

# 包头市昆都仑水库中微塑料的污染特征及生态风险评估

边博浩<sup>1</sup>, 钱亚茹<sup>2</sup>, 于秋颖<sup>3</sup>, 高艳荣<sup>1,4</sup>, 吉日豪<sup>1</sup>, 戈娜<sup>1,4</sup>, 陈建芳<sup>1</sup>, 贾玉巧<sup>1,4</sup>

1. 包头医学院, 内蒙古 包头 014060; 2. 乌兰察布市疾病预防控制中心;

3. 内蒙古自治区环境监测总站包头分站; 4. 包头医学院营养与食品健康研究所, 内蒙古 包头 014060

**摘要:**目的 探讨包头市昆都仑水库中微塑料的污染特征及生态风险。方法 在昆都仑水库表层水、沉积物和周围土壤中各采集 3 个环境样本, 经消解、密度浮选、二次消解和浓缩 4 个步骤提取出微塑料后, 使用 Clarity 软件控制的 LDIR 8700 反射模式检测微塑料的丰度、聚合物类型、粒径和形状等特征, 使用风险指数(H)和污染负荷指数法(PLI)进行生态风险评估。结果 表层水、沉积物和周围土壤中微塑料平均丰度分别为(210.83 ± 50.1) n/L、(9 633.33 ± 1 955.33) n/kg 和(10 633.33 ± 896.29) n/kg。在表层水中, 微塑料聚合物类型以聚丙烯(PP)为主, 粒径在 0 ~ 30 μm 的微塑料占比最大, 形状是以薄膜状为主。在沉积物中, 聚合物类型以聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为主, 0 ~ 30 μm 大小和薄膜状微塑料占主要地位。在周边土壤中, 聚合物类型同样以 PBS 为主, 微塑料粒径与形状则是与沉积物中的相同。基于微塑料聚合物类型的 H 显示各采样点微塑料 H 指数范围在 1.22 ~ 9 111.44, 风险等级涵盖 I ~ IV 级, 表层水中风险等级普遍偏高, 沉积物和周围土壤中风险等级略低; 而基于微塑料污染丰度的污染负荷指数(PLI)显示各采样点微塑料 PLI 指数范围为 1 ~ 1.273 3, 其平均微塑料 PLI 指数为 1.099 5, 三种环境介质中总体呈现轻微污染状态。结论 昆都仑水库 3 种环境介质中微塑料丰度较高、来源广泛且以小粒径为主, 总体风险指数偏高, 污染负荷较低。

**关键词:**昆都仑水库; 微塑料; 污染特征; 生态风险评估

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)07-1199-07

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202312446

## Pollution characteristics and ecological risk assessment of microplastics in Kundulun reservoir in Baotou city

BIAN Bo-hao\*, QIAN Ya-ru, YU Qiu-ying, GAO Yan-rong, JI Ri-hao, GE Na, CHEN Jian-fang, JIA Yu-qiao

\*Baotou Medical College, Baotou, Inner Mongolia 014060, China

**Abstract: Objective** To explore the pollution characteristics and ecological risk of microplastics in Kundulun Reservoir in Baotou city. **Methods** Three environmental samples were collected from the surface water, sediment, and surrounding soil of Kundulun Reservoir. After four steps of digestion, density flotation, secondary digestion and concentration, the microplastics were extracted. The abundance, polymer type, particle size, and shape of microplastics were detected by LDIR8700 reflection model controlled by Clarity software, and the ecological risk was assessed by risk index (H) and pollution load index (PLI). **Results** The average abundance of microplastics in surface water, sediment, and surrounding soil was (210.83±50.1) n/L, (9 633.33±1 955.33) n/kg, and (10 633.33±896.29) n/kg, respectively. In the surface water, the main type of microplastic polymer was polypropylene (PP), the microplastic with the particle size of 0 to 30 μm accounted for the largest proportion, and the shape was mainly in the form of film. In sediments, polybutylene succinate (PBS) was the main type of polymer, and the size of 0 to 30 μm and film-like microplastics were the main types. In the surrounding soil, the main type of polymer was PBS, and the particle size and shape of microplastics were the same as those in sediments. The risk index (H) based on the type of microplastic polymer showed that the microplastic H index of each sampling site ranged from 1.22 to 9 111.44, and the risk grade covered grades I to IV. The risk grade in surface water was generally high, and the risk grade in sediment and surrounding soil was slightly lower. The PLI based on the pollution abundance of microplastics showed that the range of PLI index of microplastics in each sampling site was 1: 1.2733, and the average PLI index of microplastics was 1.0995,

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2021MS08046); 内蒙古自治区卫生健康委医疗卫生科技计划项目(202201382); 包头医学院科学研究基金项目(BYJJ-DXK2022018); 包头医学院创新团队发展计划(byextd-11)

作者简介: 边博浩(1999—), 男, 硕士在读, 研究方向: 环境毒理学

通信作者: 贾玉巧, E-mail: jiayuq1713@126.com; 陈建芳, E-mail: cjf132563@163.com

which showed slight pollution in the three environmental media. **Conclusion** The abundance of microplastics in the three environmental media of Kundulun Reservoir is high, with a wide range of sources and mainly small particle sizes. The overall risk index is relatively high, and the pollution load is low.

