

微塑料及卤代有机污染物在洞庭湖的赋存研究进展

王静¹, 尹令实^{2*}

(1. 长沙市浏阳生态环境监测站, 湖南 浏阳 410300; 2. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:洞庭湖是中国第二大淡水湖,其生态价值十分重要。目前洞庭湖新污染物相关研究比较缺乏,也没有系统的综述进行归纳总结。微塑料和卤代有机污染物是近年来备受关注的新污染物,搜集历年研究成果,对这2类污染物在洞庭湖的污染水平、分布方式、污染来源进行归纳总结:洞庭湖微塑料污染水平在世界范围内处于中等,其主要来源包括上游输入、居民日常生活、农业生产及工业生产,湖泊各区域微塑料污染水平差异明显。卤代有机污染物在洞庭湖的浓度呈现随时间推移而降低的趋势,目前整体生态风险较低,但生物累积效应仍然值得警惕。在未来研究中应当关注河流与湖泊之间的相互影响,探究微塑料和卤代有机污染物对洞庭湖区生物造成的生物毒性,建立科学完善的监测方法并结合湖区具体情况对污染防治措施及污染物处理技术开展研究。

关键词:洞庭湖;微塑料;卤代有机污染物;污染水平;分布特征;生态风险

中图分类号:X171;X524

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2022)03-0035-08

Research Progress of Microplastics and OHCs Occurrence in Dongting Lake

WANG Jing¹, YIN Ling-shi²

(1. *Liuyang Ecological Environment Monitoring Station of Changsha City, Liuyang, Hunan 410300, China;*
2. *College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China*)

Abstract: Dongting Lake is the second largest freshwater lake in China which has important ecological significance. There is a lack of research and systematic review on emerging pollutants in Dongting Lake. Microplastics and halogenated organic pollutants (OHCs) are new pollutants which have attracted much attention in recent years. This review collected the research of past years and reviewed the level of pollution, distributions and sources of these two pollutants in Dongting Lake. Microplastic pollution in Dongting Lake is in the middle level around the world, and its main sources include upstream input, daily life of residents, agricultural and industrial production. The concentration of halogenated organic pollutants (OHCs) in Dongting Lake shows a trend of decreasing over past decades, and the overall ecological risk is low at present, but the bioaccumulation effect is still worthy of vigilance. In the future, researchers should pay attention to the interaction between rivers and lakes, explore the biological toxicity caused by microplastics and halogenated organic pollutants to Dongting Lake area, establish scientific monitoring methods, and carry out research on pollution prevention measures and its remediation.

Key words: Dongting Lake; Microplastics; OHCs; Pollution level; Distribution characteristic; Ecological risk

湖泊是淡水生态系统的重要组成部分,兼具蓄洪补枯、提供生物栖息地、调节气候、提供生产生活用水等多种功能,具有不可替代的生态意义。人类活动会影响湖泊环境,工农业生产、生活产生的污水和固体垃圾被排入湖中,给湖泊带来过量的营养

盐和各种污染物,如重金属、持久性有机污染物、微塑料等。

地处长江中游区域的洞庭湖是中国第二大淡水湖,是长江流域重要的农业生产基地和生态湿地,区域内设有多个自然保护区,生态环境保

收稿日期:2022-02-09;修订日期:2022-03-24

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40100)

作者简介:王静(1988—),女,工程师,硕士,主要从事生态环境保护监测工作。

* 通讯作者:尹令实 E-mail: yinls@hnu.edu.cn

护意义重大,素有“长江之肾”的称号。泥沙淤积和围湖造田导致洞庭湖面积在 20 世纪不断减小,经济的迅速发展导致入湖污染物剧增,洞庭湖环境问题在近年来受到了广泛关注。

研究者们对洞庭湖营养盐、重金属等传统污染物进行了较为系统的研究,提供了大量基础数据和科学讨论,为洞庭湖环境保护与治理提供了科学引导^[1-2]。但洞庭湖新污染物的研究依然处于起步阶段,既缺乏足够的研究数据,也缺乏全面系统的归纳总结。现搜集已有的相关文献,选择 2 类具有代表性的新污染物——微塑料和卤代有机污染物(OHCs),对洞庭湖区微塑料的赋存、来源以及生态影响进行归纳总结;对 OHCs 在洞庭湖区的使用、污染现状及环境影响进行评价,综合分析已有研究成果,并对未来潜在的研究方向进行展望。

1 微塑料在洞庭湖的赋存研究进展

微塑料是指尺寸 < 5 mm 的塑料。尺寸特殊、难以降解的微塑料可以对生物产生多方面的毒性效应,也可以作为其他污染物或微生物的载体从而导致污染扩散或物种入侵^[3]。近年来,全世界多种环境介质中都发现了微塑料的存在^[4]。微塑料具有远距离迁移的能力,稳定的性质使其可以到达世界各个区域,包括人迹罕至的南北极和高原山区^[5-6]。由于微塑料进入人们的视线时间尚短,目前仍未有公认的标准对微塑料污染进行监测和评价,相关污染处理措施也尚未成熟,基础数据库也存在许多空白,防控、治理微塑料污染仍然面临重重阻碍。

