

乌梁素海水体微塑料空间分布规律及影响因素

郝若男¹,史小红^{1,2*},刘禹^{1,2},张帆¹(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室,内蒙古呼和浩特 010018)

摘要: 为了研究乌梁素海水体中微塑料的分布规律,通过试验方法探究了湖泊不同点位处,不同密度、不同大小、不同形状的微塑料丰度,分析微塑料自身属性(密度、形状、尺寸)对其空间分布的影响.结果表明,密度范围为小于 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$, $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料在湖泊不同采样点处的丰度范围分别为 $(109.5\pm 17.3)\sim(642\pm 160)\text{n}/\text{L}$, $(160.5\pm 57.3)\sim(588\pm 104)\text{n}/\text{L}$ 和 $(124.5\pm 47.5)\sim(502.5\pm 80.2)\text{n}/\text{L}$;其中密度小于 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料在湖泊中丰度呈现出由北到南逐渐增多的趋势,密度为 $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料丰度在湖泊中部多、南北部少, $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料呈现由北到南由多变少的趋势.尺寸为 $0.05\sim 0.5\text{mm}$, $0.5\sim 2\text{mm}$ 和 $2\sim 5\text{mm}$ 的微塑料在湖泊中丰度范围分别为 $(70.5\pm 8.8)\sim(805.5\pm 154.7)\text{n}/\text{L}$, $(178.5\pm 21.4)\sim(742.5\pm 112.3)\text{n}/\text{L}$ 和 $(0\pm 0)\sim(217.5\pm 22.8)\text{n}/\text{L}$;尺寸在 $0.05\sim 0.5\text{mm}$ 的微塑料丰度呈现由北到南递增的趋势,尺寸为 $0.5\sim 2\text{mm}$ 和 $2\sim 5\text{mm}$ 的微塑料丰度呈现由北到南递减的趋势.形状为纤维状、碎片状、薄膜状和块状微塑料在湖泊中丰度范围分别为 $(499.5\pm 92.3)\sim(1126.5\pm 228)\text{n}/\text{L}$, $(30\pm 4.8)\sim(151.5\pm 31.6)\text{n}/\text{L}$, $(4.5\pm 0.8)\sim(229.5\pm 61.6)\text{n}/\text{L}$ 和 $(1.5\pm 0.2)\sim(12\pm 3.9)\text{n}/\text{L}$;其中纤维状微塑料在各个采样点均占主导地位且分布均匀,碎片状、薄膜状和块状微塑料丰度较低,无明显规律.在拉曼光谱鉴定的所有微塑料中,聚丙烯(43%)是最常见的类型,其次是聚氯乙烯(18%)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(18%)、聚乙烯(11.7%)和聚苯乙烯(9.3%).

关键词: 微塑料; 乌梁素海; 空间分布规律; 影响因素; 拉曼光谱

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)07-3316-09

Spatial distribution and influencing factors of microplastics in water of Ulansuhai. HAO Ruo-nan¹, SHI Xiao-hong^{1,2*}, LIU Yu^{1,2}, ZHANG Fan¹ (1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Water Resources Protection and Utilization Key Laboratory, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China). *China Environmental Science*, 2022,42(7): 3316~3324

Abstract: In order to investigate the distribution of microplastics in the water body of Ulansuhai, different densities, sizes and shapes of microplastics at different locations of the lake were observed for abundance by test methods, and the effects of properties (density, shape and size) of the microplastics on the spatial distribution were analyzed at the same time. The results showed that the abundance ranges of microplastics at different sampling sites in the lake with density ranges less than $1.0\text{g}/\text{cm}^3$, $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ and $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ were $(109.5\pm 17.3)\sim(642\pm 160)\text{n}/\text{L}$, $(160.5\pm 57.3)\sim(588\pm 104)\text{n}/\text{L}$ and $(124.5\pm 47.5)\sim(502.5\pm 80.2)\text{n}/\text{L}$ respectively. For the microplastics with density less than $1.0\text{g}/\text{cm}^3$, the abundance in the lake increased gradually from north to south, for the microplastics with density $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$, the abundance in the middle of the lake was higher than in the north and south of the lake, and for the microplastics with density $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$, the abundance showed a decreasing trend from north to south. The abundance ranges of microplastics of sizes $0.05\sim 0.5\text{mm}$, $0.5\sim 2\text{mm}$ and $2\sim 5\text{mm}$ in the lake were $(70.5\pm 8.8)\sim(805.5\pm 154.7)\text{n}/\text{L}$, $(178.5\pm 21.4)\sim(742.5\pm 112.3)\text{n}/\text{L}$ and $0\sim(217.5\pm 22.8)\text{n}/\text{L}$ respectively. The abundance of microplastics of size $0.05\sim 0.5\text{mm}$ showed an increasing trend from north to south, and of sizes $0.5\sim 2\text{mm}$ and $2\sim 5\text{mm}$ showed a decreasing trend from north to south. The abundance ranges of fibrous, fragmentary, membranous and massive shapes of microplastics were $(499.5\pm 92.3)\sim(1126.5\pm 228)\text{n}/\text{L}$, $(30\pm 4.8)\sim(151.5\pm 31.6)\text{n}/\text{L}$, $(4.5\pm 0.8)\sim(229.5\pm 61.6)\text{n}/\text{L}$ and $(1.5\pm 0.2)\sim(12\pm 3.9)\text{n}/\text{L}$ respectively. The fibrous microplastics were dominant and evenly distributed at all sampling points, while the fragmentary, membranous and massive microplastics were of low abundance without obvious regularity. of all microplastics identified by Raman spectroscopy, polypropylene (43%) was the most common type, followed by polyvinyl chloride (18%), polyethylene terephthalate (18%), polyethylene (11.7%) and polystyrene (9.3%).

