

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

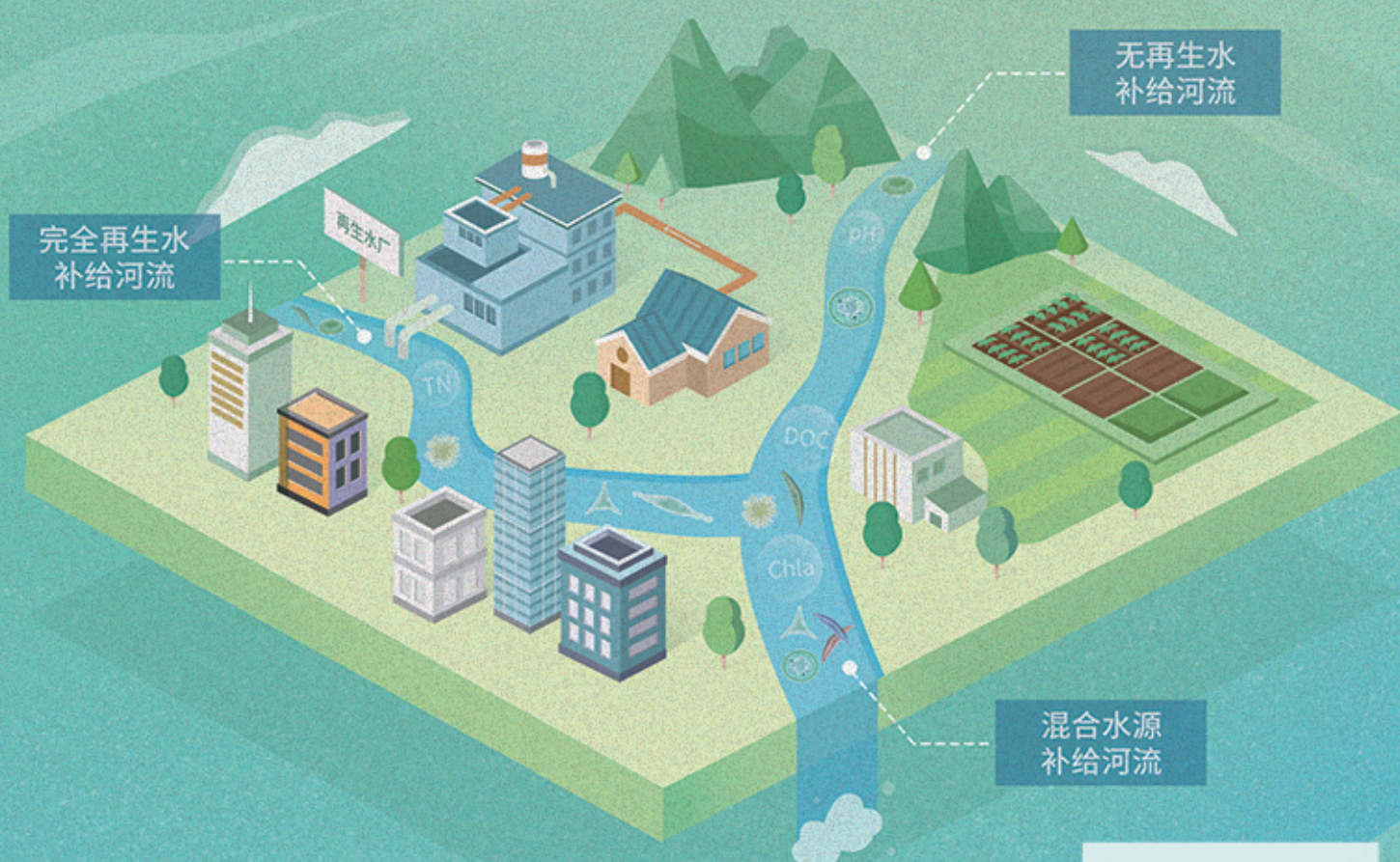
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价

