万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京城区 $PM_{2.5}$ 各组分污染特征及来源分析

安欣欣，曹阳，王琴，富佳明，王陈婧，景宽，刘保献

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年5月
第43卷 第 5 期
Vol.43 No.5

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第5期
2022年5月15日

目 次

生态知库 Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第5期 2022年5月
Vol.43, No.5 May, 2022

鄱阳湖流域水葫芦(*Eichhornia crassipes*)对水体微塑料的吸附截留效应

李文刚[1], 吴希恩[1], 简敏菲[1,2*], 刘淑丽[1], 刘海球[1], 丁惠君[2]

(1. 江西师范大学生命科学学院江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 南昌 330022; 2. 江西省水利科学院江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 南昌 330029)

摘要: 微塑料是环境中的新型污染物,随着人们对微塑料污染的认识,微塑料在河流和湖泊等淡水湿地环境中的迁移问题受到普遍关注. 中国内陆最大淡水湖鄱阳湖湿地受五河流域及其地表径流的影响,湿地水环境中的微塑料污染问题也不容忽视. 为了解鄱阳湖各流域水体中微塑料的分布现状及水生植物对微塑料的吸附截留效应,选择鄱阳湖流域的赣江、信江、抚河、修水和饶河这五河水系入湖段为研究区,以各流域水体及其普遍存在的漂浮植物水葫芦(*Eichhornia crassipes*)为研究对象,分析鄱阳湖五河流域水葫芦对水体微塑料的吸附截留特征,探讨水生植物对水体环境中的微塑料是否具有吸附或截留效应,阐明水葫芦对微塑料的吸附与水体赋存微塑料的相关性,解析微塑料在湿地环境中的迁移特性,为鄱阳湖湿地环境中微塑料的管控及污染治理提供一定的理论基础与依据. 在鄱阳湖流域赣江、抚河、信江、饶河和修水的五河水系入湖区和湖口出湖区共设置 18 个采样点, 分别采集水表漂浮的水葫芦整株样品和水深约 1 m 处的水样, 采用 HNO_3(65%)-H_2O_2(30%)混合试剂消解水样后抽滤分离水体及水葫芦体表微塑料; 采用显微鉴定方法观察微塑料的颜色、粒径和形态等特征, 采用 Nano Measurer 1.2 软件统计各流域水体和水葫芦体表中分离出的微塑料丰度; 采用傅立叶变换红外 (FTIR) 光谱仪鉴定不同形态微塑料的聚合物成分. 鄱阳湖流域各水体微塑料丰度处于中度偏高水平,丰度范围为 65.5 ~ 353 $n\cdot L^{-1}$,且以 0 ~ 0.5 mm 范围内的小粒径微塑料为主,占各流域水体中微塑料的 80% 以上; 各流域水葫芦截留或吸附的微塑料丰度范围为 36 ~ 204 $n\cdot kg^{-1}$,且以 0 ~ 1.5 mm 范围内的小粒径微塑料为主,所占比例达 80% 以上; 水葫芦吸附 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的微塑料丰度含量与水体中 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的微塑料丰度间呈显著相关,水葫芦对水体中占比较高的小粒径微塑料具有明显的吸附效应. 鄱阳湖五河流域水体微塑料的聚合物成分以聚乙烯和聚苯乙烯为主体; 各流域水体微塑料的丰度处于较高水平,以 0 ~ 0.5 mm 的小粒径微塑料为主,对水体生物及水环境易构成生态风险. 各流域水葫芦对水体微塑料具有显著的吸附效应,且以吸附 0 ~ 1.5 mm 的小粒径微塑料为主; 水葫芦吸附 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的微塑料丰度值与水体中 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的微塑料丰度间存在显著相关性; 水葫芦对水体中的小粒径微塑料具有较强的吸附效应,可为水生植物吸附或截留水体环境中的微塑料提供一定的参考依据.

关键词: 鄱阳湖; 五河水系; 入湖口; 出湖区; 水葫芦; 微塑料

中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)05-2548-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202108069

Adsorption and Interception Effects of *Eichhornia crassipes* on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin

LI Wen-gang[1], WU Xi-en[1], JIAN Min-fei[1,2*], LIU Shu-li[1], LIU Hai-qiu[1], DING Hui-jun[2]

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Protection and Utilization of Subtropical Plant Resources, College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: Microplastics are novel pollutants in the environment, and with the awareness of microplastic pollution, the migration of microplastics in freshwater wetland environments such as rivers and lakes has received widespread attention. The wetland of Poyang Lake, the largest inland freshwater lake in China, is influenced by the five river basins and their surface runoff, and the microplastic pollution in the wetland water environment cannot be ignored. In order to understand the occurrence of microplastics in the water bodies of Poyang Lake and the adsorption and interception effects of aquatic plants on microplastics, five river basins of Poyang Lake, including the Ganjiang River, Xinjiang River, Fuhe River, Xiushui River, and Raohe River, were selected as the study area, and the water samples of each basin and the prevalent floating plant *Eichhornia crassipes* were used as the research objects to study the adsorption and interception characteristics of microplastics in the water of the Poyang Lake basin. The study investigated the adsorption and interception characteristics of *E. crassipes* on microplastics in water bodies, explored whether the aquatic plants had adsorption or interception effects on microplastics in the water bodies, clarified the correlation between the adsorption of microplastics by *E. crassipes* and microplastics in the water bodies, analyzed the migration characteristics of microplastics in the wetland environment, and provided a theoretical basis for the control and pollution management of microplastics in the wetland environment of the Poyang Lake basin. A total of 18 sampling points were set up in the main entry areas of the Ganjiang River, Fuhe River, Xinjiang River, Raohe River, and

收稿日期: 2021-08-08; **修订日期**: 2021-10-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(42007389); 江西省水利科学研究院江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室开放研究基金项目(2020GPSYS03)
作者简介: 李文刚(1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为鄱阳湖湿地生态学, E-mail: 864255586@qq.com
* 通信作者, E-mail: jianminfei0914@163.com