Key words: microplastics; Ulansuhai; spatial distribution; influence factors; Raman spectroscopy

近年来,微塑料污染成为全球范围的研究热点.微塑料是粒径小于 5mm 的塑料碎片,分为原生微塑料和次生微塑料.原生微塑料包括树脂颗粒、塑料微珠、纳米微塑料等;次生微塑料是大直径塑料碎片分解成的小直径塑料微粒^[1].由于微塑料来源广、粒径

小、易转移,在环境中存在时间长、光降解能力弱,

收稿日期: 2021-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909123);国家重点研发计划项目(2017YFE0114800,2019YFC0409204);内蒙古高等学校科学研究项目(NJZY19057)

* 责任作者, 教授, shixiaohong@imau.edu.cn

因此在水体、湖泊、水库和河流中广泛存在^[2]。

微塑料进入水环境中会造成一系列危害。在长期腐蚀、浸泡下,微塑料中的化学添加剂^[3-4]释放到水环境中,对水生动植物造成影响^[5];微塑料尺寸小、比表面积大、疏水性强,能吸附大量的污染物,是重金属和各类有机物的理想载体^[6];微塑料也容易被水体中的微生物和鱼类误食,影响其生长、消化等能力^[7-8]。因此,摸清微塑料在水环境中的存在特征,对于治理微塑料污染及动植物生长具有重要意义。

了解微塑料在湖泊的丰度和空间分布规律是解决湖泊微塑料污染的关键。一般而言,人类活动、降水、风速等因素^[9]是影响微塑料丰度和分布的主要原因。有研究表明,湖泊中微塑料的丰度与离城市中心的距离呈现负相关性,即距城市中心越远其丰度就越低^[10]。在北美五大湖,人口稠密的伊利湖水体微塑料丰度(466305n/km²)分别是人口稀疏的休伦湖(6541n/km²)和苏必利尔湖(12645n/km²)的 70 倍和 38 倍^[11]。在我国的温州瓯江口、台州椒江口、福州闽江口和太湖中均发现微塑料的踪迹,且指出流经城市的水体内微塑料丰度更高^[12],对于太湖研究的两片海域中,靠近人们生活区域的东南海域微塑料的平均丰度约为中部海域的 6 倍^[13],研究人员表示城市河口的经济结构、发展程度、人口密集活动程度与微塑料污染水平和分布相关^[12]。另外,在对瑞士淡水体系的研究中发现,降雨后城市河流中微塑料密度非常高。流入日内瓦湖的瑞士 Venoge 河和 Vauchère 河水中雨季微塑料密度分别是其旱季微塑料密度的 9 倍和 150 倍^[14]。风暴过后,加利福尼亚沿海的微塑料丰度显著增高;Tamar 河口下风向样点的微塑料含量远高于上风向样点^[15]。显然,靠近城市或人类聚集地且水力条件较为稳定的湖泊微塑料污染相对严重;降水和大风天气前后水体中微塑料丰度变化和分布状况差异明显。近年来,很多学者发现微塑料本身的性质(密度、尺寸和形状)也决定了其在水环境中的分布规律,Hoellein 等^[16]采用螺旋指标发现,碎片状微塑料迁移距离较短,而纤维和球状迁移距离较长。Isobe 等^[17]在日本濑户内海利用实地调查和数值颗粒追踪模型发现,不同尺寸微塑料输移距离受其粒径大小的决定,且越靠近海岸微塑料粒径越大、丰度也逐渐增加。诸如此类,越来越多的研究表明微塑料本身的性质直接影响其在水环境中的分布^[18-20]。本文在关注形状分类

的同时进一步耦合了密度、尺寸的不同,分析微塑料不同的自身属性对其空间分布的影响方式和差异性,对于微塑料在水环境中分布影响因素的探究具有一定意义。

乌梁素海是地球同纬度最大的湿地,也是全球荒漠化、半荒漠化地区极为少见的大型多功能浅水湖泊。该湖泊是河套灌区农田退水、生活污水以及工业废水的主要承泄场所^[21],而流域内地膜和各种塑料制品的大量使用势必使微塑料成为湖泊水环境中的新兴污染物。本文采用野外采集样本和室内浮选试验相结合的方法,全面调查乌梁素海不同形状、不同密度、不同尺寸微塑料的丰度和分布状况,为探究湖泊微塑料迁移、归趋和建模奠定基础,为修复湖泊微塑料污染修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(40°36'~41°03'N,108°43'~108°57'E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内。属于黄河流域的河迹湖,湖泊面积 366.08km²,水深为 1.6~2.7m,平均水深 1.9m。湖区东西束窄 3~5km、南北狭长 35~40km^[11],是极为少见的具有蓄水、防洪、水产养殖、航运、旅游娱乐以及调节气候等多功能为一体的湖泊^[22],在排灌系统中发挥着重要作用。

1.2 样品采集

根据我国水环境和湖泊湿地调查规范,考虑乌梁素海排污入湖口的分布和水动力学特征,设置样品采集点(如图 1 所示)。收集 9 个采样点样本,每个采样点 3 个平行水体样本均采用密度浮选方法、目视评估法和拉曼光谱仪确定微塑料的丰度、密度、形状、尺寸,进行记录并得出数据。

2020 年 8 月,采用 12V 直流聚四氟乙烯泵于水面下 20cm 处收集 2L 水样,然后将水样用 50 μm 的不锈钢筛过滤,将筛网上的样品用蒸馏水冲入 250mL 玻璃瓶中,将 5%的福尔马林溶液倒入其中,并在 4℃下保存待测^[23-24]。采样前无暴雨、大风等强烈天气。

本文探究了不同密度、尺寸和形状的微塑料在乌梁素海的分布规律。形状和尺寸通过体式显微镜直接鉴别,密度需要进行提前分离。乌梁素海不同密度微塑料主要类型为聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚

苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)^[25-26],密度分别为 $0.83\sim 0.85\text{g/cm}^3$, $0.91\sim 0.94\text{g/cm}^3$, 1.05 和 1.37g/cm^3 .因此,本研究共设置 3 个密度范围,分别为小于 1.0g/cm^3 、 $1.0\sim 1.2\text{g/cm}^3$ 、 $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$,实验利用改进的分步提取法获取不同密度范围的微塑料^[27].首先将收集到的水体滤过 300 目($50\mu\text{m}$)不锈钢筛,将钢筛上的物质用去离子水冲入 250mL 玻璃制溢流烧瓶中,平均 12h 进行一次溢流,溢流 3 次,将溢流出小于 1.0g/cm^3 的物质用去离子水收集到 250mL 玻璃制储存瓶中.将此溢流步骤重复三遍,充分筛选出密度小于 1.0g/cm^3 的物质,以减少实验误差.接下来将玻璃制溢流烧瓶中的物质过滤到 300 目不锈钢筛上,然后用密度 1.2g/cm^3 的 NaCl 溶液冲洗钢筛上的物质到溢流烧瓶中进行溢流,并将溢流出的 $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$ 的物质用去离子水收集到 250mL 玻璃制储存瓶中.最后,使用 1.5g/cm^3 的 HCOOK 溶液收集 $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$ 的微塑料,操作步骤同前.

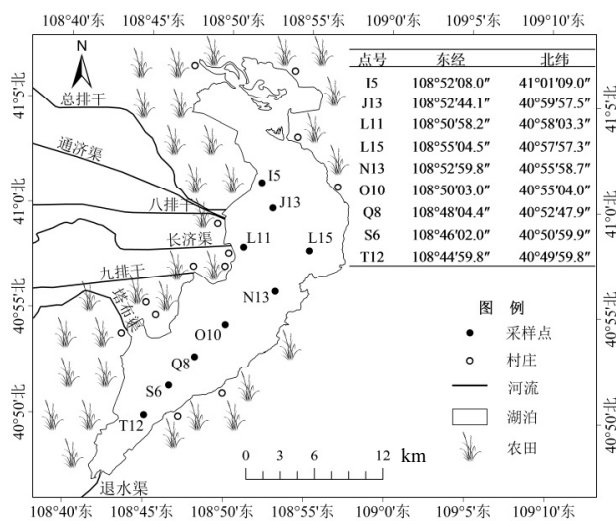


图 1 乌梁素海样品点分布示意

Fig.1 Sites of sampling

考虑到乌梁素海富营养化严重,因此将收集到不同密度的微塑料用过氧化氢(30%)在 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 、 80r/min 的水浴振荡培养箱中进行 24h 消解,去除腐殖质和有机物,减少后续观测微塑料的背景影响值.用抽滤装置将消解后的物质收集到 $0.45\mu\text{m}$ (GF/F, $47\text{mm } \varnothing$, Whatman)滤膜上,将滤膜放入玻璃培养皿中,在室温下风干待测.

1.3 微塑料的鉴定与分析

滤纸上的微塑料在体式显微镜(M165C, Leica, Germany)的徕卡 DMC2900 镜头下放大 160 倍进行目测,观测时基于目前通用的微塑料鉴别标准来确定疑似微塑料^[28],采用 Leica Application Suite X 软件计数,记录每个样品中每个微塑料的尺寸和形状.本文微塑料 3 个密度范围分别是: $<1.0\text{g/cm}^3$ 、 $1.0\sim 1.2\text{g/cm}^3$ 和 $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$;3 个尺寸范围分别是: $0.05\sim 0.5\text{mm}$ 、 $0.5\sim 2\text{mm}$ 、 $2\sim 5\text{mm}$;四种形状分别为:纤维、碎片、薄膜、块状;微塑料丰度的计算单位是每升水体中微塑料的数量.

为进一步验证视觉观测区分微塑料和其他颗粒物的准确性^[29],并确定微塑料占样本颗粒的比例、确定微塑料颗粒的成分,本文从样本中随机挑选 130 个颗粒物,利用显微激光共聚焦拉曼光谱仪(HR Evolution, HORIBA, France, 激光波长: 532nm , 光谱扫描范围: $50\sim 4000\text{cm}^{-1}$)对样品进行定性和定量检测.将样品谱图与拉曼数据库 Biorad (Knowitall) (涵盖 18 大类物质,超 28000 张光谱)进行对比,确定颗粒的化学组分.当两个谱图的匹配率大于 70%时,确定为化合物类型.最后去除非微塑料颗粒,重新计算每个样品中微塑料数量,统计微塑料的成分和对应微塑料的颗粒数量.

1.4 质量控制与确认

为保证微塑料从采集、处理和分析过程中不受外界污染,每次实验前用超纯水清洗 3 遍采样和实验仪器,并使用酒精擦拭实验台和体式显微镜,实验过程中每一步后都利用铝箔纸覆盖表面.操作全过程中全程穿着棉质实验服、禁止使用塑料制品容器.

实验时进行全程空白分析,用于检查样品从运输到分析全过程是否受到污染.采样时,将三个装有 1L 超纯水的玻璃瓶敞口摆放在船上,样品采集后,盖上瓶盖送回实验室检测,按与样品相同的操作步骤进行试验,结果发现空白中微塑料含量为 $0\sim(0.69\pm 0.29)\text{n/L}$,表明野外和室内实验过程中受到的污染可以忽略不计.

2 结果与分析

2.1 微塑料的形态特征

2.1.1 不同密度微塑料的丰度与分布 如图 2 所示,密度范围 $<1.0\text{g/cm}^3$ 、 $1.0\sim 1.2\text{g/cm}^3$ 和 $1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$ 的微塑料在各个采样点的丰度变化范围分别为

(109.5±17.3)~(642±160)n/L,(160.5±57.3)~(588±104) n/L,和(124.5±47.5)~(502.5±80.2) n/L,在各点的比例范围是 14.15%~52.45%,15.19%~58.59%,17.28%~48.78%.总体来看,密度范围为 1.0~1.2g/cm³ 的微塑料丰度在各个采样点丰度较高,<1.0g/cm³ 次之,1.2~1.5g/cm³ 的微塑料丰度最少。

不同密度微塑料在湖泊中的空间分布规律有明显差异.密度范围<1.0g/cm³ 的微塑料在采样点 S6 丰度最大,其丰度为(642±160)n/L;1.0~1.2g/cm³ 的微塑料在采样点 N13 最大,其丰度值为(588±104)n/L;密度介于 1.2~1.5g/cm³ 的微塑料在采样点 L11 丰度值最大,其值为(502.5±80.2) n/L.

