李 潇,喻庆国,王 行,等.典型高原小型湖泊微塑料时空分布及源/汇作用 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):5236-5244.
Li X, Yu Q G, Wang H, et al. Spatial-temporal distribution of microplastics and their source/sink effects in a typical plateau small lake [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):5236-5244.

典型高原小型湖泊微塑料时空分布及源/汇作用

李 潇[1,2],喻庆国[1,2*],王 行[1,2],李 波[3],谢雪杨[1,2],刘 阳[1,2] (1.西南林业大学生态与环境学院(湿地学院),云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室,云南 昆明 650224；2.滇池湖泊生态系统云南省野外科学观测研究站,云南 昆明 650228；3.广东工业大学生态环境与资源学院,广东 广州 510006)

摘要: 以云南省高原小型湖泊剑湖为研究区,通过野外样品采集和室内分析实验,研究湖泊水体中微塑料时空分布和入出湖河流通量,揭示高原小型湖泊对微塑料的源/汇作用.结果显示,丰水期和枯水期剑湖水体中微塑料平均丰度分别为(4.80±2.85)和(12.61±8.00)n/m^3,入湖平均月通量分别为(55.59×10^6)和(3.82×10^6)n,出湖月通量分别为(13.70×10^6)和(9.80×10^6)n.剑湖水体中微塑料聚合物主要类型为人造丝(RY)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、低密度苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS).枯水期剑湖水体微塑料污染程度高于丰水期,入湖河流微塑料输入对剑湖水体微塑料累积具有显著贡献.总体上,剑湖是微塑料的"汇",但在不同条件下,湖泊对微塑料的"源"和"汇"作用处于动态变化过程.

关键词: 剑湖；微塑料；季节变化；通量；源/汇
中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)09-5236-09

Spatial-temporal distribution of microplastics and their source/sink effects in a typical plateau small lake. LI Xiao[1,2], YU Qing-guo[1,2*], WANG Hang[1,2], LI Bo[3], XIE Xue-yang[1,2], LIU Yang[1,2] (1.Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, College of Ecology and Environment (College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming 650224, China；2.Dianchi Lake Ecosystem Observation and Research Station of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650228, China；3.School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：5236~5244

Abstract：Jianhu Lake, a small plateau lake in Yunnan Province, was selected as the study area. The spatio-temporal distributions of microplastics in water of Jianhu Lake were studied, and the microplastic fluxes from the influent and effluent rivers were explored through field sample collection and laboratory experiment. Then, the source or sink effects of small plateau lakes on microplastics were revealed. The results showed that the average abundances of microplastics in water of Jianhu Lake were (4.80±2.85) and (12.61±8.00) n/m^3 in wet and dry seasons, respectively. The average monthly fluxes into the lake were (55.59×10^6) and (3.82×10^6) n, respectively. The monthly fluxes out of the lake were (13.70×10^6) and (9.80×10^6) n, respectively. The rayon (RY), polyethylene terephthalate (PET), and low density styrene-butadiene-styrene (SBS) were the main polymers types in water of Jianhu Lake. The degree of microplastic pollution in water of Jianhu Lake was higher in the dry season than that in the wet season. The microplastics from influent rivers had a significant contribution to the accumulation of microplastics in water of Jianhu Lake. Generally, Jianhu Lake was the sink of microplastics, while the "source" and "sink" roles of lakes on microplastics were the dynamic process under the different conditions.

Key words：Jianhu Lake；microplastic；seasonal variation；flux；source/sink

微塑料作为环境中的一类新污染物[1],已经广泛分布于世界各地的湖泊、河流和海洋等水环境中[2].相对于海洋生态系统而言,淡水生态系统更容易受到高浓度微塑料暴露的威胁[3],面临着更高的微塑料污染风险,尤其是湖泊生态系统[4].随着研究的不断深入,淡水湖泊中也检测到了微塑料污染[5],甚至在人类活动罕迹的高原湖泊中也发现了微塑料踪迹[6],表明了湖泊生态系统中微塑料的普遍性.2023年,全球塑料的总产量高达413.8t[7],塑料通过各种途径进入水环境,给水环境造成了潜在风险[8],特别是湖泊水体.然而,湖泊相对封闭的地理环境容易形成局部微塑料污染[9]高原湖泊因受地形气候等因素影响,普遍存在着水资源匮乏、水体交换速率慢、受污

收稿日期: 2025-02-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32160311)
* 责任作者, 教授, yqg20090030@swfu.edu.cn

染后治理难度大等一系列问题开展高原湖泊微塑料的相关研究,揭示高原湖泊水环境微塑料分布现状,掌握高原河湖生态系统对微塑料的源/汇作用,可为其他类似高原湖泊微塑料污染防控提供参考.

高原湖泊生态系统中微塑料污染已成为全球环境问题,逐渐受到了各界广泛关注,并对高原湖泊生态系统中微塑料来源、分布、迁移、生态风险、复合污染等[10-12]方面展开了相关研究.高原湖泊具有独特的地理和气候条件,微塑料通过大气沉降、河流运输、冰川融化等[10-11]途径进入高原湖泊,导致高原湖泊生态系统中水体和沉积物[13-14]受到微塑料污染胁迫.高原湖泊微塑料污染主要来源于自然释放和人类活动,我国最大的内陆湖青海湖水体中检测到了微塑料[13],位于西藏高原北部地区的色林错 4 个湖泊中也发现了微塑料污染[14].国外的 Geneva 湖[15]、Titicaca 湖[16]、Baikal 湖[17]等高原湖泊水体中均存在微塑料污染.地理位置偏远,人口稀少的蒙古国北部 Hovsgol 湖表层水体同样发现微塑料的存在[18].河流输运作为微塑料迁移的重要方式之一,其微塑料输运通量也引起了研究者们的关注.现有研究主要对长江、珠江、渭河等[19-20]大中型河流以及支流微塑料输运能力开展讨论,但鲜见高原河湖生态系统中河流对湖泊微塑料累积的影响研究.相关研究表明,湖泊封闭或半封闭的地理特征以及稳定的水文特性,为湖泊中微塑料的累积创造了条件,因此湖泊成为内陆水环境中微塑料的重要汇集地[2].通过对城市湖泊微塑料源/汇关系的研究[21],表明城市湖泊是微塑料的汇集地.现有的诸多研究证实高原湖泊已存在微塑料污染,高原湖泊环境受到外界干扰时微塑料会被迫释放,高原湖泊将会成为微塑料释放源[22].