Xiushui River, and the exit of the lake into the Yangtze River confluence area in the Poyang Lake basin, and water samples were collected from the all the *E. crassipes* floating on the water surface and water at a depth of approximately 1 m. Microplastics were separated from water samples and the plant surface at the root zone of *E. crassipes* by filtration; after the water samples were disintegrated with an HNO_3(65%)-H_2O_2(30%) reagent mixture, the microscopic identification method was used. The microplastics were characterized by color, particle size, and morphology, and the abundance of microplastics in the water and *E. crassipes* root zone was calculated using Nano Measurer 1.2 software, and the polymer composition of different forms of microplastics was identified via Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. The abundance of microplastics in the water samples of the Poyang Lake basin was moderately high, ranging from 65.5 to 353 $n\cdot L^{-1}$, and the small-sized microplastics in the range of 0-0.5 mm mainly accounted for more than 80% of the microplastics in the water samples of the basin. The abundance of microplastics retained or adsorbed by *E. crassipes* in the basin ranged from 36 to 204 $n\cdot kg^{-1}$, and the small-sized microplastics in the range of 0-1.5 mm mainly accounted for more than 80% of the microplastics in the water bodies of the basin. The abundance of microplastics retained or adsorbed by *E. crassipes* in different watersheds ranged from 36 to 204 $n\cdot kg^{-1}$, and the proportion of small-sized microplastics in the range of 0-1.5 mm was more than 80%. The abundance of microplastics in the particle size range of 0-0.5 mm adsorbed by *E. crassipes* was significantly correlated with the abundance of microplastics in the particle size range of 0-0.5 mm in the water bodies. The effect of *E. crassipes* on microplastics in the water column was significant. The polymer composition of microplastics in the water samples of the five river basins of Poyang Lake included mainly polyethylene and polystyrene, the abundance of microplastics in the water samples of the Poyang Lake basin was at a high level, and the main microplastics were of small particle size in the range of 0-1.5 mm, which easily pose ecological risks to the water body organisms and water environment. The abundance of microplastics in the range of 0-0.5 mm particle size was significantly correlated with the abundance of microplastics in the range of 0-0.5 mm particle size in the water body. *Eichhornia crassipes* also had a strong adsorption effect on microplastics in the water body, which can be used by aquatic plants to adsorb or retain microplastics in the water body. The strong adsorption effect of *E. crassipes* on microplastics in the water column can provide a reference for the adsorption or retention of microplastics in the water column.

Key words: Poyang Lake; five river system; inlets of the rivers; outlet of the lake; *Eichhornia crassipes*; microplastics

塑料制品因其化学性质稳定且制作成本低廉，在日常生活中被广泛使用，但由于废旧塑料的回收利用率较低[1]，且在使用过程中因处理不当或回收利用不健全，大量塑料品被废弃后直接排放进入环境，经日晒风吹雨打或物理、化学、生物和水力冲击等作用后，逐渐转变为若干直径小于 5 mm 的塑料碎片或颗粒即为微塑料[2]. 微塑料与大中塑料碎片相比，因其更大的比表面积，对环境中各种污染物的吸附也更强[3].

微塑料的研究最早始于 20 世纪 70 年代[4,5]，但微塑料(microplastic)的概念直到 2004 年才首次提出[6]，人们全面关注微塑料是从海洋生态环境中的细小塑料颗粒开始的[7]. 目前，关于微塑料的研究主要集中于海洋环境中的微塑料污染[8,9]、土壤环境中微塑料的污染问题[10]和淡水环境中的微塑料污染等方面[11]. 其中，关于海洋环境中微塑料的研究相对较多，而内陆淡水环境中微塑料的污染研究尚处于起步阶段，淡水湿地中的河流与湖泊是连接陆地环境与海洋环境的桥梁，海洋环境中的大部分微塑料来源于内陆河流和湖泊等淡水环境[12]，现有的研究已发现微塑料污染已普遍存在于淡水水体及湿地生态系统中[13~15].

鄱阳湖是中国最大的淡水湖，位于长江中游末段南岸，上承赣江、抚河、修水、饶河和信江这“五河”之水，下接长江，经九江市湖口县城注入长江，是长江流域重要的组成部分[16]. 已有研究发现，鄱阳湖典型区域的微塑料丰度已显著高于国内外一些沿海区域[17~19]；其水体、沉积物和野生鱼类等生物体均出现了微塑料物质[20,21]，微塑料的广泛存在正在构成鄱阳湖区新的和潜在的生态危害.

水葫芦(*Eichhornia crassipes*)是一种多年水生植物，在中国本没有分布，自 20 世纪 30 年代左右作为一种饲料被引进国内[22]，现普遍分布于全国各地，在鄱阳湖五河流域也普遍存在[23]. 水葫芦具有发达的根系和根毛，繁殖速度极快，尤其在污染较严重的水域中生长繁殖更快，对水体重金属污染物及氮磷营养盐等物质均具有较强的吸附作用，目前关于水葫芦吸附重金属污染的研究较多[24,25]，但对于水葫芦吸附截留微塑料的研究尚较少. 本文选择鄱阳湖流域的赣江、信江、抚河、修水和饶河这五河水系入湖段为研究区，分析鄱阳湖五河流域水葫芦对水体微塑料的吸附截留特征，探讨水生植物对水体环境中的微塑料是否具有吸附或截留效应，阐明水葫芦对微塑料的吸附与水体赋存微塑料的相关性，对于解析微塑料在湿地环境中的迁移具有独特意义，以期为鄱阳湖湿地环境中微塑料的管控及污染治理提供一定的理论基础与依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖地处江西省北部，在北纬 28°22′～29°45′，东经 115°47′～116°45′，是中国最大的淡水湖，也是中国仅次于青海湖的第二大湖. 鄱阳湖承纳了来自赣江、信江、抚河、修水和饶河这五河水系的水流，是长江流域的重要组成和关键枢纽，整个流域面积占长江流域面积的 9%，年均入江水量约占长江径流量的 15.6%[26]，对长江水量的调蓄极其关键，并在降解污染物、调节整个长江流域的气候、保持水土和维系生态平衡等诸多方面具有非常重要的作用[27].

1.2 样品采集与处理

水葫芦样品采集. 相继于鄱阳湖丰水期(7 月中

下旬)选择赣江、抚河、信江、饶河和修水等五河水系入湖区和湖口出湖区分别设置采样点,如图 1. 分别为修水(S1、S2)、赣江西支(S3、S4)、赣江中支(S5、S6)、赣江南支(S7、S8)、抚河(S9、S10)、信江(S11、S12)、饶河(S13、S14、S15、S16)和湖口(S17、S18)共 18 个样点. 每个样点分别采集 9 株完整的水葫芦植株样品,随机分为 3 组,每组设置重复 3 个样品. 将完整的水葫芦全株样用锡箔包装纸妥善包裹好,置于 4℃冷藏箱中,运回实验室及时进行预处理.