总体来看,密度范围小于 1.0g/cm³ 的微塑料在乌梁素海各采样点的丰度呈现由北到南逐渐增多的趋势;密度范围为 1.0~1.2g/cm³ 的微塑料在湖泊中的丰度呈现南部、北部相对较低而中部相对较高;密度范围为 1.2~1.5g/cm³ 的微塑料在湖泊中的丰度呈现由北向南降低的趋势。

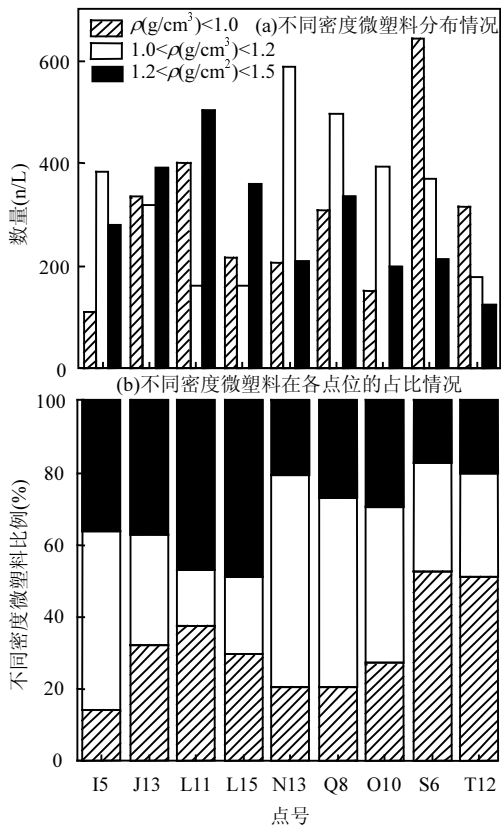


图2 不同密度微塑料的分布和占比情况

Fig.2 Distribution of microplastics with different densities

2.1.2 不同尺寸微塑料的丰度与分布 如图 3 表示,尺寸范围为 0.05~0.5mm、0.5~2mm 和 2~5mm 的

微塑料在各个采样点的丰度变化范围分别为 (70.5±8.8)~(805.5±154.7)n/L,(178.5±21.4)~(742.5±12.3)n/L,和(0±0)~(217.5±22.8)n/L,在各点的占比范围是 9.11%~71.26%,28.74%~76.94%,0.00%~20.39%.总体来看,尺寸范围为 0.5~2mm 的微塑料在各个点位的占比较大,0.05~0.5mm 次之,介于 2~5mm 的微塑料丰度最小。

从空间分布来看,最小尺寸范围(0.05~0.5mm)的微塑料在采样点 S6,O10,N13 丰度最高,其丰度分别为(805.5±154.7)、(627±155.5)、(514.5±86.6) n/L;尺寸范围为 0.5~2mm 的微塑料在采样点 L11、J13 和 I5 丰度最高,其丰度分别为(742.5±112.3)、(715.5±92)和(595.5±64.5) n/L;尺寸范围在 2~5mm 的微塑料颗粒同样在湖区北部采样点 L11、J13 和 I5 丰度最高,其丰度分别为(217.5±22.8)、(141±11.6)和(108±10.6) n/L.

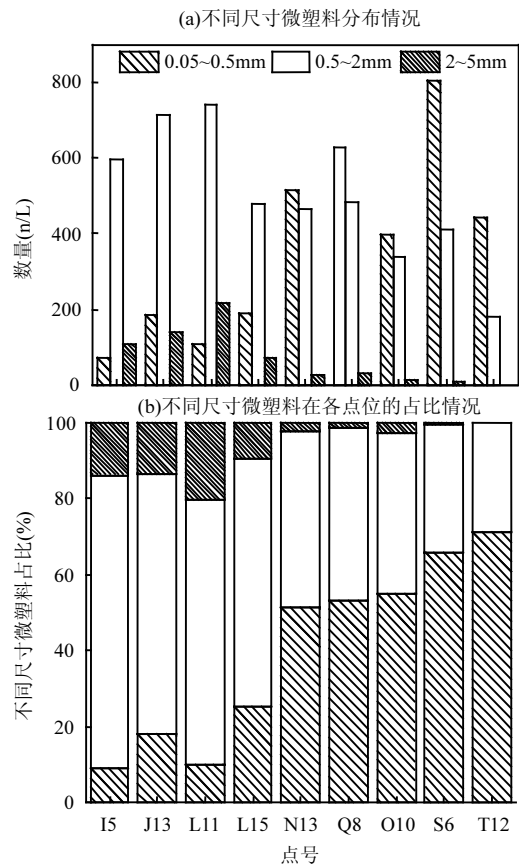


图3 不同尺寸微塑料的分布和情况占比

Fig.3 Distribution of microplastics with different sizes

总体来看,最小尺寸的微塑料丰度在湖泊中呈现由北到南增加趋势,尺寸为 0.5~2mm 和 2~5mm 微

塑料的丰度在乌梁素海湖区总体上都呈现出由北到南逐渐减少的趋势。

2.1.3 不同形状微塑料的丰度与分布 如图 4 所示,纤维状、碎片状、薄膜状、块状的微塑料在各个采样点的丰度变化范围分别为 $(499.5 \pm 92.3) \sim (1126.5 \pm 228) \text{ n/L}$, $(30 \pm 4.8) \sim (151.5 \pm 31.6) \text{ n/L}$, $(4.5 \pm 0.8) \sim (229.5 \pm 61.6) \text{ n/L}$ 和 $(1.5 \pm 0.2) \sim (12 \pm 3.9) \text{ n/L}$,在各点的占比范围分别是 66.23%~95.16%,3.88%~17.63%,0.49%~20.11%,0.39%~1.15%。总体来看,纤维状微塑料丰度在各个点的占比较大,碎片状和薄膜状次之,块状微塑料的丰度最少。

