

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
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	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事	(522)
《环境科学》征稿简则	(722)
信息	(748, 899, 924)

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

王志超¹, 杨建林¹, 杨帆¹, 杨文焕¹, 李卫平^{1*}, 李兴²

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010; 2. 内蒙古师范大学内蒙古节水农业工程研究中心, 呼和浩特 010022)

摘要: 目前关于淡水湖泊冰盖中微塑料的分布特征研究还鲜见报道。为阐明乌梁素海冰盖中微塑料的赋存特征以及其与冰盖盐度、叶绿素 a 浓度之间的响应关系, 通过野外采样、显微镜观察、傅里叶红外光谱测定和相关性分析等方法, 对冰封期乌梁素海冰盖中微塑料的丰度、颜色、形状和种类进行鉴定, 通过相关性分析探求微塑料在冰盖中的分布特征及其与盐度、叶绿素 a 之间的响应关系。结果表明, 乌梁素海冰盖中微塑料平均丰度为 $56.75 \sim 141 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$, 约为乌梁素海表层水体中微塑料丰度的 10 ~ 100 倍; 纤维状为最常见的微塑料类型, 其次是碎片状。乌梁素海冰盖中微塑料的丰度在水平方向上呈现出从上游到下游逐渐递减的趋势, 在垂直方向上则与盐度呈显著正相关, 表层冰和底层冰丰度大于中层冰和近底层冰; 微塑料丰度与叶绿素 a 浓度则未发现相关性。此外, 受冰盖对水体中微塑料颗粒捕获效应的影响, 微塑料在冬季被临时储存于冰盖中, 直到春季又被重新释放进入水体。本研究可为乌梁素海微塑料的污染治理提供参考和借鉴。

关键词: 乌梁素海; 微塑料; 冰封期; 分布特征; 相关性分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0673-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007042

Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsu Hai

WANG Zhi-chao¹, YANG Jian-lin¹, YANG Fan¹, YANG Wen-huan¹, LI Wei-ping^{1*}, LI Xing²

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Water Saving Agricultural Engineering Research Center, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: There are sparse reports on the distribution of microplastics in the ice sheets of freshwater lakes. In this study, the abundance, color, shape, and species of microplastics in the ice sheet of Lake Wuliangsu Hai were characterized using field sampling and microscope observations. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and correlation analysis were used to examine the distribution of microplastics contained in the lake and its relationships with salinity and chlorophyll a. The results show that the average abundance of microplastics in the Lake Wuliangsu Hai ice sheet is $56.75 \sim 141 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$, which is approximately 10-100 times higher than in the surface water of the Lake Wuliangsu Hai. Fibers were the most common type of microplastics followed by fragments. Overall abundance showed a decreasing trend in the downstream horizontal direction and was positively correlated with salinity in the vertical direction. The abundance of microplastic in the surface ice and bottom ice was greater than in the middle of the ice and near bottom of the ice. There was no correlation between the abundance of microplastic and the concentration of chlorophyll a. In addition, due to the capturing effect of the ice, microplastic particles are temporarily stored in the ice sheet in winter, which are released into water in spring. This study provides baseline information to inform microplastic pollution control measures in Lake Wuliangsu Hai.

Key words: Lake Wuliangsu Hai; microplastics; frozen period; distribution characteristics; correlation analysis

塑料制品自 20 世纪 50 年代大规模使用以来, 因回收机制不健全等原因, 导致海洋和淡水环境中的塑料垃圾数量急剧增加^[1]。据估计, 截止到 2015 年, 全球累积产生塑料废物约 63 亿 t, 其中 9% 被回收, 12% 被焚烧, 79% 被填埋在土地或遗弃在水环境中^[2], 而塑料垃圾进入水土环境后在风化、降解和生物等共同作用下碎化为更小的颗粒或碎片, 其中尺寸 $< 5 \text{ mm}$ 的塑料碎片被定义为“微塑料”^[3, 4]。目前, 微塑料污染已越来越受到国内外学者的重视, 并已演变成为全球性环境问题^[5~8]; 特别是由于其密度轻和体积小等原因, 微塑料在进入水体后很容易被生物误食并引起生物肠道磨损和堵塞等问题,

根据已有研究, 水体中的浮游动物、无脊椎动物、鱼类、海鸟和哺乳动物体内均发现了微塑料的存在^[9~12]。

然而, 目前关于微塑料的研究多集中于其在海洋、淡水湖泊的表层水体和沉积物中的赋存特征、毒理效应和污染特性等方面^[13], 少部分于寒冷地区海

收稿日期: 2020-07-05; 修订日期: 2020-07-24

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2019BS05004, 2020MS02017); 内蒙古科技大学科研启动基金项目 (2019QDL-B42); 国家重点研发计划项目 (2019YFC0409204); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY19132)

作者简介: 王志超 (1988 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水土环境污染控制与生态修复, E-mail: wzc5658@126.com