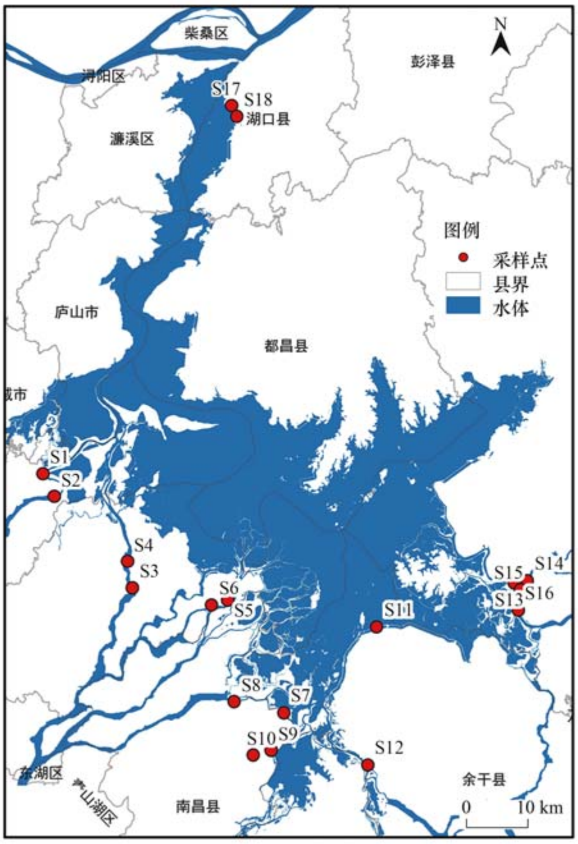


图 1 鄱阳湖研究区各流域采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in the study area of Poyang Lake basin

水样采集. 在采集水葫芦的每一点位、水深约 1 m 处,用预先清洁过的 10 L 不锈钢桶重复采集 3 次水样,全部通过网口直径为 30 cm 和孔径 30 μm 的生物网现场进行预过滤(特别小孔径的网眼可捕捉微小粒径微塑料),过滤后生物网内的所有内容物全部清洗到一个干净的玻璃瓶中,并立即加入 2.5% 的福尔马林溶液进行固定,运回实验室及时进行分离和鉴定[19].

1.3 水体微塑料分离

将采回的每个水样中加入 HNO_3(65%)和 H_2O_2(30%)混合试剂进行消解处理,混合试剂中的 HNO_3(65%)和 H_2O_2(30%)体积比为 1∶3; 静置 72 h 之后取消解液的上清液,采用真空抽滤装置(GM-0.33A)对消解液进行抽滤,选用 Φ47 mm × 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜进行抽滤[28,29],用镊子小心取出抽滤好的滤膜置于玻璃皿中,对玻璃皿分组编号,同组滤膜同步置于烘箱中烘干后小心叠放于玻璃皿中,保持玻璃皿干燥,滤膜后续进行微塑料鉴定分析.

1.4 水葫芦微塑料分离

将所有采集的水葫芦样品按组别风干水样后,每组取大小相近的 3 株样,分别称取鲜重后,用超纯水对其植株体及根部进行反复多次的清洗,保留所有的清洗液,各样品清洗液分别采用水体微塑料的分离方式进行处理,滤膜后续进行微塑料鉴定分析.

1.5 微塑料的显微鉴定与计数

用镊子逐一取出各玻璃皿中的全部滤膜样品,置于金相显微镜 NK-900(上海精密仪器公司)下进行观察,对滤膜上的微塑料进行识别鉴定,采用 Nano Measurer 1.2 软件进行计数[30],微塑料的粒径取微塑料最长一边的长度进行测量,检测出来的微塑料粒径长度均小于 5 mm,并记录好所有的观测数据.

1.6 微塑料的红外光谱分析

采用傅立叶变换红外光谱仪[Nicolet 6700,美国热电(尼高利)公司]测定各样品的红外光谱图,借助微塑料中含有的不同官能团在特定波长下具有的吸收峰来确定微塑料的具体类别,通过比对拟合聚合物的红外光谱图确定微塑料的聚合物成分.

1.7 实验过程质量保证与质量控制

为防止实验过程造成的纤维等微塑料产生干扰,本实验过程中使用的实验器皿和工具均为非塑料材料,每次使用前用蒸馏水冲洗 3 次,使用前烘干. 本实验过程中穿纯棉实验服,戴好丁腈材质手套,与此同时把门窗关闭,尽可能地减少空气流动,严格控制实验过程中带来的潜在微塑料污染. 实验溶液均采用 Φ47 mm × 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤,每实验设置 3 个空白样,以排除实验过程中来自空气中的微塑料污染.

1.8 数据处理与统计分析

采用软件 OriginPro 2018(美国 OriginLab 公司)和软件 SPSS 22.0 对实验数据进行分析处理,统计分析不同取样点水体微塑料丰度与水葫芦吸附或截留微塑料的丰度值,分析每样点的各组同一指标(P = 0.05)的显著性差异. 水体微塑料丰度采用 $n \cdot L^{-1}$(即每 L 水样中含有的微塑料个数)为计量,水葫芦吸附或截留微塑料的丰度采用 $n \cdot kg^{-1}$(即每 kg 底泥中含有的微塑料个数)为计量单位.

2　结果与分析

2.1　微塑料的聚合物成分

红外光谱解析主要分两个波段：分别为 7.5 ~ 15 μm(1 333 ~ 667 cm^{-1})指纹区和 2.5 ~ 7.5 μm (4 000 ~ 1 333 cm^{-1})特征谱带区，又称官能团区，各类官能团的特征吸收峰会出现在该区域. 如果待测化合物在某些官能团应出峰的位置无吸收，则说明该化合物不含此官能团. 选取样品中分离出的不同类型微塑料，采用红外光谱分析其主要成分，结果如图 2. 图 2(a)为硬质塑料碎片类微塑料的红外图谱，显示其聚合物成分为聚乙烯；图 2(b)为微球类微塑料，通过光谱分析，其成分为聚苯乙烯；图 2(c)为微塑料透明薄膜，其成分为聚乙烯；图 2(d)为典型纤维类微塑料红外图谱，成分为聚苯乙烯.