湖泊生态系统对社会经济稳定和持续发展起着重要作用,而高原湖泊由于其高度复杂性、敏感性和脆弱性等特征,对维持区域生态平衡具有无可替代作用.剑湖地处横断山脉,物种丰富度较高,是云南高原湿地的重要保护对象.以往在剑湖开展的研究主要针对重金属[23]、农药[24]和营养元素[25]等传统污染物.研究表明,自然因素和人为活动导致微塑料在剑湖沉积物中不断累积[26],但难以揭示剑湖河湖体系中水体微塑料赋存规律,尚缺乏高原湖泊对微塑料源/汇作用等详细调查和研究.因此,本研究以典型高原小型湖泊剑湖为核心研究区,综合考虑河湖生态系统,通过对剑湖水体微塑料时空分布特征和入出湖通量研究,以期掌握剑湖水体中微塑料分布现状,进而揭示剑湖对微塑料的源/汇作用,为高原湖泊微塑料研究提供数据参考.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

剑湖位于云南省大理白族自治州剑川县境内,地处云贵高原与青藏高原交界处的横断山脉中段东侧,距县城东南 4.5km,海拔 2188m,水域面积 5.91km^2,平均水深 2.3m.剑湖流域干湿两季分明,降水主要集中在 5~10 月,旱季在 11 月~次年 4 月,多年平均年降雨量达 736.5mm.剑湖是澜沧江重要支流漾濞江上的一个高原小型浅水湖泊,入湖河流分别是格美江、永丰河、金龙河,湖水从南部的海尾河流出.研究显示,剑湖周边农药(3.50kg/hm^2)、化肥(284.88kg/hm^2)施用[30]过程中会产生大量废弃塑料材料,且农用塑料膜在土壤中的残留(40.14%)[27]进一步加剧了剑湖潜在的微塑料污染风险.

1.2　样品采集与运输

根据典型样带布设原则,结合剑湖入出湖河流方向、位置、湖泊形状、面积等因素,采用拖网方式尽可能收集剑湖水体中的微塑料.本研究在剑湖共布设了 10 条水体采样带,以及 4 个入、出湖河流采样点(图 1).剑湖和入出湖河流水体中微塑料采集工作于 2021 年 7 月(丰水期)和 12 月(枯水期)开展,并通过固定取样和船载拖网[28]方式分别采集河流和剑湖水体中微塑料样品.剑湖采样过程中使用 3 组同规格拖网(200 目)纵向排列,每条采样带拖网速度为 3km/h,拖网距离约为 2km,从而收集剑湖水体(表层 0~20cm)中的微塑料.此外,将 3 个同规格拖网顺河流水流方向固定在采样点处让其自然平行放置 20min,采集入、出湖河流水体(表层 0~20cm)中微塑料样品.湖泊和河流水体中微塑料采集时使用便携式流速测算仪(PS-TL)测定各采样带和采样点水流速度,并测量河流宽度和深度.

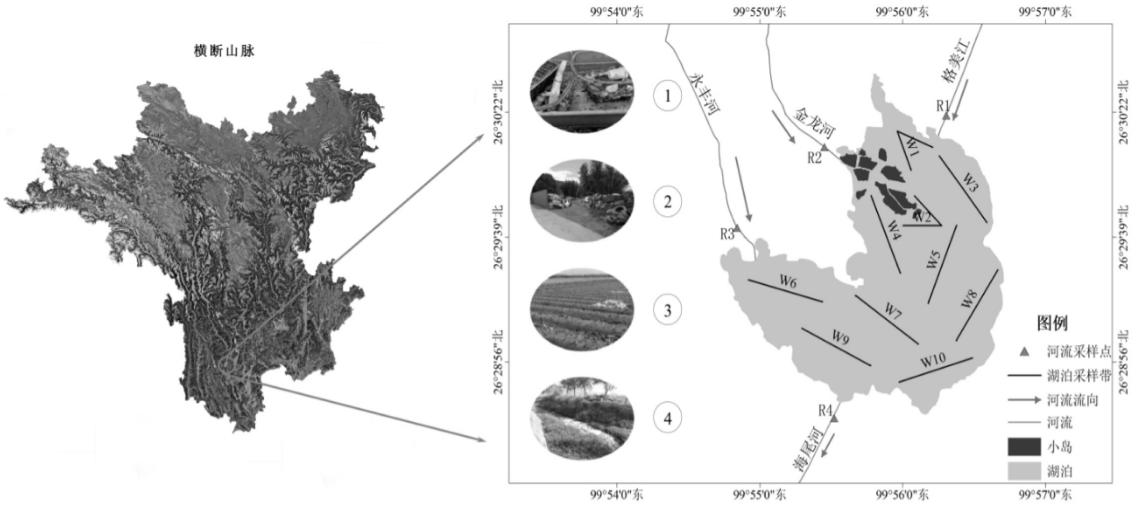


图 1 剑湖采样分布示意

Fig.1 Schematic diagram of the sampling distribution in Jianhu Lake

①剑湖中打捞的塑料垃圾;②修理厂堆放的塑料垃圾;③农地中的地膜;④河流中的塑料垃圾

1.3 微塑料提取

将野外采集的水体样品在密封状态下摇匀,避免微塑料会因静置时间过长而发生团聚或粘附现象.用 4 目不锈钢筛对野外收集的水体样品进行过滤,去除大于 5mm 的塑料颗粒和杂质.为防止有机质对微塑料识别的干扰,使用浓度为 30%的过氧化氢(H_2O_2)溶液进行消解[28],直到溶液变得澄清透明.通过抽滤装置(SHZ-D-III,中国)将微塑料转移到硝酸纤维玻璃滤膜,并将滤膜放入干净的保存盒中烘箱烘干(50℃,36h),以待下一步分析.

