段立曾,张虎才,李东林,等.杞麓湖表层沉积物微塑料污染特征[J].环境科学与技术,2024,47(S1):140-149. Duan Lizeng, Zhang Hucai, Li Donglin, et al. Pollution characteristics of microplastics in surface sediments from Lake Qilu[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(S1):140-149.

杞麓湖表层沉积物微塑料污染特征

段立曾[1], 张虎才[1*], 李东林[1], 许惟栋[1], 李华玉[1],
许婧[1], 徐天宝[1], 邓春暖[2]

(1.云南大学生态与环境学院高原湖泊生态与治理研究院,云南 昆明 650500;
2.云南师范大学地理学部,云南 昆明 650500)

摘 要:为探究杞麓湖微塑料(MPs)的污染特征及潜在来源机制,作者采用浮选法分离出36个位点表层沉积物中的MPs,通过显微镜和扫描电镜(SEM-EDS)观察MPs的表面结构、形态特征、微观结构及附着元素等,结合沉积物总氮(TN)、总磷(TP)、有机质(OM)、碳酸盐和粒度等理化指标,探讨了MPs的分布特征、影响因素和潜在来源机制。结果表明:杞麓湖表层沉积物中MPs的检出率高达100%,其丰度范围介于50~680 个/kg之间,平均丰度157.66 个/kg。物理构成特征以粒径<1 mm(65.09%),纤维状(96.85%),透明(51.01%)和蓝色(38.7%)的MPs为优势组分。在人类活动、入湖河分布及常年盛行风等因素的综合作用下,MPs丰度呈现南部、东北部湖区最高,湖心和西部湖区相对较低的空间分布格局。相关分析表明,MPs丰度和组合特征均与沉积物理化因子之间无显著相关性,流域土地利用类型、人类活动和径流输入是MPs污染状况及空间分布的主导因素。依据物理组合特征,推测其来源为日常使用塑料制品(衣物洗涤、渔具使用)和周边农用地膜的分解等。整体而言,杞麓湖面临着水体富营养化、重金属污染等传统环境问题和MPs等新型污染物质并存的多重环境压力,亟需更多的关注。

关键词:湖泊沉积物; 组合特征; 丰度及分布; 微塑料; 杞麓湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.1689.23.338 **文章编号:**1003-6504(2024)S1-0140-10

Pollution Characteristics of Microplastics in Surface Sediments from Lake Qilu

DUAN Lizeng[1], ZHANG Hucai[1*], LI Donglin[1], XU Weidong[1], LI Huayu[1],
XU Jing[1], XU Tianbao[1], DENG Chunnuan[2]

(1. Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, China;
2. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to insight the pollution status and potential source of microplastics (MPs) in Lake Qilu, 36 sites of the surface sediments samples were separated and purified by flotation method. The surface structure and morphological characteristics of MPs were observed by scanning electron microscopy (SEM) and Stereo Microscope, and then classified and counted. The distribution characteristics, influencing factors and potential import mechanism of MPs were discussed based on the physical and chemical indexes of sediments such as total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), organic matter (OM), carbonate and grain size of sediments from the Lake Qilu. The results showed that: The detection rate of MPs in the surface sediments of Qilu Lake is as high as 100%, and their abundance ranges from 50 to 680 n/kg, with an average abundance of 157.66 n/kg. Physical composition characteristics of MPs with particle size <1 mm (65.09%), fibrous (96.85%), transparent (51.01%) and blue (38.7%) are the dominant components. Under the comprehensive effect of human activities, river distribution and prevailing wind, the abundance of MPs showed the highest spatial distribution pattern in the southern and northeast lake area, and relatively low in the central and western lake area. Correlation analysis showed that there was no significant correlation between MPs characteristics and sediment physicochemical factors, which further indicated that land use type, human activities and runoff input were the dominant factors in the spatial distribution of MPs pollution. According to the physical combina-

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期:2023-09-04;修回2023-11-20
基金项目:云南省基础研究计划项目(202101AT070049);云南省科技厅科技计划项目(202305AM070001);国家自然科学基金项目(U2202207);国家自然科学基金项目(21866033)
作者简介:段立曾(1986-),男,实验师,博士研究生,研究方向为湖泊污染与修复,(电子信箱)duanlizeng2019@ynu.edu.cn;*通讯作者,(电子信箱)zhanghc@ynu.edu.cn。

tion characteristics of MPs, it is speculated that the source is the daily use of plastic products (clothing washing, fishing gear use) and the decomposition of surrounding agricultural mulch. Under the background of increasingly intense human activities, Lake Qilu is facing multiple environmental pressures and ecological risks caused by lake eutrophication, traditional pollutants such as heavy metals, and new pollutants such as MPs, which require more research and attention.

Key words: lake sediments; classification characteristics; abundance and distribution; microplastics; Lake Qilu

微塑料(microplastic,MPs)作为全球性的新型环境污染物质之一,其分布广泛、来源复杂、环境危害和生态风险极高,是当前环境污染领域关注的热点。开展河流、水库和湖泊等陆域水系中MPs污染的研究,减少外源输入和远距传播,是实现全域环境MPs污染防控的有效途径[1]。因此,近年的研究逐步从先前的海洋环境转向了与人类活动更密切的淡水环境[2,3]。统计发现,我国湖泊水体和沉积物中MPs平均丰度分别为0.34~8.9 个/L、3~14 700 个/kg[4]。研究集中于青海湖、乌梁素海、洞庭湖、鄱阳湖、太湖和部分城市湖泊等[5]。整体而言,由于人口密度大、监管及处置措施缺乏,我国大多数湖泊中MPs丰度高于发达国家和地区[6]。

湖泊作为区域陆源碎屑物质的收纳体,完整地记录了流域物质输入的过程和机制。流域输入的污染物质经吸附、堆积后沉淀于湖底,因此沉积物污染状况可作为湖泊受污染程度的指示器[7]。MPs富积于沉积物之后,在水动力条件、人为或生物扰动等作用下发生再悬浮,或与其它污染物质结合并造成二次污染[8]。此外,复杂的自然环境直接或间接地影响了MPs的运移、分解和累积过程,进而改变环境中MPs的污染状况。因此,探究MPs与各环境因子的关联性,对揭示其赋存特征、分布格局、来源追溯和环境风险等具有重要意义[9,10]。研究表明,MPs丰度与水体总氮(TN)浓度正相关(P<0.01),与叶绿素(Chl-a)浓度呈负相关[11];MPs的沉降速率与水体电解质浓度呈正相关,与pH值呈负相关;沉积物部分理化性质制约了MPs对重金属的吸附能力,进而影响MPs表面附着生物的生长状况及生态风险等级[12-14]。