从空间分布来看,纤维状微塑料在 S6 和 L11 采样点的丰度最高,分别达到 (1126.5 ± 228) 和 $(1008 \pm 228.8) \text{ n/L}$;碎片状微塑料在采样点 O10、Q8 的丰度最高,分别为 (151.5 ± 31.6) 和 $(114 \pm 26.1) \text{ n/L}$;薄膜状微塑料在采样点 O10 丰度较高,其值为 $(229.5 \pm 61.6) \text{ n/L}$;相比以上所述微塑料形状丰度,块状微塑料丰度极少,其在入湖口附近 J13 采样点丰度较高,其值为 $(12 \pm 3.9) \text{ n/L}$ 。

总体来看,纤维状是湖泊微塑料的主要污染类型,且在湖区北部的入湖口和景区区域附近水域的纤维状微塑料丰度较高;碎片、薄膜、块状的微塑料在全湖含量相对较少。

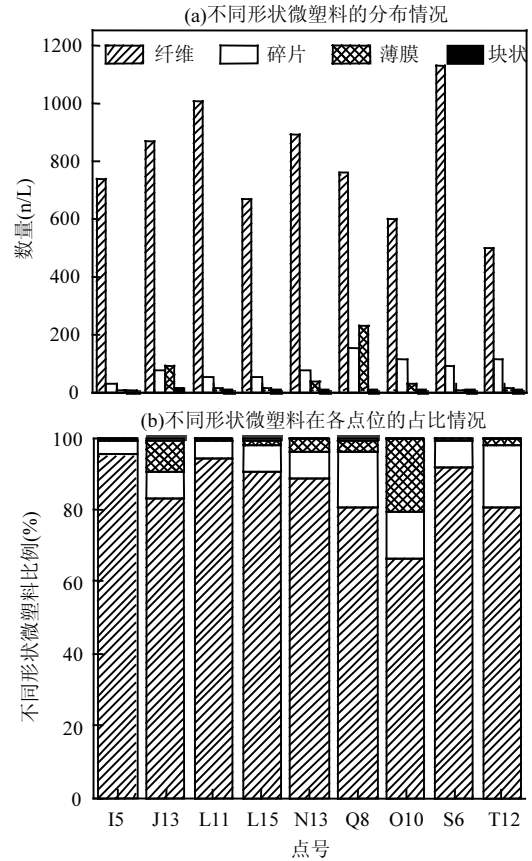
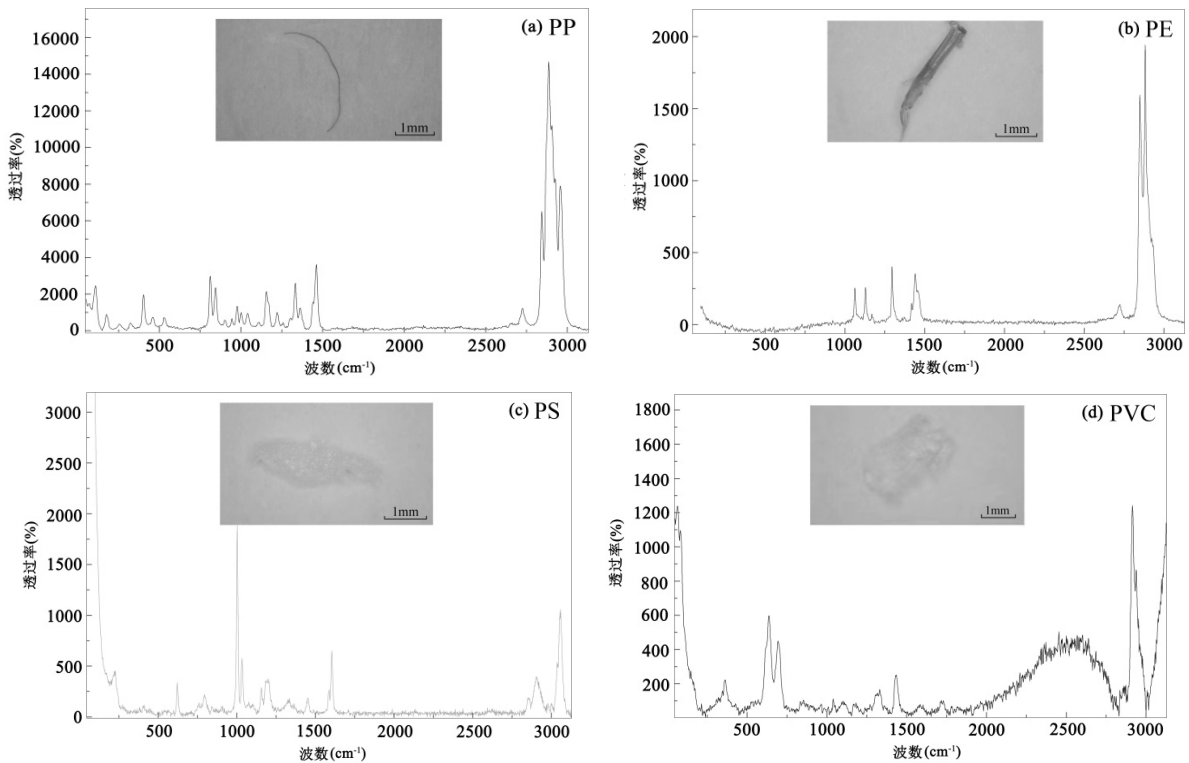