1.4 微塑料鉴定

使用显微镜(Leica DMI3000B,德国)对滤膜上的微塑料进行图像采集,用 Image J 软件对微塑料的颜色、形状和粒径进行观察统计,根据目测法借助立体显微镜(Leica M165C,德国)将疑似的微塑料挑出并标记,采用波长范围在 400~4000nm 的傅里叶变换红外光谱(Nicolet IN10,美国)鉴定标记物成分.此外,使用场发射扫描电子显微镜(TESCAN CLARA,捷克)和能量散色 X 射线光谱仪(Xplore 30,捷克)分析微塑料微观形貌及其表面元素组成.

1.5 质量控制

现场采样时,先用采样处的水清洗所有拖网和容器,再用蒸馏水清洗 3 遍.室内实验过程中,为了最大限度减少外界的潜在污染,全程均佩戴乳胶手套,穿着棉质实验服.同时,样品消解过程均用铝箔覆盖,并在洁净通风橱中完成室内实验操作.将蒸馏水作为实验对象,设置 3 组空白对照,样品处理同剑湖水体样品实验过程一致,且观察到空白样品中有 4n 微塑料,后续所有样品微塑料丰度均去除该空白值.根据 Li 等[29]的方法,准备聚丙烯(PP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氯乙烯(PVC)和聚乙烯(PE)塑料颗粒各 20 粒,并进行 3 组重复实验,用 60 目不锈钢筛分选后加入到蒸馏水中,添加塑料颗粒提取方法与水样处理方式相同,最终 PP、PET、PVC 和 PE 的平均回收率分别为 95%、98%、93%、95%.

1.6 数据统计分析

用 Excel 2016 对数据进行初步统计,并采用 SPSS 19.0 中的 Pearson 方法进行相关性分析,最后使用 Origin 2021 进行绘图.河流微塑料通量用以下公式计算:

$$F = C \cdot Q \tag{1}$$

式中:F 表示河流中微塑料通量,n;C 表示微塑料丰度,n/m^3;Q 表示河流总径流量,m^3.

2 结果与分析

2.1 湖泊微塑料时空分布特征

剑湖水体中微塑料时空分布特征如图 2.丰水期和枯水期剑湖水体中微塑料平均丰度分别为(4.80±2.85)和(12.61±8.00)n/m^3,变异系数分别为 59%和 63%,且微塑料峰值均出现在样带 7 附近.丰水期剑湖水体微塑料丰度范围为 1.36~10.42n/m^3,最低值出现在格美江入口处附近.枯水期剑湖水体中

微塑料丰度在4.60~31.52n/m^{3}范围,其最小值出现在样带 2.

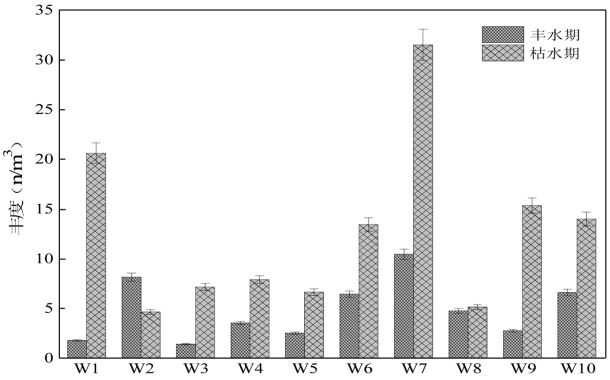


图 2　剑湖水体中微塑料时空分布特征

Fig.2　Spatial and temporal distribution characteristics of microplastics in water of Jianhu Lake

同时,丰水期和枯水期剑湖水体中微塑料丰度存在显著差异性(r=0.013,P<0.05),尤其是样带 1 差异最明显.从空间分布上看,丰水期各样带之间微塑料丰度无明显差异,枯水期样带 7 微塑料丰度最高,样带 2 附近的微塑料丰度最低.

2.2　湖泊微塑料赋存特征

剑湖水体中 4 种微塑料形状类型(图 3).如图 4(a)所示,在丰、枯水期占比最高的微塑料粒径均在200~500μm之间,且粒径在1000μm以下的微塑料占比最大,分别为 82%和 79%.丰水期和枯水期剑湖水体中微塑料形状分布特征均保持一致,所占比例呈现出线条>颗粒>碎片>球形的规律(图 4(b)).两季剑湖水体中线条状微塑料占比均超过 75%,其中枯水期线条状微塑料占比高达 81%,球形微塑料相对较少,两季占比总量不足 6%.剑湖水体中微塑料颜色种类繁多(图 4(c)),两季各采样带黑色和蓝色微塑料总比例均超过 60%.丰水期和枯水期剑湖水体中分别检测到 16 种和 22 种微塑料聚合物类型(表 1),丰水期和枯水期聚合物的主要类型均是 RY、PET、SBS,总比例分别为 86%和 68%,且 RY 是两季水体中检出率最高的聚合物类型.