**Keywords:** Kundulun Reservoir; Microplastics; Pollution characteristics; Ecological risk assessment

塑料制品在我们生活中应用广泛,得益于其具有轻便、成本低、可塑性强和耐用等特性。在发明的几十年时间里,全球的塑料产量激增,预计到 2050 年,将达到 12 亿吨<sup>[1]</sup>。随着塑料制品的大量生产和使用,在各种外力如机械磨损、太阳辐射、生物降解和风化等作用下,会逐渐分解成小于 5 mm 的塑料颗粒,也被称为微塑料<sup>[2]</sup>。目前,微塑料作为一种新型环境污染物,已经被列入环境与生态科学研究领域的第二大科学问题,成为全球重大环境问题。由于微塑料具有吸附性强、比表面积大、体积小和不易降解等特性,因此能够广泛的分布在各种环境介质中,如大气<sup>[3]</sup>、水体<sup>[4]</sup>、土壤<sup>[5]</sup>和沉积物<sup>[6]</sup>中,对生态环境产生潜在危害。除此之外,在部分海洋生物(鱼类和贝类)<sup>[7-9]</sup>、食物<sup>[9]</sup>、饮品<sup>[10]</sup>以及人体粪便<sup>[11]</sup>和血液<sup>[12]</sup>中也发现了微塑料的存在,表明微塑料可通过多种途径进入到人体内,对人体产生潜在的健康风险。

近年来,内陆淡水环境中的微塑料污染状况越来越受到关注,现有的研究已经在湖泊<sup>[13]</sup>和河流<sup>[14]</sup>等内陆淡水环境中发现了微塑料的存在。水库作为内陆淡水系统中的重要组成部分,与当地居民的饮用水安全息息相关,研究水库中微塑料的赋存特征有助于更好的了解整个内陆淡水系统的微塑料污染特征,同时对于居民饮用水安全的评估也具有重要意义。包头市昆都仑水库建于 1960 年,位于黄河一级支流昆都仑河下游沟口处,是自治区水利厅批准按大型水库进行管理的中型水库,是包头市重要的防洪屏障,作为包头市城镇主要的应急供水水源地之一,承担着包头市城镇的供水任务。本研究以昆都仑水库的表层水、沉积物和周边土壤作为研究对象,采用 LDIR 8700 激光红外系统对微塑料的丰度、聚合物类型、粒径和形状等污染特征进行分析,并进行水库微塑料污染的生态风险评估,为城市供水水库的微塑料污染现状评估提供了基础数据,为水库微塑料污染的管控和处理提供了科学依据,对于保护居民饮用水安全具有重要意义。

## 1 材料与方

**1.1 研究区域及样本采集** 昆都仑区水库位于包头市市区以北 10 公里昆都仑河,坝址以上控制流域面积 2 851 平方千米,总库容 7 850 立方米,是全国重点中型水库,为保护重要国民经济基础设施及保障城市生产、生活用水,做出了巨大的贡献。样品采样时间

为 2021 年 7 月(丰水期),结合昆都仑水库的地理水文特征,本研究共布设了 9 个采样点,均匀的分布在水库主要区域。M1、M2、M3 分别为在入库口,水库中央和泄水口处采集的 3 个表层水样本;M4、M5、M6 对应入库口、水库中央和泄水口的 3 个沉积物样本;M7、M8、M9 对应入库口、水库中央和泄水口的 3 个周围土壤样本。具体采样点位置见图 1。

使用不锈钢桶收集水库表层水(距河面 0~1 m)样品 2 L,存放于 2 L 玻璃广口瓶内。收集表层沉积物样品约 1 kg,清除沉积物中明显石块和其他杂质等后保存在铝箔袋中。使用不锈钢铲在距离河道 10~20 m 处采集表层土壤样品约 1 kg,清除杂质后存放在铝箔袋中。所有样品带回实验室中均放于 4℃ 保存,样品全部采集完成后,尽快完成检测。