1.1 洞庭湖微塑料的赋存现状

2018 年, Yin 等^[7]、Wang 等^[8]、Jiang 等^[9]对洞庭湖各区域的表层水和沉积物中微塑料污染情况进行了首次调查。研究发现,洞庭湖各区域普遍受到了微塑料的污染,微塑料污染水平在世界范围内属中等,表 1 和表 2 列举了洞庭湖微塑料丰度与其他湖泊的对比。表层水方面,人类活动频繁的湖泊中的微塑料丰度比洞庭湖更高,如中国武汉的北湖和长沙的跃进湖,这些湖泊表层水中的微塑料丰度数倍于洞庭湖。人类活动相对稀少、管理措施良好的湖泊中的微塑料污染水平相对洞庭湖较低,例如意大利的波尔塞纳湖和秋士湖,中国的太湖和乌梁素海^[10-12]。洞庭湖沉积物中的微塑料污染在世界

范围同样属于中等水平,大多数已被调查的湖泊沉积物中的微塑料与洞庭湖不存在数量级差距。少数水体由于其特殊的水动力条件、形成原因和用途导致少见的微塑料丰度,如丹麦城市及高速公路由于暴雨形成的池塘表层水和沉积物中微塑料丰度最高达到 22 894 个/m³和 127 986 个/kg,而中国丹江口水库沉积物中的丰度仅为 15 ~ 40 个/kg^[13-14]。

表 1 湖泊表层水中的微塑料分布^①

湖泊	国家	采集下限/ μm	丰度	丰度单位
东洞庭湖 ^[8]	中国	50	900 ~ 2 800	个/m ³
西洞庭湖 ^[9]	中国	45	433 ~ 1 500	个/m ³
南洞庭湖 ^[9]	中国	45	367 ~ 1 567	个/m ³
东洞庭湖 ^[15]	中国	74	293	个/m ³
太湖 ^[12]	中国	47	3.4 ~ 25.8	个/L
波尔塞纳湖 ^[10]	意大利	300	0.82 ~ 4.42	个/m ³
秋士湖 ^[10]	意大利	300	2.68 ~ 3.36	个/m ³
北湖 ^[16]	中国	50	8 925	个/m ³
洪湖 ^[8]	中国	50	1 250 ~ 4 650	个/m ³
跃进湖 ^[17]	中国	45	7 050	个/m ³
鄱阳湖 ^[18]	中国	50	5 ~ 34	个/L
乌梁素海 ^[11]	中国	75	3.12 ~ 11.25	个/L
日内瓦湖 ^[19]	瑞士/法国	300	48 100	个/km ²
库苏古尔湖 ^[20]	蒙古	333	20 300	个/km ²
青海湖 ^[21]	中国	112	0.05 ~ 7.58 × 10 ⁸	个/km ²

表 2 湖泊沉积物中的微塑料分布^①

湖泊	国家	浮选溶液	丰度	丰度单位
西洞庭湖 ^[9]	中国	ZnCl ₂	320 ~ 480	个/kg
南洞庭湖 ^[9]	中国	ZnCl ₂	200 ~ 1 150	个/kg
东洞庭湖 ^[7]	中国	ZnCl ₂	180 ~ 693	个/kg
东洞庭湖 ^[15]	中国	NaCl	310	个/kg
太湖 ^[12]	中国	NaCl	11 ~ 234.6	个/kg
秋士湖 ^[10]	意大利	NaCl	234	个/kg
波尔塞纳湖 ^[10]	意大利	NaCl	112	个/kg
跃进湖 ^[22]	中国	ZnCl ₂	536.34	个/kg
艾德巴斯顿湖 ^[23]	英国	H ₂ O	25 ~ 30	10 ⁻² 个/g
丹江口水库 ^[14]	中国	NaCl	15 ~ 40	个/kg*
鄱阳湖 ^[18]	中国	NaCl、NaI	54 ~ 506	个/kg
维多利亚湖 ^[24]	乌干达	NaCl	0.9 ~ 239.8	个/kg

①* 代表湿重。

由于微塑料研究尚无统一的采样、统计方法,导致现有数据之间难以进行直接对比。从采样方法上来看,不同的采集方式导致采样对象尺寸下限不同。例如,拖网孔径通常为 300 ~ 330 μm,而不锈钢筛则为 45 ~ 75 μm,这使得进行结果对比时需要要对数据进行进一步处理。例如, Wang 等^[8]在对比东洞庭湖与其他区域微塑料丰度时,将 330 μm

以下尺寸的微塑料忽略不计。从统计方法上来看,部分研究使用“个数/面积”的单位进行统计,如中国的青海湖、蒙古的库苏古尔湖、瑞士和法国交界处的日内瓦湖^[19-21];另一部分研究则采用“个数/体积”的单位,如洞庭湖、洪湖,只有极少数研究使用上述 2 种方法分别进行统计,如 Su 等^[12]对太湖的研究。除此之外,浮选溶液选择、采样点深度差异、采样时间差别等也都有可能给最终结果带来影响^[25]。