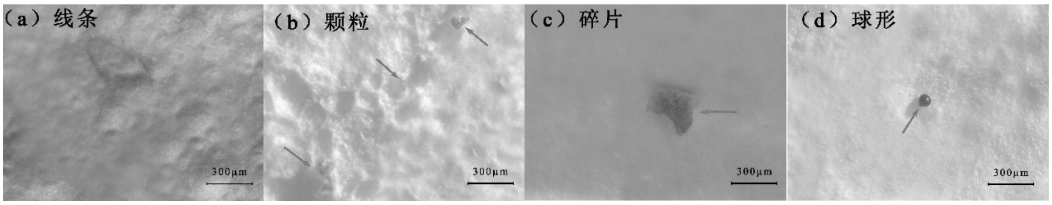


图 3　剑湖水体中微塑料形状类型

Fig.3　The shape types of microplastics in water from Jianhu Lake

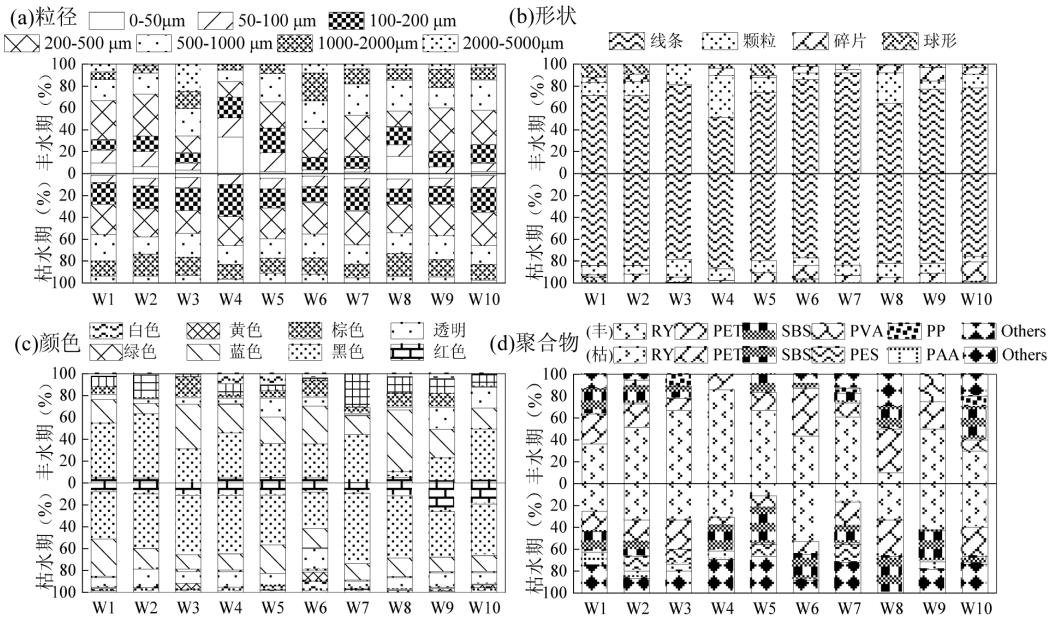


图 4　剑湖水体中微塑料粒径、形状、颜色和聚合物特征

Fig.4　The characteristics of particle size, shape, color and polymer of microplastics in water from Jianhu Lake

表 1 剑湖水体微塑料聚合物类型

Table 1 The polymers types of microplastics in water of Jianhu Lake

聚合物类型	英文/简写	丰水期(%)	枯水期(%)
人造丝	Rayon/RY	48.34	31.33
聚对苯二甲酸乙二醇酯	Polyethylene terephthalate/PET	23.84	19.35
低密度苯乙烯-丁二烯-苯乙烯	Low density Styrene−Butadiene−Styrene/SBS	13.92	17.34
聚乙烯醇	Polyvinyl alcohol/PVA	1.99	1.33
聚丙烯	Polypropylene/PP	1.99	1.33
聚(丙烯酸:丙烯酰胺)	Poly(acrylic acid:acrylamide)/P(A:AM)	1.32	1.33
四氟乙烯-全氟丙基乙烯基醚共聚物	Tetrafluoroethylene−perfluoropropyl vinyl ether Copolymer/PTFE−PFA	1.32	/
聚乙烯亚胺	Polyethylenimine/PEI	1.32	1.33
聚苯乙烯	Polystyrene/PS	1.32	/
聚酯	Polyester/PES	/	6
聚丙烯酸	Polyacrylic acid/PAA	/	4
聚四氟乙烯	Polytetra fluoroethylene/PTFE	/	2.67
聚丙烯腈	Polyacrylonitrile/PAN	/	2
专有纤维素聚合物	Proprietary cellulosic polymer/PCP	/	2
聚丙烯酰胺	Polyacrylamide/PAM	/	1.33
聚(丙烯腈:丙烯酸)	Poly(acrylonitrile:acrylic acid)/P(AN:AA)	/	1.33
聚氨酯	Polyurethane/PU	/	1.33
丙烯酸塑料	Acrylic/AC	/	1.33
其他	Others	4.64	4.67

2.3 湖泊微塑料表面形貌及元素组成特征

剑湖水体中不同微塑料表面纹理有所差异(图 5).透明线条状微塑料表面呈现出明显的沟壑和褶皱(图 5(a)),白色线条表面平整光滑(图 5(b)),白色碎片上观察到孔隙和突起(图 5(c)),红色线条状微塑料表面有明显附着颗粒(图 5(d)).同时,在剑湖水体微塑料表面发现了碳(C)、氧(O)、硅(Si)、磷(P)等元素,其中碳和氧是最主要的两种元素,还检测到镉(Cr)、铁(Fe)、铝(Al)、锰(Mn)、钾(K)等金属元素.