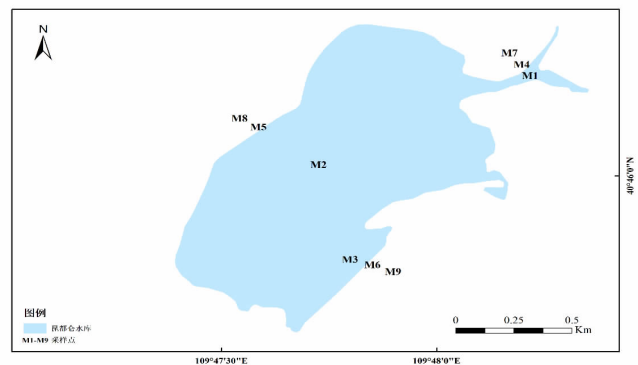


图 1 昆都仑水库采样点示意图

**Figure 1** Schematic diagram of sampling points in Kundulun Reservoir

**1.2 样本中微塑料的提取** 样本中微塑料的提取主要包括消解、密度浮选、二次消解和浓缩 4 个步骤。水样经隔膜真空泵(GM-1.0A;天津腾实验设备有限公司)过滤至 10 μm 的不锈钢滤膜上。首先使用 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液进行消解,消解条件为:室温 120 r/min 震荡消解 24 h。然后,使用甲酸钾溶液和浮选装置进行密度浮选以分离微塑料。分离后微塑料过滤至 10 μm 不锈钢滤膜上,再次使用 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液进行二次消解。消解完成后加入无水乙醇并使用氮气吹扫仪(ND200-1;杭州瑞诚仪器有限公司)进行浓缩,最后贮存于液相瓶保存。

沉积物和土壤样品自然风干后,干燥后的样品过 5 mm 不锈钢筛网。取 10 g 干燥后的样品加入 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液进行消解。消解完成后,样品用冷冻干燥机

(Alpha-1-2 LD plus, Christ company)进行干燥。后续的步骤与水样相同。

**1.3 样本中微塑料的检测** LDIR 8700 是一种激光红外成像系统,相较于传统的振动光谱技术如傅里叶变换红外光谱和拉曼光谱而言,能够对小粒径微塑料实现准确的表征,不需要人工进行分析颗粒的预选,具有较高的稳定性和耐用性<sup>[15]</sup>,目前已被应用于多种环境中的微塑料检测<sup>[16-18]</sup>。因此,本研究使用 Clarity 软件控制的 LDIR 8700 (Agilent Technologies, Inc.)反射模式对粒径为 0~500 μm 的微塑料进行自动检测。将所检测样品的红外光谱与创建的微塑料标准品谱库进行比较,获得微塑料的类型、直径、圆度、固体度、匹配度等特征信息。排除非塑料颗粒后,选择匹配度大于 85%的颗粒认定为与谱库中材料一致。

**1.4 质量保证与控制** 为避免在实验过程中受到微塑料污染,防止周围环境的干扰,在实验过程中的所有仪器和容器用超纯水进行仔细冲洗,至少 3 次。实验过程中实验人员穿着防护服,在无尘环境中进行样品的处理与分析。以超纯水作为空白对照组,空白对照组的微塑料含量小于样本组的 5%。

**1.5 数据处理和分析** 采样点示意图利用 ArcGIS 10.8 进行绘制;使用 Excel 2019 统计数据。环境样品中的表层水中微塑料丰度用 n/L 表示,即每升表层水中所含的微塑料个数;沉积物和周围土壤中微塑料丰度用 n/kg 表示,即每 kg 沉积物和周围土壤干物质中所含的微塑料个数,平均丰度的结果用(均数 ± 标准差)表示;采用 SPSS 20.0 的单因素方差分析(one-way ANOVA)进行丰度差异性分析,检验水准  $\alpha=0.05$ ;利用 GraphPad Prism 9 进行图形绘制。

**1.6 生态风险评估** 微塑料作为一种新型环境污染物质,目前还缺乏权威的生态风险评估模型。由于微塑料在生态环境中的毒性效应与其化学组成和丰度有关,因此本文基于前人的研究<sup>[19-20]</sup>,从聚合物类型以及污染丰度两个角度出发,采用风险指数( $H$ )评估昆都仑水库中表层水、沉积物和周围土壤中的微塑料聚合物毒性效应,计算公式如下:

$$H = \sum P_n S_n \quad \text{公式(1)}$$

式中  $H$  为微塑料聚合物的风险指数,  $P_n$  为各采样点采集的微塑料聚合物类型的百分比,  $S_n$  为各类微塑料聚合物的危害评分,见表 1。由于丁二酸丁二酯 (polybutylene succinate, PBS)、聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM)、聚碳酸亚丙酯 (polypropylene carbonate, PPC)、聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 以及聚己二酸 (poly butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) 目前尚未有标准的危害评分,因

此在计算时未将这几种聚合物纳入。最后,根据大小进行微塑料聚合物风险评级<sup>[21]</sup>: <10(I), 10~100(II), 101~1 000(III), >1 000(IV)。

采用污染负荷指数法评估昆都仑水库中表层水、沉积物和周围土壤中微塑料的污染负荷,其计算公式与微塑料丰度有关,具体如下:

$$CF_i = \frac{C_i}{C_0} \quad \text{公式(2)}$$

$$PLI = \sqrt{CF_i} \quad \text{公式(3)}$$

$$PLI_{zone} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \cdots PLI_n} \quad \text{公式(4)}$$