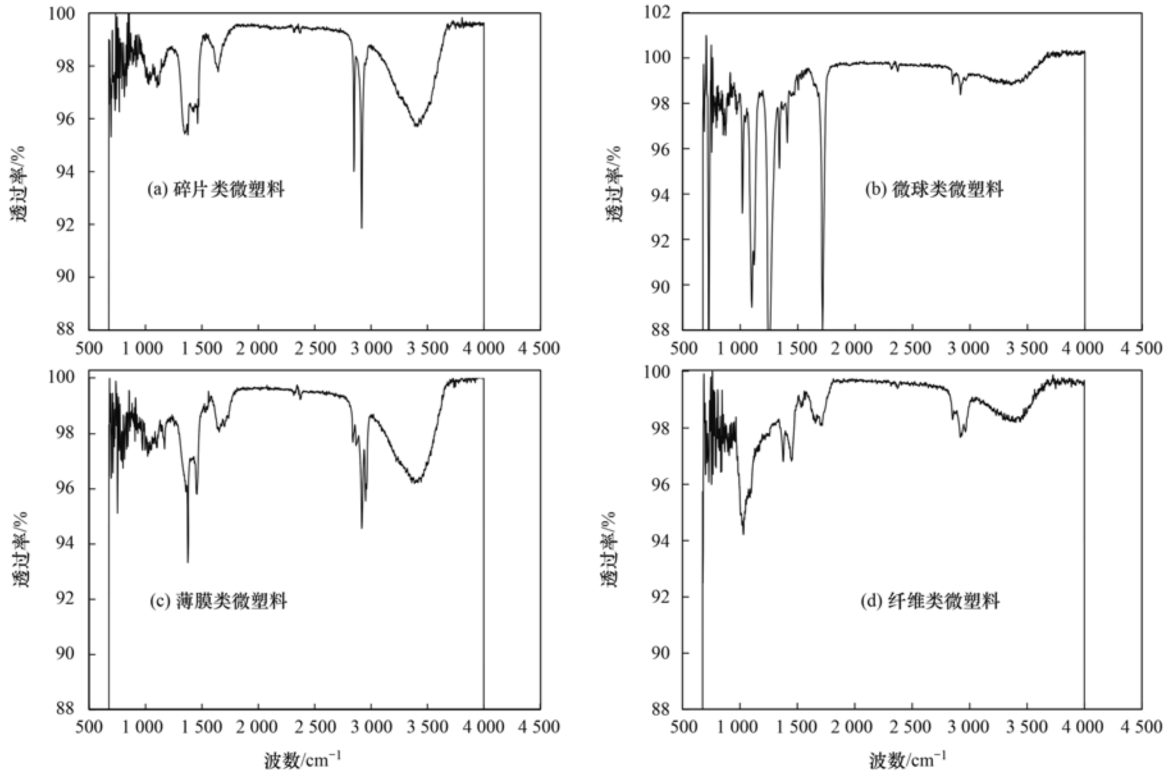


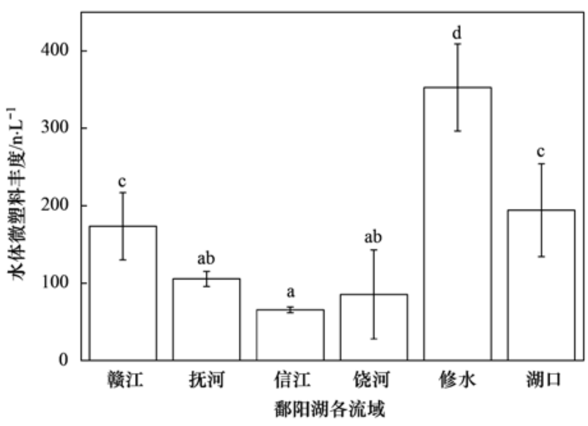
图 2　研究区主要类型微塑料红外光谱鉴定

Fig. 2　Infrared spectra of the main types of microplastics in the study area

2.2　鄱阳湖五河流域水体微塑料的分布特征

2.2.1　各流域水体微塑料丰度差异

鄱阳湖五河水系及长江段出湖区各样点水体微塑料的丰度统计结果如图 3 所示. 不同区域水体中微塑料的丰度大小表现为：353 $n \cdot L^{-1}$(修水) > 194 $n \cdot L^{-1}$(湖口) > 173 $n \cdot L^{-1}$(赣江) > 105 $n \cdot L^{-1}$(抚河) > 85 $n \cdot L^{-1}$(饶河) > 65.5 $n \cdot L^{-1}$(信江)，不同区域丰度值表现出一定的显著性差异($P < 0.05$).



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 3　鄱阳湖各流域不同水体微塑料的丰度

Fig. 3　Abundance of microplastics in different waters of Poyang Lake basin

2.2.2　各流域水体微塑料颜色分布特征

鄱阳湖研究区各流域不同水体中不同颜色微塑料的组成特征如图 4. 各流域水体不同颜色微塑料的占比存在一定差异，但多以红色微塑料为主，占比均高出 40%，显著高于其他各色，抚河与修水流域的红色微塑料占比高达 70%.

2.2.3　各流域水体微塑料粒径分布特征

将鄱阳湖各流域水体中的微塑料按其粒径大小划分为 0 ~ 0.1、0.1 ~ 0.3、0.3 ~ 0.5、0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 2.0 和 2.0 ~ 5.0 mm 这 6 个等级，分别统计分析各水体不同粒径微塑料的占比，结果如图 5 所示. 在赣江、抚河和修水等流域 0 ~ 0.1 mm 的小粒径微

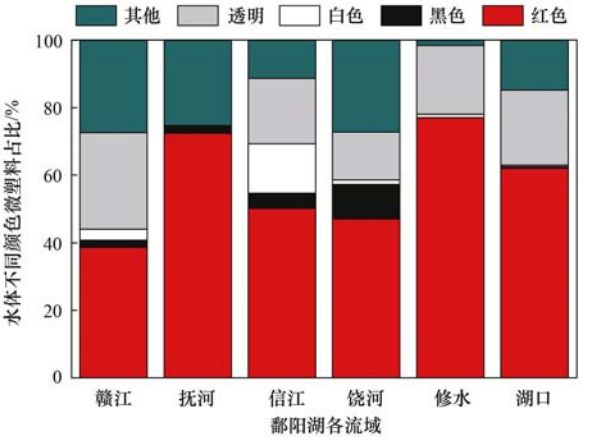


图 4 鄱阳湖各流域水体中不同颜色微塑料的占比

Fig. 4 Proportion of microplastics with different colors in different waters of Poyang Lake basin

塑料占比较高,均超出 50%,信江和湖口区域 0 ~ 0.1 mm 的小粒径微塑料占比偏低,约为 20% ~ 30%,而饶河区域的小粒径微塑料占比不足 10%;总体上,全部流域 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的全部微塑料占比均超出 80%;多数流域 0.5 ~ 5 mm 粒径范围的微塑料占比总和不足 20%.