图 4 不同形状微塑料的分布和占比情况

Fig.4 Distribution of microplastics with different shapes

2.2 拉曼光谱检测



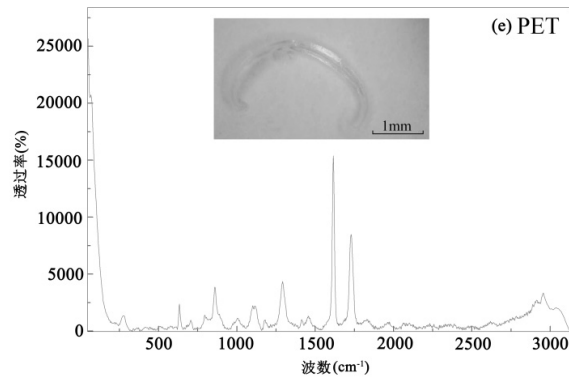


图5 不同种类微塑料的拉曼光谱

Fig.5 Raman spectra of different types of microplastics

拉曼光谱检测在鉴定微塑料化学结构方面具有极高的准确率,因此被广泛应用于水体和沉积物样本中微塑料定性、定量分析^[30-32].本文采用拉曼光谱对疑似微塑料的颗粒物进行鉴定分析.结果显示,130个样本颗粒中,128个被鉴定为微塑料,包括聚丙烯(PP,43%,图5(a))、聚乙烯(PE,11.7%,图5(b))、聚苯乙烯(PS,9.3%,图5(c))、聚氯乙烯(PVC,18%,图5(d))和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET,18%,图5(e)),5种不同材质微塑料的典型拉曼光谱图如图5所示.测定结果表明,收集的颗粒物中98.5%为微塑料,说明本实验所采用的收集、分离和人工鉴定方法比较可靠.

3 讨论

目前有关微塑料的研究大多是从人类活动和气候角度分析其存在、分布影响,最近有不少学者通过实验和模型发现微塑料自身性质也是影响其在湖泊中丰度和分布的关键因素^[16-20].本文考虑不同密度、尺寸、形状的微塑料自身性质在水环境中影响微塑料丰度和分布分析是研究微塑料的重要内容.

3.1 不同密度微塑料分布规律

研究表明,在湖泊各个采样点,不同密度微塑料所占比例相差较小.从拉曼光谱检测结果来看,密度范围 $<1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料的主要成分是聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP).乌梁素海每年接纳河套灌区90%以上的农田退水,同时灌区内成分为PE的地膜使用比较普遍,由于地膜密度小、厚度薄,易破碎分裂,因此相当一部分会随农田退水进入湖泊^[33].湖泊中密度范围为 $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料的成分为聚苯乙烯

(PS),其主要来源为湖泊渔业中产生的塑料单丝线和尼龙制网^[34],通过排干进入湖泊的生活污水中的塑料纤维^[35],以及景区游客随意丢弃的一次性塑料餐具.湖泊中密度范围为 $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料成分为聚氯乙烯(PVC)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),主要来源可能是居民及游客的日用品、包装膜、可乐瓶、矿泉水瓶等^[36-37].

从不同密度微塑料在湖泊中的分布来看,密度 $<1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料在湖泊南部丰度较高,密度范围为 $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料在湖泊中部丰度较高, $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料在湖泊北部丰度较高.乌梁素海的主要输入排干为总排干和八排干,其入湖水量占湖泊总入湖水量的90%~95%,位于湖泊入湖口附近,湖泊中水流方向总体从北向南流动.调查结果说明密度 $<1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料更容易随水流进行输移,而密度为 $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料进入湖泊后则更容易滞留,且密度越大,输移距离越短.在太湖、鄱阳湖的水体中主要的微塑料成分是PE、PP,由于它们密度小于水,多数悬浮在水体上部,易被水输送,使两种聚合物广泛分布^[13,38].鄱阳湖微塑料来自洗衣废水和渔业活动的密度较大的尼龙、PVC聚合物,在其活动就近的沉积物区域内集中^[38];在太湖沉积物中PS、PET是主要的塑料类型,同时指出湖泊沉积物中微塑料污染水平与离污染源的距离关系更密切^[13].上述研究结果与本文研究结果一致,说明在湖泊中密度较大的微塑料迁移距离较短,而密度较小的微塑料迁移距离较长,微塑料的密度与其迁移距离成反比.

3.2 不同尺寸微塑料分布规律

研究结果显示,不同尺寸微塑料所占比例相差

较大,介于0.05~2mm的微塑料丰度最大,2~5mm微塑料的丰度最小。塑料颗粒进入湖泊水体初期,体积较大、表面光滑,没有风化、侵蚀的痕迹,随着时间的推移及降解作用^[1,39]使塑料材质变脆^[27],趋于碎片化^[39],与原始塑料颗粒相比,经过降解的塑料颗粒尺寸逐渐变小。使进入湖泊的塑料颗粒随着水流运动的过程中,0.05~0.5mm小尺寸塑料颗粒的丰度变多,0.5~2mm和2~5mm大尺寸塑料颗粒的丰度变少。

从不同尺寸微塑料在湖泊中的空间分布来看,0.05~0.5mm的小尺寸微塑料丰度北部少、南部多;相反,0.5~2mm和2~5mm尺寸较大的微塑料丰度在乌梁素海北部多、南部少。密度大于水的微塑料会在重力和水动力作用下在水体中发生垂向混合。根据斯托克斯沉降定律,物质的沉降速度与粒径成正比^[40]。因此对于湖泊中密度大于水的微塑料而言,当其尺寸较大时,沉降速度较快,更容易滞留在入水口附近,不易随水流输移。而尺寸较小时,沉降速度相对较慢,不易滞留,更容易随水流向湖泊南部输移。此外,湖泊中多半微塑料密度虽然小于水,但在水环境的长期作用下,其表面因出现许多裂纹、孔隙^[10,41-42]而变得粗糙、凹凸不平,会吸附藻类、泥沙等物质^[1,14]。尺寸较大的微塑料容易吸附更多的杂质,当其整体密度大于水后,也容易滞留在湖泊入水口附近,不易向远处输移。因此总体来看,湖泊北部大尺寸微塑料相对较多,而湖泊南部小尺寸微塑料较多。有学者也探究了不同尺寸微塑料在河流和水槽中的迁移分布规律,如Besseling等^[43]研究模拟了25种粒径的微塑料在Dommel河中的迁移实验,结果表明,微塑料粒径越大越容易较早的在河流上游发生沉降,不易在水体表面迁移;而小尺寸微塑料容易受外界条件的影响随水流进行输移。Kowalski等^[44]则采用不同矿化度的流体对不同的聚合物颗粒进行了下沉实验,实验显示,微塑料的沉降速度随粒径的增大而增大。这说明无论是在湖泊还是河流中,微塑料尺寸越大其迁移能力就越弱,尺寸越小迁移能力就越强,微塑料的尺寸与迁移距离呈反比。