式中  $CF_i$  为微塑料的污染系数;  $C_i$  为各采样点微塑料的实测丰度;  $C_0$  为微塑料在各采样点的基线丰度,即背景值,本研究使用不同类型样本中微塑料丰度最低的采样点的丰度作为基线丰度<sup>[22]</sup>;  $PLI$  表示微塑料在各采样点的污染负荷指数;  $n$  为采样点数;  $PLI_{zone}$  表示整个研究区域的污染负荷指数。  $PLI$  污染负荷指数评价标准共分为 3 类<sup>[23]</sup>: <1(轻微污染), 1~2(中度污染), >2(极强污染)。

表 1 各类微塑料聚合物的危害评分<sup>[24]</sup>

Table 2 Hazard scores of various microplastic polymers

| 聚合物种类<br>Polymer type                        | 危害评分<br>Hazard score |
|--|----------------------|
| 聚丙烯 (polypropylene, PP)                      | 1                    |
| 聚酰胺 (polyamide, PA)                          | 47                   |
| 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) | 4                    |
| 聚乙烯 (polyethylene, PE)                       | 11                   |
| 聚氨酯 (polyurethane, PU)                       | 13 844               |
| 聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA)     | 1 021                |
| 聚苯乙烯 (polystyrene, PS)                       | 30                   |
| 聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC)               | 10 551               |
| 聚碳酸酯 (polycarbonate, PC)                     | 610                  |

## 2 结果

**2.1 微塑料的丰度特征** 本研究结果显示在各采样点中微塑料的检出率达到了 100%, 见图 2。其中,昆都仑水库表层水中微塑料的丰度范围在 165~267.5 n/L, 平均丰度为 (210.83 ± 50.1) n/L。在表层水各采样点中, M3 处丰度最低, 为 165 n/L; M2 处丰度最高, 为 267.5 n/L。沉积物中微塑料的丰富范围在 7 600~11 500 n/kg, 平均丰度为 (9 633.33 ± 1 955.33) n/kg, 在采样点 M4 处丰度最低, 为 7 600 n/kg; 在采样点 M5 处丰度最高, 为 11 500 n/kg。周围土壤中微塑料的丰度范围在 9 600~11 200 n/kg, 平均丰度为

(10 633.33 ± 896.29) n/kg, 在采样点 M9 处丰度最低, 为 9 600 n/kg; 在采样点 M7 处丰度最高, 为 11 200 n/kg。不同环境介质(表层水、沉积物和周围土壤)中微塑料的平均丰度差距较大。

近年来黄河流域中微塑料污染情况受到广泛关注, 黄河上游流域的乌梁素海<sup>[25]</sup>(3.12 ~ 11.25 n/L)显著低于同为上游流域的昆都仑水库微塑料丰度(165 ~ 267.5 n/L), 可能是因为水库水体流动有限, 延长了微塑料在库前水体中滞留的时间, 容易造成微塑料的蓄积。除此之外, 表层水中微塑料丰度在 M2 处最高, M3 处最低, 这可能是因为水库稳定的水环境造成水库中央微塑料的蓄积, 从而导致泄水口处微塑料丰度较低。水库中沉积物和周围土壤中微塑料丰度同样受水体中微塑料丰度的影响, 本研究在沉积物和土壤中均发现了不同丰度的微塑料, 且都显著高于表层水中微塑料丰度, 可能是因为水库中微塑料受水流和风力等作用的影响, 随着干流顶托作用的加强逐渐向沉积物和周围土壤中转移<sup>[26]</sup>。本研究中周围土壤中微塑料丰度略高于沉积物, 可能是因为土壤中微塑料的来源往往更为广泛<sup>[27]</sup>。

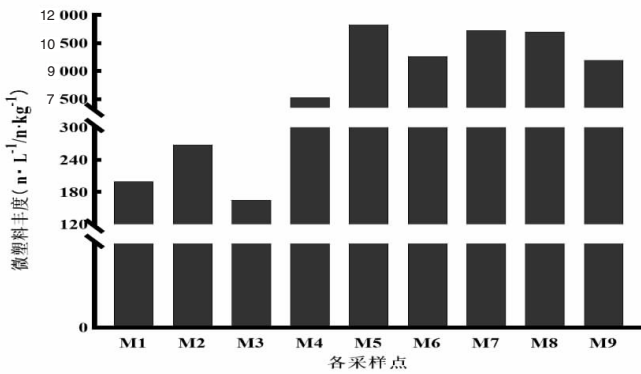


图2 采样点微塑料丰度  
Figure 2 Abundance of microplastics at sampling site

**2.2 微塑料的聚合物类型特征** 昆都仑水库中微塑料的聚合物类型共有 14 种, 分别为 PP、PBS、PA、PAM、PET、PE、PU、PPC、PMMA、PS、PTFE、PVC、PC 和 PBAT。如图 3 所示, 在所有采样点中, M4 采样点发现的微塑料聚合物类型最少, 仅为 4 种; M2 采样点中发现的微塑料聚合物类型最多, 达到了 10 种; M8 采样点和 M9 采样点中单一聚合物类型微塑料的数量超过了半数, 分别达到了 65.77% 和 89.58%。

