

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙晨翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律

刘禹^{1,2}, 史小红^{1,2*}, 张生^{1,2}, 郝若男¹, 孙标^{1,2}, 赵胜男^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 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, 呼和浩特 010018)

摘要: 沉降是低密度微塑料聚合物在湖泊中的主要迁移过程。为探究乌梁素海中低密度微塑料聚合物的沉降规律, 基于微塑料和悬浮微粒的相似和不同之处设计微塑料捕获器和沉降试验方法, 定量描述不同形状和不同大小的低密度微塑料聚合物在乌梁素海的沉降过程。结果表明, 各类型低密度微塑料聚合物沉降通量随风速变快而增大, 其中形状为纤维状, 各种尺寸(0.05~0.5、0.5~2和2~5 mm)的低密度微塑料聚合物沉降通量与风速的相关性较好, 相关系数变化范围为0.218~0.836。在不同点位处, 不同风速下, 形状为纤维状、碎片状、块状和薄膜状, 各种尺寸(0.05~0.5、0.5~2和2~5 mm)的低密度微塑料聚合物沉降通量变化范围分别为0~(1458±284)、0~(368±144)、0~(71±37)和0~(85±65) n·(m²·d)⁻¹。在形状相同的情况下, 大尺寸的低密度微塑料聚合物更容易沉积, 而小尺寸的低密度微塑料聚合物更容易随水流迁移。在尺寸相同的情况下, 纤维状和薄膜状的低密度微塑料聚合物更容易随水流迁移, 而碎片状的低密度微塑料聚合物更容易沉积。

关键词: 低密度微塑料聚合物; 微塑料捕获器; 沉降; 乌梁素海; 风速

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1463-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202108019

Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangsu Lake

LIU Yu^{1,2}, SHI Xiao-hong^{1,2*}, ZHANG Sheng^{1,2}, HAO Ruo-nan¹, SUN Biao^{1,2}, ZHAO Sheng-nan^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010018, China)

Abstract: Deposition is the main migration process of low-density microplastic aggregation in lakes. In order to explore the deposition law of low-density microplastic aggregation in Wuliangsu Lake, a microplastic trap was designed and applied to examine the deposition process based on the similarities and differences between microplastics and naturally occurring suspended solids. The deposition processes of different sizes and shapes of low-density microplastic aggregation were quantified in Wuliangsu Lake. The results showed that the deposition fluxes of all types of low-density microplastic aggregation increased with wind speed. The deposition of flux of low-density microplastic aggregations with a similar shape of fiber and with a size ranging from 0.05-0.5, 0.5-2, and 2-5 mm had better correlation with wind speed. The correlation coefficient changed from 0.218 to 0.836. The deposition of flux of low-density microplastic aggregations with a similar shape of fiber, fragment, grain, and film and with size ranging from 0.05-0.5, 0.5-2, and 2-5 mm under different wind speeds at different experiment sites changed from 0-(1458±284), 0-(368±144), 0-(71±37), and 0-(85±65) n·(m²·d)⁻¹, respectively. Furthermore, we found that, when shape was held constant, larger low-density microplastic aggregations were more likely to be deposited, whereas smaller low-density microplastic aggregations were more likely to be transported. When size was held constant, fragmentary low-density microplastic aggregations were more likely to be deposited than fibrous and film microplastic.

Key words: low-density microplastic aggregation; microplastic trap; deposition; Wuliangsu Lake; wind speed

湖泊是水资源和水利资源的重要储藏地, 在美化环境和降解污染等方面发挥着重要作用。近些年来, 随着湖泊周边人类活动日益频繁, 湖泊微塑料污染问题日益凸显。目前, 无论是城市湖泊还是高山湖泊, 均已发现微塑料的踪迹^[1~3]。微塑料会对湖泊生态环境造成一系列负面影响。比如, 微塑料易被水体中的浮游动物和鱼类等生物误食, 其危害包括抑制浮游植物生长^[4], 影响浮游动物摄食和运动能力^[5], 危害牡蛎的滤食行为和繁殖^[6], 导致鱼类生病等^[7]。微塑料尺寸小, 比表面积大, 疏水性强, 是重金属、有机物环芳烃和多溴联苯醚等污染物的载体^[8~10]。此外, 微塑料还含有许多化学添加剂, 如在生产过程中为了改善塑料的性质或延长其寿命, 通常会添加稳定剂、增塑剂、阻燃剂或抗氧化剂等, 这些化学品对环境均有一定有害影响^[11]。对比大块塑料, 微塑料在湖泊环境中更难降解, 易在大气、水

体和沉积物间迁移, 并在某一环境介质中相对富集^[12~14]。由于其本身具有毒性并携带大量污染物, 微塑料在湖泊中的迁移和归趋对湖泊环境具有一定影响, 所以了解湖泊中微塑料的迁移规律具有重要意义。

一般而言, 微塑料在湖泊中的迁移和归趋主要取决于其密度。高密度微塑料(密度大于水的微塑料)在进入湖泊后首先会在重力作用下沉降到沉积物中, 并不断累积, 如太湖、三峡水库和 Chusi 湖沉积物中的微塑料丰度分别高达 15~160、25~300 和 234 n·kg⁻¹, 其中三峡水库和太湖沉积物中微塑

收稿日期: 2021-08-03; 修订日期: 2021-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(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)

作者简介: 刘禹(1988~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水环境中微塑料迁移规律, E-mail: yuliu@imau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: shixiaohong@imau.edu.cn

料主要类型分别为 PS 和 PET, 密度均大于水^[15-17]。低密度微塑料(密度小于水的微塑料)通常只能漂浮或悬浮在水体当中, 在水动力的作用下进行扩散^[18]。但在水环境的长期作用下, 微塑料的表面形态会发生变化, 易吸附重金属和有机化合物, 同时还会黏着有机碎片、微生物和黏粒等, 变为聚合物, 不断增大自身的密度, 当其密度大于水后, 也会发生沉降, 进而富集到沉积物当中^[19,20]。因此, 沉降是低密度微塑料聚合物和高密度微塑料在水体中主要迁移过程之一。但对比来看, 低密度微塑料聚合物的沉降过程要更加复杂, 更难量化和预测。而且据调查研究表明, 我国多数湖泊中微塑料以低密度微塑料为主^[16,21,22]。所以了解低密度微塑料聚合物的沉降规律是探究湖泊微塑料迁移机制的关键。