杜彩丽^{1,2}, 黎佳茜^{1*}, 李国文¹, 李晓光¹, 赵琛¹, 张列宇¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了解乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属污染情况, 于2021年7月对乌梁素海16个采样点位表层沉积物中总氮、总磷和9种重金属的含量进行了测定分析。结果表明, 表层沉积物中 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 均值为 $7.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数分别达到了27.96%和43.51%, 具有一定的空间差异; 营养盐污染指数表明, 乌梁素海表层沉积物中TN和TP均处于严重污染程度。表层沉积物中Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Hg等重金属均已超过了背景值, 其中Cd和Hg超标最严重, 重金属地累积指数(I_{geo})也显示Cd和Hg生态风险严重。乌梁素海表层沉积物中重金属潜在生态风险指数值RI值介于337.82~681.88之间, 均值为504.39, 处于强的潜在生态风险, 其中Cd和Hg两种重金属对RI贡献最高, 贡献率分别达到了47.83%和43.99%。

关键词: 乌梁素海; 表层沉积物; 营养盐; 重金属; 风险评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5598-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202060

Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake

DU Cai-li^{1,2}, LI Jia-xi^{1*}, LI Guo-wen¹, LI Xiao-guang¹, ZHAO Chen¹, ZHANG Lie-yu¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To understand the pollution condition of nutrients and heavy metals in surface sediments from Wuliangsu Lake, the contents of total nitrogen, total phosphorus, and nine heavy metals in the surface sediments from 16 sampling sites were measured and analyzed in July 2021. The results showed that the average values of $\omega(\text{TN})$ and $\omega(\text{TP})$ in the surface sediments were $7.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the coefficients of variation were 27.96% and 43.51%, respectively. There were spatial variations in the nutrient content over the study regions. The results of the nutrient pollution index indicated that TN and TP were at a heavy pollution level in the surface sediments of Wuliangsu Lake. The average concentrations of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, and Hg) in the surface sediments were higher than the background contents, and Cd and Hg were the highest-risk elements. The results of I_{geo} also showed that Cd and Hg had the higher ecological risk. A potential ecological risk assessment indicated that the potential ecological risk index (RI) of the investigated heavy metals ranged from 337.82 to 681.88, with an average value of 504.39. This indicated that heavy metals of surface sediments from Wuliangsu Lake were at high ecological risk. The results of Er showed that Cd and Hg had become the main rates for the contribution of potential ecological risk, reaching 47.83% and 43.99%, respectively.

Key words: Wuliangsu Lake; surface sediment; nutrient; heavy metals; risk assessment

湖泊沉积物是水生态系统中的重要组成部分, 可以为水生植物和底栖动物等提供栖息地。同时湖泊沉积物也是污染物中的重要蓄积库, 是湖泊内源污染的主要来源^[1,2]。大多数湖泊中污染物可以通过吸附、堆积和沉淀等一系列物理变化富集到沉积物中^[3], 而沉积物中污染物反过来也会影响湖泊, 如当水环境条件变化时(水动力扰动、pH值、氧化还原或有机物降解等), 沉积物中营养盐会被释放到上覆水体中, 造成水体二次污染(水体富营养化或水华暴发)^[1,4,5]。此外当重金属进入水体时, 也容易被悬浮颗粒物吸附和沉降, 进而富集到湖泊沉积物中^[6], 因此湖泊沉积物中也蕴含着多种重金属^[7,8]。有研究表明进入水生系统的重金属有99%可以储存在沉积物中^[9], 而沉积物中重金属也可以

通过形态改变、浓度扩散、界面特性改变、释放和溶解等进入到水体中, 从而对水生生物和人类造成危害^[10~12]。重金属会对人类造成严重的健康问题, 如癌症、器官或神经系统损伤、自身免疫下降, 甚至在某些情况下导致人类死亡^[13]。因此, 表层沉积物作为营养盐和重金属等污染物的重要蓄积库, 有必要对重金属和营养盐污染情况进行风险评价, 这将为湖泊生态治理和恢复提供科学依据。

乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内, 也是巴彦淖尔市境内最大的湖泊(40°36′

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409202)