云南高原湖泊MPs污染的相关研究,最早为刘亚菲有关滇池南岸湖滨带表土的调查和报道,其MPs的累积量巨大(平均含量为19 660 n/kg),以纤维状、小粒级为主要构成类型[15]。后续研究发现,滇池水体和沉积物中MPs的平均丰度分别为91.2 个/ m^3和338.48 个/ kg;除流域人类活动外,湖底地形、湖流等自然因素的综合作用塑造了滇池MPs丰度在湖心区、北部湖区最高,其它湖区相对较低的空间分布格局,并将其主要来源归结为污水处理厂尾水的排放、日常纺织品和渔网的使用等[11,16-18]。由此可见,云南高原湖泊MPs污染研究起步较晚,且主要集中于滇池,其它湖泊的研究报道则相对较少。近年来,随着人类活动加剧,杞麓湖的水环境状况不容乐观。单纯开展营养盐、重金属等传统污染研究已无法满足综合治理需求,而MPs等新型环境污染物质的赋存特征、污染状况及来源机制等仍不得而知。此外,沉积物作为水体中各类污染物质最终的受纳体,比水体更能反映MPs污染状况[19,20]。基于此,本文以典型高原浅水湖泊杞麓湖为研究对象,利用湖泊沉积物这一优良的研究载体,在鉴别微塑料形态组合特征的基础上,阐明其丰度和空间分布特征,剖析环境因子对MPs赋存的影响,追溯MPs的潜在来源。研究结果对污染物质的流域管控和水环境质量的提升具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况及样品采集

杞麓湖(24°05′~24°14′ N,102°34′~102°53′ E)位于云南省玉溪市通海县境内,为典型的高原浅水型封闭湖泊,多年平均水深4.2 m,蓄水量1.47×10^8 m^3。流域内有红旗河、大新河等十余条季节性入湖河(图1),主要靠降雨径流补给。流域属亚热带半湿润夏凉季风气候,年均温15.7 ℃,降水量889 mm,降雨集中于5-10月,平均蒸发量1 239.3 mm,近年来年降水量和蒸发量均呈增加趋势[21]。杞麓湖不仅是区域社会经济发展的重要支撑,还具有调节区域小气候的重要作用,尤其在冬季表现更为明显[22]。近现代以来,随着人类活动的加剧,湖泊水环境状态不断恶化。尤其20世纪以来,围湖造田等农业活动导致了湖泊水位降低、污染物质的输入量持续上升[23,24]。近来,由于农业面源污染、湖泊底泥释放等,导致水体TN、TP等营养盐浓度持续升高,水体富营养化明显加剧[25,26]。

2022年5月,结合湖泊形态特征及水深分布等,布设36个样点(图1),利用彼得森采泥器获取表层沉积物样品。每个样点取2份,分别用于MPs的分离、鉴定和各项理化指标的测定。确保样品量满足重复实验需求,避光、低温条件下运回室内待测。

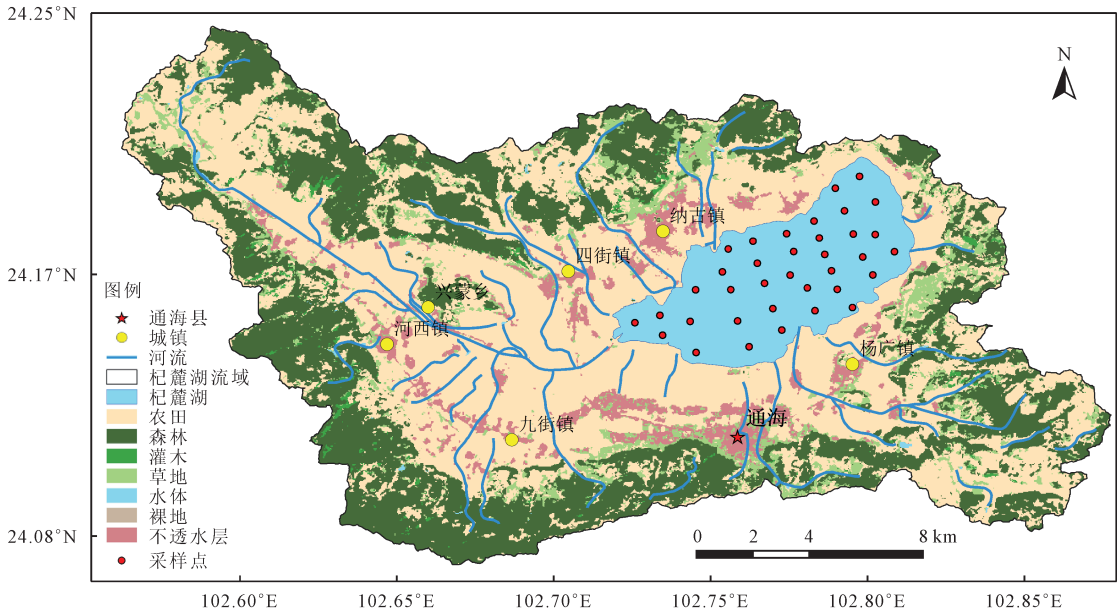


图1 杞麓湖及采样点位置

1.2 微塑料的分离提取与鉴定

(1)采用浮选法开展微塑料的分离、提取[27,28]。先用玻璃纤维滤膜(直径47 mm,孔径0.5 μm)过滤100 mL浓度为300 g/L的氯化钠(NaCl)溶液;称取200 g(湿重)沉积物放入干燥的烧杯(2 L),加入1 000 mL饱和NaCl溶液(1.12 g/cm^3)进行浮选。磁力搅拌10 min后静置沉降12 h后,收集上清液并在真空下过滤并将残留颗粒物冲至烧杯中(重复3次)。在上清液中加入足量的H_2O_2(30%),在65 ℃条件下消解8 h降解有机质,以减少植物类纤维对镜下观察的干扰。再次真空过滤后,将滤纸转移到培养皿中室温干燥。

(2)目视法鉴定微塑料[16]。在体式光学显微镜下检查滤纸上的塑料颗粒。按照尺寸<1 mm、1~3 mm、3~5 mm、>5 mm的标准进行4级分组,借助Motic Images Plus 3.0软件,在自由线的模式下测量MPs尺寸。MPs的形态按纤维状、薄膜状、颗粒状、气泡状等分类;颜色包括:透明色、蓝色、黑色、红色及其他颜色。鉴定过程中记录好滤膜上MPs的数量、颜色、形态以及显微镜放大倍数等信息,并对MPs进行拍照。利用扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS,S-3400N)获取MPs的微观结构电镜图,在MPs样品上随机取样点进行表面附着物的元素分析,扫描范围为20~4 000 cm^{-1},扫描20次。

1.3 沉积物理化指标的测定

沉积物TN、TP浓度采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度计法[29];依据常规测定方法,同时参考已有文献[23],分别采用气量法、烧失法、激光衍射法测定沉积物中的碳酸盐、OM和粒度,各指标均重复测量2次后取其平均值。

1.4 质量控制与数据分析

为提高实验结果的可靠性,野外采样和室内实验人员均需着装棉质衣物。实验中避开聚乙烯材质的容器,各类设备经去离子水清洗、烘干后使用。用锡箔纸盖好浮选过程中使用的烧杯,存放滤膜的玻璃培养皿始终处于封闭状态。确保在无尘环境中鉴定MPs,并增加空白实验[30]。