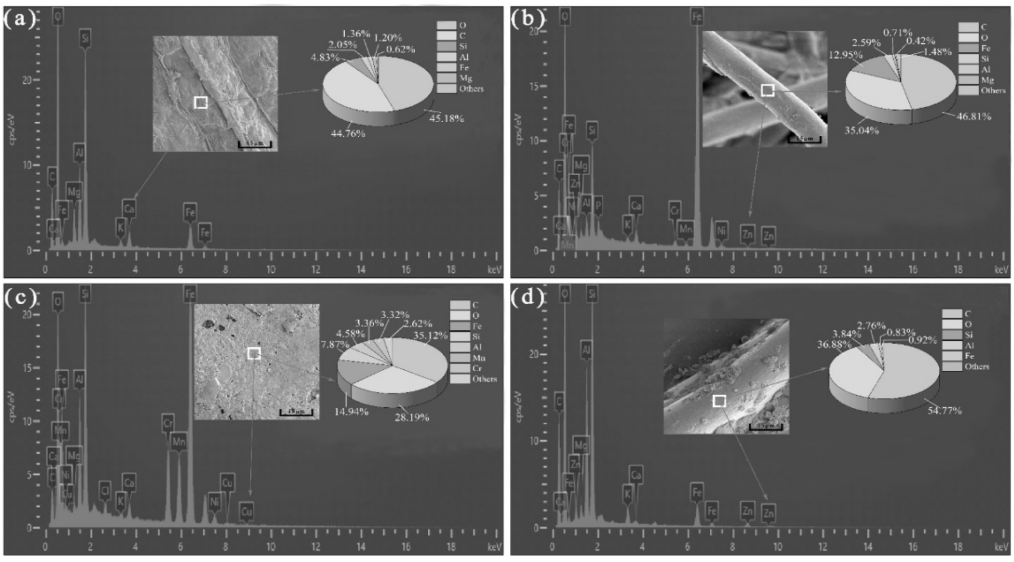


图 5 剑湖水体微塑料表面形貌及元素组成

Fig.5 Surface morphology and elemental composition of microplastics in the water of Jianhu Lake

图 a~d 分别是透明线条、白色线条、白色碎片和红色线条的特征,聚合物类型分别为 PVA、RY、PET 和 PET

2.4 河流微塑料时空分布和赋存特征

河流水体微塑料的分布特征如图 6.丰水期格美

江、金龙河、永丰河 3 条入湖河流微塑料平均丰度分别为(1.34±0.37),(0.83±0.21)和(7.96±1.51)n/m^3,其入湖微塑料月通量分别为(89.73×10^6),(35.45×10^6)和(41.60×10^6)n.丰、枯两季入湖平均月通量分别为(55.59×10^6)和(3.82×10^6)n.枯水期 3 条入湖河流水体微塑料丰度范围为 5.89~34.76n/m^3,其平均丰度分别为(34.76±7.56),(14.33±2.89),(22.68±3.82)n/m^3.丰、枯两季海尾河水体微塑料输出丰度分别为(0.71±0.17)和 (5.89±1.19)n/m^3, 微塑料出湖月通量分别为(13.70×10^6)和(9.80×10^6)n.

格美江、金龙河、永丰河、海尾河 4 条河流水体中微塑料分布特征如图 7.河流中微塑料粒径均集中分布在 200~500μm 之间,其中格美江丰水期和枯水期 200~500μm 微塑料粒径占比最大,分别为 39%、34%.丰水期永丰河中微塑料输入形状以碎片(55%)为主,枯水期则是线条状微塑料输入较多(66%).枯水期金龙河和海尾河均未检测到球形微塑料的存在,其余河流无论在丰水期还是枯水期都有球形微塑料的检出.两季中,虽然河流微塑料经辨认有 8 种颜色,但河流微塑料输入和输出均以蓝色、黑色为主.丰水期海尾河未发现绿色微塑料,金龙河枯水期棕色微塑料仅占 0.3%.丰水期永丰河 PP 为主要聚合物类型(50%),枯水期格美江和永丰河 RY 占比相同(43%).

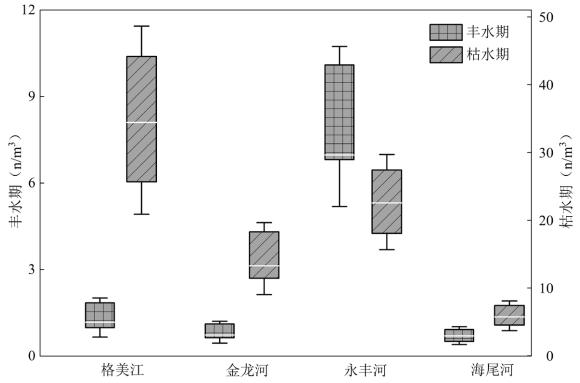


图 6　河流水体中微塑料分布特征

Fig.6　Distribution characteristics of microplastics in water of rivers

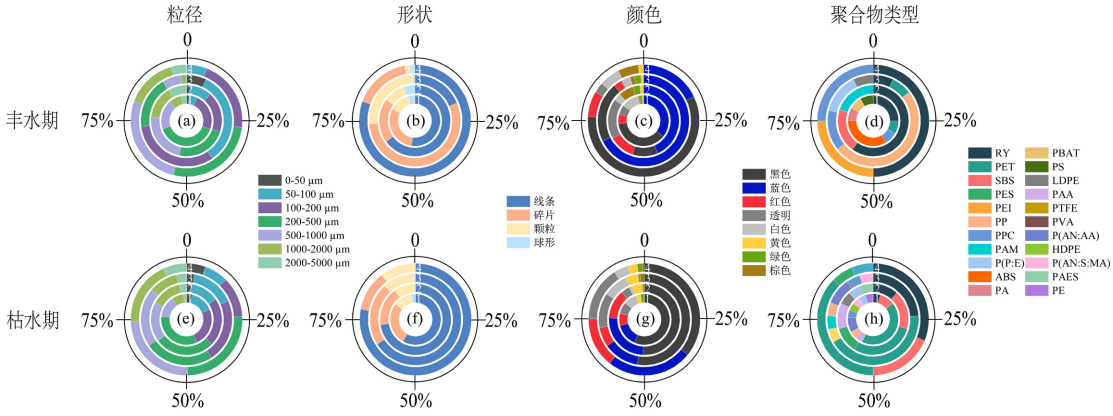


图 7　丰水期和枯水期格美江(第 1 层)、金龙河(第 2 层)、永丰河(第 3 层)和海尾河(第 4 层)中微塑料分布特征

Fig.7　Distribution characteristics of microplastics in Gemei River (first layer), Jinlong River (Second layer), Yongfeng River (third layer) and Haiwei River (fourth layer) during wet season and dry season