在各采样点中, 不同类型的微塑料聚合物分布不均且采样点间差异较大, 没有呈现统一的规律, 可能是因为不同环境介质中的微塑料来源较为广泛, 且受自然环境和地理位置等多种因素的影响, 难以形成单一或几种微塑料聚合物类型的蓄积。而在综合分析

了表层水、沉积物和周围土壤中微塑料聚合物类型的占比后, 发现表层水中主要为 PP, 一方面可能是因为 PP 主要用于渔网和包装材料<sup>[28]</sup>, 由于人类捕鱼活动以及生产生活产生塑料垃圾在下游水库处堆积, 另一方面可能是因为其密度相对较小, 更容易漂浮在表层水中<sup>[29]</sup>。同样的, PBS 是一种生物可降解塑料, 常被用于食品包装材料<sup>[30]</sup>, 在本研究中被证实大量存在于沉积物和周围土壤中, 推测一方面来源于表层水中 PBS 的迁移, 另一方面则是来源于人类的生产生活垃圾。

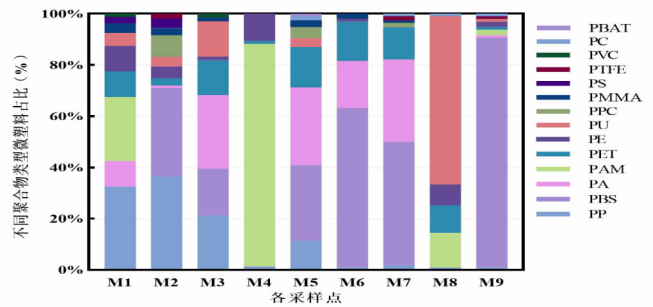


图3 采样点不同聚合物类型微塑料占比  
Figure 3 Proportion of microplastics of different polymer types at sampling point

**2.3 微塑料的粒径特征** 目前, <5 mm 的塑料被称为微塑料, 本研究共检测了 6 个微塑料粒径范围, 分别为 0 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 100、100 ~ 200、200 ~ 300 和 300 ~ 500 μm。如图 4 所示, 在各采样点中均发现了不同粒径的微塑料, 0 ~ 30 μm 的微塑料占比普遍较大, 在 M2、M3、M5 和 M8 中的占比甚至超过了 50%; 300 ~ 500 μm 的微塑料普遍占比最小, 仅在 M1 和 M5 有所发现, 在其他采样点中均未发现。在不同环境介质中, 微塑料粒径分布呈现与各采样点中相同的趋势, 总体来看表层水、沉积物和周围土壤中均是以 0 ~ 30 μm 的微塑料为主, 而 300 ~ 500 μm 的大粒径微塑料则占比最小。

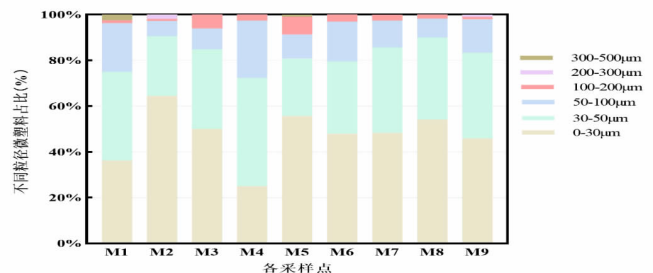


图4 采样点不同粒径微塑料占比  
Figure 4 Proportion of microplastics with different particle sizes at sampling site

本研究发现在各采样点还是在不同环境介质中,小粒径微塑料占比最高,与三峡水库<sup>[31]</sup>、密云水库<sup>[32]</sup>和刘家峡水库<sup>[20]</sup>一致。占比相对最高的为水库中央表层水采样点 M2 处,这可能是因为水库环境中水体停留的时间更长,有更多的时间发生破裂和分解,有利于小粒径微塑料的形成。此外,粒径越小的微塑料对周围污染物吸附性越强<sup>[33]</sup>,能够作为载体被水生生物误食从而进入食物链中,对人类以及生态环境产生潜在的健康风险,因此后续对与水库环境中的小粒径微塑料应该给予更大的关注。

**2.4 微塑料的形状特征** 本研究将所有检测到的微塑料分为薄膜状、纤维状和颗粒状 3 类。在 9 个采样点和 3 种环境介质中均检测到了这 3 种形状的微塑料,见图 5。在各采样点中,薄膜状微塑料占比普遍偏高,除了 M4 和 M5 采样点外,在所有采样点中发现薄膜状微塑料的占比均达到了一半以上;而占比最小的则是纤维状微塑料,在各采样点中的占比均未超过 5%。在不同环境介质中,同样以薄膜状微塑料占主要地位;纤维状微塑料在 3 种环境介质中占比最小。