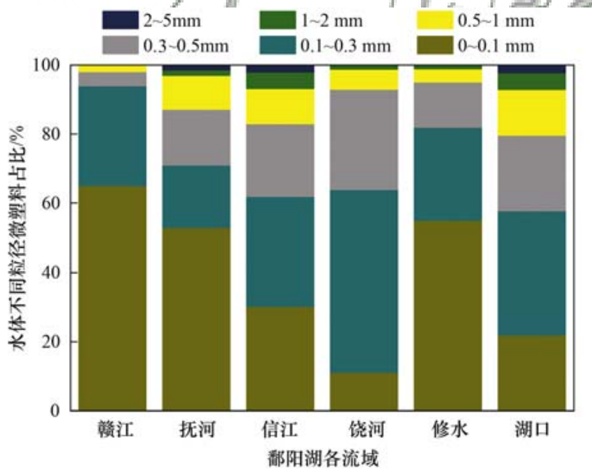


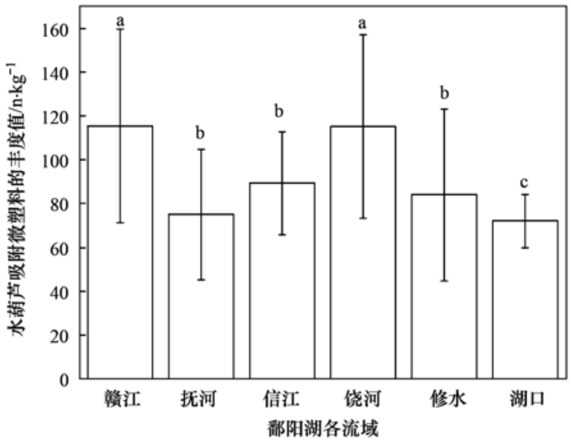
图 5 鄱阳湖各流域水体中不同粒径微塑料的占比

Fig. 5 Proportion of microplastics with different particle sizes in different waters of Poyang Lake basin

2.3 鄱阳湖五河流域水葫芦吸附微塑料的特征

2.3.1 五河流域水葫芦吸附微塑料的丰度差异

鄱阳湖五河水系赣江、抚河、信江、饶河、修水和湖口这 6 个区域采集的水葫芦均分离检测到微塑料,如图 6 所示.各流域水葫芦主要以其根系或植株体表吸附或截留的微塑料为主,微塑料的丰度范围约为 36 ~ 204 $n\cdot kg^{-1}$,五河流域水葫芦吸附的微塑料丰度最高值出现在赣江和饶河区域,丰度低值出现在湖口汇入长江段区域.鄱阳湖和五河入湖段水葫芦吸附微塑料的丰度具有一定显著差异性($P < 0.05$),赣江和饶河入湖段水葫芦吸附的微塑料丰度较一致,均显著高于其它区域;而抚河、信江和修水这 3 个入湖段水葫芦吸收的微塑料较一致,均显著高于湖口汇入长江段出湖区域.



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 6 鄱阳湖流域水葫芦吸附微塑料的丰度

Fig. 6 The abundance of microplastics adsorbed by *Eichhornia crassipes* in Poyang Lake basin

2.3.2 五河流域水葫芦吸附不同形态微塑料的差异性

根据微塑料的形状差异将微塑料按不同形态划分为不同类型,主要有:纤维状、薄膜状、碎片状和泡沫状[31].而不同形态的微塑料聚合物成分存在一定差异,本研究薄膜状和碎片状微塑料主要成分为聚乙烯,纤维状和泡沫状微塑料主要成分为聚苯乙烯.结果显示(图 7),水葫芦吸附纤维类和薄膜类微塑料的占比最高,而碎片类和泡沫类微塑料占比较低,尤其是泡沫类微塑料在各流域所占比例均较小,而在修水河段采集的水葫芦中未分离检测到泡沫类微塑料;其他 3 种类型的微塑料在各流域分布的水葫芦中均被检测到.赣江与饶河两河流域入湖段分布的水葫芦吸附或截留的微塑料类型及其占比含量均较接近;抚河流域及湖口段出湖区两地区微塑料

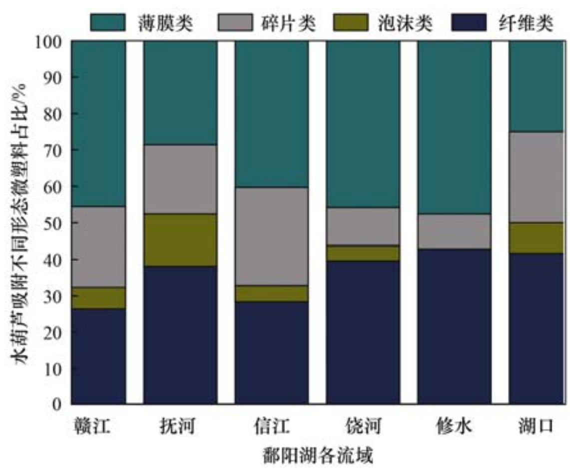


图 7 鄱阳湖流域水葫芦吸附不同形态微塑料的占比

Fig. 7 Proportion of different microplastics adsorbed by *Eichhornia crassipes* in Poyang Lake basin

的分布也较类似. 信江和修水两河流域的微塑料类型及其占比与其他区域相比差异较大,信江流域的水葫芦吸附或截留的微塑料类型以纤维、薄膜和碎片这 3 种类型为主,且三者所占比例均较接近,修水流域的水葫芦吸附的微塑料主要以薄膜类及纤维类为主,碎片类微塑料占比较小,与其他区域的差异较显著.

2.3.3　五河流域水葫芦对不同颜色微塑料的吸附

从水葫芦及其根系体表分离检测到的不同颜色微塑料主要有蓝色、黑色、红色、绿色和透明色等,其它含量极少的各色统称为其他色,如图 8. 五河流域入湖段水葫芦体表对各类颜色的微塑料均有吸附,且多以透明色为主,各流域不同彩色微塑料占比呈现不一致,但多数流域以蓝色及红色微塑料占比较高,少数流域如抚河以黑色占比偏高. 湖口—长江段出湖区水葫芦所吸附的微塑料颜色以蓝色为主,占比超出一半,其次是透明色,红色与黑色微塑料有一定占比,绿色及其它色未观测到.

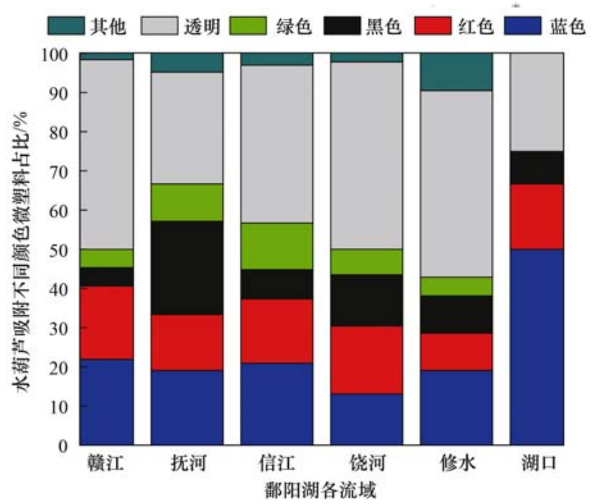


图 8　**鄱阳湖流域水葫芦吸附不同颜色微塑料的占比**

Fig. 8　Proportion of microplastics with different color adsorbed by *Eichhornia crassipes* in Poyang Lake basin

2.3.4　五河流域水葫芦吸附不同粒径微塑料的特性

对各流域采集的水葫芦体表吸附的微塑料进行分离提取,根据其粒径大小归为以下 4 类,分别为 0 ~0.5、0.5 ~1.5、1.5 ~3.5 和 3.5 ~5 mm,鄱阳湖各流域水葫芦吸附的不同粒径范围微塑料占比如图 9.