目前, 有关微塑料沉降规律研究多为室内试验和模型模拟^[23-25], 而在野外直接测定其通量大小和影响因素的研究并不多见, 相关研究有待进一步开展。Martin 等^[26]的研究指出应加强对水环境中微塑料的沉降和再悬浮等迁移过程的研究, 从而更好地了解微塑料在水环境中的迁移和归趋。Kooi 等^[12]的研究提出由于微塑料颗粒较小且易在淡水环境中垂向混合, 并富集到沉积物中, 与悬浮颗粒和胶体环境行为相似, 可参考悬浮颗粒来探究微塑料在水环境中的迁移规律。悬浮微粒与微塑料最大区别在于, 自然悬浮颗粒大小和形状比较接近, 而微塑料的大小范围很大, 且形状各异, 因此其迁移规律差异较大, 所以在探究微塑料沉降规律时应分别探讨。此外, 对于浅水湖泊而言, 底部沉积物易受风浪影响发生再悬浮^[27-29], 而后发生再次沉降, 沉积物再悬浮速率和沉降速率的大小与风速快慢相关^[30]。所以在探究低密度微塑料聚合物沉降规律时应主要考虑风速的影响。

本文以典型浅水湖泊乌梁素海为研究区, 基于悬浮微粒沉降试验方法, 设计微塑料捕获器, 并建立低密度微塑料聚合物沉降试验方法, 定量描述不同形状和不同大小低密度微塑料聚合物在不同风速下沉降过程, 对了解微塑料的迁移过程有重要意义, 同时也是构建微塑料迁移模型的关键。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海地处中国北方寒旱区(40°36' ~ 41°03'N, 108°43' ~ 108°57'E), 是黄河流域最大的淡水湖泊, 也是地球上同一纬度最大的湿地。2020年湖泊面积 341 km², 水力滞留时间为 240 ~ 290 d 左右。据相关研究表明, 乌梁素海水体中微塑料丰度

高达(1 400 ± 390) ~ (10 120 ± 4 090) n·m⁻³^[21], 是已知报道微塑料丰度最高的湖泊之一。由于湖泊水深较浅(平均 2 m), 风力对湖泊扰动作用较强, 泥沙、水藻和微塑料等固体物质在湖泊中的掺混强烈。

1.2 低密度微塑料聚合物沉降试验仪器及测定方法

如前文介绍, 微塑料颗粒小, 易在水体中发生垂向混合, 并富集到水体沉积物中, 与水体中悬浮颗粒迁移过程相似。一般而言, 利用沉积物捕获器能有效地量化悬浮物的沉降过程和底泥的再悬浮过程, 该方法原理简单且所需装置简便, 试验时只需将沉积物捕获器固定在湖泊中, 然后测量其中沉积物质重量, 即可计算得出悬浮物沉降通量^[31,32]。因此, 本研究结合微塑料与悬浮颗粒的相似和不同之处, 同时考虑浅水湖泊的环境特征, 设计微塑料捕获器和试验方法, 量化低密度微塑料聚合物沉降过程, 提出研究湖泊微塑料迁移规律的新方法。

1.2.1 微塑料捕获器

沉积物捕获器通常使用有机玻璃制成, 具有质轻、强度大和耐腐蚀等特点, 但由于其成分为塑料, 利用其进行试验可能会造成误差。此外, 低密度微塑料聚合物的密度比湖泊沉积物的密度小, 更易发生再悬浮离开捕获器, 因此微塑料捕获器的高度直径比应尽可能大。本研究利用玻璃圆筒制作微塑料捕获器, 内径为 10 cm, 高度为 50 cm, 高度直径比为 5:1, 满足捕获器设计的要求^[32]。微塑料沉降通量测量装置如图 1 所示, 主要包括微塑料捕获器、不锈钢框和不锈钢支架。所有捕获器均固定在不锈钢筐内, 保持捕获器瓶口水平, 每个捕获器瓶口均用孔径为 1 cm 左右的不锈钢覆盖, 以防止大型浮游动物或昆虫进入捕获器而影响试验精度。试验时将不锈钢框连同水体微塑料捕获器固定在支架上。水体中不锈钢筐下挂 2 kg 左右的重物, 确保不锈钢筐在水中能保持水平, 微塑料捕获器能保持竖直。不锈钢筐顶端系上不锈钢索, 可以将不锈钢筐连同微塑料捕获器固定在水中不同深度。

1.2.2 低密度微塑料聚合物沉降测定方法

对于浅水湖泊而言, 低密度微塑料聚合物的沉降和再悬浮主要受流速和风速共同影响。乌梁素海水深较浅, 所在区域风力较强, 而流速却非常低(0.04 m·s⁻¹), 因此本研究只考虑了风速对低密度微塑料聚合物沉降和再悬浮的影响^[33]。研究于 2020 年 7 月 15 ~ 31 日在乌梁素海进行了低密度微塑料聚合物沉降试验。本研究共设置 3 个采样点, 如图 2 所示, 从北向南依次为 O10、Q8 和 R7, 流速为 0.02

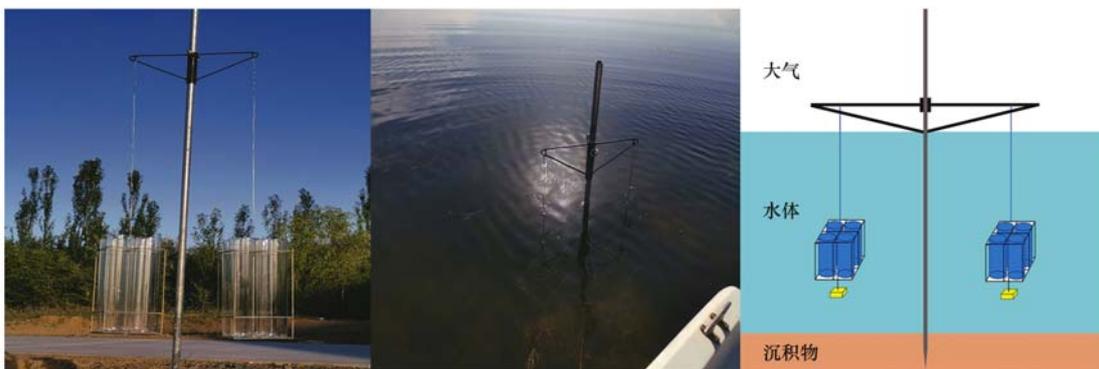


图1 微塑料捕获器

Fig. 1 Microplastic trap

$\sim 0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与乌梁素海平均流速相近.