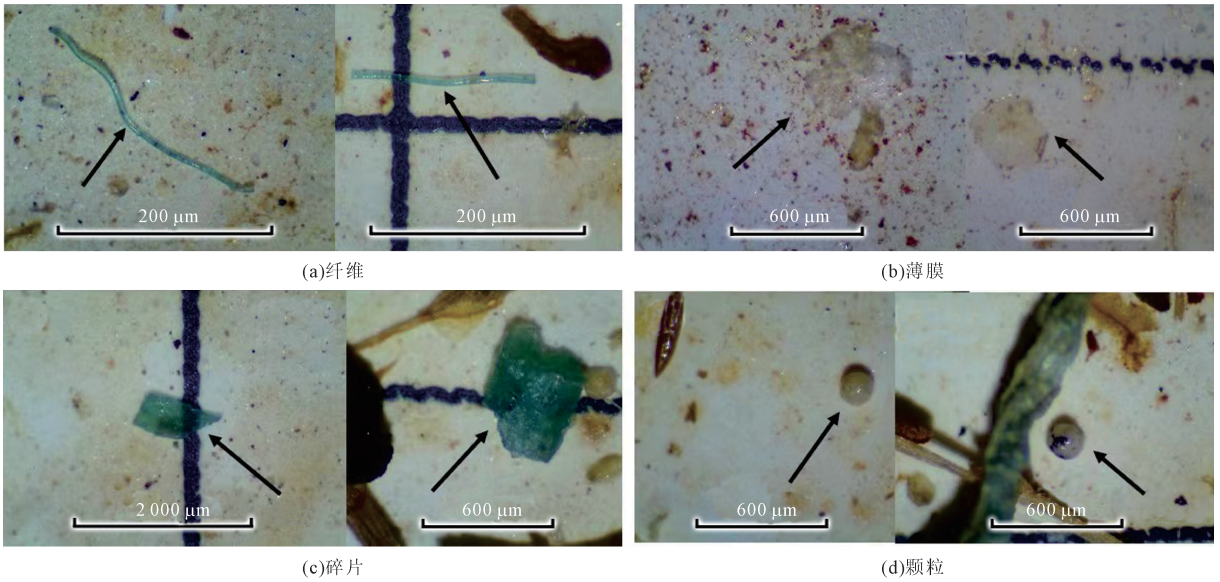
沉积物中MPs丰度采用每kg颗粒数表示,单位为个/kg。采用Excel对不同颜色、粒径和形状的MPs及丰度进行统计;ArcGIS10.4.1软件绘制样点图及MPs丰度空间分布图;Origin 2018绘制MPs丰度热力图和构成的柱形图,相关性分析采用R-4.2.2,设置的显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 微塑料的物理形貌特征

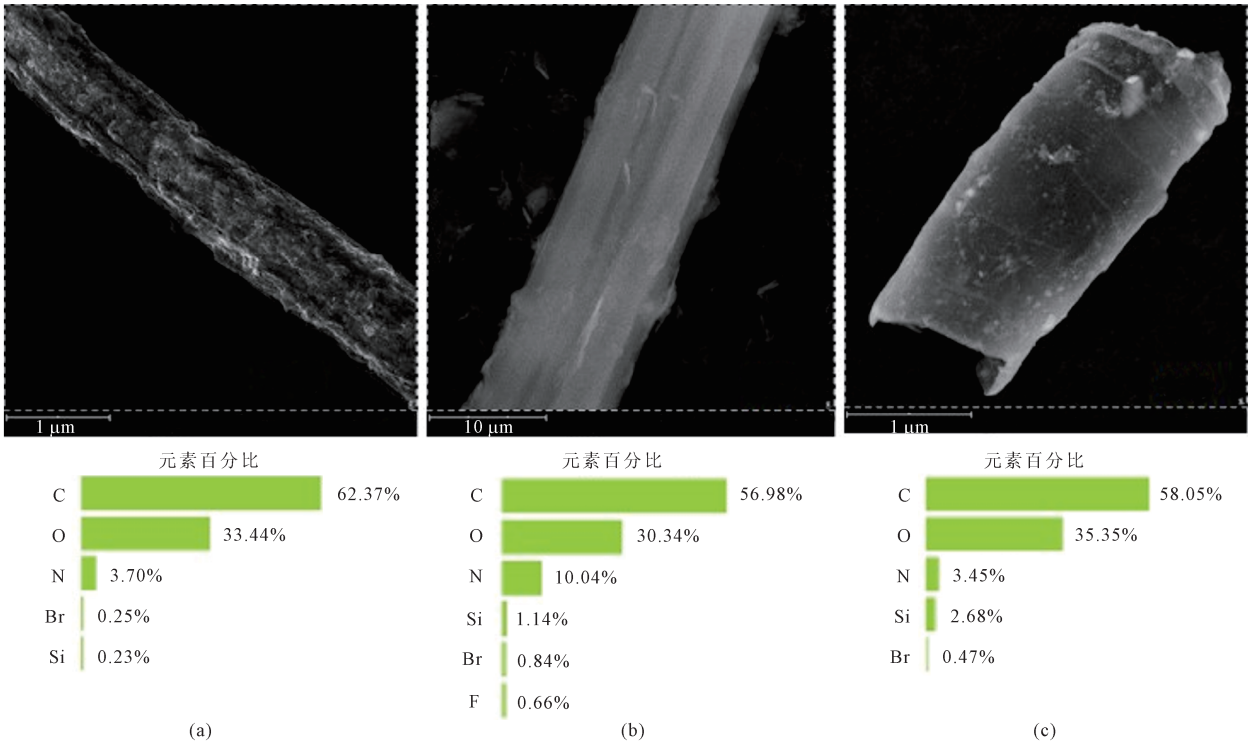
体式显微镜下,杞麓湖表层沉积物中MPs的形态如图2所示,主要由纤维状、薄膜状、碎片状和颗粒状等4种构成。其中,纤维状(图2(a))MPs多为长线型,部分为弯曲的螺旋状,有绿色、蓝色和透明色等;薄膜状(图2(b))MPs大多为轻薄的片状,颜色以透明色居多,其粒径均在1 mm以内;碎片状(图2(c))MPs形状由多边形和不规则的形状构成,颜色以透明色为主;颗粒状(图2(d))MPs多呈卵球形和圆盘形,颜色均为透明色,粒径均<0.2 mm。

扫描电子显微镜(SEM-EDS)-能谱仪(S-3400N)下,杞麓湖沉积物中MPs的微观结构特征如图3所示。受外界环境中紫外辐射、机械磨损、化学风化、水体溶蚀等因素的综合影响,MPs表面多呈现粗糙、多



(a)纤维　(b)薄膜　(c)碎片　(d)颗粒

图2 显微镜下沉积物中MPs的形态特征



(a)　(b)　(c)

图3 扫描电镜-能谱仪下MPs的微观特征及元素组成

孔、裂痕、褶皱、凹陷或凸起等特征。沉积物中的MPs易暴露而被氧化,与其他固体物质发生碰撞后加快了其老化的速度[31]。MPs表面EDS分析发现,大部分MPs表面均含有C、O、N、Si和Br等元素,部分微MPs面还附着F(图3(b))等元素。