以往的研究发现,内陆淡水环境中微塑料的形状多为纤维状<sup>[14,34]</sup>和颗粒状<sup>[35]</sup>,而本研究发现昆都仑水库中微塑料类型则是以薄膜状为主,纤维状微塑料反而占比最小。微塑料薄膜是由较大的柔性塑料包装降解产生的二级微塑料,常被用于包装袋和信封等<sup>[36]</sup>,本研究在各采样点和不同环境介质中均检测到高占比的薄膜状微塑料,推测可能是因为人类生产生活中产生的塑料包装经光降解及机械分解等途径留存在环境中。除此之外,塑料薄膜还被广泛用于农业生产的地膜中<sup>[5]</sup>,本研究发现在入库口周围土壤采样点 M7 处的薄膜状微塑料占比相对最高,这可能是因为水库入库口上游为平原灌溉区,为提升种植作物生产率而使用大量的地膜和棚膜<sup>[37]</sup>,造成薄膜状微塑料的增多。

**2.5 生态风险评估**

**2.5.1 H 法** 不同聚合物由于其化学组成不同,导致其危害评分相差几百倍到几千倍不止,而 *H* 的大小受不同聚合物危险评分的影响,在某个采样点中检出危险评分较高的聚合物可能会直接影响到该采样点的风险等级。本研究根据微塑料聚合物类型及危险评分采用 *H* 法对昆都仑水库进行生态风险评估,见表 2。结果发现各采样点微塑料 *H* 范围在 1.22 ~ 9 111.44,风险等级涵盖 I ~ IV 级。在 M4 采样点处 *H* 指数最小,风险等级为 I 级,可能归因于该采样点检出的聚合物危险评分普遍偏低,如 PP(1)、PET(4)和 PE(11)等;在 M3 和 M8 处风险等级为 IV 级,可能归

因于该采样点检出的 PVC(10 551)和 PU(13 844)危险评分过高。综合不同环境介质来看,表层水中风险等级普遍偏高,沉积物和周围土壤中风险等级略低,可能归因于表层水中含有更多危险评分较高的聚合物,导致其 *H* 升高。

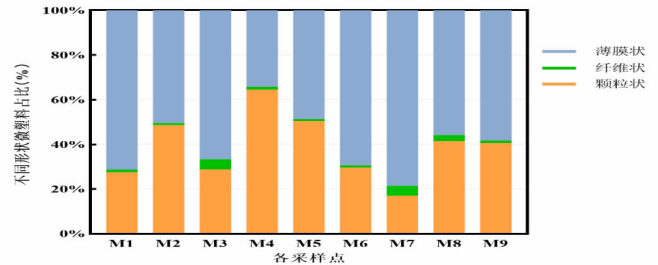


图 5 采样点不同形状微塑料占比

Figure 5 Proportion of microplastics with different shapes at sampling site

表 2 昆都仑水库微塑料聚合物 H

Table 2 Kundulun Reservoir microplastic polymer risk index (H)

| 环境介质                   | 采样点             | H        | 风险等级       |
|------------------------|-----------------|----------|------------|
| Environmental media    | Sampling points |          | Risk level |
| 表层水(surface water)     | M1              | 869.65   | III        |
|                        | M2              | 548.71   | III        |
|                        | M3              | 2 077.61 | IV         |
| 沉积物(sediment)          | M4              | 1.22     | I          |
|                        | M5              | 533.82   | III        |
|                        | M6              | 30.20    | II         |
| 周围土壤(surrounding soil) | M7              | 30.19    | II         |
|                        | M8              | 9 111.44 | IV         |
|                        | M9              | 151.33   | III        |

**2.5.2 PLI** PLI 的大小受微塑料丰度影响,  $PLI_{zone}$  区域的大小则与该区域的各采样点微塑料丰度呈现正相关。本研究采用 PLI 法对昆都仑水库的微塑料污染丰度进行生态风险评估,见图 6、7。结果发现各采样点微塑料指数 PLI 范围为 1 ~ 1.273 3,其平均微塑料指数为 1.099 5,总体属于中度污染。其中,表层水各采样点指数范围在 1 ~ 1.273 3 之间,区域  $PLI_{zone}$  指数为 1.401 8,属于中度污染;沉积物和周围土壤各采样点 PLI 指数范围分别在 1 ~ 1.230 1 和 1 ~ 1.080 1,区域  $PLI_{zone}$  指数分别为 1.396 8 和 1.614 5,均属于中度污染。此外,表层水和沉积物区域  $PLI_{zone}$  指数略高于周围土壤,这与其微塑料丰度呈现不同的趋势,可能归因于周围土壤各采样点微塑料污染系数  $CF_i$  略小于表层水和沉积物。