试验方法如下: 为防止固定不锈钢杆扰动沉积物发生再悬浮, 试验前先将不锈钢杆下端固定在沉积物当中, 待 24 h 之后, 再把不锈钢框连同微塑料捕获器用不锈钢索固定在不锈钢杆上. 每个采样点架设一个不锈钢杆, 每个杆上先分别固定两个不锈钢框, 两个框中共装 3 个微塑料捕获器. 捕获器瓶口通过不锈钢索均固定在距沉积物 50 cm 处, 安装微塑料捕获器时尽量避免扰动沉积物. 试验装置 72 h 后, 将所有微塑料捕获器中的样品倒入 5 L 玻璃瓶中, 然后将所有捕获器安装好, 再次进行试验, 试验一共进行 5 次. 试验期间通过小型气象站收集风速资料. 样品收集后直接送到试验室, 静置 24 h 后, 将上覆水体抽出, 留下下部沉积物质, 待测.

1.3 微塑料的鉴别

1.3.1 低密度微塑料样品制备

本文拟探究不同形状和不同大小低密度微塑料聚合物的沉降规律, 但根据湖泊微塑料的迁移过程, 捕获器中的微塑料既包括高密度微塑料也包括低密度微塑料聚合物, 且二者是同时进入捕获器的, 因此本研究利用密度分离法来进行分离^[34]. 首先将捕获器中样品倒入 50 μm 不锈钢筛过滤, 然后用超纯水冲入到 150 mL 溢流烧瓶中, 再将其放入超声波振荡器中振荡 6 min, 去掉微塑料表面附着的杂质^[35]. 在此过程中, 低密度微塑料聚合物表面的泥沙和藻类会被剥离, 其密度低于水的密度, 漂浮到水体表面. 静置 24 h 后, 加入超纯水使漂浮的低密度微塑料溢流出烧瓶并用烧杯收集. 接下来, 将样品倒入不锈钢筛, 然后用 30% 双氧水冲入 250 mL 锥形瓶, 置于 45°C, 80 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的振荡培养箱中, 处理 24 h 以除去水中的有机质, 如生物组织和非生物材料, 若腐殖质消解不干净, 此过程可重复多次. 最后将样品用去离子水稀释, 过 0.7 μm (GF/F, 47 mm \varnothing , Whatman) 滤膜, 然后将滤膜放入玻璃培养皿中, 在室温下风干待测.

1.3.2 低密度微塑料聚合物的观测、统计和鉴别

利用体视显微镜 (M165 C, Leica, Germany) 来观测滤膜上的微塑料, 放大倍数为 160 倍, 观测时基于前人制定的微塑料鉴别标准来确定疑似微塑料^[36], 采用 Leica Application Suite X 软件计数, 并统计微塑料的尺寸和形状. 根据前人对乌梁素海微塑料的基础调查^[37,38], 本研究将微塑料的形状分为 4 种, 包括纤维状、碎片状、薄膜状和块状, 大小分为 3 个区间, 分别为: 0.05 ~ 0.5、0.5 ~ 2 和 2 ~ 5 mm. 微塑料沉降速率采用通量单位 [F_{MPs} , $\text{n}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]. 采用 Microsoft Excel 2016 和 Photoshop 等软件进行绘图. 利用 SPSS (24.0) 多因素方差分析 (ANOVA) 对样本差别进行显著性检验.

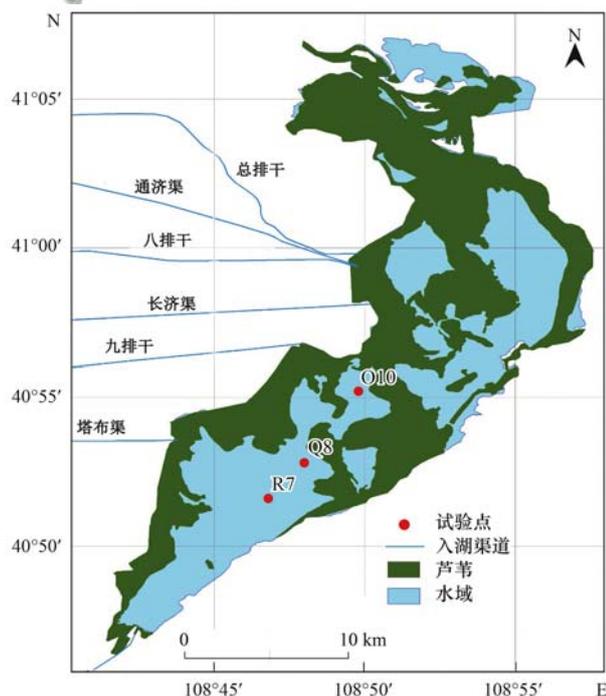


图2 乌梁素海试验点分布示意

Fig. 2 Experiment sites of Wuliangsu Hai

本文拟探究不同尺寸和不同形状的低密度微塑料聚合物在湖泊中的沉降规律. 但通常情况下, 尺寸和形状均对低密度微塑料聚合物的沉降有一定影响, 单独比较不同尺寸, 或比较不同形状的低密度微塑料聚合物在湖泊不同位置的沉降通量是没有意义的. 因此, 本研究将低密度微塑料聚合物划分为 12 类, 如表 1 和图 3 所示. 然后分别比较: ①当形状相同时, 不同大小范围低密度微塑料聚合物在湖泊中的沉降规律. ②当大小范围相同时, 不同形状的低密度微塑料聚合物在湖泊中的沉降规律. 需要注意的是, 虽然低密度微塑料表面会吸附一定数量的泥沙和藻类等物质, 但通常不足以改变其形状, 或致使其尺寸增大一个数量级. 因此本研究并未考虑微塑料因吸附杂质而导致的形状或大小发生改变带来的影响.