Li 等^[15]在 2018 年 8—9 月,使用相同的采样、实验室处理及统计方法对长江中下游 18 个湖泊的微塑料污染进行了调查,其中包括洞庭湖以及邻近的大通湖、洪湖。调查发现,洞庭湖相比长江中下游其他湖泊,表层水微塑料污染最低,这得益于洞庭湖及其上游区域的环境管理措施,但其沉积物微塑料污染水平较高,需要持续关注。

由于受到时间和经济成本的限制,大多数微塑料相关研究均选择有代表性的疑似微塑料粒子进行光谱分析以确定其化学成分。洞庭湖微塑料的多项研究中均采用了拉曼光谱分析方法对典型样品进行分析,共有 9 种微塑料被检测到,分别是聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚酰胺(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、亚克力(PMMA)和纤维素塑料(Cellulose),这些都是工农业生产和日常生活中常见的塑料类型,其主要化学成分及比例见表 3。由于不同成分的微塑料对环境造成的影响区别大不相同,因此在未来的研究中需要找到更加便捷、经济的方法来区别对待不同的微塑料。

表 3 洞庭湖微塑料的主要化学成分及比例

地点	研究对象	主要化学成分及比例
西/南洞庭湖	表层水 ^[9]	PS(38%),PET(28%), PP(16%),PE(12%)
	沉积物 ^[9]	PET(46%),PE(17%),PS(13%)
东洞庭湖	表层水 ^[8]	PE(42%),PP(36%)
	沉积物 ^[7]	PET(30%),PA(19%), PE(16%),PP(10%)

1.2 洞庭湖微塑料的表面形态与来源

微塑料不溶于水,以固体形态留存于环境中,而不同表面形态的微塑料对环境的影响也有所差

异,通过对微塑料表面形态的研究来推断其来源是目前普遍的做法。在洞庭湖微塑料的已有研究中,均对其形状、颜色、尺寸进行了统计。和大多数淡水区域一样,洞庭湖中微塑料以 <1 mm 的尺寸为主,究其原因,一是单个大尺寸塑料可以在环境中裂解为多个小尺寸塑料,二是大尺寸塑料更容易被污水或固体废物处理措施截留去除。在微塑料的形状分类上,Wang 等^[8]将微塑料分为纤维、颗粒、薄膜,Jiang 等^[9]和 Yin 等^[7]将其分为纤维、微珠、薄膜、碎片,而 Li 等^[15]则仅将其分为纤维和碎片 2 种主要形状。尽管采取了不同的分类方法,但纤维状微塑料在各研究中都占比最大。洞庭湖区周边人口众多且渔业发达,洗衣废水中含有的大量纤维状微塑料和渔具破损产生的微塑料都难以被现有的处理设施去除。另外,洞庭湖汇集多条入湖河流来水,河水中挟带的大量微塑料也以纤维状为主,且质量较轻的纤维还可以借助风力进行远距离迁移,从其他区域到达洞庭湖区。碎片状微塑料一般来源于塑料废弃物的解体,微珠则一般是日常护理品或工业生产中的添加剂^[9]。

颜色方面,在洞庭湖微塑料的多次调查中发现透明微塑料数量最多,这可以归因于洞庭湖区作为重要的农业生产基地,每年使用大量透明塑料薄膜,薄膜在风力、水流等外界因素的影响下破碎并进入洞庭湖中。另外,经济发展使洞庭湖区的居民及游客的活动中一次性塑料制品用量大增。一次性塑料制品大多是透明或在环境中易褪色的,这些都导致透明微塑料在洞庭湖中的数量占比较大。和形状分析的情况类似,由于缺乏统一标准,对于微塑料颜色的判断、分类,尤其是彩色微塑料的判断上,不同研究之间的差距较大,除蓝色微塑料在洞庭湖发现频率较高外,不同研究的结果差异较大^[8,26]。

1.3 洞庭湖微塑料的分布特征与生态影响

1.3.1 分布特征

微塑料在湖泊中的分布可以受到多种因素的影响,如水动力条件、地形、风力、生物活动等,大型湖泊不同区域的微塑料分布有时会表现出明显的差别,例如北美的安大略湖和休伦湖,不同区域微塑料丰度差异达上千倍之多^[27]。洞庭湖表层水中微塑料污染最严重的地点出现在西、南、东洞庭湖的出口处,即小河咀、鹿角、城陵矶区域,其中城陵矶区域表层水中微塑料丰度为 2 800 个/m³,是洞

洞庭湖所有采样点中微塑料污染水平最高的。在这些地点,水流由宽阔的湖面流向狭窄水道,微塑料分布面积减小,导致其在表层水中的丰度较高。城陵矶作为长江中游重要的综合枢纽港口,兼具交通枢纽、工业园区和旅游景点多重功能,而工业、旅游、交通产生的污水和废弃物均是微塑料的重要来源^[8]。