作者简介: 杜彩丽(1994~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境风险评价, E-mail: aquaduct@163.com

* 通信作者, E-mail: 1098385737@qq.com

~41°03'N, 108°43' ~ 108°57'E), 其水域面积 293 km², 大片水域水深在 0.5 ~ 1.5 m 之间, 最大水深达到了 4 m, 同时也是一个典型的草藻型富营养化湖泊. 长期以来, 上游河套灌区的农田退水经不同的排水沟流入乌梁素海, 致使流域内水质日趋下降, 并遭受着有机污染、盐化污染和重金属污染等^[14]. 已有学者针对乌梁素海中营养盐或者重金属展开了相关研究^[15~18], 如王爽等^[16]对乌梁素海沉积物中重金属分布特征以及污染状况进行了详细地研究; 张晓晶等^[17]对乌梁素海表层沉积物营养盐分布特征展开了相关调查; 赵胜男等^[18]研究了乌梁素海沉积物重金属生物活性及理化性质对重金属形态变化的影响; 乌云等^[19]分析了乌梁素海沉积物中营养元素和重金属含量. 以上研究对乌梁素海污染物含量变化进行了探讨, 而关于综合对表层沉积物中重金属和营养盐风险评价未展开详细报道.

为此本研究于 2021 年 7 月对乌梁素海表层沉积物营养盐(总氮、总磷)和 9 种重金属(Zn、Cu、Pb、Cr、Cd、As、Ni、Mn 和 Hg)含量进行调查, 并且借助多种评价方法(营养盐综合污染指数、重金属潜在生态风险指数法以及地累积指数法)对沉积物中营养盐和重金属生态风险进行了生态风险评价, 以期对乌梁素海生态环境安全提供基础数据和科学理论.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品分析

参照文献[20]等技术规范并根据乌梁素海实际水域形态、水系特征和历年采样点等共布置 16 个采样点位. 其中在南部较开阔水域设置 8 个点位(W1 ~ W8), 北部设置 8 个点位(W9 ~ W16), 具体见图 1.

于 2021 年 7 月采用彼得森采泥器采集各个点位的表层沉积物(0 ~ 15 cm), 使用密封袋保存, 随后冷藏运回实验室进行相关指标测定. 在进行成分分析前需对样品预处理, 首先应剔除沉积物中较大石粒和植物残体等杂质, 然后置于冷干机冷冻干燥 24 h, 研磨过 100 目筛后装入自封袋备用. 沉积物中总氮和总磷含量采用过硫酸钾联合消解法测定. 重金属含量(Zn、Cu、Pb、Cr、Cd、As、Ni、Mn 和 Hg)按照 GB 17378.5-2007 方法进行消解处理, 之后利

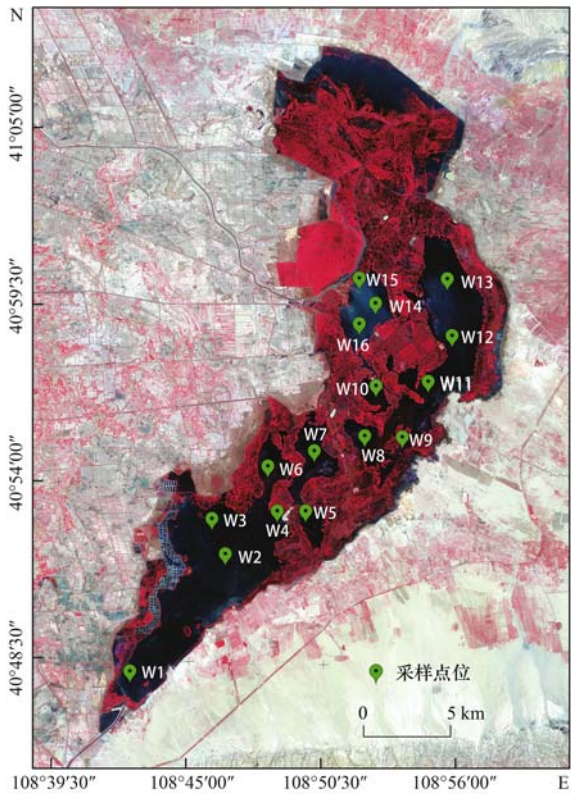


图1 乌梁素海表层沉积物采样点位示意
Fig. 1 Sampling sites in Wuliangsu Lake

用原子吸收仪和原子荧光光度计测定.