为更进一步确定疑似微塑料, 随机从样品中挑选 60 个样品, 利用傅里叶变换显微红外光谱仪检测其成分, 波数范围为 $4\ 000 \sim 50\ \text{cm}^{-1}$, 对比样品红外光谱图与标准光谱图, 对目标物进行定性分析, 最后确定成分为微塑料的颗粒数量.

1.3.3 质量控制与管理

为保证微塑料从采集、处理和分析过程中不受到外界污染, 每次试验前用超纯水清洗 3 遍采样和试验仪器, 并使用酒精擦拭试验台和体式显微镜, 试

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试验服.

试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. 进行野外试验时将额外 3 个微塑料捕获器带到现场, 然后加入 4 L 超纯水. 安装装置时将捕获器竖直立在船上, 待装置安装完毕后, 倒入 5 L 玻璃容量瓶中. 送回试验室后, 按与样品相同的操作步骤进行试验, 结果在空白中发现少量纤维状微塑料, 其含量为 $0 \sim (0.42 \pm 0.29)\ \text{n} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明野外和室内试验过程中受到的污染可以忽略不计.

2 结果与分析

本研究共在乌梁素海非冰封期连续 5 次试验, 每个时间段的日平均风速分别为 1.9 、 2.6 、 3.5 、 4.1 和 $2.9\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 本试验分别检测出不同风速下 R7、Q8 和 O10 这 3 个试验点微塑料捕获器中各种低密度微塑料聚合物含量(不同大小和不同形状), 即得出各类型低密度微塑料聚合物沉降量, 每次试验有 3 组平行. 通过计算后, 将数量换算为沉降通量 [$F_{\text{MPs}}, \text{n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 并对不同风速下, 各类型低密度微塑料聚合物沉降通量在各试验点的差异进行显著性检验, 结果如表 1 和图 3 所示.

表 1 不同风速下, 各类型低密度微塑料聚合物在湖泊各试验点沉降通量/ $\text{n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

项目	R7	Q8	O10	方差分析 F 检验	P	
纤维	0.05 ~ 0.5 mm	226 ± 102 ~ 609 ± 270	311 ± 113 ~ 1458 ± 284	354 ± 37 ~ 665 ± 111	5.577	0.009
	0.5 ~ 2 mm	255 ± 107 ~ 736 ± 139	538 ± 172 ~ 1090 ± 113	538 ± 102 ~ 991 ± 177	2.527	0.097
	2 ~ 5 mm	14 ± 14 ~ 71 ± 28	0 ~ 57 ± 14	28 ± 14 ~ 156 ± 71	3.908	0.033
碎片	0.05 ~ 0.5 mm	42 ± 0 ~ 99 ± 62	85 ± 25 ~ 225 ± 107	71 ± 14 ~ 198 ± 57	3.488	0.046
	0.5 ~ 2 mm	42 ± 25 ~ 127 ± 25	71 ± 37 ~ 184 ± 62	99 ± 37 ~ 368 ± 144	4.731	0.016
	2 ~ 5 mm	0 ~ 28 ± 14	0 ~ 28 ± 14	0 ~ 71 ± 14	8.667	0.001
块状	0.05 ~ 0.5 mm	0 ~ 57 ± 28	0 ~ 42 ± 25	0 ~ 71 ± 14	0.800	0.459
	0.5 ~ 2 mm	0 ~ 71 ± 14	0 ~ 42 ± 25	0 ~ 71 ± 37	1.421	0.257
	2 ~ 5 mm	0	0	0		
薄膜	0.05 ~ 0.5 mm	0 ~ 85 ± 65	28 ± 14 ~ 57 ± 14	14 ± 14 ~ 28 ± 14	1.425	0.256
	0.5 ~ 2 mm	42 ± 25 ~ 85 ± 25	14 ± 14 ~ 71 ± 37	0 ~ 42 ± 25	3.244	0.053
	2 ~ 5 mm	0 ~ 28 ± 14	0	0 ~ 42 ± 0	4.000	0.029

2.1 相同形状, 不同尺寸低密度微塑料聚合物在不同试验点的沉降规律

本试验结果表明, 在不同风速, 形状相同的情况下, 不同尺寸的低密度微塑料聚合物在湖泊 3 个点位的沉降规律有一定差异. 形状为纤维状, 尺寸为 $0.05 \sim 0.5\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 Q8 的沉降通量相对较高, 尺寸为 $0.5 \sim 2\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 Q8 和 O10 相对较高, 而尺寸为 $2 \sim 5\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 O10 相对较高;

形状为碎片状, 尺寸为 $0.05 \sim 0.5\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 Q8 和 O10 的沉降通量相对较高, 尺寸为 $0.5 \sim 2\ \text{mm}$ 和 $2 \sim 5\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 O10 相对较高; 形状为薄膜状, 尺寸为 $0.05 \sim 0.5\ \text{mm}$ 和 $0.5 \sim 2\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 R7 的沉降通量相对较高, 而 $2 \sim 5\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在试验点 O10 相对较高; 形状为块状, 尺寸为 $0.05 \sim 0.5\ \text{mm}$ 和 $0.5 \sim 2\ \text{mm}$ 的低密度微塑料聚合物在 3 个点位沉降通量相差不大, 且并未