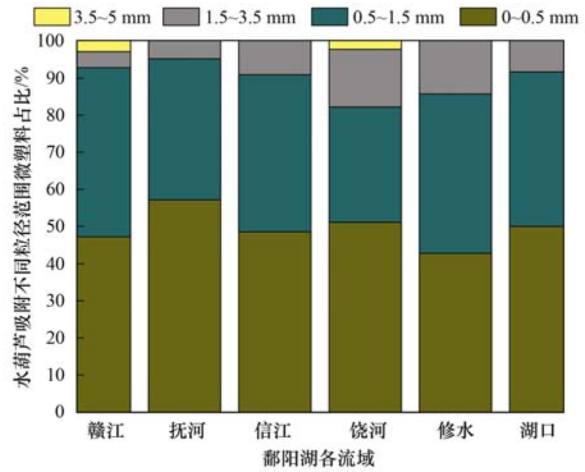


图 9　**鄱阳湖流域水葫芦吸附不同粒径微塑料的占比**

Fig. 9　Proportion of microplastics with different particle sizes adsorbed by *Eichhornia crassipes* in Poyang Lake basin

总体结果显示,五河水系各流域水葫芦所吸附或截留的各粒径微塑料占比相一致,均以 0 ~0.5 mm 或 0.5 ~1.5 mm 的小粒径微塑料占比较高,粒径范围为 3.5 ~5 mm 的微塑料仅在赣江和饶河流域的水葫芦体表分离检测出. 各流域水葫芦所吸附或截留的微塑料各粒径范围的占比均表现为:0 ~0.5 mm > 0.5 ~1.5 mm > 1.5 ~3.5 mm > 3.5 ~5 mm,各流域粒径大小为 0 ~0.5 mm 和 0.5 ~1.5 mm 的微塑料占比较一致,各自占比均达到 30% ~40%,且两者的占比之和超出 80%.

2.4　鄱阳湖流域水葫芦吸附微塑料与水体微塑料的相关性

用 SPSS 对水体中微塑料数据和水葫芦吸附的微塑料从形态、粒径和颜色各方面进行相关性分析,根据鄱阳湖流域水体中赋存的微塑料多以小粒径、轻质碎片类微塑料为主体的特性[19],分别筛选水体微塑料丰度、水葫芦吸附微塑料、水体中 0 ~0.5 mm 微塑料占比、水葫芦吸附 0 ~0.5 mm 微塑料和水体中碎片微塑料等特征指标,数据如表 1 所示. 结果显示,水体中微塑料丰度和水体 0 ~0.5 mm 微塑料丰度、碎片类微塑料均呈极显著相关,表明水体微塑料以 0 ~0.5 mm 碎片类微塑料为主体; 水

表 1　**水体微塑料与水葫芦吸附微塑料间的相关性**1)

Table 1　Correlation between water microplastics and microplastics adsorbed by *Eichhornia crassipes* in Poyang Lake basin

		水体微塑料丰度	水葫芦吸附微塑料	水体中 0 ~0.5 mm 微塑料	水葫芦吸附 0 ~0.5 mm 微塑料	水体中碎片微塑料
水葫芦吸附微塑料	显著性(双侧)	-0.216				
水体中 0 ~0.5 mm 微塑料	显著性(双侧)	0.782 **	-0.207			
水葫芦吸附 0 ~0.5 mm 微塑料	显著性(双侧)	-0.257	0.711 **	0.478 *		
水体中碎片类微塑料	显著性(双侧)	0.761 **	-0.246	0.950 **	-0.088	
水葫芦吸附碎片微塑料	显著性(双侧)	-0.310	0.483 *	-0.278	0.405 *	-0.256

1) * 表示显著性相关($P<0.05$), ** 表示极显著性相关($P<0.01$)

葫芦吸附 0 ~ 0.5 mm 的微塑料和水体中的 0 ~ 0.5 mm 小粒径微塑料丰度间存在显著相关性；水葫芦吸附碎片类微塑料与其吸附 0 ~ 0.5 mm 粒径微塑料丰度显著相关；水葫芦吸附的微塑料与其吸附的粒径 0 ~ 0.5 mm 微塑料呈极显著性相关,并与其吸附的碎片微塑料呈显著性相关；水体 0 ~ 0.5 mm 微塑料丰度与水体中碎片类微塑料呈极显著相关.

3 讨论

3.1 鄱阳湖五河流域水体微塑料的赋存特征及其成因

本研究调查发现鄱阳湖水体流域微塑料已具有较高的丰度.有研究指出农业生产和人类活动是河流塑料废弃物的主要来源,微塑料的暴露丰度与当地经济发展现状密切相关.鄱阳湖五河流域各水体中的微塑料丰度达 65.5 ~ 353 $n\cdot L^{-1}$,与发达国家及国内的淡水系统相比,均处于较高水平.如 Watkins 等[32]的研究发现美国纽约伊萨卡的 6 个水库微塑料含量在 700 ~ 2 500 $n\cdot m^{-3}$之间；Park 等[33]对韩国汉江的调查显示微塑料含量在 0 ~ 42.9 $n\cdot m^{-3}$之间.国内如乌梁素海表层水体中微塑料丰度介于 1.76 ~ 10.03 $n\cdot L^{-1}$之间[34]；滇池近岸水体微塑料丰度在 800 ~ 6 000 $n\cdot m^{-3}$ 之间,平均值为 2 867 $n\cdot m^{-3}$[35].微塑料在水环境中的分布受许多因素的影响,如气象、水文、周边环境乃至生活污水排放等,它们均可能是导致鄱阳湖及其入湖支流微塑料丰度分布差异性的原因.

本研究从各流域水体中分离出的微塑料颜色种类多样化,不同流域水体微塑料颜色占比存在显著性差异,但多以红色居多,占比显著高于其他各色,多数流域水体红色微塑料超出一半以上,主要原因是鄱阳湖各流域主要受农业、渔业及人类其他活动的不同影响,微塑料来源极其广泛,彩色尤其是红色塑料用品因其代表吉祥喜庆,在广大乡村备受居民青睐,但大多塑料用品使用后因回收利用不当而进入环境成为废旧塑料与微塑料的主要来源.