2.2 微塑料的形态、粒径及颜色

有关MPs的分类尚未统一标准,目前较为常见的分类依据为形状、颜色和尺寸(粒径)等[32]。杞麓湖沉积物中MPs形态、粒径及颜色构成如图4所示。形态而言,纤维状、颗粒状、碎片状和薄膜状4种形态的占比差异显著(图4(a))。其中,纤维状MPs最多,占比高达96.85%;颗粒状、碎片状和薄膜状较少,占比分别为1.76%、1.02%和0.37%。此外,纤维状MPs在全湖的检出率达100%,各点位上的占比均超过75%。薄膜状的检出率最低,仅为12%。全湖中未出现同时含4种形态MPs的位点;其中,2号、10号位点中检出3种形态的MPs;同时含2种形态MPs的点位共计14个,10个位点沉积物中均只有一种(纤维状)形态MPs的检出。

按<1 mm、1~3 mm、3~5 mm、>5 mm 4个粒级分类后,全湖MPs粒径组合特征如图4(b)所示。36个位

点所有MPs粒径最小为78 μm，最大的超过5 mm。其中，粒径<1 mm的MPs最多，占比高达65.09%，其次为1~3 mm的类型，占比为28.89%，3~5 mm和>5 mm粒径的MPs相对较少，两者占比仅为6%。说明杞麓湖表层沉积物中的MPs以小粒径（<1 mm）为主。其中，<1 mm和1~3 mm粒径的MPs在各位点的检出率均为100%；粒径>5 mm的MPs主要在3号和30号位点沉积物中检出。

有关MPs的颜色，观察到了透明、蓝色、黑色、红色、绿色和粉色等6种（图4(c)）。全湖而言，透明色MPs最多，占比为51.01%，其次为蓝色，占比为38.7%。红色、黑色的占比分别为5.18%和4.25%；粉色和绿色最少，两者的占比不足1%。透明色和蓝色MPs的检出率均为100%，粉色和绿色的检出率仅为8%。可见，全湖中MPs的颜色构成以透明色和蓝色为主。

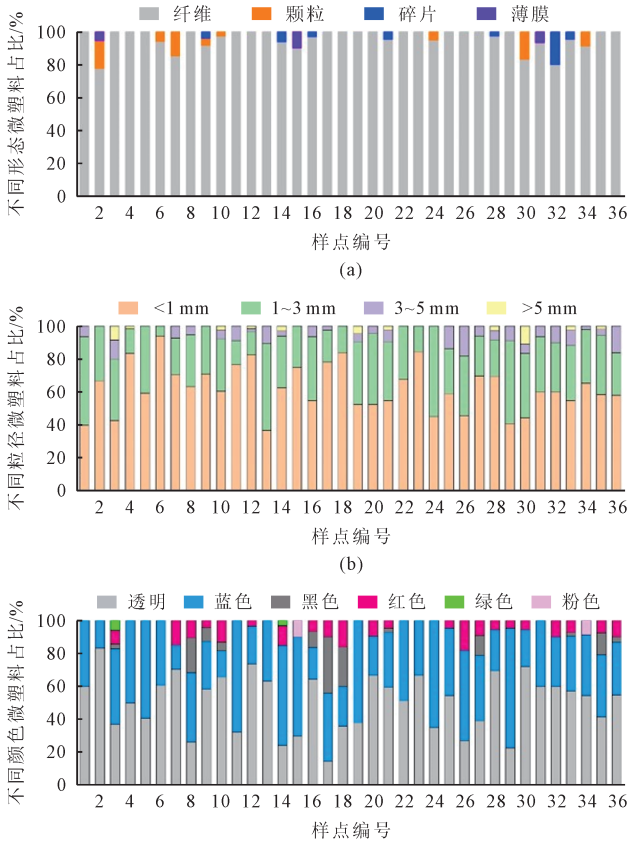


图4 各点位沉积物中不同形态、粒径和颜色MPs的赋存比例

2.3 微塑料丰度及空间分布

与水体中MPs污染的快速变化不同，沉积物中的MPs是流域环境中污染物质长期输入后累积的结果[33]。尤其小型浅水湖泊，湖水交换频繁，MPs一旦进入湖泊后会快速扩散，最终沉淀至湖泊沉积物中。杞麓湖沉积物中MPs丰度的空间分布如图5所示，36个点位中MPs的检出率高达100%，说明MPs的污染已遍及全湖。MPs丰度（湿沉积物）介于50~680 个/kg之间，平均丰度为157.66 个/kg。

如图5所示，不同点位沉积物中MPs的丰度差异较大。其中，丰度最大的为11号样点（680 个/kg），最小的为32号样点（50 个/kg）。空间分布上，丰度较高的样点位于南部、东部湖区以及东南部近岸湖区；湖心区、西部湖区MPs丰度相对较低，总体呈现出近岸湖区高于湖心区的特征。从自然地理角度来看，杞麓湖的入湖河流多集中于湖盆西部、西南及西北部（图1(b)）。此外，研究区地处西南季风区，常年的盛行风以及由此引发的湖流亦影响了MPs在水体和沉积物中的迁移。从流域产业布局来看，南部、东部，以及近岸湖区为农田和城镇的主要分布区，人类活动相对频繁，亦是污水的集中排放区[22]。总之，自然条件和人为活动共同塑造了杞麓湖表层沉积物中MPs丰度的空间分布格局。

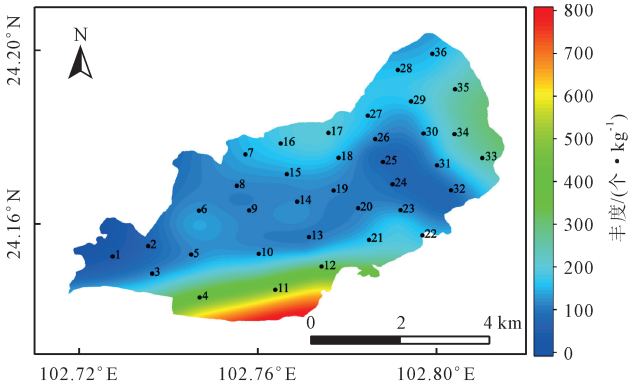


图5 杞麓湖表层沉积物中MPs丰度的空间分布特征

2.4 沉积物的理化性质

沉积物中的TN、TP浓度能反映湖泊的营养状态和内源污染情况，常作为湖泊富营养化状况的重要评价指标；OM含量反映了湖泊初级生产力水平；湖泊中的碳酸盐有自生和外源之分，自生的源于湖水中的无机化学沉淀和生物成因来源，外源碳酸盐源于流域物质的化学风化，通过径流搬运至湖泊。沉积物粒度是解释湖水动力学、地貌学和沉积学的良好指标。沉积物作为流域物质的汇区，明确上述指标的含量、形态及空间分布，对了解湖泊中各类物质的内、外源输入、环境状况及变化具有重要意义。