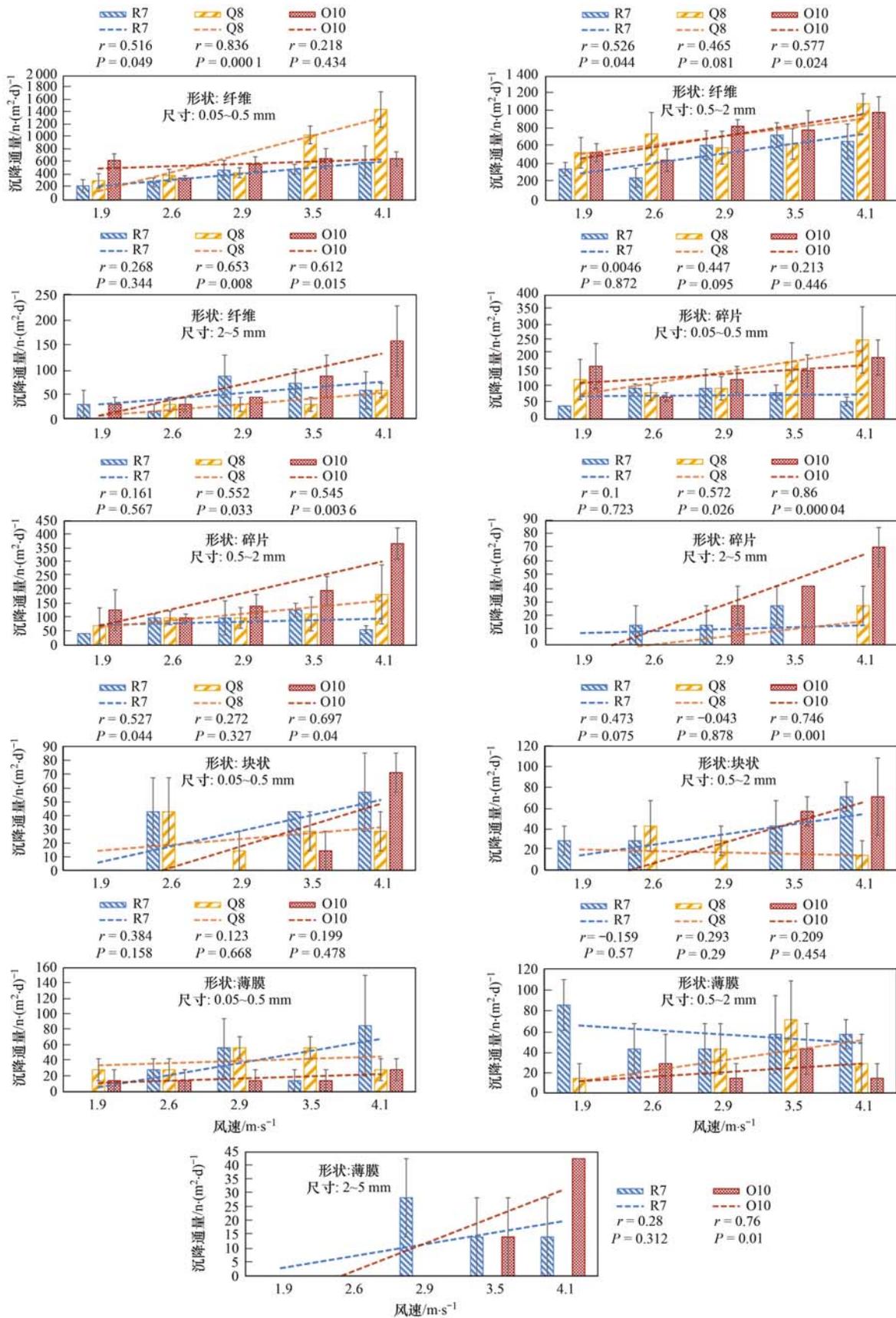


图3 不同点位处,各类型低密度微塑料聚合沉降通量与风速的相关性

Fig. 3 Correlation between deposition flux of all types of low-density microplastic aggregation at different experiment sites and wind speeds

收集到尺寸 2~5 mm 的低密度微塑料聚合物. 总体来看,当形状相同时,尺寸较大的低密度微塑料聚合物

(2~5 mm) 在位置偏北的试验点 O10 沉降通量较高,而尺寸较小的低密度微塑料聚合物(0.05~0.5 mm

和 0.5 ~ 2 mm) 在位置中间和位置偏南的试验点 Q8 和 R7 沉降通量较高。

2.2 相同尺寸,不同形状低密度微塑料聚合物在不同试验点的沉降规律

本试验结果表明,在不同风速,尺寸相同的情况下,不同形状的低密度微塑料聚合物在湖泊 3 个地点的沉降通量规律有一定差异。尺寸为 0.05 ~ 0.5 mm,形状为纤维状的低密度微塑料聚合物在试验点 Q8 的沉降通量较高,形状为碎片状的低密度微塑料聚合物在试验点 O10 和 Q8 相对较高,形状为薄膜状的低密度微塑料聚合物在试验点 R7 相对较高,形状为块状的低密度微塑料聚合物在 3 个试验点沉降通量相差不大;尺寸为 0.5 ~ 2 mm,形状为纤维状的低密度微塑料聚合物在试验点 Q8 和 O10 的沉降通量较高,形状为碎片状的低密度微塑料聚合物在试验点 O10 相对较高,形状为薄膜状的低密度微塑料聚合物在试验点 R7 相对较高,形状为块状的低密度微塑料聚合物在 3 个试验点沉降通量相差不大;尺寸为 2 ~ 5 mm,形状为纤维状、碎片状和薄膜状的低密度微塑料聚合物均是在试验点 O10 的沉降通量较高,未收集到块状的低密度微塑料聚合物。总体来看,当尺寸一定时,碎片状的低密度微塑料聚合物在偏北部的试验点 O10 沉降通量更高,纤维状的低密度微塑料聚合物在位置中间的试验点 Q8 沉降通量更高,而薄膜状的低密度微塑料聚合物则在偏南部的试验点 R7 沉降通量更高,但尺寸为 2 ~ 5 mm 的各种形状的低密度微塑料聚合物均在偏北部的试验点 O10 沉降通量更高。

2.3 风速对各种低密度微塑料聚合物沉降通量的影响

在不同点位处,各种类型低密度微塑料聚合物的沉降通量随着风速的变快而增加(如图 3)。从整体来看,形状为纤维状,各个尺寸的低密度微塑料聚合物的沉降通量与风速的相关性更好,其相关系数变化范围为 0.218 ~ 0.836。形状为碎片状、块状和薄膜状的,各个尺寸的低密度微塑料聚合物的沉降通量与风速的相关性相对较差,其相关系数变化范围分别为 0.0046 ~ 0.86、-0.043 ~ 0.746 和 -0.159 ~ 0.76。