各流域水体样品中分离出的微塑料粒径范围主要分布在 0 ~ 0.5 mm 之间,且随着粒径的增大其丰度逐渐减小.Di 等[36]也在研究中指出粒径不足 500 μm 的微塑料往往在水环境中最为丰富.类似的还有,越南西贡河水体微塑料以粒径小于 250 μm 为主,很少有粒径超过 1 000 μm 的微塑料颗粒[37]；珠江广州段及其河口水体中超过 80% 的微塑料粒径小于 500 μm[38]；黄海和渤海海水中大部分微塑料粒径在 50 ~ 500 μm 之间[39],本研究与上述研究结果相符.小于 1 mm 的微塑料可能更容易被生物摄入,对生物的威胁也可能更大,并对生物体具有广泛的影响,未来研究需要进一步关注小粒径微塑料.

3.2 水葫芦对微塑料的吸附效应及主要影响因素

从各区域水葫芦中提取出的所有微塑料类型中,纤维类微塑料和薄膜类微塑料占比最多.有研究表明,一件衣服洗涤一次排出的纤维可达到 1 900 个之多[40],纤维被广泛用于衣物面料的制造,在某些城市的生活污水中的微塑料检测中,纤维类微塑料含量也很高[41].本研究鄱阳湖各流域水葫芦所吸附的纤维类微塑料,与鄱阳湖流域及其五河水系受纳的生活污水有密切关联.薄膜类微塑料主要与农用薄膜、各种玩具以及各种各样商品包装袋有密切关系；泡沫塑料的来源与渔业活动密切相关,泡沫体微塑料因其质轻、绝热性能好和吸音效果好等特性,在日常生活中也被广泛应用,废弃后难以回收而更易进入水土环境中；而渔业活动使用的泡沫浮子也多由泡沫塑料制成[42],近年来,随着鄱阳湖及其流域 10 年禁渔期的实施,泡沫类微塑料问题有望呈减少趋势.各种碎片类微塑料的来源相对较广泛,主要来源于生活中各种硬塑料例如塑料水瓶的老化与破碎,经过雨水冲刷和地表径流进入各水体后,随水流汇集到河流和湖泊中.

各流域水葫芦吸附或截留的微塑料中颜色丰富多彩,蓝色、红色、绿色、黑色和透明色等各色均占有一定比例,其中,以透明色和蓝色占比较高.水葫芦吸附透明色微塑料占比高的流域,其薄膜类微塑料占比也较高,表明不同流域水葫芦吸附或截留的透明色微塑料主要与薄膜类有关.除修水地区外,水葫芦吸附蓝色微塑料含量较高的流域其纤维类微塑料的含量也比较高,蓝色微塑料主要与纤维类微塑料中的尼龙纤维及化工纺织纤维具有一定的关联性.不同颜色微塑料与不同类型微塑料之间存在的关联性,有待未来更进一步研究.

各流域水葫芦所吸附或截留的微塑料多以 0 ~ 1.5 mm 的小粒径微塑料为主,表明水葫芦根系对于水体中的小粒径微塑料具有较好的吸附效应.主要原因有两方面,一是由于小粒径微塑料易漂浮于水体中,而大粒径微塑料因重力作用易沉降于沉积物中；二是由于水葫芦的须根系极其发达密集,长达 30 cm 左右,形成密集的网状结构,对水体中各种悬浮物质具有较好的过滤截留与吸附效能,对于水体中悬浮的微塑料也具有较好的吸附效应.

3.3 水体微塑料与水葫芦吸附微塑料的相关性

各流域水体微塑料的分布特性与水葫芦吸附微塑料的相关性表明,水葫芦吸附 0 ~ 0.5 mm 微塑料的丰度含量与水体中 0 ~ 0.5 mm 的微塑料丰度间存

在显著相关性,主要原因一方面是水体中微塑料以粒径小于0.5 mm 的微塑料为主,占比达 80% 以上,另一方面是水葫芦具有发达密集的须根系,漂浮在水体表面并受水力作用而随处漂移,并有效吸附或截留水体表面漂浮的小粒径微塑料. 另外,各流域的水文条件和自然地理环境条件均存在一定差异,也可能会导致各流域水葫芦吸附微塑料的效应有所不同.

各流域入湖段水葫芦中微塑料的丰度产生的差异性与多重因素有关,与水体环境中的微塑料类型及水葫芦的吸附特性均有一定关联性,其主要原因值得进一步深入研究与探讨.

4　结论

(1) 鄱阳湖五河流域水体微塑料聚合物成分以聚乙烯和聚苯乙烯为主体; 各流域水体微塑料的丰度值达 65.5 ~ 353 $n \cdot L^{-1}$,处于较高水平,且多以 0 ~ 0.5mm 的小粒径微塑料为主,均占各流域水体微塑料总量 80% 以上,小粒径微塑料极易被水生生物摄入而构成更大威胁.

(2) 各流域水葫芦对水体微塑料均具有一定的吸附效应,且吸附微塑料的丰度值达 36 ~ 204 $n \cdot kg^{-1}$. 水葫芦对微塑料的吸附特性表现为以吸附小粒径的微塑料为主,粒径范围介于 0 ~ 1.5 mm 的微塑料占比达 80%.

(3) 水葫芦吸附 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的微塑料丰度值与水体中 0 ~ 0.5 mm 粒径范围内的微塑料丰度间存在显著相关性; 水葫芦对水体中占比较高的小粒径微塑料具有较强的吸附效应,可为水生植物吸附或截留水体环境中的微塑料提供一定参考.

参考文献:

[1] 李娜, 周辉, 符文昌, 等. 鄱阳湖典型岸滩垃圾带的组成和来源分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2019, **43**(3): 314-319.
Li N, Zhou H, Fu W C, *et al*. The analysis on composition and source of typical coastal litter belt in Poyang Lake[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science), 2019, **43**(3): 314-319.

[2] 朱莹, 曹淼, 罗景阳, 等. 微塑料的环境影响行为及其在我国的分布状况[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(9): 1437-1447.
Zhu Y, Cao M, Luo J Y, *et al*. Distribution and potential risks of microplastics in China: a review [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(9): 1437-1447.

[3] 王璇, 牛司平, 宋小龙, 等. 城市湖泊沉积物微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3240-3248.
Wang X, Niu S P, Song X L, *et al*. Characterization of microplastic pollution of sediments from urban lakes [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3240-3248.

[4] Carpenter E J, Anderson S J, Harvey G R, *et al*. Polystyrene spherules in coastal waters[J]. Science, 1972, **178**(4062): 749-750.

[5] Wong C S, Green D R, Cretney W J. Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean[J]. Nature, 1974, **247**(5435): 30-32.

[6] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al*. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, **304**(5672): 838.

[7] 张子琪, 高淑红, 康园园, 等. 中国水环境微塑料污染现状及其潜在生态风险[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(10): 3574-3581.
Zhang Z Q, Gao S H, Kang Y Y, *et al*. Current status of microplastics contamination in China's water environment and its potential ecological risks[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(10): 3574-3581.