杞麓湖表层沉积物中TN、TP、OM、碳酸盐、中值粒径（$d50$）和粉砂含量及分布特征如图6所示。其中，TN的平均浓度为5.75 mg/g，TP为1.01 mg/g，两者均已超标。其中，TN以有机氮为主，TN的单因子评分高于TP，氮是主要贡献因子，磷是主要的限制因子。空间分布上，TN呈现西南湖区最高，由湖心向近岸区递减的趋势；北湖区沉积物的TP浓度最高，其次为东湖区即红旗河入湖区域，两个高值区中间出现一个低值区。全湖的OM含量分布相对均一，高值位于西南湖区，低值区位于湖心偏西的湖区；碳酸盐含量出现

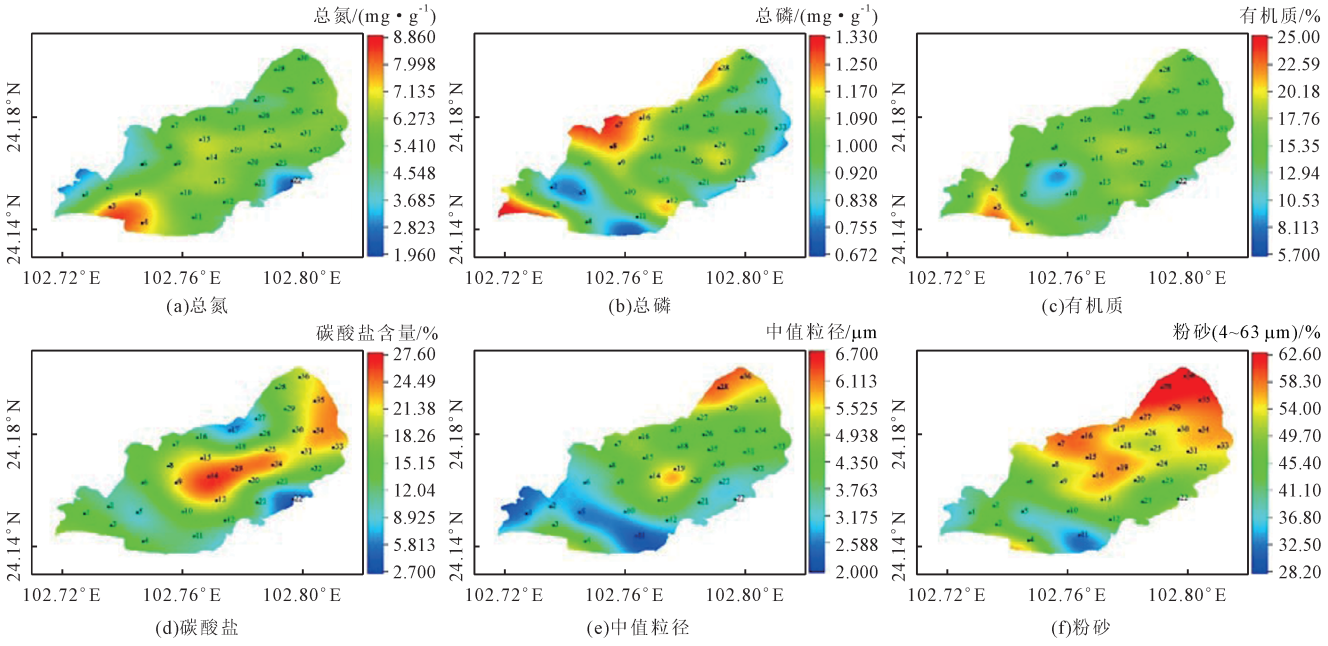


图6 沉积物总氮、总磷浓度、碳酸盐、有机质含量和中值粒径的分布

湖心区最高、东部湖区次之,其他湖区较低的分布趋势;d50与粉砂占比的分布趋势大致相当,东北湖区最高,西南湖区最低,其中湖心和北湖区沉积物中粉砂的占比较高。整体而言,受湖泊地理位置、地质状况、区域气候等自然因素和人类活动的影响,沉积物各理化指标的含量和空间分布呈现不同的特征。

3　讨论

3.1　微塑料的污染状况及其来源解析

杞麓湖表层沉积物中MPs的表面形貌特征与鄱阳湖[14]、雨山湖[34]等研究报道具有一致性。MPs表面多样化的形貌特征,增加了MPs比表面积,提高了吸附其它物质的能力,其表面所富集的重金属等物质种类和浓度由周围的环境主导[35]。除C、O、N、Si等一般有机物构成的基本元素外,MPs表面富集的Br和F元素及其化合物,常被添加于净水剂、杀虫剂、染料等物质中。由此可见,杞麓湖中MPs存在潜在的环境危害和复合污染风险。

几乎所有的淡水环境中均有MPs的检出,近年来有越来越多关于湖泊、河流等陆域水系水体和沉积物MPs研究相继被报道。就沉积物而言,如表1所示,内蒙古高原17个湖泊沉积物中MPs的丰度范围为(128.29±77.63)个/kg[10]、鄱阳湖为356~1 452 个/kg[14]、滇池为330.48 个/kg[17]、骆马湖夏季为(513±201) 个/kg,冬季为(528±236) 个/kg[28]、太湖11~234.6 个/kg[36]、洞庭湖403 个/kg[37]、雨山湖(278.9±529) 个/kg[34]等。如前述,杞麓湖表层沉积物中MPs丰度范围为50~680 个/kg,平均丰度157.66 个/kg。可见,相较于流域人口密度和经济发达程度较高地区的湖泊,杞麓湖MPs污染目前处于中低水平。

表1　部分湖泊沉积物中MPs的丰度及构成特征

湖泊	样品	丰度/(个·kg⁻¹)	形状	粒径/mm	颜色	文献
内蒙古(17个湖泊)	沉积物	128.29±77.63	纤维	>0.5	蓝色	[10]
鄱阳湖	沉积物	982.33	碎片	≤1	彩色	[14]
滇池	沉积物	330.48	纤维	1	透明	[17]
骆马湖	沉积物	513±201(夏) 528±236(冬)	纤维	0.06~0.5	透明	[28]
太湖	沉积物	11~234.6	纤维	0.1~0.1	透明	[34]
洞庭湖	沉积物	403	纤维	<0.5	透明	[35]
雨山湖、南湖	沉积物	278.9±529(春) 277.1±395.6(夏)	纤维	<1	透明	[36]
杞麓湖	沉积物	157.66	纤维	<1	透明	本研究

如前述,杞麓湖表层沉积物中MPs的形态、粒径和颜色构成未出现明显的规律性特征。是由于各地工农业生产和人民生活组织模式的差异,导致不同地区环境中MPs类型的差异[38]。如纤维状MPs的来源

较多，包括衣物、绳子、地毯和渔网等[39]。薄膜状MPs多源于塑料薄膜的分解，其中农用地膜是其主要来源之一[40]。工业生产和生活中的塑料废弃物裂解破碎后均可形成碎片状和颗粒状MPs[41]。因此，推测杞麓湖表层沉积物中纤维状MPs的来源为流域范围内城镇居民日常生活中衣物洗涤、渔具使用等。