3　讨论

3.1　微塑料时空分布及来源

水体和沉积物作为湖泊生态系统中的重要组成要素,两者之间存在频繁的物质和能量交换[30].已有研究发现,剑湖沉积物中已经存在大量的微塑料[26],表明剑湖水体也存在微塑料污染的可能性,本研究也证实了这一推论.相比之下,剑湖水体中微塑料丰度远低于尼日利亚的牛轭湖[31],以及我国鄱阳湖[6]、洪湖和洞庭湖[32],这与剑湖流域内人口数增长缓慢有关[26].本研究表明,剑湖枯水期微塑料丰度显著高于丰水期,这一结论与徐沛等[5]研究结果相似.这源于丰水期降水量大,较大的水量对微塑料污染产生了稀释效应[33],而枯水期水流输运微塑料的能力下降,使得微塑料在剑湖中大量积累.丰水期植物生长茂盛,植物拦截微塑料作用明显,枯水期植物枯萎,拦截作用降低,黏附在植物上的微塑料有可能被释放[34],导致微塑料滞留在剑湖水体中.丰、枯两季微塑料峰值均

出现在剑湖中部区域,一方面是该区域位于剑湖码头附近,码头上塑料垃圾堆放和焚烧所产生的微塑料容易通过地表径流和大气输送[35]方式进入剑湖.另一方面,进入剑湖的微塑料伴随着开阔的湖面,水流速度降低,微塑料逐渐停滞在湖泊中央.剑湖周边有大量的村庄和农田,农业耕种活动造成了地膜、农药、化肥的使用,给剑湖水体中微塑料累积带来了严重的威胁[26-28].此外,剑湖流域内衣物洗涤、垃圾堆放和焚烧等人为活动产生的微塑料均有可能通过大气输送、地表径流方式输送到剑湖中[36-37].

剑湖水体中微塑料粒径主要集中在 1000μm 以下,这与意大利 Ebro 河[38]中微塑料粒径分布特征相似,但小于 50μm 的微塑料较少,这可能与本研究所使用的拖网孔径(64μm)有关.研究显示,粒径越小的微塑料比表面积和吸附能力越大[39],为污染物提供的活性吸附位点越多,其他有机污染物更容易在微塑料上富集[40],将对剑湖水生生态系统造成潜在威胁.目前,受样品采集方法的限制,使用拖网方式收集水体中的微塑料仍存在不足,后续研究可使用超声辅助拖网[41]、纳米纤维拖网[42]等方式收集小粒径微塑料.剑湖水体中微塑料颜色以蓝色和黑色为主,这与 Miller 等[43]在美国 Hudson 河中发现的微塑料颜色分布结果相似.研究表明,线条状微塑料大多数来源于渔业活动所用的渔具和渔网[44],剑湖中频繁的捕捞活动以及格美江上游三文鱼养殖基地渔具的广泛使用,导致线条状微塑料增加.

RY 和 PET 均是服饰的主要成分,PET 作为生产薄膜和各类塑料瓶关键原材料,剑湖周边存在大量的此类潜在污染源,这两类聚合物通过洗涤、破碎等方式被释放进入剑湖水体,造成剑湖水体中高浓度的RY 和PET.此外,聚合物本身的物理性质会直接影响它们在水体中的分布,密度高于淡水的微塑料在进入水体后会发生沉降,即使 RY(1.13~1.15g/cm^3)和 PET(1.38g/cm^3)的密度均比水大,但在剑湖水体中仍存在RY 和PET 两种聚合物,表明密度并不是影响微塑料在水体中分布的唯一因素.研究证实了微塑料表面形成的生物膜有可能会增加其浮力[45],导致高密度微塑料漂浮在水体中.同时,微塑料经过长时间的老化和降解作用后,表面官能团被破坏,增加了表面积和孔隙度,使微塑料表面活性增强[46],密度可能降低,剑湖水体微塑料形貌特征也证实了这一观点.有研究表明,微塑料表面 Cl、Cu、Zn 等元素被释放后会对环境造成污染[47],剑湖水体中微塑料表面附着的多种元素也对水环境造成了潜在的污染风险.

3.2 高原小型湖泊对微塑料的源/汇作用

河湖生态体系作为水环境的重要组成部分,两者具有密切联系,河流输送也是湖泊微塑料污染的潜在途径[48].丰水期剑湖河流水体中微塑料月输入通量显著高于枯水期(14.6 倍),主要原因是丰水期强大的水流携带陆源微塑料进入剑湖.剑湖入、出湖河流中都检测到微塑料的存在,其中永丰河丰度最高,这是因为永丰河作为剑湖主要入湖河流之一,流经剑川县城市区域,接纳了大量城市污染物.丰、枯水期剑湖河流水体入湖通量分别是出湖通量的 12.2 和 1.2 倍,月平均入湖通量是出湖通量的 7.6 倍,表明输入剑湖的微塑料绝大部分被滞留在剑湖.剑湖水生植物类型多样,分布广泛[49],植物对微塑料的吸附和拦截作用加剧了剑湖对微塑料的汇集作用.此外,由于微塑料体积小容易被水生生物摄入或误食,鄱阳湖野生鱼类体内检出的小粒径微塑料占比均较高[6],进一步导致微塑料被滞留在湖泊生态系统中,这也是剑湖作为微塑料汇集区域的原因之一.研究证实微塑料在剑湖沉积物中不断累积,剑湖沉积物中微塑料平均丰度为(924±427)n/kg,微塑料年平均沉积速率达 79n/(kg·a),且未来数 10 年剑湖沉积物中微塑料将持续增加[26].由于微塑料自然降解周期长[50],剑湖中汇集的微塑料短时间内将难以降解,这也给当地微塑料污染防治带来了巨大的挑战.