3.3 不同形状微塑料分布规律

调查研究显示,不同形状微塑料所占比例相差较大。其中纤维状微塑料在各采样点占比都比较高,丰度范围在(499.5±92.3)~(1126.5±228)n/L,是最常见的类型。碎片状、薄膜状、块状微塑料丰度较少。从

不同形状微塑料在湖泊中的分布来看,纤维状微塑料在乌梁素海较为均匀,其大多来源于洗涤衣物的污水、捕鱼渔具和景区游客对塑料制品的消耗。Browne等^[45]统计发现,一件衣服每次洗涤至少可以脱落1900个纤维,且水体中纤维状微塑料主要来源于洗涤衣物的污水。随着乌梁素海渔业和旅游业的发展,渔民使用的渔具几乎都是塑料制品,捕鱼过程中不可避免地造成渔具发生丢失,破损的渔网、钓鱼线等进入水体,甚至被随意丢弃在湖里的情况^[46],丢失或丢弃的渔具通常呈纤维状的塑料单丝线和尼龙网^[23-24]。同时,位于景区附近的区域因为受到外来游客带来的塑料制品压力,导致此处湖泊塑料纤维尤其多,增加了乌梁素海微塑料污染。

乌梁素海由于渔民捕鱼活动频繁且涉猎范围遍布湖区,是造成大量纤维状微塑料进入湖泊后分布广泛的原因之一。太湖、鄱阳湖、洞庭湖水体中分布范围较大的形态同样是由生活污水和繁忙的渔业活动导致的纤维素状微塑料^[13,28,38]。Hoellein等^[47]对河流中的三种微塑料(纤维、碎片、颗粒)进行了水体滞留量的实验,试验表明,纤维状微塑料长而细的形态特点使其更倾向于在水体表面迁移、扩散。另有Khatmullina等^[48]研究模拟了600个不同形状微塑料的沉降实验,结果显示,纤维状微塑料在水体内旋转、翻滚、弯曲、缠绕,造成的曲率对纤维下沉造成很大的阻力影响,这种沉降不稳定性也意味着更大的阻力和更低的沉降速度^[49-50]。因此纤维状微塑料在进入湖泊后容易发生迁移,分布比较均匀。

微塑料在湖泊中的分布规律是多种因素共同作用的结果。本文探究了人类、环境因素以及微塑料自身属性(密度、尺寸以及形状)对其在乌梁素海水体中分布的影响。但环境因素发生改变时,如在冰封期,水生植物枯萎、繁盛期,微塑料在湖泊中的分布必然受到影响。不同类型微塑料在冰-水间迁移规律,各种水生动植物对微塑料的影响研究有待开展,从而深入了解湖泊中微塑料的分布规律和影响因素。

4 结论

4.1 在乌梁素海表层水体中,各个采样点都存在大量微塑料,其中在湖泊入湖口、排干附近和景区周围采样点,微塑料丰度值较高。说明湖泊中微塑料主要有3个来源:一是上游居民生活污水、农田退水、工

业废水等通过入湖口和排干进入湖泊,二是湖泊中下游景区游客丢弃的塑料制品,三是大面积捕鱼过程中丢失或丢弃的渔具。

4.2 对于不同密度的微塑料,密度 $<1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料丰度呈现由北到南逐渐增多的趋势,密度为 $1.0\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料丰度在湖泊中部多、南北两端少,而 $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料呈现由北到南减少趋势。说明密度 $<1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料更容易随水流进行迁移,其迁移距离远、且不容易发生沉降;而密度相对较高的 $1.2\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的微塑料更容易在水体中发生滞留或沉降,密度越大的微塑料迁移距离越短,即微塑料的密度与其迁移距离成反比。

4.3 对于不同尺寸的微塑料,介于 $0.05\sim 0.5\text{mm}$ 的微塑料丰度在湖泊中呈现由北到南递增的趋势, $0.5\sim 2$ 和 $2\sim 5\text{mm}$ 的微塑料丰度呈现由北到南递减的趋势。说明小尺寸微塑料更容易随水流迁移、迁移距离远且不易沉降;而大尺寸微塑料更容易发生沉降,迁移距离短,或在输移过程中破碎为小尺寸微塑料后继续向南迁移和积累,即微塑料的尺寸与迁移距离成反比。