2.4 傅里叶变换红外光谱检测结果

由于在分析未知塑料材料方面具有极高的可靠性,傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)已被广泛应用于微塑料组分的鉴定^[39~41]。本研究对收集到的样品进行红外光谱测试。结果显示,在随机挑选的 60 个样品中,有 53 个被鉴定为微塑料,48 个为低密度微塑料,包括聚乙烯和聚丙烯。其中聚乙烯的个数为

30 个,聚丙烯的个数为 18 个,这两种低密度塑料的典型 FT-IR 光谱如图 4 所示。测定结果表明,捕获器中收集到的微塑料有 80% 为低密度微塑料聚合物,说明本研究的收集和分离方法是比较可靠的。

3 讨论

水环境中微塑料迁移是有关微塑料研究的新内容。如前文介绍,沉降是低密度微塑料聚合物在水环境中主要迁移过程。近些年来,不少学者通过试验和模型探究了微塑料在水环境中的沉降规律,其研究结果多为通过计算得出的理论值或模拟值,或者在静水状态下得出的试验结果^[25,42,43]。而低密度微塑料聚合物在实际水环境中的沉降受到诸多因素的影响,通过模型或室内试验很难准确地得到微塑料在自然水体中的沉降规律。低密度微塑料聚合物与湖泊中的悬浮物迁移行为相似,参考悬浮颗粒来探究微塑料在水环境中的迁移是探究水环境微塑料迁移研究的新方法^[12]。目前,已有学者利用悬浮物沉降公式估算了微塑料的沉降^[24,42]。本研究基于微塑料和悬浮物的相似和不同之处构建新的仪器——微塑料捕获器,同时建立试验方法。对比其他方法,微塑料捕获器能够直接地测量湖泊中低密度微塑料聚合物的沉降通量,同时考虑环境因素(如风速和流速)对其过程的影响,避免了室内试验和模型模拟的局限性和不确定性,更准确地量化湖泊中微塑料聚合物沉降过程。此外,微塑料捕获器装置结构简单,容易安装,稍加改动后,亦可测量其他湖泊、河流和海洋中微塑料的沉降。

3.1 风速对低密度微塑料聚合物沉降的影响

本文利用微塑料捕获器探究了风速对不同类型低密度微塑料聚合物沉降规律的影响。本试验结果表明,各类型低密度微塑料聚合物沉降通量随风速的增快而增大,说明风速对低密度微塑料聚合物的沉降有一定影响。根据低密度微塑料聚合物在湖泊中的迁移过程,微塑料捕获器中的低密度微塑料聚合物主要来自于以下 3 个方面:①沉积物中低密度微塑料聚合物在水动力作用下发生再悬浮,返回上覆水体,然后在重力作用下进入捕获器;②漂浮或悬浮在湖泊中的低密度微塑料不断吸附泥沙和藻类,当其整体密度大于水体后,沉降至捕获器中;③低密度微塑料聚合物通过水流进入湖泊并进行迁移,然后沉降到捕获器。

乌梁素海是典型的浅水湖泊,底部的沉积物质极易受风浪影响发生再悬浮,且沉积物再悬浮速率主要受风速的影响^[33]。有研究表明,浅水湖泊中再悬浮沉积物浓度与风速的相关系数可以达到