* 通信作者, E-mail: sjlwp@163.com

冰中的分布特征等^[14]。有研究表明,北极海冰中存在高丰度的微塑料颗粒,其测量丰度比海水中高几个数量级^[15]; Geilfus 等^[16]在波罗的海进行的实地研究则发现,海冰融水中微塑料的丰度为 $8 \sim 41 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,而随着微塑料丰度的增加,海冰与微塑料的结合将影响海冰反照率; Kelly 等^[17]的研究通过对比不同时期南极冰芯中微塑料颗粒的丰度,发现南极海冰中微塑料的丰度呈现出稳步增加的趋势。因此,海冰有可能成为海洋中微塑料的重要临时储存和运输工具,并对海洋食物网产生影响^[17, 18]。但目前微塑料在淡水湖泊冰盖中的分布特征研究还较匮乏,特别是关于微塑料在冰盖中分布的影响因素分析等方面的研究还鲜见报道。

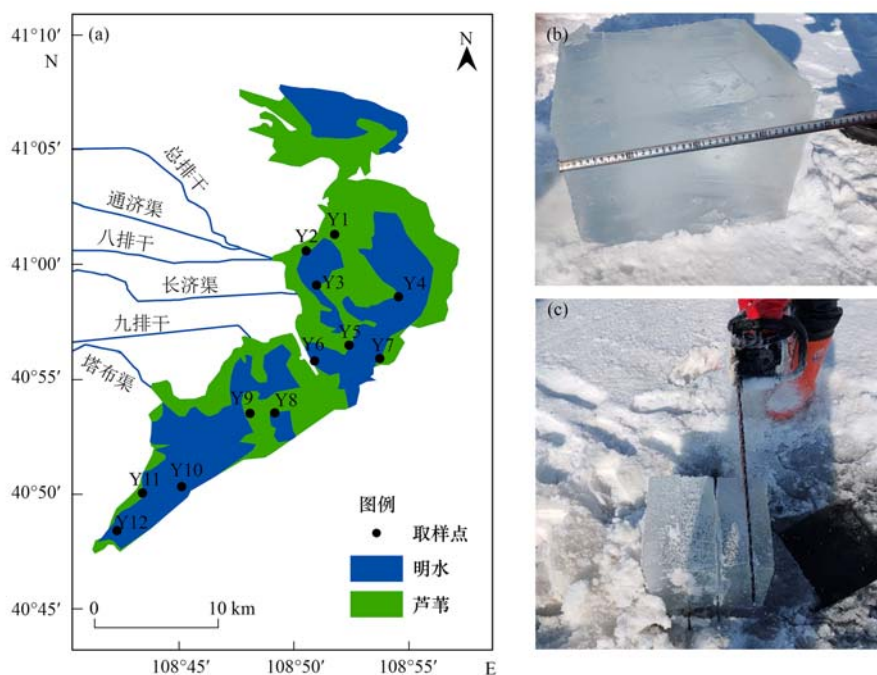
另一方面,冰的生长是一个空间和时间的过程,其生长过程中会结合水体中的颗粒物质,而微塑料密度较低,在冰的生长过程中更容易被并入冰体中^[15]。根据相关学者对海冰中微塑料丰度与环境变量的响应关系研究发现,叶绿素 a 和盐度对海冰中微塑料垂直分布的影响较为明显^[19];如在 Hoffmann 等^[12]的研究指出,随着水的盐度从 $34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,冰下水中微塑料的相对含量从 96% 减少到 50%,表明海冰中盐度与微塑料丰度有着显著的正相关性;而 Kelly 等^[17]的研究则发现冰芯整体盐度、叶绿素 a 与微塑料的垂直分布具有明显的相似性。根据 Wang 等^[19]的研究,处于我国北方高寒地区的乌梁素海水体中微塑料已达

$1.76 \sim 10.03 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,且湖水盐度较高^[20],叶绿素 a 呈现冰封期高于非冰封期的特征^[21]。因此,确定微塑料在乌梁素海冰盖中被截留的程度,研究冰封条件下冰盖中微塑料的分布特征,阐明冰盖中微塑料丰度与盐度、叶绿素 a 的响应关系,对解析微塑料在淡水湖泊冰盖中的分布具有重要意义,以期为乌梁素海微塑料污染的治理提供一定的理论基础与依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海 ($40^{\circ}36' \sim 41^{\circ}03' \text{ N}$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57' \text{ E}$) 坐落于内蒙古自治区西部,巴彦淖尔市乌拉特前旗境内。乌梁素海年均水深 1.8 m ,水面面积 298.5 km^2 ,芦苇区占湖面面积的 41.2% ,其中水生植物密集区域为湖面面积的 20.9% ^[22]。乌梁素海地处高纬度的蒙新高原地区,是全球范围内同纬度荒漠半荒漠地区最大的湿地湖泊,同时也是我国八大淡水湖之一,具有净化水质,调节水量,减缓水体富营养化等生态作用^[23]。乌梁素海主要承接来自河套灌区的农田退水以及来自周边地区生活污水和工业废水;由于地处北方,受到太阳辐射、大气环流和地理地貌等因素影响,四季交替明显,年均气温 7.5°C ,湖水于每年 11 月初结冰,直到翌年 3 月末到 4 月初开始融化,冰封期约为 5 个月,冰盖总体积约占湖泊总体积的 $1/3 \sim 1/2$,多年冰盖平均冰厚 0.3



(a) 乌梁素海取样点分布; (b) 测量冰厚; (c) 冰样分层

图 1 乌梁素海取样点分布及野外冰样采集

Fig. 1 Distribution of sampling points and field ice sample collection in Lake Ulansuhai

~0.6 m^[22, 23].