[8] Cole M, Lindeque P, Halsband C, *et al*. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(12): 2588-2597.

[9] do Sul J A I, Costa M F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment [J]. Environmental Pollution, 2014, **185**: 352-364.

[10] He D F, Luo Y M, Lu S B, *et al*. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2018, **109**: 163-172.

[11] 丁剑楠, 张闪闪, 邹华, 等. 淡水环境中微塑料的赋存、来源和生态毒理效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(9): 1619-1626.
Ding J N, Zhang S S, Zou H, *et al*. Occurrence, source and ecotoxicological effect of microplastics in freshwater environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(9): 1619-1626.

[12] 黄福义, 杨凯, 张子兴, 等. 微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2234-2239.
Huang F Y, Yang K, Zhang Z X, *et al*. Effects of microplastics on antibiotic resistance genes in estuarine sediments [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2234-2239.

[13] Eerkes-Medrano D, Thompson R C, Aldridge D C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs[J]. Water Research, 2015, **75**: 63-82.

[14] 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.

[15] Klein S, Worch E, Knepper T P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-main area in Germany [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(10): 6070-6076.

[16] 金斌松, 聂明, 李琴, 等. 鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(3): 268-275.
Jin B S, Nie M, Li Q, *et al*. Basic characteristics, challenges and key scientific questions of the Poyang Lake Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(3): 268-275.

[17] 简敏菲, 周隆胤, 余厚平, 等. 鄱阳湖-饶河入湖段湿地底泥中微塑料的分离及其表面形貌特征[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 579-586.
Jian M F, Zhou L Y, Yu H P, *et al*. Separation and microscopic study of microplastics from the sediments of the wetland in the estuary of Raohe River of Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 579-586.

[18] 周隆胤, 简敏菲, 余厚平, 等. 乐安河—鄱阳湖段底泥微塑

料的分布特征及其来源[J]. 土壤学报, 2018, **55**(5): 1222-1232.
Zhou L Y, Jian M F, Yu H P, *et al*. Distribution of microplastics and its source in the sediments of the Le'an River in Poyang Lake[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(5): 1222-1232.

[19] Jian M F, Zhang Y, Yang W J, *et al*. Occurrence and distribution of microplastics in China's largest freshwater lake system[J]. Chemosphere, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128186.

[20] Yuan W K, Liu X N, Wang W F, *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.

[21] 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 等. 鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 242-252.
Li W H, Jian M F, Liu S L, *et al*. Occurrence relationship between microplastics and heavy metals pollutants in the estuarine sediments of Poyang Lake and the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 242-252.

[22] 王亚民, 曹文宣. 中国水生外来入侵物种对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 7-13.
Wang Y M, Cao W X. The strategies of aquatic invasive alien species (IAS) in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, **25**(1): 7-13.

[23] 张广帅, 于秀波, 刘宇, 等. 鄱阳湖碟形湖泊植物分解和水位变化对水体碳、氮浓度的叠加效应[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 668-679.
Zhang G S, Yu X B, Liu Y. *et al*. Accumulation effect of litter decomposition and water level on carbon and nitrogen in shallow lake water of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(3): 668-679.

[24] 王洪, 李志鹏, 王超洋, 等. 水葫芦重金属吸附性能再利用研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(7): 33-35, 121.
Wang H, Li Z P, Wang C Y, *et al*. Heavy metal adsorption properties of *Eichhornia crassipes*[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(7): 33-35, 121.

[25] Liu C W, Ye J, Lin Y, *et al*. Removal of Cadmium (Ⅱ) using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biochar alginate beads in aqueous solutions[J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114785.

[26] 孙鹏, 张强, 陈晓宏, 等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J]. 地理学报, 2010, **65**(7): 828-840.
Sun P, Zhang Q, Chen X H, *et al*. Spatio-temporal patterns of sediment and runoff changes in the Poyang Lake Basin and underlying causes[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, **65**(7): 828-840.

[27] 方春明, 曹文洪, 毛继新, 等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响[J]. 水利学报, 2012, **43**(2): 175-181.
Fang C M, Cao W H, Mao J X, *et al*. Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Georges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(2): 175-181.

[28] 李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3212-3221.
Li Z, Gao C M, Yang J L, *et al*. Distribution characteristics of microplastics in surface water and sediments of Haizhou Bay, Lianyungang[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3212-3221.

[29] 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 等. 长江口潮滩表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2067-2074.
Zhu X T, Yi J, Qiang L Y, *et al*. Distribution and settlement of microplastics in the surface sediment of Yangtze Estuary[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2067-2074.

[30] 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 等. 鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2639-2646.
Liu S L, Jian M F, Zhou L Y, *et al*. Pollution characteristics of microplastics in migratory bird habitats located within Poyang Lake Wetlands[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2639-2646.

[31] Zhao S Y, Danley M, Ward J E, *et al*. An approach for extraction, characterization and quantitation of microplastic in natural marine snow using Raman microscopy[J]. Analytical Methods, 2017, **9**(9): 1470-1478.

[32] Watkins L, McGrattan S, Sullivan P J, *et al*. The effect of dams on river transport of microplastic pollution[J]. Science of the Total Environment, 2019, **664**: 834-840.

[33] Park T J, Lee S H, Lee M S, *et al*. Occurrence of microplastics in the Han River and riverine fish in South Korea[J]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134535.

[34] Wang Z C, Qin Y M, Li W P, *et al*. Microplastic contamination in freshwater: first observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China[J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, **17**(4): 1821-1830.

[35] 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 等. 滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3166-3175.
Yuan H Y, Hou L, Liang Q B, *et al*. Correlation between microplastics pollution and eutrophication in the near shore waters of Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3166-3175.

[36] Di M X, Liu X N, Wang W F, *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.

[37] Lahens L, Strady E, Kieu-Le T C, *et al*. Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity[J]. Environmental Pollution, 2018, **236**: 661-671.

[38] Yan M T, Nie H Y, Xu K H, *et al*. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China[J]. Chemosphere, 2019, **217**: 879-886.

[39] Zhao J M, Ran W, Teng J, *et al*. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **640-641**: 637-645.

[40] Browne M A, Crump P, Niven S J, *et al*. Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(21): 9175-9179.

[41] Yang L B, Li K X, Cui S, *et al*. Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant[J]. Water Research, 2019, **155**: 175-181.

[42] 周德庆, 吕世伟, 刘楠, 等. 海洋微塑料的污染危害与检测分析方法研究进展[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, **10**(3): 60-68.
Zhou D Q, Lyu S W, Liu N, *et al*. Review on pollution hazards and detection and analysis methods of microplastics in ocean[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2020, **10**(3): 60-68.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2022

CONTENTS