粒径构成而言，在自然条件下，废弃的塑料制品在自然环境各理化作用下不断风化为尺寸更小的塑料颗粒或碎片，粒径越小的MPs越容易随降雨等进入支流河道后汇入湖泊，最终沉淀于沉积物中[42]。此外，杞麓湖地处云南高原，相较于长江中下游地区，紫外辐射强、日照时间长，MPs在多级风化条件下更易被分解为小尺寸的颗粒。杞麓湖表层沉积物中的MPs以<1 mm的小粒径颗粒为主，高原地区特殊的气象条件可能是影响MPs粒径构成的间接因素之一。此外，由于小粒径彩色的MPs与浮游动物具有相似性，进入环境后混淆生物的视觉，易被水生生物或鸟类误食，通过食物链向高等生物迁移，加剧了环境生态风险[43]。大量小粒径MPs的赋存，一定程度上加剧了杞麓湖潜在的生态风险。

造成MPs颜色的多样性是在生产塑料制品过程中常加入小粒径颜色分子的着色剂(<5 μm)[44]。同时，着色剂容易在老化过程中从树脂内部逐渐移至表面，形成新的污染物质。透明的渔网和钓鱼线是最常见的颜色之一，且大多数湖泊沉积物中透明色MPs占比均较高[45]。杞麓湖表层沉积物中MPs以透明色(51.01%)为主，与表1中其他湖泊沉积物中检出的颜色构成相一致。

麓湖表层沉积物中MPs丰度的空间分布呈现靠近农田、城镇、河流入湖口、污水集中排放等湖区高于其他湖区的特征，是人类活动、流域特征、湖泊环境等综合作用的结果。周边人类活动的类型和强度是影响微塑料分布特征重要因素之一，湖泊沉积物MPs丰度的分布与区域人类活动具有密切的相关性[30,46]。此外，由于MPs自身的性质(形状、密度和尺寸等)会影响其沉降速度和迁移能力，进而影响MPs的空间分布格局[30]。相较于重金属等污染物质，MPs均由人工合成分解转化而来，人类活动产生的MPs随雨水径流、风力搬运等进入河流，继而汇入下游水域。

3.2 微塑料与沉积物理化性质的关联性

MPs在环境中的产生、运移和归趋等过程均受各种自然条件及其自身理化性质的影响[47]，各类环境因子与湖泊中MPs的命运密切相关[48]，追溯MPs与环境因子之间的相互关系，是确定其来源的重要手段[49]。已有研究已证实，MPs污染状况与环境因子之间既存在正相关关系，亦存在不相关的情况。如流域气候(湿润、过渡或半干旱)与湖岸沉积中MPs浓度的差异无关[50]、与沉积物粒度之间无相关性[51]、与Chl-a浓度无明显的相关性[52]、与水体TP浓度、透明度、高锰酸钾指数等未达到显著相关水平[11]。水下地形(粗糙度、起伏度、坡度和坡向等)与水体中MPs的空间分布不相关[18]。长江中下游18个典型湖泊沉积物中MPs丰度与富营养化状态无关[53]。

Spearman相关分析表面，全湖36个样点MPs丰度、形态、粒径和颜色与沉积物TN、TP、OM、碳酸盐和粒度等各指标之间均无显著相关性(图7(a))，与内蒙古高原湖泊的研究结果一致。内蒙古高原湖泊水体MPs丰度与水体环境指标不具显著相关性；但分区域进行分析后发现微塑料丰度与Pb浓度、TOC、DO等参数之间显著的相关性，而沉积物中的MPs与沉积物理化性质则无相关性[10]。同理，将杞麓湖沉积物中MPs丰度大于200 个/kg的9个样点数据进行Spearman相关性分析后发现：沉积物TP浓度与透明色MPs，TP浓度与纤维状MPs，以及1~3 mm粒级范围的MPs与沉积物碳酸盐含量、d50径和粉砂占比均呈现出显著的正相关关系(P<0.05)(图7(b))。

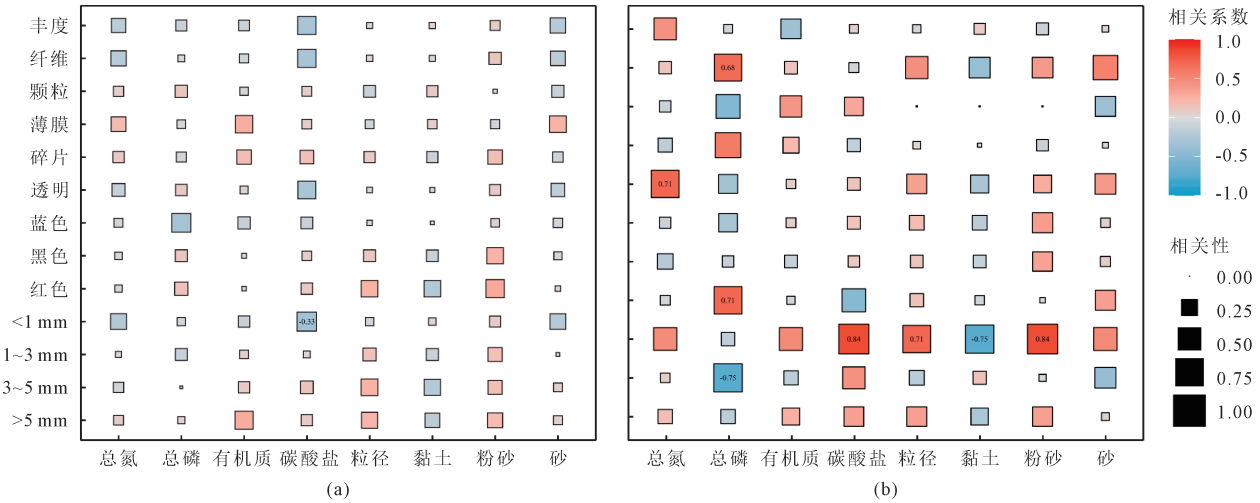


图7 MPs丰度及物理特征与沉积物部分理化指标之间的相关性特征

分析发现,因丰度大于200 个/kg的9个位点大多位于河流入湖口处、城镇和农田集中的区域,其中透明色、纤维状和小粒径的MPs是优势组分。其一,氮、磷(除湖泊自生部分外)等营养物质和粒径为1~3 mm的物质一部分为流域输入;其二,<1 mm的黏土组分多为大气粉尘的传输,该组分与MPs丰度无相关性。由此说明径流输入对杞麓湖沉积物中MPs赋存的主导性作用。如前述,滇池沉积物中MPs丰度的空间分布,亦呈现靠近河流入湖口处丰度高于其它湖区的格局[17]。综上可知,MPs丰度与环境因子之间的相关性,很大程度上受控于样点位置及其上游人类活动的方式及强度,而非某个环境参数本身。如北京市城市河流中的MPs整体上未呈现明显的空间分布特征,但MPs丰度与位点布设的间距具有一定的关联性[46]。