1.2 取样方法

综合考虑安全性和样品完整性等,于2019年1月12、13日对乌梁素海上游(Y1、Y2、Y3、Y4)、中游(Y5、Y6、Y7、Y8、Y9)和下游(Y10、Y11、Y12)等12个采样点进行冰样采集工作[图1(a)].利用GPS定位仪在湖上进行取样点定位,清除湖面表层积雪后,使用油锯采集冰样.根据前人对乌梁素海冰盖取样的研究^[24],因各点冰厚不同,在现场测量冰厚数据后[图1(b)],使用油锯将冰柱自上而下按冰厚的0~10%(表层冰),10%~50%(中层冰),50%~85%(近底层冰)和85%~100%(底层冰)进行切割[图1(c)].共采集12个点的48份样品,所有样品在-15℃环境下保存并带回实验室进行检测.

1.3 微塑料的分离与提取

根据Peeken等对海冰冰芯的处理方法,为避免冰样采集、储存过程中的潜在污染,使用不锈钢刀将冰样表面去除并用超纯水冲洗^[14].每个冰样放置在体积为2 L玻璃容器内,在室温下融化.量取1 L体积的融水,加入100 mL 30%的H₂O₂溶液消解有机物质,24 h后使用玻璃砂芯过滤器(滤膜使用孔径为0.45 μm的玻璃纤维滤膜)过滤实验样品,后将每个滤膜放置在培养皿中置于45℃环境中干燥.余下融水样品一部分使用水质分析仪检测不同冰层融水盐度,一部分通过丙酮提取法测量叶绿素a浓度.使用立体显微镜(M165FC,徕卡,德国)观察干燥的滤膜,对微塑料颗粒进行计数,利用激光共聚焦显微镜(奥林巴斯,OLS4000)测定微塑料的粒径与形貌特征,通过傅里叶红外光谱仪(RXI,美国)分析微塑料样品的官能团并确认微塑料样品的化学组成.

1.4 质量保证和控制

为防止外部潜在的微塑料污染,在取样和实验过程中穿戴棉质衣物和一次性丁腈手套,避免使用塑料容器.玻璃容器只能在450℃的熔炉中热处理后使用.清洁实验台和室内环境,减少空气中纤维对实验结果的影响.

1.5 数据处理与分析

采用Excel 2017 进行数据处理,SPSS 22.0 进行相关性分析,Origin 2017 进行分析制图.

2 结果与分析

2.1 乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征

乌梁素海上游、中游和下游不同冰层中微塑料的丰度特征如图2所示,从中可知,乌梁素海冰盖中

微塑料的平均丰度为56.75~141 n·L⁻¹,约是相同取样点水体中微塑料丰度的10~100倍^[19];其中平均丰度最大点位于上游的Y4点(141 n·L⁻¹),最小点位于中游的Y8点(56.75 n·L⁻¹),整体呈现出丰度从上游到下游逐渐递减的趋势.另由图2可以发现,在垂直方向上,除Y4点外,乌梁素海冰盖中微塑料丰度均呈现出表层冰和底层冰丰度大于中层冰和近底层冰的特征,在所有取样点中,表层冰、中层冰、近底层冰和底层冰中微塑料丰度分别占微塑料总丰度的37%、17%、12%和34%.另,冰盖中微塑料的主要类型见[图3(a)],乌梁素海冰盖中微塑料主要为纤维、碎片和薄膜这3种类型,其中大多数微塑料是纤维类(87.7%),其余是碎片类(8.1%)和薄膜类(4.2%).就微塑料聚合物组成而言,在冰盖中共发现聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)这3种类型的合成聚合物(图4),其中PE(68.1%)和PS(24.6%)占总体优势,其次是PET(7.3%)[图3(b)].根据微塑料的尺寸等级,另由检测发现,乌梁素海冰盖中微塑料主要分为6类:<0.5 mm(27.4%)、0.5~1 mm(23.1%)、1~2 mm(19.5%)、2~3 mm(14.5%)、3~4 mm(9.3%)和4~5 mm(6.2%)[图3(c)].冰盖中微塑料有多种颜色,其中大多数是黑色(58.6%),其次是透明(29.7%)、红色(5.2%)、蓝色(3.7%)和绿色(2.8%)[图3(d)].