剑湖沉积物中的微塑料在水动力或生物扰动下会二次悬浮[22],沉积物会成为水体中微塑料的潜在来源.同时,剑湖地处板块交界处,流域内泥石流灾害频发,洪水、地震和泥石流等自然灾害均有可能导致沉积物中微塑料释放[51-52].在湖泊水流的影响下,剑湖水体中微塑料朝着海尾河方向输移,使得剑湖成为下游河段微塑料的来源.此外,剑湖流域内的农耕活动会通过抽水灌溉和人工疏浚等方式直接将剑湖中的微塑料带出,这也是农业土壤中微塑料的来源之一.当地政府对剑湖的垃圾清运,以及渔民的水草打捞活动会直接或间接地导致剑湖中微塑料流失.总体上,类似剑湖这样的高原小型湖泊是微塑料的“汇”,但在自然和人为因素干扰下,剑湖也是微塑料的“源”.由此可见,高原小型湖泊“源”和“汇”作

用是一个有机整体,始终处于动态变化过程.

4　结论

4.1　丰水期和枯水期剑湖水体中微塑料平均丰度分别为(4.80±2.85)和(12.61±8.00)n/m^3,枯水期水体中微塑料丰度显著高于丰水期,且存在显著的差异性.

4.2　剑湖水体中微塑料均以线条状为主,黑色和蓝色微塑料居多,且粒径集中分布在 200~500μm 范围,主要的聚合物类型为 RY.

4.3　剑湖丰水期和枯水期入湖微塑料平均月通量分别为(55.59×10^6)和(3.82×10^6)n,出湖河流月通量分别为(13.70×10^6)和(9.80×10^6)n.

4.4　剑湖作为典型高原小型湖泊,总体上是微塑料的“汇”,但在不同条件下,其“源”和“汇”角色的转变始终处于动态过程.

参考文献：

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

[2] 骆永明,施华宏,涂　晨,等.环境中微塑料研究进展与展望 [J]. 科学通报, 2021,66(13):1547-1562.
Luo Y M, Shi H H, Tu C, et al. Research progresses and prospects of microplastics in the environment [J]. Chinese Science Bulletin, 2021,66:1547-1562.

[3] 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.

[4] Mao R F, Hu Y Y, Zhang S Y, et al. Microplastics in the surface water of Wuliangsuhai Lake, northern China [J]. Science of The Total Environment, 2020,723:137820.

[5] 徐　沛,彭谷雨,朱礼鑫,等.长江口微塑料时空分布及风险评价 [J]. 中国环境科学, 2019,39(5):2071-2077.
Xu P, Peng G Y, Zhu L X, et al. Spatial-temporal distribution and pollution load of microplastics in the Changjiang Estuary [J]. China Environmental Science, 2019,39(5):2071-2077.

[6] 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.

[7] Plastics Europe. Plastics and Facts: Analysis of European Plastics Production, Demand, Conversion and End-of-Life Management [R]. Brussels: Plastics Europe, 2024.

[8] Li J Y, Liu H H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [J]. Water Research, 2017,137:362-374.

[9] 陈启晴,杨守业,Hollert H,等.微塑料污染的水生生态毒性与载体作用 [J]. 生态毒理学报, 2018,13(1):16-30.
Chen Q Q, Yang S Y, Henner H, et a1. The ecotoxicity and carrier function of microplasfics in the aquatic environment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018,13(1):16-30.

[10] Zhang Y, Kang S C, Allen D, et al. Microplastics in the Tibetan Plateau lakes: Sources, inventory and fate [J]. Science of the Total Environment, 2023,876:162817.

[11] Napper I E, Thompson R C, Barrett A C, et al. Cascading impacts of glacier-derived microplastics in alpine ecosystems [J]. Nature Communications, 2024,15:3124.

[12] Wang F, Wong C S, Chen C, et al. Combined effects of microplastics and co-contaminants in alpine lakes: From mechanisms to ecological consequences [J]. Environmental Science & Technology, 2024,58(12): 5421-5432.

[13] Xiong X, Wu C, Elser J J, et al. Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River-from inland to the sea [J]. Science of the Total Environment, 2019,659:66-73.

[14] Zhang K, Su J, Xiong X, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2016,219:450-455.

[15] Faure F, Corbaz M, Baecher 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.

[16] Rodríguez A P, Espinoza-Morriberón D, Alfaro R C. Microplastic contamination in Lake Titicaca: Assessment of abundance and distribution patterns in the world's highest navigable lake [J]. Environmental Pollution, 2023,334:122187.

[17] Ivanov A V, Galachyants Y P, Domysheva V M, et al. Microplastics in Lake Baikal: A legacy of anthropogenic and natural transport [J]. Science of the Total Environment, 2024,912:169246.

[18] Free C M, Jensen O P, Mason S A, et al. High -levels of microplastic pollutions in a large, remote, mountain lake [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014,85(1):156-163.

[19] Zhang W F, Yin L S, Li X Y, et al. Comparative study of microplastic transport dynamics in the Yangtze and Pearl Rivers: From source to sink [J]. Environmental Pollution, 2023,336:122465.

[20] Ding L, Mao R F, Guo X, et al. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China [J]. Science of the Total Environment, 2019,667:427-434.

[21] Li B, Li B W, Jia Q P, et al. Source or sink role of an urban lake for microplastics from Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area, China [J]. Environmental Research, 2023,224:115492.

[22] Li B, Peng J P, Hong B, et al. Simulation of the dynamic processes of microplastic suspension and deposition in a lake sediment-water system [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024,31: 41926-41938.

[23] Li B, Wang H, Yu Q G, et al. Spatial distribution and ecological assessment of nickel in sediments of a typical small plateau lake from Yunnan Province, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28:14469-14481.

[24] 欧阳敏,喻庆国,赵晓慧,等.剑湖沉积物中有机氯农药的分布特征与风险评估 [J]. 环境科学学报, 2019,39(12):4075-4087.
Ou Y M, Yu Q G, Zhao X H, et al. The distribution characteristics and the

risk assessment of organochlorine pesticides in the sediments of Jianhu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(12):4075-4087.

[25] 冯仡哲,张虎才,常凤琴,等.云南剑湖水体及表层沉积物氮、磷空间分布特征及对湖泊环境的影响 [J]. 第四纪研究, 2020,40(5):1251-1263.
Feng Y Z, Zhang H C, Chang F Q, et al. Spatial distribution of nitrogen and phosphorus and pollution assessment in Lake Jianhu, Yunnan Province [J]. Quaternary Sciences, 2020,40(5):1251-1263.