废弃的塑料颗粒在传输及扩散过程受各种复杂的自然环境因素的影响,导致不同地区和环境载体中MPs丰度、形貌特征和空间分布的差异性。从现有的研究结果来看,不同环境因子对MPs污染的影响未呈现出规律性特征,大多数环境因子的影响主要体现于MPs的运移、分化过程中,是一种间接影响。如乌梁素海冰盖中MPs丰度在垂直方向上与盐度呈显著正相关,是因为表层冰体中高浓度的MPs对盐分迁移的影响,导致盐分的累积[52]。香溪河表层水体和沉积物中MPs丰度与水体流速、河床底质均呈负相关,说明水体流速及河床底质的类型是影响沉积物中MPs分布的重要因素[10]。盐度变化改变了湖水的密度,进而影响MPs的沉降速率,盐的结晶也会影响MPs的沉降过程,导致盐湖沉积物中MPs丰度高于其它类型的湖泊[54]。综上,人类活动强度和方式决定了MPs污染的丰度、类型及空间分布特征;环境因子如常年盛行风、湖流等影响了MPs的运移和沉降的方向及速率;pH、化学离子等则参与在MPs的老化和降解等过程中,进而间接影响MPs在环境中的赋存特征。

4　结论

(1)杞麓湖表层沉积物中MPs检出率高达100%,丰度介于50~680 个/kg之间,平均丰度为157.66 个/kg。其中,优势组分MPs的物理构成特征为:纤维状(96.85%),粒径小于1 mm(65.09%),颜色以透明色为主(51.01%),其次为蓝色(38.7%)。

(2)受人类活动、入湖河流分布、土地利用类型、常年盛行风向等因素的综合影响,MPs丰度呈现出南部、东北部湖区最高,湖心区、西部湖区相对较低的空间分布格局。

(3)杞麓湖表层沉积物TN、TP、碳酸盐和粒度等理化性质与MPs丰度及物理构成特征之间无显著的关联性,MPs丰度大小受控于样点所处位置上游人类活动的强度;流域日常生活中的衣物洗涤、农用地膜及渔具的使用是MPs的潜在来源,主要通过径流输入达到湖泊。MPs的传输和运移受常年盛行风、湖流等环境因子的影响,进而改变MPs的赋存特征和空间分布格局。

[参考文献]

[1] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014,86(1/2):562−568.

[2] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011,62(8):1596−1605.

[3] 陈圣盛,李卫明,张坤,等. 香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析[J]. 环境科学, 2022,43(6):3077−3087.
Chen Shengsheng, Li Weiming, Zhang Kun, et al. Distribution characteristics of microplastics and their migration patterns in Xiangxi River Basin[J]. Environmental Science, 2022,43(6):3077−3087.

[4] 孙晓楠,陈浩,贾其隆,等. 我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估[J]. 环境科学, 2022,43(11):5040−5052.
Sun Xiaonan, Chen Hao, Jia Qilong, et al. Ecological risk assessment of microplastics occurring in surface water of terrestrial water systems across China[J]. Environmental Science, 2022,43(11):5040−5052.

[5] Zhang Z Y, Chen Y G. Current research and perspective of microplastics (MPs) in soils (dusts), rivers (lakes), and marine environments in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,202:110976.

[6] 王志鹏,陈蕾. 陆地水系中微塑料的研究进展[J]. 应用化工, 2019,48(3):677−680.
Wang Zhipeng, Chen Lei. Research progress of microplastics in land water system[J]. Applied Chemical Industry, 2019,48(3):677−680.

[7] 王艳平,徐伟伟,韩超,等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. 环境科学, 2021,42(2):699−711.
Wang Yanping, Xu Weiwei, Han Chao, et al. Distribution and pollution assessment of nitrogen and phosphorus in Chaohu Lake sediments[J]. Environmental Science, 2021,42(2):699−711.

[8] 田胜艳,张彤,宋春诤,等. 生物扰动对海洋沉积物中有机污染物环境行为的影响[J]. 天津科技大学学报, 2016,31(1):1−7.

[9] 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.

[10] 吴昊南. 内蒙古高原湖泊水体与沉积物中微塑料的赋存特

征研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2-9.

[11] 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 Haiying, Hou Lei, Liang Qibin, et al. Correlation between microplastics pollution and eutrophication in the near shore waters of Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2021,42(7):3166-3175.

[12] 董姝楠,夏继红,王为木,等. 典型水环境因素对聚酯微塑料沉降的影响机制研究[J]. 中国环境科学, 2021,41(2):735-742.
Dong Shunan, Xia Jihong, Wang Weimu, et al. Study on the influence mechanism of typical water environment factors on polyester microplastics sedimentation[J]. China Environmental Science, 2021,41(2):735-742.

[13] 李晨曦,高雨萱,张佳祺,等. 附着在不同微塑料表面的藻类结构与群落组成[J]. 中国环境科学, 2020,40(8):3360-3366.
Li Chenxi, Gao Yuxuan, Zhang Jiaqi, et al. Structure and community composition of algae attached to different microplastics surfaces[J]. China Environmental Science, 2020, 40(8):3360-3366.

[14] 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 Wenhua, Jian Minfei, Liu Shuli, et al. Relationship between microplastics and heavy metal pollutants in sediments from Hukou-Yangtze section of Poyang Lake[J]. Environmental Science, 2020,41(1):242-252.

[15] 刘亚菲. 滇池湖滨农田土壤中微塑料数量及分布研究[D]. 昆明:云南大学.
Liu Yafei. Quantity and Distribution of Microplastics in Farmland Soil of Lake Shore in Dianchi Lake[D]. Kunming: Yunnan University.

[16] 李大凤,邓春暖,张权,等. 滇池水体中纤维状微塑料的污染特征及其来源分析[J]. 湿地科学, 2022,20(4):529-536.
Li Dafeng, Deng Chunnuan, Zhang Quan, et al. Pollution characteristics and source analysis of fibrous microplastics in the water body of Dianchi Lake[J]. Wetland Science, 2022,20(4):529-536.

[17] 张浩. 滇池表层沉积物微塑料赋存特征及影响因素[D]. 昆明:云南师范大学.
Zhang Hao. Occurrence Characteristics and Influencing Factors of Microplastics in Surface Sediments of Dianchi Lake [D]. Kunming: Yunnan Normal University.

[18] Deng C N, Li D F, Li J, et al. Impacts of underwater topography on the distribution of microplastics in lakes: a case from Dianchi Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2022,837:155708.

[19] Sathish N, Jeyasanta K I, Patterson J. Abundance, characteristics and surface degradation features of microplastics in beach sediments of five coastal areas in Tamil Nadu, India [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019,142:112-118.

[20] Teng J, Zhao J M, Zhang C, et al. A systems analysis of microplastic pollution in Laizhou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2020,745:140815.