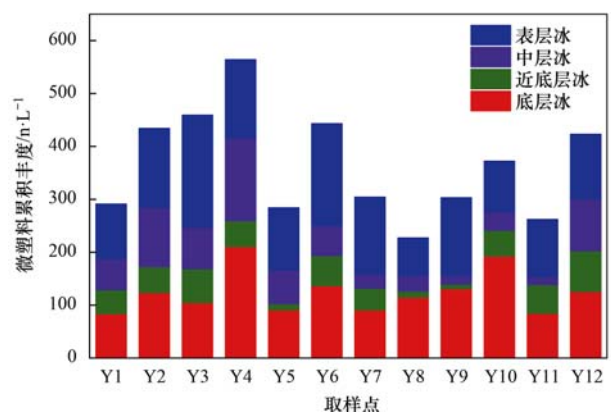
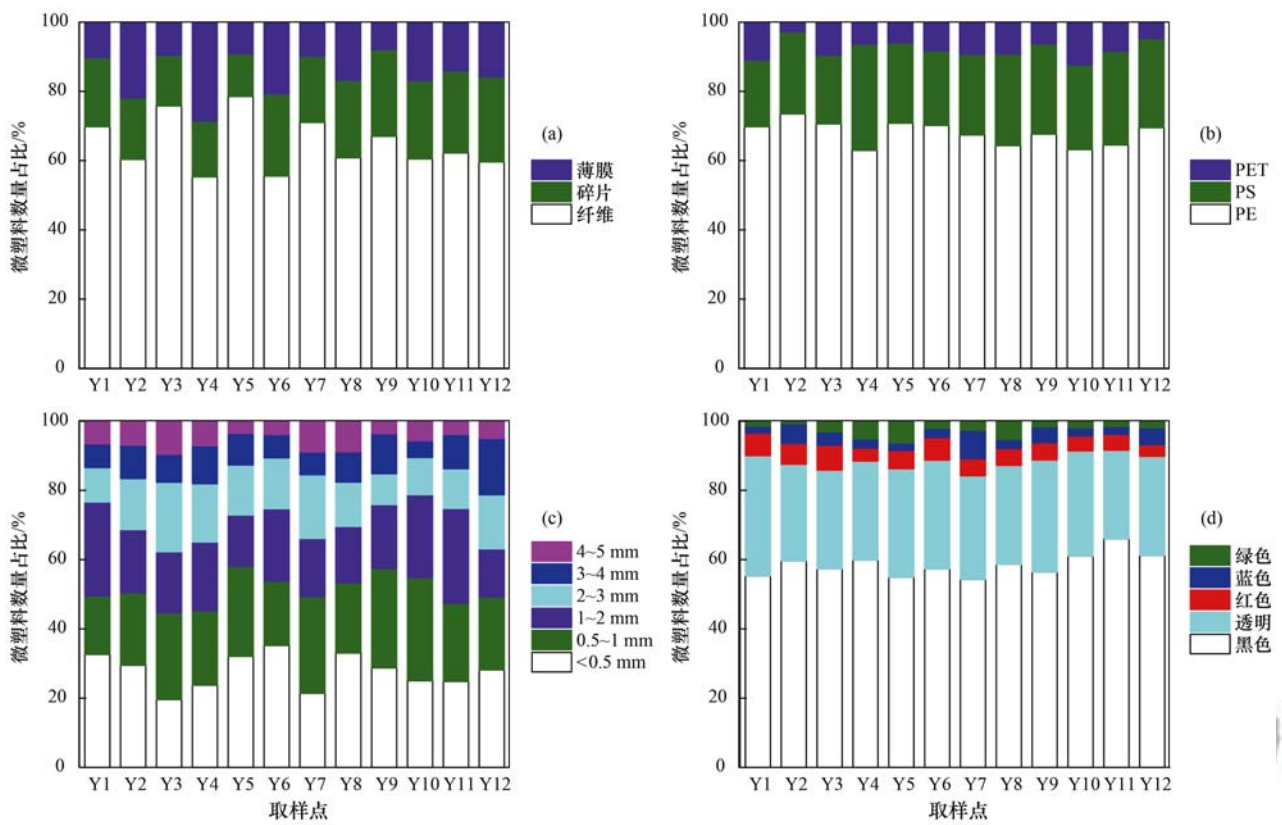


图2 乌梁素海不同冰层中微塑料的累积丰度分布

Fig. 2 Cumulative abundance distribution of microplastics in different ice layers in Lake Ulansuhai

2.2 盐度和叶绿素与微塑料分布的相关性分析

乌梁素海上游、中游和下游不同百分比厚度冰盖中盐度的分布如图5所示.从中可知,在水平方向上,冰盖盐度最大值位于Y12点,平均盐度65 mg·L⁻¹,最小值位于Y9点,平均盐度15 mg·L⁻¹,整体呈现出上游至中游递增,随后沿水流方向递减,最后在退水渠附近又逐渐增加的趋势.在垂直方向上,盐度则随着冰盖深度的增加呈现出先减少后增



(a) 微塑料的形状比例; (b) 微塑料的成分比例; (c) 微塑料的尺寸比例; (d) 微塑料的颜色比例

图3 乌梁素海冰盖中微塑料形状、成分、尺寸和颜色比例

Fig. 3 Shape, composition, size, and color ratios of microplastics in the Lake Ulansuhai ice sheet