4.4 对于不同形状的微塑料,在各个采样点都发现大量纤维状微塑料,而且它们在湖泊入湖口和景区的丰度更大,碎片状、薄膜状和块状的微塑料丰度则很小。说明纤维状微塑料除了由于湖泊入湖口和景区特殊位置的影响外,它们更容易随水流迁移、迁移距离较长,分布广泛。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王文锋.华中地区湖泊微塑料污染特征及其与菲、芘的吸附行为研究 [D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2018.
Wang W F. Pollution characteristics of microplastics and their adsorption behavior with phenanthrene and pyrene in lakes of Central China [D]. Wuhan: Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [3] Boyle D, Catarino A I, Clark N J, et al. Polyvinyl chloride (PVC) plastic fragments release Pb additives that are bioavailable in zebrafish [J]. *Environmental Pollution*, 2020,263:114422.
- [4] Hermabessiere L, Dehaut A, Paul-Pont I, et al. Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: a review [J]. *Chemosphere*, 2017,182:781-793.
- [5] Lithner D, Larsson Å, Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition [J]. *Science of the Total Environment*, 2011,409(18): 3309-3324.
- [6] 李丹文,林莉,潘雄,等.淡水环境中微塑料采样及预处理方法研究进展 [J]. *长江科学院院报*, 2021,38(7):14.
Li D W, Lin L, Pan X, et al. Advances in sampling and pretreatment of microplastics in freshwater Environment [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021,38(7):14.
- [7] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat [J]. *Environmental Research*, 2008,108(2): 131-139.
- [8] Rochman C M, Kurobe T, Flores I, et al. Early warning signs of endocrine disruption in adult fish from the ingestion of polyethylene with and without sorbed chemical pollutants from the marine environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,493:656-661.
- [9] 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.
- [10] Blaga A. Durability of building materials and compounds [J]. *ASTM STP*, 1980,691:827-837.
- [11] 全栋,张生,史小红,等.环境因子对乌梁素海水体营养状态的影响:基于2013~2018年监测数据的分析 [J]. *湖泊科学*, 2020,32(6): 1610-1619.
Quan D, Zhang S, Shi X H, et al. Effects of environmental factors on nutrient status of wuliangin seawater: Analysis based on monitoring data from 2013 to 2018 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020,32(6): 1610-1619.
- [12] Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic in three urban estuaries, China [J]. *Environmental Pollution*, 2015,206:597-604.
- [13] Su L, Xue Y, Li L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016,216:711-719.
- [14] Thompson R C, Swan S H, Moore C J, et al. Our plastic age [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009,364(1526):1973-1976.
- [15] Browne M A, Galloway R S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,44(9):3404-3409.
- [16] Hoellein T J, Shogren A J, Tank J L, et al. Microplastic deposition velocity in streams follows patterns for naturally occurring allochthonous particles [J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1):1-11.
- [17] Isobe A, Kubo K, Tamura Y, et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014,89(1/2):324-330.
- [18] Derraik J G B. The pollution of the marine environment by plastic debris: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002,44(9):842-852.
- [19] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009,364(1526):1985-1998.
- [20] Claessens M, De Meester S, Van Landuyt L, et al. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(10):2199-2204.
- [21] 段晓男,王效科,欧阳志云.乌梁素海湿地生态系统服务功能及价值评估 [J]. *资源科学*, 2005,27(2):110-115.

- Duan X N, Wang X K, Ouyang Z Y. Evaluation of wetland ecosystem service function and value in Wuliangshuai wetland [J]. *Resources Science*, 2005,27(2):110-115.
- [22] 李建茹. 内蒙古乌梁素海浮游植物群落特征及生态模拟研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- Li J R. Characteristics and ecological simulation of phytoplankton community in Wuliangshuai, Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [23] Timmers M A, Kistner C A, Donohue M J. Marine debris of the Northwestern Hawaiian Islands: Ghost net identification [R]. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Sea Grant College Program, 2005.
- [24] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,586:127-141.
- [25] Wang Z, Qin Y, Li W, et al. Microplastic contamination in freshwater: first observation in lake ulansuhai, yellow river basin, China [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019,17(4):1821-1830.
- [26] 王志超, 杨帆, 杨文焕, 等. 内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 [J]. *环境科学*, 2020,41(10):4590-4598.
- Wang Z C, Yang F, Yang W H, et al. Occurrence characteristics and quality estimation of microplastics in drainage ditches in Hetao Irrigation Area, Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 2020,41(10):4590-4598.
- [27] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(8):1596-1605.
- [28] 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.
- [29] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013,77(1/2):177-182.
- [30] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,46(6):3060-3075.
- [31] Murray F, Cowie P R. Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(6):1207-1217.
- [32] Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic in three urban estuaries, China [J]. *Environmental Pollution*, 2015,206:597-604.
- [33] 何文清, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(3):533-538.
- He W Q, Yan C R, Zhao C X, et al. Current situation and prevention of plastic film pollution in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009,28(3):533-538.
- [34] Bullimore B A, Newman P B, Kaiser M J, et al. A study of catches in a fleet of "ghost-fishing" pots [J]. *Fishery Bulletin*, 2001,99(2):247-247.
- [35] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions [J]. *Environment International*, 2017, 102:165-176.
- [36] Santini A, Tenore G C, Novellino E. Nutraceuticals: A paradigm of proactive medicine [J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2017,96:53-61.
- [37] Dhavalikar R, Yamaguchi M, Xanthos M. Molecular and structural analysis of a triepoxide-modified poly (ethylene terephthalate) from rheological data [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2003,41(7):958-969.
- [38] 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.
- [39] Browne M A, Galloway T, Thompson R. Microplastic—an emerging contaminant of potential concern? [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management: An International Journal*, 2007, 3(4):559-561.
- [40] Onink V, Wichmann D, Delandmeter P, et al. The role of Ekman currents, geostrophy, and stokes drift in the accumulation of floating microplastic [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(3):1474-1490.
- [41] Qayyum M M, White J R. Effect of stabilizers on failure mechanisms in weathered polypropylene [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1993,41(2):163-172.
- [42] Blaga A, Yamasaki R S. Surface microcracking induced by weathering of polycarbonate sheet [J]. *Journal of Materials Science*, 1976,11(8): 1513-1520.
- [43] Besseling E, Quik J T K, Sun M, et al. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study [J]. *Environmental Pollution*, 2017,220:540-548.
- [44] Kowalski N, Reichardt A M, Waniek J J. Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,109(1):310-319.
- [45] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011,45(21):9175-9179.
- [46] Watson R, Revenga C, Kura Y. Fishing gear associated with global marine catches: I. Database development [J]. *Fisheries Research*, 2006,79(1/2):97-102.
- [47] Hoellein T J, Shogren A J, Tank J L, et al. Microplastic deposition velocity in streams follows patterns for naturally occurring allochthonous particles [J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1):1-11.
- [48] Khatmullina L, Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,114(2):871-880.
- [49] Dietrich W E. Settling velocity of natural particles [J]. *Water Resources Research*, 1982,18(6):1615-1626.
- [50] Hazzab A, Terfous A, Ghennaim A. Measurement and modeling of the settling velocity of isometric particles [J]. *Powder Technology*, 2008, 184(1):105-113.

作者简介: 郝若男(1995-),女,内蒙古包头人,内蒙古农业大学硕士研究生,主要研究水环境中微塑料的迁移规律.发表论文1篇.