沉积物方面,位于益阳城区的万家咀发现较高丰度的微塑料,丰度达 1 150 个/kg,除万家咀之外,西、南洞庭湖各采样点微塑料丰度差异不明显^[9]。东洞庭湖区域的南端,漉湖作为一个半封闭的区域,微塑料丰度较高,达 693 个/kg。较弱的水力条件、长期疏于管理以及遍布区域的芦苇都是造成微塑料累积的原因,而周边居民的日常生活、种植、养殖活动则是微塑料的当地来源。相反,位于岳阳城区某采样点的微塑料丰度仅为 180 个/kg,除了位于湘江主河道的地理优势之外,岳阳较为严格、完善的管理措施可能也是微塑料污染水平较低的原因^[7]。整体来看,洞庭湖区沉积物中微塑料的分布受到多方面的影响,包括地形、周边环境、环境管理措施等。微塑料在缓流区域、回水区域等水利条件较弱的区域更加容易沉降并累积于沉积物中,而农业养殖、植被密集区的此类现象更加显著。然而,微塑料作为人造产物,较为完善的管理可以实现对其污染的有效控制。

1.3.2 生态影响

尽管目前尚无研究直接对洞庭湖区微塑料污染引发的生态影响开展调查,但该区域的微塑料污染对环境造成的威胁依然不可忽视。暴露于微塑料污染下的低营养生物在急性和慢性时间尺度下都可能受到不利影响^[28]。淡水环境,尤其是缓流湖泊环境中的微塑料可以随着食物链进行频繁迁移,当低营养级的生物摄食或粘附微塑料时,生物累加效应随之产生,使微塑料影响的范围波及更多类型的生物,进而引发对人类暴露的担忧^[29]。除此之外,洞庭湖之类的淡水湖泊丰富的微生物让微塑料上的生物膜更加容易生成,生物膜包含不同的物种和群落组成,并可能作为有害或入侵物种的载体^[30]。洞庭湖作为重要的生态基因库和农业生产基地,微塑料对生物种群、食品安全的威胁不言而喻,对微塑料防控措施的出台和完善是目前亟待进行的任务。

2 卤代有机污染物在洞庭湖的赋存研究进展

OHCs 主要包括有机氯农药(OCPs)、二噁英(PCDD/Fs)、多氯联苯(PCBs)、多溴联苯醚(PBDEs)等^[31]。OHCs 稳定的性质可以使其在环境中长期存在,而脂溶性使其得以在生物体组织中随食物链富集而形成生物放大效应,并凭借其高毒性对生物造成危害^[31]。OHCs 还可以在环境中通过多种途径进行远距离迁移,使污染扩散至其他区域^[32]。中国从 20 世纪 70 年代开始,陆续禁止了多种 OHCs 的使用,但这些具有持久性的污染物依然可以从洞庭湖的水、沉积物和生物体中被发现。

2.1 有机氯农药

有机氯农药(OCPs)凭借其经济、高效、应用范围广、对作物无害等优点曾经一度是世界上用量最大的农药,滴滴涕(DDTs)和六六六(HCHs)是其常见的类型,洞庭湖作为重要的农业生产基地,曾经在 20 世纪 50—80 年代大量使用这 2 种农药。DDTs 和 HCHs 在中国禁用超过 20 年后,2004 年 Qian 等^[33]在洞庭湖 8 个采样点采集了沉积物样品,对上述 2 种农药污染情况进行了调查。调查结果显示,DDTs 和 HCHs 在洞庭湖沉积物中的质量分数分别为 0 ~ 10.15 和 0.21 ~ 9.59 ng/g,其分布与农业活动密切相关。2014 年 Wei 等^[34]对东洞庭湖东部和北部的调查中,发现 DDTs 和 HCHs 在沉积物中的质量分数分别为 0.48 ~ 3.04 和 2.08 ~ 6.36 ng/g,比起 10 年前,污染物质量分数明显降低。同时针对湖泊水的调查中发现,2 种农药的质量浓度仅为 0.05 ~ 2.12 和 0.96 ~ 2.57 ng/L,生态风险评估结果表明,东洞庭湖湖水可以用作洗浴和饮用水源。

尽管部分区域污染状况好转,人类活动频繁、化工企业林立区域的 OCPs 污染依然值得重视。为了防治蚊虫带来的传染病,2002 年 DDTs 被有限度地重新使用。杨海君等^[35]在 2015 年对洞庭湖各区域的沉积物进行调查,从洞庭湖沉积物中发现了高质量分数的 OCPs,其中 HCHs 最高质量分数达到 140.303 ng/g,而 DDTs 的最高质量分数达到了 157.55 ng/g,这说明残留于沉积物中的 OCPs 依然存在一定的生态风险,在东洞庭湖和南洞庭湖交界区域情况较为严重。而根据聚类分析发现沉积物中 DDTs 为近期输入,这一现象值得引起重视。OCPs 在洞庭湖的赋存见表 4。