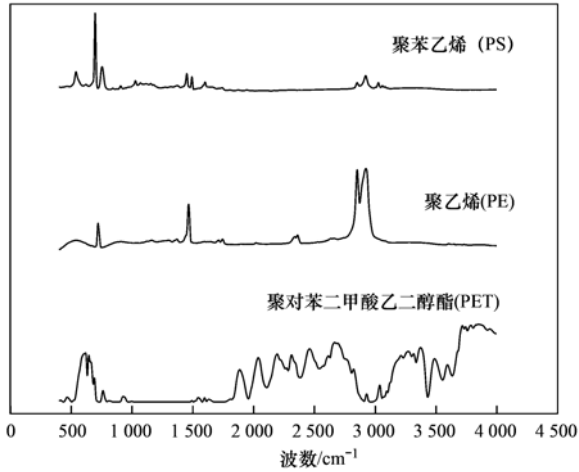


图4 微塑料样品 FTIR 图像

Fig. 4 FTIR image of a microplastic sample

加的趋势,如图5所示,冰盖表层、中层、近底层和底层的盐度分别为20~100、10~50、10~20和20~120 mg·L⁻¹,与营养盐在冰盖中垂直分布的情况类似^[25],表层盐度较高的原因主要有3个方面,一是由于乌梁素海昼夜温差较大,白天较高的气温致使表层冰体融化,中层冰向水体中释放盐分,在温度降低时融化的盐水再次结冰,导致表层冰盐度较高。二是由于乌梁素海的低气温导致表层冰产生更多的分枝,分枝越多所捕获的盐分越多。三是由于表层

冰体中水分的蒸发,使得表层盐度浓度增加。底层冰盐度较高主要由于相对于表层,底层冰温度较高,氢键间的作用力较小,造成底层冰空隙较大,盐分进入冰体,使得底层冰盐度较高。

另由图5可知,乌梁素海冰盖中叶绿素a浓度最大值位于Y10点,平均浓度75.37 μg·L⁻¹,最小值位于Y7点,平均浓度19.96 μg·L⁻¹。整体而言,在水平方向与垂直方向上,叶绿素a浓度都没有明显的变化趋势。造成这种现象的原因主要是乌梁素海中浮游植物的分布对叶绿素的浓度有着重要影响,叶绿素a是水生植物分布的指示剂,其在淡水湖泊冰盖中的分布主要受水生植物密度的影响^[26]。而乌梁素海水生植物主要分布于湖中部、西岸、东部和北部^[23],对比本研究中各取样点叶绿素a浓度发现,其浓度差异与水生植物的分布具有一定的相似性,位于水生植物密集区域的叶绿素a浓度普遍高于其他地区,如Y2、Y5和Y10点的叶绿素a浓度在所有取样点中最高,而其他区域相对较低。

3 讨论

3.1 冰封对乌梁素海冰盖中微塑料丰度的影响
本研究对乌梁素海冰盖中12个取样点进行微塑料丰度分析发现,冰盖融水中微塑料的丰度介于

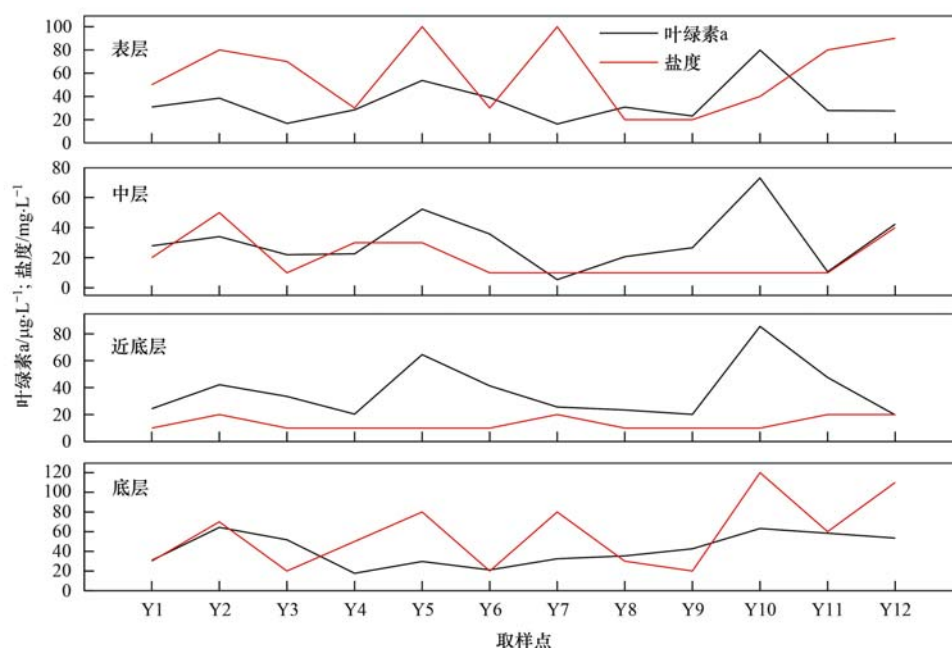


图5 乌梁素海冰盖中盐度与叶绿素 a 的分布

Fig. 5 Distribution of salinity and chlorophyll a in the ice layer of Lake Ulansuhai

