apportionment, and ecological risk assessment [J]. Chemosphere, 251:126397.
- Jiang Y F, Yuan L M, Lin Q H, et al, 2019. Polybrominated diphenyl ethers in the environment and human external and internal exposure in China: A review[J]. Science of the Total Environment, 696:133902.
- Khan A U H, Naidu R, Dharmarajan R, et al, 2023. The interaction mechanisms of co-existing polybrominated diphenyl ethers and engineered nanoparticles in environmental waters: A critical review[J]. Journal of Environmental Sciences, 124:227-252.
- Kofi E D, Kweku A J, Kweku C S, et al, 2018. Levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in some Ghanaian water body environments[J]. Research Journal of Environmental Sciences, 12(2):73-82.
- Lee H J, Jeong H J, Jang Y L, et al, 2018. Distribution, accumulation, and potential risk of polybrominated diphenyl ethers in the marine environment receiving effluents from a sewage treatment plant[J]. Marine Pollution Bulletin, 129:364-369.
- Lu C X, Yang S W, Yan Z G, et al, 2018. Deriving aquatic life criteria for PBDEs in China and comparison of species sensitivity distribution with TBBPA and HBCD[J]. Science of the Total Environment, 640/641:1279-1285.
- Mekni S, Barhoumi B, Aznar-Aleman O, et al, 2019. Occurrence of halogenated flame retardants in sediments and sea urchins (*Paracentrotus lividus*) from a North African Mediterranean coastal lagoon (Bizerte, Tunisia) [J]. Science of the Total Environment, 654:1316-1325.
- Olisah C, Okoh O O, Okoh A I, 2020. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surface water and fish tissues from Sundays and Swartkops Estuaries, Eastern Cape Province, South Africa: Levels, spatial distribution, seasonal variation and health implications[J]. Regional Studies in Marine Science, 36:101319.
- Paliya S, Mandpe A, Bombaywala S, et al, 2021. Polybrominated diphenyl ethers in the environment: a wake-up call for concerted action in India[J]. Environmental Science and Pollution Research, 28:44693-44715.
- Ren G F, Yan X L, Chu X D, et al, 2019. Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in mangrove sediments of Shantou, China: Occurrence, profiles, depth-distribution, and risk assessment[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 183:109564.
- Sun H W, Giesy J P, Jin X W, et al, 2017. Tiered Probabilistic assessment of organohalogen compounds in the Han River and Danjiangkou Reservoir central China[J]. Science of the Total Environment, 586:163-173.
- Sun R X, Pan C G, Li Q X, et al, 2020. Occurrence and congener profiles of polybrominated diphenyl ethers in green mussels (*Perna viridis*) collected from northern South China Sea and the associated potential health risk[J]. Science of the Total Environment, 698:134276.
- Tang T, Lu G N, Wang R, et al, 2018. Debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) by zero valent zinc: Mechanisms and predicting descriptors[J]. Journal of Hazardous Materials, 352:165-171.
- Tham T T, Anh H Q, Trinh L T, et al, 2019. Distributions and seasonal variations of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls, and polybrominated diphenyl ethers in surface sediment from coastal areas of central Vietnam[J]. Marine Pollution Bulletin, 144:28-35.
- Valsecchi S, Conti D, Crebelli R, et al, 2017. Deriving environmental quality standards for perfluorooctanoic acid (PFOA) and related short chain perfluorinated alkyl acids [J]. Journal of Hazardous Materials, 323:84-98.
- Wang X T, Chen L, Wang X K, et al, 2015. Occurrence, profiles, and ecological risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in river sediments of Shanghai, China[J]. Chemosphere, 133:22-30.

- Wang R, Tang T, Xie J B, et al, 2018. Debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their conversion to polybrominated dibenzofurans (PBDFs) by UV light: Mechanisms and pathways[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 354:1-7.
- Wang Q Q, Li X G, Liu S P, et al, 2019a. The effect of hydrodynamic forcing on the transport and deposition of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Hangzhou Bay[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 179:111-118.
- Wang G G, Liu Y, Tao W, et al, 2019b. Reflection of concentrations of polybrominated diphenyl ethers in health risk assessment: A case study in sediments from the metropolitan river, North China[J]. *Environmental Pollution*, 247:80-88.
- Wang G G, Liu Y, Jiang N, et al, 2020. Field study on bioaccumulation and translocation of polybrominated diphenyl ethers in the sediment-plant system of a national nature reserve, North China[J]. *Chemosphere*, 61:127740.
- Wang G G, Liu Y, Wang X, et al, 2022. Application of dual carbon-bromine stable isotope analysis to characterize anaerobic micro-degradation mechanisms of PBDEs in wetland bottom-water[J]. *Water Research*, 208:117854.
- Wei X P, Guo Z Y, Yin H, et al, 2021. Removal of heavy metal ions and polybrominated biphenyl ethers by sulfurized nanoscale zerovalent iron: Compound effects and removal mechanism[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 414:125555.
- Yin H M, Tang Z W, Meng T, et al, 2020. Concentration profile, spatial distributions and temporal trends of polybrominated diphenyl ethers in sediments across China: Implications for risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206:111205.
- Zhang Y F, Xi B D, Tan W B, et al, 2021. Release, transformation, and risk factors of polybrominated diphenyl ethers from landfills to the surrounding environments: A review [J]. *Environment International*, 157:106780.
- Zhao C H, Yan M, Zhong H, et al, 2018. Biodegradation of polybrominated diphenyl ethers and strategies for acceleration: A review[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 129:23-32.
- Zhou H C, Tam N F Y, Cheung S G, et al, 2019. Contamination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in watershed sediments and plants adjacent to e-waste sites[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 379:120788.

(责任编辑 万月华)

Research Progress on Characterization and Ecological Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Coastal Wetlands

ZHANG Hui-lian¹, WU Tong¹, CHA Jia-bao¹, HUANG Hai-peng¹, YANG Xin-yue¹, HAN Rui², WU Ying-hai¹

(1. Dalian Ocean University, College of marine and civil engineering, Dalian 116023, P.R. China;

2. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Dalian Ocean University, Ministry of Education, Dalian 116023, P.R. China)

Abstract: Pollution of coastal wetlands by polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their impact on the wetlands have attracted increasing attention. Research on PBDEs in coastal wetlands has made great strides in terms of characterizing the pollution characteristics and assessing the ecological risk but a research summary is lacking. In this study, we systematically reviewed relevant research on the types and concentration of PBDEs in coastal wetland sediments and organisms, the horizontal and vertical distribution of wetland PBDEs, the relationship between the distribution of PBDEs and sediment physicochemical factors, and the ecological risk assessment of PBDEs. To conclude the review, we offer suggestions for future research: further clarification of congeners, determination of enrichment ratios of PBDEs in coastal wetland sediments and organisms, strengthening research on the transport and fate PBDEs near the sewage outfalls of coastal cities, analyzing the relationship between the physicochemical factors (such as iron, sulfur, nitrogen) of coastal wetlands and PBDEs, and estimating ecological risk thresholds and evaluation methods for PBDEs. Our study provides technical support for pollution control and evaluation of coastal wetlands.

Key words: polybrominated diphenyl ethers; coastal wetlands; sediment; pollution characteristics; ecological risk