表 4 OCPs 在洞庭湖的赋存^①

年份	污染物	研究对象	浓度范围	平均浓度	单位
2004	HCHs	沉积物 ^[33]	0.21 ~ 9.59		ng/g*
2004	DDTs	沉积物 ^[33]	0 ~ 10.15		ng/g*
2014	HCHs	水 ^[34]	0.96 ~ 2.57	1.33	ng/L
2014	DDTs	水 ^[34]	0.05 ~ 2.12	0.54	ng/L
2014	HCHs	沉积物 ^[34]	2.08 ~ 6.36	3.21	ng/g*
2014	DDTs	沉积物 ^[34]	0.48 ~ 3.04	1.31	ng/g*
2015	HCHs	沉积物 ^[35]	0.383 ~ 140.303	15.99	ng/g*
2015	DDTs	沉积物 ^[35]	7.42 ~ 157.55	34.81	ng/g*

①* 代表干重。

2.2 二噁英

二噁英 (PCDD/Fs) 是一类剧毒物质, 低浓度的 PCDD/Fs 就可对动物显现致死效应, 给人类健康带来多方面影响。洞庭湖区是血吸虫病的重度流行区, 为了控制血吸虫的宿主钉螺, 湖区在 20 世纪 60—90 年代喷洒了大量含有 PCDD/Fs 的五氯酚钠杀虫剂。在五氯酚钠杀虫剂被禁用多年后, PCDD/Fs 仍然在多种动植物中被检出。尽管 PCDD/Fs 难溶于水, 但 Gao 等^[36] 于 2004 年在洞庭湖区检测出质量浓度为 36 ~ 345 pg/L 的 PCDD/Fs, 证明在五氯酚钠杀虫剂被禁用 20 余年后的洞庭湖水中仍然有高于世界平均水平的残留存在。水中的 PCDD/Fs 可经由鱼鳃或表皮进入水生动物体内, 在相近时间进行的调查中, 发现处于较高营养级的鸬鹚、江豚比鱼类体内的 PCDD/Fs 有数量级差距, 说明 PCDD/Fs 在洞庭湖生态系统中展现出明显的生物累积性^[37-39]。处在食物链顶端的人类也难以幸免, 洞庭湖区农民的血清中发现了 PCDD/Fs, 农药喷洒区哺乳期妇女母乳中的 PCDD/Fs 浓度则显著高于其他区域^[40]。PCDD/Fs 在洞庭湖生物体内的赋存见表 5。

表 5 PCDD/Fs 在洞庭湖生物体内的赋存^①

年份	研究对象	浓度范围	平均浓度	单位
2004	血清(人类) ^[40]	0.005 ~ 0.109	0.026	ngTEQ/g*
2004	母乳(人类) ^[40]	0.0004 ~ 0.01	0.005 5	ngTEQ/g*
2004	鸬鹚 ^[38]	0.421 ~ 5.696		ng/g*
2004	卵(禽类) ^[41]	0.011 ~ 0.182		ng/g*
2004	鱼类 ^[39]	0.002 ~ 0.018		ng/g**
2005	植物 ^[42]	0.14 ~ 1.64	0.67	ngTEQ/g***
1998—2004	江豚 ^[37]	0.006 ~ 1.563		ng/g*
2012	鱼类 ^[43]	8.865 ~ 24.964	12.397	pg/g***
2012	鱼类 ^[43]	0.49 ~ 1.442	0.771	pg/g***

①* 代表脂重; ** 代表湿重; *** 代表干重。

1995 和 2004 年对洞庭湖沉积物中 PCDD/Fs 污染情况的调查结果显示, 沉积物中的 PCDD/Fs 浓度在 10 年内下降明显, 这得益于对五氯酚钠农药的禁用, 生物降解和洪水稀释也有所贡献。崔婷婷^[44] 在 2016 年的调查中发现, 洞庭湖各表层水样品中 PCDD/Fs 的浓度均已低于检出限。尽管如此, 沉积物调查结果显示, 洞庭湖部分区域依然属于 PCDD/Fs 重度污染区, 生物放大效应让人们在食用当地鱼类等生物时依然面临健康风险。在 3 次调查中, 湘江入湖口及其主河道附近区域都显示出较高的污染水平, 如虞公庙、鹿角等地^[36, 45]。这些地区曾经是血吸虫病最严重的区域, 也是工业排放最集中的区域, 五氯酚钠农药的禁用和重污染工业的关停、搬迁在源头上大大减少了 PCDD/Fs 的排放, 但由于 PCDD/Fs 在环境中可以长期残留, 今后仍然需要通过生物修复、化学降解等方法对其进行处理以消除潜在生态风险。PCDD/Fs 在洞庭湖的赋存见表 6。

表 6 PCDD/Fs 在洞庭湖的赋存^①

年份	研究对象	浓度范围	平均浓度	单位
1995	沉积物 ^[46]	130 ~ 891	274	pgTEQ/g*
2004	水 ^[39]	36 ~ 345	191	pg/L
2004	沉积物 ^[36]	0.7 ~ 11	4.5	pgTEQ/g*
2004	沉积物 ^[45]	15.4 ~ 38.9		pgTEQ/g*
2016	水 ^[44]	未检出		
2016	沉积物 ^[44]	0.079 9 ~ 3.449		ng/g*