56.75 ~ 141 $\text{n}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 远高于本课题组前期对该相同 12 个取样点表层水体、底泥沉积物中微塑料丰度的检测值。根据前期研究, 乌梁素海表层水体中微塑料丰度介于 $1.76 \sim 10.03 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间^[19], 而底层沉积物中微塑料丰度介于 $[(14 \pm 3) \sim (24 \pm 7) \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}]$ (湿重) 之间^[27], 故乌梁素海冰盖中微塑料丰度约比表层水体和底层沉积物高 1 ~ 2 个数量级; 从冰、水、泥整体而言, 冰盖中的微塑料丰度最大, 其次是底泥沉积物, 水体中微塑料丰度最小。本研究结果与 Kanhai 等^[18] 对北极海冰中微塑料的丰度研究相似, 在该研究中, 海冰中微塑料的丰度约为 $2 \sim 17 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$, 而水体中的微塑料丰度约为 $0 \sim 1.8 \times 10^{-2} \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$, 海冰中微塑料丰度约是水体中的 1000 倍; 另在 Kelly 等^[17] 对南极东部海冰里的研究也表现出类似的实验结果, 海冰中微塑料丰度约为 $6 \sim 33 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$, 与 Isobe 等^[28] 在南极水体中观察到的微塑料丰度约为 $3.1 \times 10^{-5} \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$ 相差近百万倍。

尽管目前关于淡水湖泊冰盖中微塑料分布的研究较为少见, 但经分析乌梁素海冰盖中微塑料丰度显著大于水体的现象可能是由以下原因造成的: 一是冰盖在成冰的生长过程中, 与会释放氮、磷等常规污染物不同^[29], 反而会从冰下水体中捕获微塑料颗粒^[16], 导致微塑料颗粒随着冰盖的不断生长而因集聚效应越来越多, 使得冰盖成为乌梁素海冰封期微塑料的一个重要的临时储存场所。二是每年 10 月河套灌区都会进行大规模秋浇灌水, 所产生的农田退水沿河套灌区各排水干沟退回乌梁素海^[30], 而已有研究表明, 河套灌区排干渠中含有大量微塑料颗

粒^[31], 随着退水结束, 乌梁素海进入冰封期 (每年 11 月), 湖面开始结冰, 随退水进入湖泊的微塑料颗粒随即被冰盖捕获。所以根据冰盖的形成和融化周期, 随退水入湖的微塑料颗粒会季节性地在冬季被冰盖捕获, 直到春季才从冰中释放出来, 相关研究表明, 由于冰盖对微塑料的捕获与释放, 使得微塑料在湖泊表层区域的停留时间延长, 增加了水生生物对其利用的时间, 从而提高了水生生物受到伤害的可能^[17]。

3.2 盐度与叶绿素 a 对冰盖中微塑料垂向分布的影响

乌梁素海冰盖中微塑料丰度与盐度、叶绿素 a 之间的皮尔逊相关关系如表 1 所示。从中可知, 微塑料丰度与盐度在冰中的垂直分布趋势具有显著相关性 ($P < 0.05$), 相关系数均在 0.95 以上, 其中 Y9 点相关系数最大为 0.995, Y5 点相关系数最小为 0.954, 说明冰盖中盐度对微塑料丰度的垂直分布有较大影响。表层冰与底层冰的盐度与微塑料丰度均高于中间层冰, 其中, 表层冰中大量的微塑料主要来源于秋冬季冰面形成初期, 微塑料粘附在初冰上从而导致微塑料在冰层表面的积累^[17]。而其高盐度除 2.2 节中所述的 3 个方面以外, 表层冰中高浓度的微塑料颗粒也可能对其盐分的迁移造成一定的影响, 从而导致盐分在表层冰中累积。另外, 表层冰中大量微塑料颗粒还可能影响冰体中盐分通过盐水通道转移的过程, 使得盐分最终滞留在冰中。Geilfus 等^[16] 通过实验表明, 海冰表面的微塑料丰度较高可能是由于底层水中的微塑料颗粒在海冰生长

早期被结合在冰中,而高丰度的微塑料改变了海冰的生长,微塑料的富集导致海冰盐水通道中颗粒浓度的增加,当盐水通过通道移动时,向上排出的盐水最终停留在海冰表面,使得表层冰中出现高浓度的液体. 而底层冰中发现的大量微塑料颗粒,其主要由于在冰的生长过程中冰-水界面盐度逐渐增大^[18],使得冰下水中越来越多的微塑料颗粒在冰-

水界面聚集,从而在冰的生长过程中被底层冰捕获,最终导致底层冰中微塑料丰度高于中层冰. Hoffmann 等^[12]的研究发现,冰中微塑料的相对丰度随着海水盐度的增加而增加,盐度在 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右时冰中微塑料的相对丰度最高(约为 50%),盐度在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右的冰中微塑料的相对丰度最低(约为 10%).