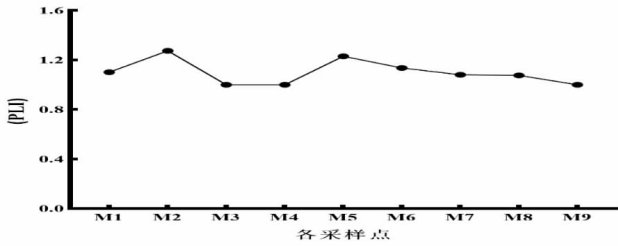


图 6 采样点微塑料 PLI

Figure 6 Microplastic pollution load index (PLI) at sampling site

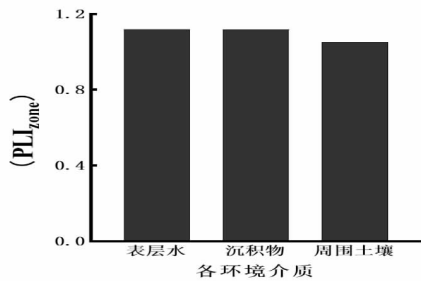


图 7 各环境介质微塑料 PLI

Figure 7 Microplastic pollution load index (PLI) in various environmental media

### 3 结论

本研究发现昆都仑水库表层水、沉积物和周围土壤中的微塑料平均丰度分别为  $(210.83 \pm 50.1)$  n/L、 $(9\ 633.33 \pm 1\ 955.33)$  n/kg 和  $(10\ 633.33+896.29)$  n/kg, 远高于其他黄河上游流域。聚合物类型主要为 PP 和 PBS, 以小粒径和薄膜状为微塑料最为常见, 这些微塑料可能源于人类生产生活、农业地膜的使用以及大气沉降等。除小粒径微塑料占主导地位外, 本研究发现的主要微塑料聚合物类型以及微塑料形状均与其他淡水环境中的调查结果存在一定的差异, 后续应该重视此类微塑料的研究。

此外, 基于微塑料聚合物类型的  $H$  显示, 表层水、沉积物和周围土壤的  $H$  普遍偏高, 处于高风险等级。基于微塑料污染丰度的指数显示, 各采样点间的 PLI 差距较小, 3 种环境介质中区域  $PLI_{zone}$  的均属于中度污染。因此, 未来需要对昆都仑水库中的微塑料污染情况进行定期监测, 注重多聚合类型微塑料的评估, 加强源头治理, 从源头减少微塑料污染。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

### 参考文献

[ 1 ] Suaria G, Avio CG, Mineo A, et al. The Mediterranean plastic Soup: synthetic polymers in Mediterranean surface waters [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 37551.  
 [ 2 ] Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, et al. Lost at sea: where is all the plastic?[J]. Science, 2004, 304(5672): 838.  
 [ 3 ] Fang MZ, Liao ZL, Ji XL, et al. Microplastic ingestion from atmospheric

deposition during dining/drinking activities [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 432: 128674.  
 [ 4 ] Zhang BH, Xu DY, Wan XH, et al. Comparative analysis of microplastic organization and pollution risk before and after thawing in an urban river in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154268.  
 [ 5 ] Wang K, Chen W, Tian JY, et al. Accumulation of microplastics in greenhouse soil after long-term plastic film mulching in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154544.  
 [ 6 ] Peng B, Hossain KB, Lin Y, et al. Assessment and sources identification of microplastics, PAHs and OCPs in the Luoyuan Bay, China: Based on multi-statistical analysis [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 175: 113351.  
 [ 7 ] Justino AKS, Ferreira GVB, Schmidt N, et al. The role of mesopelagic fishes as microplastics vectors across the deep-sea layers from the Southwestern Tropical Atlantic [J]. Environmental Pollution, 2022, 300: 118988.  
 [ 8 ] Halbach M, Vogel M, Tammen JK, et al. 30 years trends of microplastic pollution: Mass-quantitative analysis of archived mussel samples from the North and Baltic Seas [J]. Science of the Total Environment, 2022, 826: 154179.  
 [ 9 ] Hasan J, Islam SMM, Alam MS, et al. Presence of microplastics in two common dried Marine fish species from Bangladesh [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 176: 113430.  
 [ 10 ] Li YN, Peng L, Fu JX, et al. A microscopic survey on microplastics in beverages: the case of beer, mineral water and tea [J]. Analyst, 2022, 147(6): 1099-1105.  
 [ 11 ] Zhang N, Li YB, He HR, et al. You are what you eat: Microplastics in the feces of young men living in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2021, 767: 144345.  
 [ 12 ] Leslie HA, van Velzen MJM, Brandsma SH, et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood [J]. Environment International, 2022, 163: 107199.  
 [ 13 ] Kallenbach EMF, Friberg N, Lusher A, et al. Anthropogenically impacted lake catchments in Denmark reveal low microplastic pollution [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(31): 47726-47739.  
 [ 14 ] Ma M, Liu SB, Su M, et al. Spatial distribution and potential sources of microplastics in the Songhua River flowing through urban centers in Northeast China [J]. Environmental Pollution, 2022, 292 (Pt B): 118384.  
 [ 15 ] Ourgaud M, Phuong NN, Papillon L, et al. Identification and quantification of microplastics in the Marine environment using the laser direct infrared (LDIR) technique[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(14): 9999-10009.  
 [ 16 ] Bäuerlein PS, Pieke EN, Oesterholt FIHM, et al. Microplastic discharge from a wastewater treatment plant: long term monitoring to compare two analytical techniques, LDIR and optical microscopy while also assessing the removal efficiency of a bubble curtain [J]. Water Science and Technology, 2023, 87(1): 39-56.  
 [ 17 ] Liu PJ, Shao LY, Zhang YX, et al. Comparative study on physicochemical characteristics of atmospheric microplastics in winter in inland and coastal megacities: A case of Beijing and Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169308.