①* 代表干重。

2.3 多氯联苯与多溴联苯醚

具有稳定化学性质的多氯联苯 (PCBs) 和多溴联苯醚 (PBDEs) 是用途广泛的工业添加剂, PCBs 可用作润滑油和绝缘油, 而 PBDEs 则是常见的阻燃剂。PCBs 和 PBDEs 对人类的免疫系统、肝脏、生殖系统、神经系统有影响, 具有不可逆转的生物毒性。和其他持久性有机污染物一样, PCBs 和 PBDEs 稳定的化学性质使其难以被降解, 而脂溶性和持久性使其可以具备在食物链中累积的能力。

Yang 等^[37] 在 1998—2004 年间对洞庭湖的长江江豚进行了调查, 发现 PCBs 和 PBDEs 存在于江豚的肝脏、肾脏、消化道以及大脑中, 其中 PCBs 质量分数为 60 ~ 1 890 ng/g, 而 PBDEs 的质量分数为 5.32 ~ 72.76 ng/g; Wei 等^[34] 于 2014 年在东洞庭湖水和表层沉积物中分别检测到浓度为 1.13 ng/L

和 11.16 ng/g 的 PCBs, PBDEs 则为 0.66 ng/L 和 3.82 ng/g。和 PCDD/Fs 的情况类似, PCBs 污染水平随着时间的推移逐渐降低, 2018 年的研究结果显示, 沉积物中 PCBs 最高浓度已经下降了 1/4。PCBs 和 PBDEs 在东洞庭湖沉积物中浓度分布展现了不同的趋势, PCBs 在东洞庭湖北侧浓度较高, 而 PBDEs 则在湖泊东侧浓度较高^[34], PCBs 和 PBDEs 在洞庭湖的赋存见表 7 和表 8。

表 7 PCBs 在洞庭湖的赋存^①

年份	研究对象	浓度范围	平均浓度	单位
1998—2004	江豚 ^[37]	60 ~ 1 890		ng/g*
2012—07	鱼类 ^[43]	153.896 ~ 335.483	237.764	pg/g**
2012—11	鱼类 ^[43]	52.171 ~ 408.696	119.711	pg/g**
2014	水 ^[34]	0.5 ~ 2.84	1.13	ng/L
2014	沉积物 ^[34]	7.47 ~ 18.69	11.16	ng/g**
2015	鱼类 ^[47]	4.29 ~ 326		ng/g*
2016	水 ^[44]	0.077 ~ 10.321		ng/L
2016	沉积物 ^[44]	0.122 6 ~ 4.453 8		ng/g**

①*代表脂重;**代表干重。

表 8 PBDEs 在洞庭湖的赋存^①

年份	研究对象	浓度范围	平均浓度	单位
1998—2004	江豚 ^[37]	5.32 ~ 72.76		ng/g*
2012	鱼类 ^[43]	64.834 ~ 164.86	106.513	pg/g**
2012	鱼类 ^[43]	61.872 ~ 177.108	86.837	pg/g**
2014	水 ^[34]	0.06 ~ 2.03	0.66	ng/L
2014	沉积物 ^[34]	2.7 ~ 5.23	3.82	ng/g**

①*代表脂重;**代表干重。

从潜在生态风险评估结果来看, 2014 年东洞庭湖沉积物中的 PCBs 和 PBDEs 污染的生态风险均处于较低水平。然而, 这 2 种污染物的生物累积性让人们依然需要重视它们带来的威胁。葛芳芳等^[48]对洞庭湖 6 种鱼类组织中的 PCBs 进行检测, 发现鱼类体内的 PCBs 浓度在全球范围内属于较低水平, 符合欧盟标准。数据分析表明, 不同营养级的鱼类体内的 PCBs 来源一致, 且鲢鱼作为营养级最高的鱼类体内检测到最高比例的 PCBs, 从而证实了 PCBs 在洞庭湖环境中存在生物累积现象。PBDEs 在鱼类体内的污染情况则相对较轻, 黄志等^[43]对洞庭湖 13 种鱼类的调查中发现, 洞庭湖鱼类体内的 PBDEs 浓度与人口稀疏的青藏高原类似, 明显低于中国海滨城市的情况, 说明 PBDEs 污染在洞庭湖鱼类中的污染程度处于较低水平。

3 总结与展望

3.1 总结

通过对洞庭湖微塑料、OHCs 相关研究的回顾, 可以发现洞庭湖水、沉积物及生物体都不同程度地受到这 2 类污染物的影响。洞庭湖微塑料的污染水平在世界范围内属于中等水平, 上游输入、居民日常生活、农业生产、工业生产是微塑料的来源。横跨多个县市的洞庭湖, 各个区域情况迥异, 微塑料污染的防控措施需要根据具体情况来分别制定。洞庭湖多年来一直受到 OHCs 的威胁, 这些污染物大多随着时间推移, 污染水平降低, 其中 PCDD/Fs 在水中浓度已低于检出限, 多种污染物浓度较低, 生态风险也处于较低水平。即使如此, OHCs 的高毒性和持久性仍然值得人们持续关注。