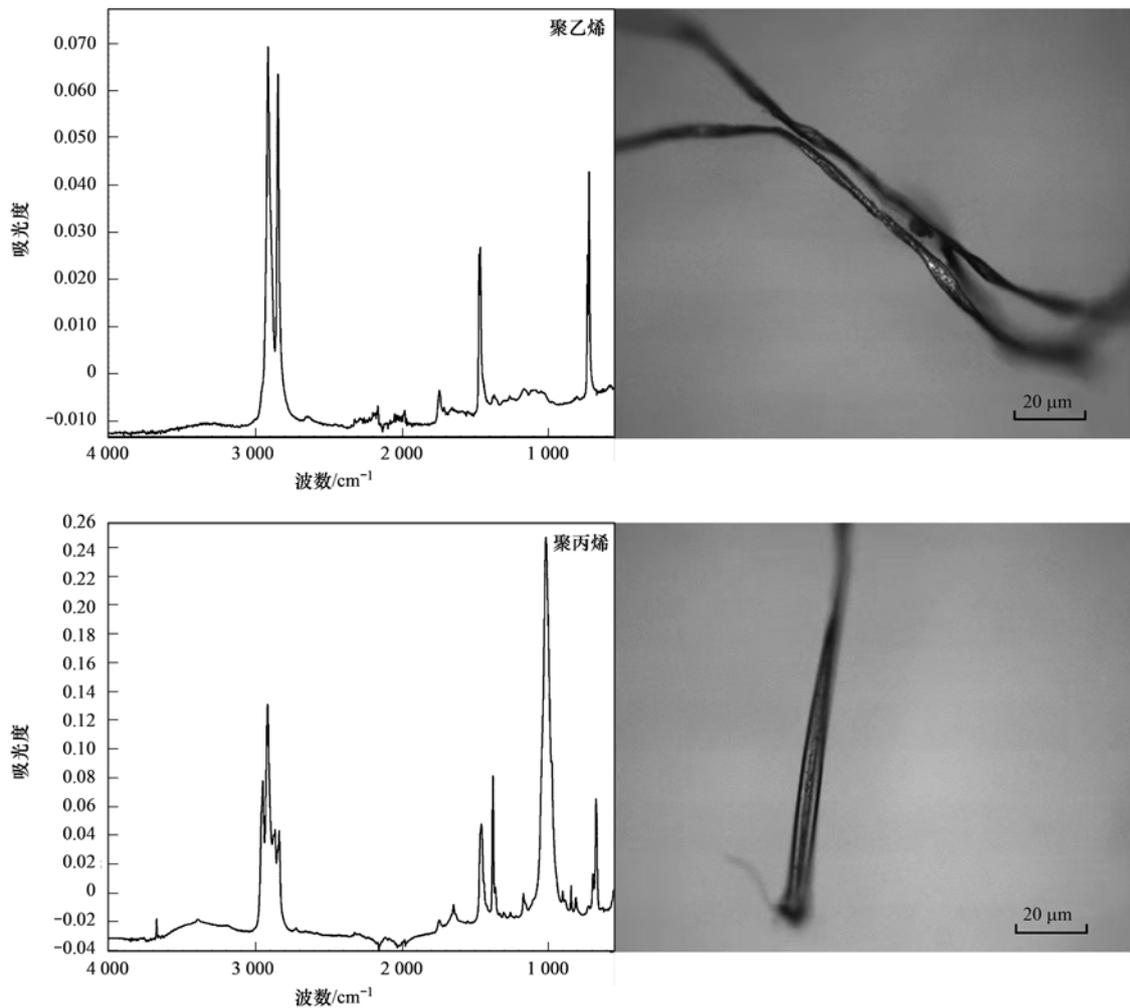


图 4 不同种类微塑料的红外光谱图

Fig. 4 FT-IR spectrum of different microplastic samples

0.981^[44]. 所以, 风速越快, 低密度微塑料聚合物的再悬浮通量也就越高, 结果其沉降通量也就越高, 所以乌梁素海中低密度微塑料聚合物沉降受风速影响. 整体来看, 形状为纤维状, 各个尺寸低密度微塑料聚合物沉降通量与风速的相关系数最高. Ho 等^[45]的研究通过室内试验和模型模拟探究了水罐中沉积物的再悬浮规律, 结果表明在相同水动力作用下, 沉积物尺寸越小或质量越低就越容易发生再悬浮. 在直径相同且密度相近的情况下, 纤维状微塑料表面积最小, 吸附的杂质最少, 整体质量相对较低, 更容易在风浪影响下发生再悬浮然后沉降, 因此其沉降通量与风速的相关性较好.

3.2 不同形状和不同尺寸的低密度微塑料聚合物沉降规律

本试验结果表明, 在不同风速下, 当形状相同时, 尺寸较大的低密度微塑料聚合物在位置偏北的试验点 O10 沉降通量较高, 而尺寸较小的低密度微塑料聚合物在位置中间和位置偏南的试验点 Q8 和 R7 沉降通量较高. 如前文介绍, 根据湖泊低密度微

塑料聚合物的迁移过程, 捕获器中部分低密度微塑料聚合物来自于输入河流. 乌梁素海的主要输入排干(总排干和八排干, 其入湖水量占湖泊总入湖水量的 90%~95%) 位于湖泊西北部, 湖泊中水流方向总体从北向南流动, 北部的试验点 O10 离入水口更近, 偏南部的试验点 R7 离入水口更远. 本试验结果说明, 大尺寸的低密度微塑料聚合物更容易沉降, 而小尺寸的低密度微塑料聚合物更容易向远距离输移. Besseling 等^[24]的研究利用 DUFLOW 模型模拟了微塑料在多梅尔河的迁移过程, 结果表明, 尺寸较大的微塑料迁移距离较短, 而尺寸较小的微塑料迁移距离则较远. Khatmullina 等^[25]的研究通过室内试验模拟了不同尺寸微塑料的沉降速率, 结果表明微塑料尺寸越大, 其沉降速率也就越快. 以上研究与本文的试验结果相似, 说明尽管湖泊和河流的水动力条件相差很大, 但尺寸对微塑料在湖泊和河流中的影响是相似的.

在不同风速下, 当尺寸相同时, 碎片状的低密度微塑料聚合物在偏北部的试验点 O10 沉降通量更

高,纤维状的低密度微塑料聚合物在位置中间的试验点 Q8 沉降通量更高,薄膜状的低密度微塑料聚合物则在偏南部的试验点 R7 沉降通量更高,而块状的低密度微塑料聚合物在各个试验点沉降通量相差不大,无明显规律. 本试验结果说明,薄膜状和纤维状的低密度微塑料聚合物更容易随水流迁移,而碎片状的低密度微塑料聚合物则不容易迁移,而更容易沉降. Hoellein 等^[46]的研究采用螺旋指标探究了河流中碎片状、纤维状和球状微塑料的迁移和沉降,结果表明,碎片状的微塑料迁移距离较短,而纤维和球状迁移距离较长. 此外,还有学者通过室内试验对比了纤维状、球状和短柱形微塑料的沉降速率,结果表明,在大小和材质相近的情况下,纤维状的沉降速率要比其他形状微塑料慢^[25]. 一般情况下,纤维状和薄膜状的低密度微塑料聚合物容易悬浮在水体当中,迁移距离较长,因此可能在较远的地方发生沉降. 在尺寸相近的情况下,碎片状的低密度微塑料聚合物通常比纤维状和薄膜状的低密度微塑料聚合物质量更大,更容易发生沉降. 且碎片状的低密度微塑料聚合物形状不圆润,不易在沉积物表面随水流运动,迁移能力弱,因此碎片状的低密度微塑料聚合物在离入水口近的地方沉降量更大.

4 结论

(1)在乌梁素海中,各种类型低密度微塑料聚合物沉降通量随风速的增快而增大,其中形状为纤维状,各个尺寸的低密度微塑料聚合物的沉降通量与风速的相关性较好,其相关系数变化范围为 0.218 ~ 0.836.

(2)不同风速下,在形状相同的情况下,尺寸较大的低密度微塑料聚合物在离湖泊入水口近的试验点沉降通量高,而尺寸较小的低密度微塑料聚合物在离湖泊入水口较远的试验点沉降通量较高,说明大尺寸的低密度微塑料聚合物在湖泊中更容易沉积,而小尺寸的低密度微塑料聚合物更容易随水流迁移.

(3)不同风速下,在尺寸相同的情况下,碎片状的低密度微塑料聚合物在离入水口较近的试验点沉降通量较高,而纤维状和薄膜状的低密度微塑料聚合物则在离湖泊入水口较远的试验点沉降通量较高,说明乌梁素海中纤维状和薄膜状的低密度微塑料聚合物更容易随水流迁移,而碎片状的低密度微塑料聚合物更容易沉积.

参考文献:

[1] Biginagwa F J, Mayoma B S, Shashoua Y, *et al.* First evidence of microplastics in the African Great Lakes: recovery from Lake Victoria Nile perch and Nile tilapia[J]. *Journal of Great Lakes*

Research, 2015, **42**(1): 146-149.

[2] Ballent A, Corcoran P L, Madden O, *et al.* Sources and sinks of microplastics in Canadian Lake Ontario nearshore, tributary and beach sediments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **110**(1): 383-395.