表 1 乌梁素海不同取样点冰芯盐度和叶绿素 a 浓度与微塑料丰度的皮尔逊相关分析

Table 1 Pearson's correlations for salinity and chlorophyll a concentrations and microplastics abundance in ice cores at different sampling points in the Lake Ulansuhai

影响因素	采样点											
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12
盐度	0.981 *	0.980 *	0.980 *	0.981 *	0.954 *	0.996 **	0.971 *	0.988 *	0.995 **	0.992 **	0.960 *	0.975 *
叶绿素 a	0.930	0.097	-0.442	0.137	-0.792	-0.231	0.243	0.942	0.486	0.936	0.484	0.910

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

另由表 1 可以看出,各取样点叶绿素 a 浓度与微塑料丰度之间均未表现出显著相关性($P > 0.05$),说明叶绿素 a 浓度对微塑料丰度在淡水湖泊冰盖中的垂直分布产生的影响较小或无影响. 但是,此结果与其他研究人员对冰盖中叶绿素 a 浓度与微塑料丰度之间的关系所得出的结论有所差异. 如 Peeken 等^[14]的研究发现,与海冰中叶绿素 a 的垂直分布一般呈 L 型相比,微塑料在海冰中的垂直分布变化差异较大,而相关性分析表明,微塑料在海冰中的垂直分布与其聚合物组成种类(N)和 Shannon-Wiener 系数(H')之间只有很少的显著相关性,而与叶绿素 a 浓度之间存在显著的负相关关系^[19]. Hoffmann 等^[12]的研究通过培养冰藻分析生物量与海冰结合微塑料颗粒之间的关系,虽然实验最终没能证明微塑料通过附着在冰藻细胞上,从而向海冰中的迁移量增加,但是在实验中确实发现了冰藻和微塑料之间相互作用的迹象,即在海冰存在的情况下,相较于没有微塑料的培养,当与微塑料一起培养时,在冰中发现的藻类细胞明显更少. 截至目前,生物量对冰中微塑料含量的影响还没有统一的结论,不过值得注意的是,这一结果可能表明冰中微塑料的分布是极不均匀的. 因此,在计算湖泊冰盖或者是海冰中微塑料含量时,如果仅用单一截面的丰度值估算整体的含量,将会对结果产生严重的影响^[17]. 而对于叶绿素 a 浓度与冰体中微塑料含量之间的相互关系,还有待更加深入地研究.

自然情况下,微塑料在冰中的垂直分布所受到的影响因素是复杂的. 根据资料显示,湖水结冰过程中,由于溶解在液态水中的气体来不及逃逸,通常会形成气泡镶嵌在冰体内,受湖面温度和风浪扰动等不稳定因素的影响,通常表层冰中气泡细小繁多、

分布杂乱,而中层冰由于形成环境稳定,气泡较少,底层冰由于与液态水接触,冰层较为松散^[25]. 因此,冰盖中气泡含量、大小和形状等因素都有可能对微塑料在冰体内的分布产生影响. 所以,在下一步的研究中,建议采用建模的方式,更全面地模拟自然状态下微塑料颗粒所受的物理作用和生物作用,将有助于解析微塑料在冰中的分布规律.

4 结论

本研究结果表明:乌梁素海冰盖中微塑料平均丰度为 $56.75 \sim 141\text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$,约为表层水体中微塑料丰度的 10 ~ 100 倍,故冰盖是乌梁素海冰封期微塑料的重要临时储存场所;微塑料在乌梁素海冰盖中的水平方向上呈现从上游向下游逐渐递减的趋势,垂直方向上呈现表层冰与底层冰大于中间层的分布特征. 乌梁素海冰盖中平均盐度介于 $15 \sim 65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,盐度在冰盖中的垂直分布呈现表层和底层高于中层和近底层的趋势,统计分析表明其与微塑料丰度的垂直分布具有显著相关性;冰盖中叶绿素 a 浓度的垂直分布较为杂乱,相关性分析表明其与微塑料丰度不具有显著相关性.

参考文献:

[1] 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 W H, Jian M F, Liu S L, et al. Occurrence relationship between microplastics and heavy metals pollutants in the estuarine sediments of Poyang Lake and the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 242-252.
[2] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 2017, 3(7), doi: 10.1126/sciadv.1700782.
[3] 王彤,胡献刚,周启星. 环境中微塑料的迁移分布、生物效应及分析方法的研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(4): 385-395.