3.2 展望

在过往的研究中, 人们对洞庭湖微塑料及 OHCs 污染的基本情况, 如检测方法、分布特征等有了初步的了解, 并以此为基础对污染的来源和污染水平进行了分析, 但目前针对这 2 类尚未被列入常规监测项目的污染物研究尚存在不足, 需要在未来得以改进。

(1) 河流与洞庭湖中污染物的分布及相互作用。洞庭湖港汊纵横, 洲滩密布, 江湖关系复杂。河流是洞庭湖中污染物的来源, 也是污染物迁移离开洞庭湖的通道, 针对各条河流不同地理特征、水文条件以及周边环境对洞庭湖造成的影响及它们之间的相互关系, 对洞庭湖微塑料及 OHCs 污染进行研究有着重要意义。

(2) 微塑料和 OHCs 的生物效应。目前这 2 类污染物的生物效应研究基本是针对部分指标性生物进行的实验室研究, 针对洞庭湖区生物相关研究还十分匮乏, 未来需要对从基因到个体多个水平上的生物效应及其机理展开研究。

(3) 微塑料和 OHCs 的监测。目前这 2 类污染物尚未被纳入常规监测项目之中, 仅有少量科学研究中得到了相关数据, 这为深入开展研究、制定相关防治措施带来了不便。在后续的探索中, 需要建立一套完整、科学、统一的标准来获得可靠的相关数据。

(4) 微塑料和 OHCs 的防治措施和处理技术。洞庭湖拥有广大的湖泊面积和复杂的地理条件, 湖区各个地点情况相差较大, 针对不同区域需要结合具体情况研究、选择合理的防治措施及处理技术,

研究学者、当地政府及民众需要共同努力开展相关工作。

(5)微塑料和OHCs的相互关系。两者的污染特征之间并无直接关系,然而这2类污染物可能来自类似的污染源,如现代化的农业活动;此外,这2类污染物在环境中可能存在吸附关系,它们共同作用下引发的毒性效应也值得关注,需要得到更加系统深入的研究。

[参考文献]

- [1] 李胜男,陈豪宇,彭华,等. 丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因子[J/OL]. 环境科学,2020: 1-12 [2020-01-13]. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.201912223>.
- [2] WANG L, DAI L, LI L, et al. Multivariable cokriging prediction and source analysis of potentially toxic elements (Cr, Cu, Cd, Pb, and Zn) in surface sediments from Dongting Lake, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 312-319.
- [3] MA H, PU S, LIU S, et al. Microplastics in aquatic environments: Toxicity to trigger ecological consequences [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114089.
- [4] XU S, MA J, JI R, et al. Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 703: 134699.
- [5] JIANG C, YIN L, LI Z, et al. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 91-98.
- [6] SUARIA G, PEROLD V, LEE J R, et al. Floating macro-and microplastics around the Southern Ocean: Results from the Antarctic circumnavigation expedition [J]. *Environment International*, 2020, 136: 105494.
- [7] YIN L, WEN X, DU C, et al. Comparison of the abundance of microplastics between rural and urban areas: A case study from east Dongting Lake [J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125486.
- [8] WANG W, YUAN W, CHEN Y, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 539-545.
- [9] JIANG C, YIN L, WEN X, et al. Microplastics in sediment and surface water of west Dongting Lake and south Dongting Lake: abundance, source and composition [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (10): 2164.
- [10] FISCHER E K, PAGLIALONGA L, CZECH E, et al. Microplastic pollution in lakes and lake shoreline sediments-A case study on Lake Bolsena and Lake Chiusi (central Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 213: 648-657.
- [11] MAO R, HU Y, ZHANG S, et al. Microplastics in the surface water of Wuliangshuai Lake, northern China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 723: 137820.
- [12] SU L, XUE Y, LI L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 711-719.
- [13] LIU F, OLESEN K B, BORREGAARD A R, et al. Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 671: 992-1000.
- [14] DI M, LIU X, WANG W, et al. Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, 65: 82-89.
- [15] LI L, GENG S, WU C, et al. Microplastics contamination in different trophic state lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River Basin [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 112951.
- [16] WANG W, NDUNGU A W, LI Z, et al. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 575: 1369-1374.
- [17] YIN L, JIANG C, WEN X, et al. Microplastic pollution in surface water of urban lakes in Changsha, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (9): 1650.
- [18] YUAN W, LIU X, WANG W, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170: 180-187.
- [19] FAURE F, CORBAZ M, BAECHE H, et al. Pollution due to plastics and microplastics in Lake Geneva and in the Mediterranean Sea [J]. *Archives des Sciences*, 2012, 65: 157-164.
- [20] FREE C M, JENSEN O P, MASON S A, et al. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 85 (1): 156-163.
- [21] XIONG X, ZHANG K, CHEN X, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake-Qinghai Lake [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 899-906.
- [22] WEN X, DU C, XU P, et al. Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: Abundance, composition, surface textures [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136: 414-423.
- [23] VAUGHAN R, TURNER S D, ROSE N L. Microplastics in the sediments of a UK urban lake [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229: 10-18.
- [24] EGESSA R, NANKABIRWA A, BASOOMA R, et al. Occurrence, distribution and size relationships of plastic debris along shores and sediment of northern Lake Victoria [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113442.
- [25] ZHANG K, SHI H, PENG J, et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 630: 1641-1653.