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

[4] Wu Y M, Guo P Y, Zhang X Y, *et al.* Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **374**: 219-227.

[5] Bergami E, Bocci E, Vannuccini M L, *et al.* Nano-sized polystyrene affects feeding, behavior and physiology of brine shrimp *Artemia franciscana* larvae [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **123**: 18-25.

[6] Gardon T, Reisser C, Soyez C, *et al.* Microplastics Affect energy balance and gametogenesis in the pearl oyster *Pinctada margaritifera*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(9): 5277-5286.

[7] Jin Y X, Xia J Z, Pan Z H, *et al.* Polystyrene microplastics induce microbiota dysbiosis and inflammation in the gut of adult zebrafish[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 322-329.

[8] De Sá L C, Oliveira M, Ribeiro F, *et al.* Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future? [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 1029-1039.

[9] Dobaradaran S, Schmidt T C, Nabipour I, *et al.* Characterization of plastic debris and association of metals with microplastics in coastline sediment along the Persian Gulf [J]. *Waste Management*, 2018, **78**: 649-658.

[10] Selvam S, Jesuraja K, Venkatramanan S, *et al.* Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123786.

[11] 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.

[12] Kooi M, Besseling E, Kroeze C, *et al.* Erratum to: modeling the fate and transport of plastic debris in freshwaters: review and guidance[A]. In: Wagner M, Lambert S (Eds.). *Freshwater Microplastics*[M]. Switzerland: Springer, 2018.

[13] Pastorino P, Pizzul E, Bertoli M, *et al.* First insights into plastic and microplastic occurrence in biotic and abiotic compartments, and snow from a high-mountain lake (Carnic Alps) [J]. *Chemosphere*, 2021, **265**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129121.

[14] Drummond J D, Nel H A, Packman A I, *et al.* Significance of hyporheic exchange for predicting microplastic fate in rivers[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(10): 727-732.

[15] Su L, Cai H W, Kolandhasamy P, *et al.* Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 347-355.

[16] 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.

[17] Fischer E K, Paglialonga L, Czech E, *et al.* Microplastic pollution in lakes and lake shoreline sediments—a case study on Lake Bolsena and Lake Chiusi (central Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 648-657.

- [18] Suaria G, Aliani S. Floating debris in the Mediterranean Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **86**(1-2): 494-504.
- [19] 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.
- [20] Rocha-Santos T, Duarte A C. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, **65**: 47-53.
- [21] Wang Z C, Qin Y M, Li W P, *et al.* Microplastic contamination in freshwater: first observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, **17**(4): 1821-1830.
- [22] 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.
- [23] Ballent A, Pando S, Purser A, *et al.* Modelled transport of benthic marine microplastic pollution in the Nazaré Canyon [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(12): 7957-7970.
- [24] Besseling E, Quik J T K, Sun M Z, *et al.* Fate of nano-and microplastic in freshwater systems: a modeling study [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 540-548.
- [25] Khatmullina L, Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **114**(2): 871-880.
- [26] Martin J, Lusher A, Thompson R C, *et al.* The deposition and accumulation of microplastics in marine sediments and bottom water from the Irish continental shelf [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**, doi: 10.1038/s41598-017-11079-2.
- [27] Chung E G, Bombardelli F A, Schladow S G. Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake [J]. *Ecological Modelling*, 2009, **220**(9-10): 1251-1265.
- [28] Tammeorg O, Niemistö J, Möls T, *et al.* Wind-induced sediment resuspension as a potential factor sustaining eutrophication in large and shallow Lake Peipsi [J]. *Aquatic Sciences*, 2013, **75**(4): 559-570.
- [29] Qi C, Xu X G, Shi K, *et al.* In situ resuspension rate monitoring method in the littoral zone with multi-ecotypes of a shallow wind-disturbed lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(8): 7476-7485.
- [30] Maxam A M, Webber D F. The influence of wind-driven currents on the circulation and bay dynamics of a semi-enclosed reefal bay, Wreck Bay, Jamaica [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **87**(4): 535-544.
- [31] Bloesch J. A review of methods used to measure sediment resuspension [J]. *Hydrobiologia*, 1994, **284**(1): 13-18.
- [32] Gasith A. Tripton sedimentation in eutrophic lakes-simple correction for the resuspended matter [J]. *SIL Proceedings*, 1975, **19**(1): 116-122.
- [33] Liu Y, Zhang S, Li C Y, *et al.* A modified QWASI model for fate and transport modeling of Zn and Pb in a shallow lake during the ice-free period [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 577-584.
- [34] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, *et al.* A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 161-169.
- [35] Cooper D A, Corcoran P L. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(5): 650-654.
- [36] 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.
- [37] Mao R F, Hu Y Y, Zhang S Y, *et al.* Microplastics in the surface water of Wuliangshai Lake, northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137820.
- [38] Qin Y M, Wang Z C, Li W P, *et al.* Microplastics in the sediment of Lake Ulansuhai of Yellow River Basin, China [J]. *Water Environment Research*, 2020, **92**(6): 829-839.
- [39] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(9): 3404-3409.
- [40] 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.
Wang Z C, Yang J L, Yang F, *et al.* Distribution characteristics of microplastics in ice sheets and its response to salinity and chlorophyll a in the Lake Wuliangshai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 673-680.
- [41] 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 等. 辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1781-1790.
Han L H, Xu L, Li Q L, *et al.* Levels, characteristics, and potential source of micro(meso)plastic pollution of soil in Liaohé River basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1781-1790.
- [42] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, *et al.* A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, **18**(8): 1050-1059.
- [43] Li Y F, Zhang H, Tang C. A review of possible pathways of marine microplastics transport in the ocean [J]. *Marine Microplastic Anthropocene Coasts*, 2020, **3**(1): 6-13.
- [44] Wang J J, Pang Y, Li Y P, *et al.* Experimental study of wind-induced sediment suspension and nutrient release in Meiliang Bay of Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(14): 10471-10479.
- [45] Ho C K, Christian J M, Ching E J, *et al.* Sediment resuspension and transport in water distribution storage tanks [J]. *Journal-American Water Works Association*, 2016, **108**(6): E349-E361.
- [46] 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**, doi: 10.1038/s41598-019-40126-3.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polthioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)