[26] Li X, Yu Q G, Li B, et al. Long-term deposition records of microplastics in a plateau lake under the influence of multiple natural and anthropogenic factors [J]. Science of the Total Environment, 2023, 856:159071.

[27] 李佳钰.剑湖流域农业面源污染防治技术 [J]. 环境科学导刊, 2019,38(2):53-55.

[28] Muthoni F K, Onyari J M, Wanjeri V O, et al. Occurrence and spatial distribution of microplastics in the surface waters of Lake Naivasha, Kenya [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023,125:678-689.

[29] Li B, Wan H, Cai Y P, et al. Human activities affect the multidecadal microplastic deposition records in a subtropical urban lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2022,820:153187.

[30] Zeng J, Jiao C C, Zhao D Y, et al. Patterns and assembly processes of planktonic and sedimentary bacterial community differ along a trophic gradient in freshwater lakes [J]. Ecological Indicators, 2019,106:105491.

[31] Onia B A, Ayenia A O, Agboolaa O, et al. Comparing microplastics contaminants in (dry and raining) seasons for Ox-Bow Lake in Yenagoa, Nigeria [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 198:110656.

[32] Wang W F, Yuan W K, Chen Y L, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,633:539-545.

[33] 李文刚,简敏菲,聂佳敏,等.鄱阳湖湿地水土环境中微塑料的时空分布及其多源性 [J]. 应用生态学报, 2022,33(10):2862-2870.
Li W G, Jian M F, Nie J M, et al. Spatiotemporal distribution and multi-source characteristics of microplastics in the soil and water environment of Poyang Lake Wetland, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(10):2862-2870.

[34] 李文刚,吴希恩,简敏菲,等.鄱阳湖流域水葫芦(*Eichhornia crassipes*)对水体微塑料的吸附截留效应 [J]. 环境科学, 2022,43(5):2548-2556.
Li W G, Wu X E, Jian M F, et al. Adsorption and interception effects of Eichhornia crassipes on microplastics in water of the Poyang Lake Basin [J]. Environmental Science, 2022,43(5):2548-2556.

[35] Zhao H, Zhou Y, Han Y, et al. Pollution status of microplastics in the freshwater environment of China: a mini review [J]. Water Emerging Contaminants & Nanoplastics, 2022,1:5.

[36] Yang L B, Qiao F, Lei K. Microfiber release from different fabrics during washing [J]. Environmental Pollution, 2019,249:136-143.

[37] 简敏菲,饶 丹,孙望舒,等.南方小城镇生活垃圾热解焚烧灰渣中微塑料与重金属的赋存特征 [J]. 环境化学, 2020,39(4):1012-1023.
Jian M F, Rao D, Sun W S, et al. Occurrence characteristics of microplastics and heavy metals in pyrolysis incineration residues of small towns in Southern China [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(4):1012-1023.

[38] Simon-Sánchez L, Grelaud M, Garcia-Orellana J, et al. River deltas as hotspots of microplastic accumulation: The case study of the Ebro River (NW Mediterranean) [J]. Science of the Total Environment, 2019,687:1186-1196.

[39] Syberg K, Khan F R, Selck H, et al. Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2015,34(5):945-953.

[40] Zhang W W, Ma X D, Zhang Z F, et al. Persistent organic pollutants carried on plastic resin pellets from two beaches in China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015,99(1/2):28-34.

[41] Zhang L, Wang Y, Chen X, et al. Enhancing microplastic capture efficiency via ultrasonic net vibration [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2023,43(8):120876.

[42] Lee S, Kim J, Park H, et al. Electrospun nanofiber nets for deep-sea microplastic sampling [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2024,44(3):2301234.

[43] Miller R Z, Watts A J R, Winslow B O, et al. Mountains to the sea: River study of plastic and non-plastic microfiber pollution in the northeast USA [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017,124(1):245-251.

[44] Xiong X, Zhang K, Chen X C, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake Qinghai Lake [J]. Environmental Pollution, 2018,235:899-906.

[45] Leiser R, Wu G M, Neu T R, et al. Biofouling, metal sorption and aggregation are related to sinking of microplastics in a stratified reservoir [J]. Water Research, 2020,176:115748.

[46] Liu P, Zhan X, Wu X W, et al. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks [J]. Chemosphere, 2020,242:125193.

[47] Bandow N, Will V, Wachtendorf V, et al. Contaminant release from aged microplastic [J]. Environmental Chemistry, 2017,14(6):394-405.

[48] Lebreton L C M, van der Zwet J, Damsteeg J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans [J]. Nature Communications, 2017,8:15611.

[49] 王 粤,石 明,杜 凡,等.剑湖自然保护区种子植物区系特征及其评价 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022,42(1):46-52.
Wang Y, Shi M, Du F, et al. Floristic characteristics and evaluation of seed plants flora in Jianhu Nature Reserve [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences). 2022,42(1):1-7.

[50] Lin J, Yan D Y, Fu J W, et al. Ultraviolet-C and vacuum ultraviolet inducing surface degradation of microplastics [J]. Water Research, 2020,186:116360.

[51] Gündoğdu S, Çevik C, Ayat B, et al. How microplastics quantities increase with flood events? An example from Mersin Bay NE Levantine coast of Turkey [J]. Environmental Pollution, 2018,239:342-350.

[52] Zhang Y F, Liang J, Zeng G M, et al. How climate change and eutrophication interact with microplastic pollution and sediment resuspension in shallow lakes: A review [J]. Science of the Total Environment, 2019,705:135979.

致谢： 非常感谢云南省大理州剑川剑湖湿地省级自然保护区管护局对采样工作的支持和帮助.

作者介绍： 李 潇(1997-),女,云南大理人,硕士,主要研究方向为微塑料污染防治.发表论文 1 篇.naonao_li@163.com.