- [26] 王彤,胡献刚,周启星. 环境中微塑料的迁移分布、生物效应及分析方法的研究进展[J]. 科学通报,2018,63(4):385-395.
- [27] MASON S A, DAILY J, ALEID G, et al. High levels of pelagic plastic pollution within the surface waters of Lakes Erie and Ontario[J]. Journal of Great Lakes Research, 2020, 46(2):277-288.
- [28] OKEKE E S, OKOYE C O, ATAKPA E O, et al. Microplastics in agroecosystems-impacts on ecosystem functions and food chain[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 177:105961.
- [29] BENSON N U, AGBOOLA O D, FRED-AHMADU O H, et al. Micro(nano)plastics prevalence, food web interactions, and toxicity assessment in aquatic organisms: a review[J/OL]. Frontiers in Marine Science[2022-03-09]. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.851281>.
- [30] MIAO L, GAO Y, ADYEL T M, et al. Effects of biofilm colonization on the sinking of microplastics in three freshwater environments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413:125370.
- [31] PENG B, HOSSAIN K B, LIN Y, et al. Assessment and sources identification of microplastics, PAHs and OCPs in the Luoyuan Bay, China: Based on multi-statistical analysis[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 175:113351.
- [32] LO H S, WONG C Y, TAM N F, et al. Spatial distribution and source identification of hydrophobic organic compounds (HOCs) on sedimentary microplastic in Hong Kong[J]. Chemosphere, 2019, 219:418-426.
- [33] QIAN Y, ZHENG M, ZHANG B, et al. Determination and assessment of HCHs and DDTs residues in sediments from Lake Dongting, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 116(1-3):157-167.
- [34] WEI L, TADESSE A W, WANG J. Organohalogenated contaminants (OHCs) in surface sediments and water of east Dongting Lake and Hong Lake, China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, 76(2):157-170.
- [35] 杨海君,张海涛,刘亚宾,等. 洞庭湖沉积物中持久性有机有毒物质的分布、评价与源解析[J]. 中国环境科学,2017,37(4):1530-1539.
- [36] GAO L R, ZHENG M H, ZHANG B, et al. Declining polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans levels in the sediments from Dongting Lake in China[J]. Chemosphere, 2008, 73(1):176-179.
- [37] YANG F, ZHANG Q, XU Y, et al. Preliminary hazard assessment of polychlorinated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers, and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans to yangtze finless porpoise in Dongting Lake, China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(4):991.
- [38] GAO L, ZHENG M, ZHANG B, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in different tissues of the cormorants (*Phalacrocorax carbo*) from Dongting Lake, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10):1709-1713.
- [39] GAO L, ZHANG Q, ZHANG B, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in water and six fish species from Dongting Lake, China[J]. Chemosphere, 2014, 114:150-157.
- [40] SCHECTER A, JIANG K, PÄPKE O, et al. Comparison of dibenzodioxin levels in blood and milk in agricultural workers and others following pentachlorophenol exposure in China[J]. Chemosphere, 1994, 29(9-11):2371.
- [41] FANG L, ZHENG M, ZHANG B, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in eggs of eight avian species from Dongting Lake, China[J]. Chemosphere, 2007, 69(3):411-421.
- [42] FANG L, ZHENG M, XIAO K, et al. Tissue-dependent distribution and bioaccumulation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in vegetation samples collected from Dongting Lake, China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(1):49-56.
- [43] 黄志,尚晓红,李梓民,等. 洞庭湖鱼类中持久性有机污染物含量调查[J]. 中华预防医学杂志, 2019, 53(12):1236-1241.
- [44] 崔婷婷. 洞庭湖水和沉积物中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2018.
- [45] XIAO K, ZHENG M. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the sediment core from a schistosomiasis area with Na-PCP application in China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 90(2):160-164.
- [46] ZHENG M H, BAO Z C, WANG K O, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in lake sediments from Chinese schistosomiasis areas[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1997, 59(4):653-656.
- [47] GE F, WANG X, ZHANG K, et al. The correlation study between PCBs and $\delta^{15}N$ values or FAs in fish collected from Dongting Lake[J]. Chemosphere, 2019, 234:763-768.
- [48] 葛芳芳,付青,张可欣,等. 洞庭湖不同营养级鱼组织中 PCBs 的分布特征[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6):2652-2658.