[21] 谷桂华. 云南杞麓湖流域降水蒸发特征及变化趋势分析[J]. 水利水电快报, 2019,40(1):14-17.
Gu Guihua. Analysis on characteristics and changing trend of precipitation evaporation in Qilu Lake basin, Yunnan Province[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019,40(1):14-17.

[22] 周瑜,张虎才,常凤琴,等. 杞麓湖水质参数季节性变化[J]. 地球科学前沿(汉斯), 2017(4):487-499.
Zhou Yu, Zhang Hucai, Chang Fengqin, et al. Seasonal variations of water quality parameters in Lake Qilu[J]. 1, 2017(4): 487-499.

[23] 李楠,常凤琴,张虎才,等. 近70年来云南杞麓湖流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录[J]. 云南师范大学学报:自然科学版, 2016,36(5):60-66.
Li Nan, Chang Fengqin, Zhang Hucai, et al. Lake sediment records on climate change and human activities in Qilu Lake catchment in Yunnan Province during the past 70 years[J]. Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition, 2016,36(5):60-66.

[24] 钱福明,张恺,陈光杰,等. 云南杞麓湖沉积物记录的近现代生态环境变化及影响因子识别[J]. 湖泊科学, 2018,30(4): 1109-1122.
Qian Fuming, Zhang Kai, Chen Guangjie, et al. Modern eco-environmental changes recorded by sediments in Qilu Lake, Yunnan Province and identification of influencing factors[J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(4):1109-1122.

[25] 李雪. 杞麓湖近年来水环境质量现状、成因及对策分析[J]. 环境科学导刊, 2020,39(4):5-10.
Li Xue. Analysis on the present situation, causes and countermeasures of water environment quality in Qilu Lake in recent years[J]. Environmental Science Survey, 2020,39(4): 5-10.

[26] Li D L, Chang F Q, Wen X Y, et al. Seasonal variations in water quality and algal blooming in hypereutrophic Lake Qilu of southwestern China[J]. Water, 2022,14(17):2611.

[27] 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 Xiaotong, Yi Jun, Qiang Liyuan, et al. Distribution and sedimentation characteristics of microplastics in surface sediments of tidal flat in the Yangtze River Estuary[J]. Environmental Science, 2018,39(5):2067-2074.

[28] 姚明轩,白雪,徐振佳,等. 骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储存量[J]. 环境科学, 2022,43(5):2566-2574.
Yao Mingxuan, Bai Xue, Xu Zhenjia, et al. Distribution, Source and Storage of microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2566-2574.

[29] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程-基本理论与常用测定方法[M]. 北京:科学出版社, 2014.

Wang Shengrui. Sediment-Water Interface Process of Lakes [M]. Beijing: Science Press, 2014.

[30] 门聪,李峘,左剑恶,等. 北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析[J]. 环境科学, 2022,43(7):3656-3663.
Men Cong, Li Di, Zuo Jian'e, et al. Spatial distribution and potential source analysis of microplastics composition in rivers in Tongzhou District, Beijing[J]. Environmental Science, 2022,43(7):3656-3663.

[31] 刘倡君,罗专溪,闫钰,等. 九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系[J]. 环境科学, 2022,43(1):239-246.
Liu Changjun, Luo Zhuanxi, Yan Yu, et al. Relationship between microplastics occurrence characteristics and heavy metals in surface sediments of mangrove wetland in Jiulongjiangkou[J]. Environmental Science, 2022,43(1):239-246.

[32] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2018,616/617:1620-1627.

[33] 赵昕,陈浩,贾其隆,等. 城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为[J]. 环境科学, 2020,41(8):3612-3620.
Zhao Xin, Chen Hao, Jia Qilong, et al. Pollution status and pollution behavior of microplastic in surface water and sediment of urban rivers[J]. Environmental Science, 2020,41(8):3612-3620.

[34] 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 Xuan, Niu Siping, Song Xiaolong, et al. Characterization of microplastic pollution of sediments from urban lakes [J]. Environmental Science, 2020,41(7):3240-3248.

[35] 赵伟高,田一梅,赵鹏,等. 淡水环境中微塑料与重金属的"木马效应"研究进展[J]. 环境科学, 2023,44(3):1244-1257.
Zhao Weigao, Tian Yimei, Zhao Peng, et al. Research progress on "trojan horse effect" of microplastics and heavy metals in freshwater environment[J]. Environmental Science, 2023,44(3):1244-1257.

[36] Su L, Xue Y G, Li L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2016,216:711-719.

[37] Yin L S, Wen X F, Du C Y, 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.

[38] 潘雄,林莉,张胜,等. 丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征[J]. 环境科学, 2021,42(3):1372-1379.

[39] Galvão A, Aleixo M, De Pablo H, et al. Microplastics in wastewater: microfiber emissions from common household laundry[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020,27(21):26643-26649.

[40] 郝爱红,赵保卫,张建,等. 土壤中微塑料污染现状及其生态风险研究进展[J]. 环境化学, 2021,40(4):1100-1111.

[41] Katare Y, Singh P, Sankhla M S, et al. Microplastics in aquatic environments: sources, ecotoxicity, detection & remediation[J]. Biointerface Research in Applied Chemistry, 2021,12(3):3407-3428.

[42] 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.

[43] Costa M F, Ivar do Sul J A, Silva-Cavalcanti J S, et al. On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline: a snapshot of a Brazilian beach[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010,168(1/2/3/4):299-304.

[44] Sahin S, Yayla P. Effects of testing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer[J]. Polymer Testing, 2005,24(5):613-619.

[45] Montarsolo A, Mossotti R, Patrucco A, et al. Study on the microplastics release from fishing nets[J]. The European Physical Journal Plus, 2018,133(11):494.

[46] 胡嘉敏,左剑恶,李峘,等. 北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布[J]. 环境科学, 2021,42(11):5275-5283.

[47] Cao L, Wu D, Liu P, et al. Occurrence, distribution and affecting factors of microplastics in agricultural soils along the lower reaches of Yangtze River, China[J]. Science of the Total Environment, 2021,794:148694.

[48] Alimi O S, Claveau-Mallet D, Kurusu R S, et al. Weathering pathways and protocols for environmentally relevant microplastics and nanoplastics: what are we missing?[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,423:126955.

[49] Yang L, Luo W, Zhao P, et al. Microplastics in the Koshi River, a remote alpine river crossing the Himalayas from China to Nepal[J]. Environmental Pollution, 2021, 290:118121.

[50] Santos Silva-Cavalcanti J, Silva J C P, de Andrade F M, et al. Microplastic pollution in sediments of tropical shallow lakes[J]. Science of the Total Environment, 2023, 855:158671.

[51] Alomar C, Estarellas F, Deudero S. Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size[J]. Marine Environmental Research, 2016,115:1-10.

[52] 王志超,杨建林,杨帆,等. 乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素*a*的响应关系[J]. 环境科学, 2021,42(2):673-680.

[53] Li L, Geng S X, Wu C X, 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.

[54] Sun Y R, Yuan J H, Zhou T, et al. Laboratory simulation of microplastics weathering and its adsorption behaviors in an aqueous environment: a systematic review[J]. Environmental Pollution, 2020,265:114864.