- [ 18 ] Zhu BQ, Chen Y, Jiang LH, et al. Quantification and characterization of microplastics in farmland soils of Jiangsu Province, East China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30 (57): 120653–120662.
- [ 19 ] Islam MS, Islam Z, Hasan MR. Pervasiveness and characteristics of microplastics in surface water and sediment of the Buriganga River, Bangladesh[J]. Chemosphere, 2022, 307(Pt 3): 135945.
- [ 20 ] Min R, Ma K, Zhang HW, et al. Distribution and risk assessment of microplastics in Liujiaxia Reservoir on the upper Yellow River[J]. Chemosphere, 2023, 320: 138031.
- [ 21 ] Mai YZ, Peng SY, Lai ZN, et al. Measurement, quantification, and potential risk of microplastics in the mainstream of the Pearl River (Xijiang River) and its estuary, Southern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(38): 53127–53140.
- [ 22 ] Wang GL, Lu JI, Li WJ, et al. Seasonal variation and risk assessment of microplastics in surface water of the Manas River Basin, China[J]. Ecotoxicology and Environment Safety, 2021, 208: 111477.
- [ 23 ] 程伟彬,何成达,朱腾义,等. 扬州市城区水体微塑料赋存特征及生态风险分析[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(5): 223–228. Cheng WB, He CD, Zhu TY, et al. Occurrence characteristics and ecological risk analysis of microplastics in urban waters of Yangzhou City [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46 (5): 223–228.
- [ 24 ] Lithner D, Larsson A, 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.
- [ 25 ] Mao RF, Hu YY, Zhang SY, et al. Microplastics in the surface water of Wuliangshai Lake, northern China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 137820.
- [ 26 ] Xiong X, Wu CX, Elser JJ, 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.
- [ 27 ] Qian YR, Shang YX, Zheng YX, et al. Temporal and spatial variation of microplastics in Baotou section of Yellow River, China [J]. Journal of Environment Management, 2023, 338: 117803.
- [ 28 ] Ma J, Niu X, Zhang D, et al. High levels of microplastic pollution in aquaculture water of fish ponds in the Pearl River Estuary of Guangzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2020: 140679.
- [ 29 ] He D, Chen XJ, Zhao W, et al. Microplastics contamination in the surface water of the Yangtze River from upstream to estuary based on different sampling methods [J]. Environmental Research, 2021, 196: 110908.
- [ 30 ] Barrino F, De La Rosa–Ramírez H, Schiraldi C, et al. Preparation and characterization of new bioplastics based on polybutylene succinate (PBS)[J]. Polymers, 2023, 15(5): 1212.
- [ 31 ] Di MX, 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.
- [ 32 ] 何文宣,李垒,李久义,等. 密云水库中微塑料的污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2022, 42(12): 122–135. He WX, Li L, Li JY, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of microplastics in the Miyun Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(12): 122–135.
- [ 33 ] Sendra M, Pereiro P, Yeste MP, et al. Size matters: Zebrafish (*Danio rerio*) as a model to study toxicity of nanoplastics from cells to the whole organism [J]. Environmental Pollution, 2021, 268 (Pt A): 115769.
- [ 34 ] Abbasi S, Sources TA, concentrations, et al. Fluxes and fate of microplastics in a hypersaline lake:maharloo,south–west Iran [J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153721.
- [ 35 ] Winkler A, Antonioli D, Masseroni A, et al. Following the fate of microplastic in four abiotic and biotic matrices along the Ticino River (North Italy) [J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153638.
- [ 36 ] Vaughan R, Turner SD, Rose NL. Microplastics in the sediments of a UK urban lake[J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 10–18.
- [ 37 ] 王志超,孟青,于玲红,等. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 204–209. Wang ZC, Meng Q, Yu LH, et al. Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(3): 204–209.

收稿日期:2023–12–22

(上接第 1180 页)

the atopic March revisited[J]. Allergy, 2014, 69(1): 17–27.

[ 17 ] Gu Z, WEI P, KOU W, et al. Analysis of multimorbidity of moderate to severe allergic rhinitis in children: a Real–World study [J]. International Archives of Allergy and Immunology, 2023, 184 (9): 882–892.

[ 18 ] Sigurdardottir ST, Jonasson K, Clausen M, et al. Prevalence and ear–

ly–life risk factors of school–age allergic multimorbidity: The Euro–Prevall–iFAAM birth cohort[J]. Allergy, 2021, 76(9): 2855–2865.

[ 19 ] Atiim GA, Elliott SJ, Clarke AE, et al. "What the mind does not know, the eyes do not see". Placing food allergy risk in sub–Saharan Africa[J]. Health & Place, 2018, 51: 125–135.

收稿日期:2023–12–24