- Wang T, Hu X G, Zhou Q X. The research progress in migration, distribution, biological effects and analytical methods of microplastics[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(4): 385-395.
- [4] Jacques J. Mulching with microplastics[J]. Water Environment & Technology, 2019, **31**(4): 19-20.
- [5] Fan Y J, Zheng K, Zhu Z W, et al. Distribution, sedimentary record, and persistence of microplastics in the Pearl River catchment, China[J]. Environmental Pollution, 2019, **251**: 862-870.
- [6] Ding L, Mao R F, Guo X T, et al. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **667**: 427-434.
- [7] Pan Z, Guo H G, Chen H Z, et al. Microplastics in the Northwestern Pacific: Abundance, distribution, and characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 1913-1922.
- [8] Eo S, Hong S H, Song Y K, et al. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea[J]. Water Research, 2019, **160**: 228-237.
- [9] 谢沅汕, 张清科, 张漓杉, 等. 污水处理厂对漓江桂林市区河段淡水生物中微塑料累积的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4999-5007.
- Xie Y S, Zhang Q K, Zhang L S, et al. Impact of sewage treatment plant on the accumulation of microplastics in freshwater organisms in the Lijiang River of Guilin urban section[J]. Environmental Science, **41**(11): 4999-5007.
- [10] 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, **41**(8): 3612-3620.
- Zhao X, Chen H, Jia Q L, et al. Pollution status and pollution behavior of microplastic in surface water and sediment of Urban Rivers[J]. Environmental Science, **41**(8): 3612-3620.
- [11] 田媛, 涂晨, 周倩, 等. 环渤海海岸大气微塑料污染时空分布特征与表面形貌[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1401-1409.
- Tian Y, Tu C, Zhou Q, et al. The temporal and spatial distribution and surface morphology of atmospheric microplastics around the Bohai Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(4): 1401-1409.
- [12] Hoffmann L, Eggers S L, Allhusen E, et al. Interactions between the ice algae *Fragillariopsis cylindrus* and microplastics in sea ice[J]. Environment International, 2020, **139**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105697.
- [13] 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, **41**(7): 3240-3248.
- Wang X, Niu S P, Song X L, et al. Characterization of microplastic pollution of sediments from Urban Lakes[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3240-3248.
- [14] Peeken I, Primpke S, Beyer B, et al. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic[J]. Nature Communications, 2018, **9**, doi: 10.1038/s41467-018-03825-5.
- [15] Obbard R W, Sadri S, Wong Y Q, et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice[J]. Earth's Future, 2014, **2**(6): 315-320.
- [16] Geilfus N X, Munson K M, Sousa J, et al. Distribution and impacts of microplastic incorporation within sea ice[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **145**: 463-473.
- [17] Kelly A, Lannuzel D, Rodemann T, et al. Microplastic contamination in east Antarctic sea ice[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **154**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111130.
- [18] Kanhai L D K, Gardfeldt K, Krumpen T, et al. Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean[J]. Scientific Reports, 2020, **10**, doi: 10.1038/s41598-020-61948-6.
- [19] 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.
- [20] 姜涛, 张生, 赵胜男, 等. 乌梁素海盐分在冰-水-沉积物间的分布及迁移特征[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 969-975.
- Jiang T, Zhang S, Zhao S N, et al. Distribution and migration characteristics of salinity in ice-water-sediment in Lake Ulansuhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(4): 969-975.
- [21] 蒋鑫艳, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(5): 964-973.
- Jiang X Y, Li C Y, Shi X H, et al. Spatial and temporal distribution of chlorophyll-a concentration and its relationships with environmental factors in Lake Ulansu[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(5): 964-973.
- [22] 全栋, 史小红, 赵胜男, 等. 2006-2017 年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1259-1267.
- Quan D, Shi X H, Zhao S N, et al. Eutrophication of Lake Ulansuhai in 2006-2017 and its main impact factors[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1259-1267.
- [23] 杜雨春子, 青松, 曹萌萌, 等. 乌梁素海沉水植物群落光谱特征及冠层水深影响分析[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1100-1115.
- Duyu C Z, Qing S, Cao M M, et al. Spectral features of submerged aquatic vegetation and water depths impact in Lake Ulansuhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(4): 1100-1115.
- [24] 杨芳, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海冰封期湖泊冰盖组构特征对污染物分布的影响[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 455-462.
- Yang F, Li C Y, Shi X H, et al. Impact of seasonal ice structure characteristics on ice cover impurity distributions in Lake Ulansuhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 455-462.
- [25] 于玲红, 吕超, 李卫平. 冰封期乌梁素海冰层中营养盐垂直分布特征分析[J]. 环境工程, 2013, **31**(S1): 170-174.
- Yu L H, Lv C, Li W P. Analysis of vertical distribution of nutrientsalts in ice of Wuliangsu Lake closed period[J]. Environmental Engineering, 2013, **31**(S1): 170-174.
- [26] 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 等. 三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2107-2115.
- Yang F, Ji D B, Wang L J, et al. Vertical distribution characteristics of dissolved oxygen and chlorophyll a in typical tributaries during the impoundment period of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2107-2115.
- [27] 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.
- [28] Isobe A, Uchiyama-Matsumoto K, Uchida K, et al. Microplastics in the Southern Ocean[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **114**(1): 623-626.

- [29] 张岩, 李畅游, 高宁, 等. 结冰对乌梁素海水体富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 811-818.
Zhang Y, Li C Y, Gao N, *et al.* Effect of freezing on eutrophication in Lake Ulansuhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(4): 811-818.
- [30] 孙鑫, 李兴, 李建茹. 乌梁素海全季不同形态氮磷及浮游植物分布特征[J]. 生态科学, 2019, **38**(1): 64-70.
Sun X, Li X, Li J R. Distribution characteristics of different forms of nitrogen, phosphorus and phytoplankton in the whole season of Wuliangsuhai Lake[J]. Ecological Science, 2019, **38**(1): 64-70.
- [31] 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 District of Inner Mongolia [J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4590-4598.

环 境 科 学

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)