1.2 评价方法

1.2.1 营养盐污染指数评价

本文采用单因素污染指数法和综合污染指数法对乌梁素海表层沉积物氮磷的污染程度进行评价. 其计算公式为:

$$S_i = C_i/C_s$$
$$FF = \sqrt{(F^2 + F_{\max}^2)}/2$$

式中, S_i 为单因子评价指数或标准指数, S_i 大于 1 表示因子 i 含量超过评价标准值, C_i 为因子 i 的实测值; C_s 为因子 i 的评价标准值. TN 的标准值取 0.55 g·kg⁻¹, TP 的标准值 C_s 值取 0.6 g·kg⁻¹^[21], 该标准值为加拿大安大略省环境和能源部发布指南中沉积物中能引起最低级别生态毒理效应总氮和总磷的含量^[22]. F 为 n 项污染指数平均值(S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值); $F_{\max}$ 为最大单因子污染指数(S_{TN} 和 S_{TP} 中最大者)^[23]. 单因素污染程度和综合污染程度评价标准见表 1.

表 1 沉积物营养盐评价指标

Table 1 Evaluation standards of nutrients in sediments

级别	S_{TN}	S_{TP}	FF	等级
1	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 1.0	清洁
2	$1.0 < S_{TN} \leq 1.5$	$0.5 < S_{TP} \leq 1.0$	$1.0 < FF \leq 1.5$	轻度污染
3	$1.5 < S_{TN} \leq 2.0$	$1.0 < S_{TP} \leq 1.5$	$1.5 < FF \leq 2.0$	中度污染
4	> 2	> 1.5	> 2	重度污染

1.2.2 重金属潜在生态风险评价方法

本文采用底泥污染评价法对水体表层底泥物重金属污染情况进行潜在生态风险评价^[24].

其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times c_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{c^i}{c_B^i}$$

式中,RI 为潜在生态风险指数; E_r^i 为第 i 种元素的

潜在生态风险系数; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数; c_f^i 为第 i 种重金属的污染指数; c^i 为底泥中第 i 种重金属的实测值; c_B^i 为第 i 种重金属的背景值. 内蒙古自治区重金属背景值和毒性系数见表 2. 重金属潜在生态风险程度评价标准见表 3.

1.2.3 重金属地质累积指数法

考虑到人为污染因素、地球化学背景值和自然

表 2 重金属背景值和毒性系数^[25,26]

Table 2 Soil background values and toxicity coefficients of heavy metal elements

项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	41.4	520	19.5	14.1	59.1	7.5	0.053	17.2	0.004
毒性系数	2	1	5	5	1	10	30	5	40

表 3 沉积物重金属潜在生态风险程度评价标准

Table 3 Potential ecological risk assessment indicators and classification in sediment

风险指数	轻微	中等	强	很强	极强
危害系数(E_r)	<40	$40 \leq E_r < 80$	$80 \leq E_r < 160$	$160 \leq E_r < 320$	≥ 320
生态风险指数(RI)	<150	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	$600 \leq RI < 1\,200$	$\geq 1\,200$

成岩作用等因素可能会引起背景值变动,由 Muller 等^[27]提出的地质累积指数法可定量评价沉积物中的重金属污染程度.

其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C/(kB)]$$

式中, I_{geo} 为重金属的地质累积指数; C 为重金属在沉积物中的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B 为重金属在沉积岩中所测的地球化学背景值,采用内蒙古

自治区土壤重金属环境背景值(表 2); k 为考虑到成岩作用可能会引起背景值变动而设定的常数,一般 $k = 1.5$ ^[28]. I_{geo} 大小与污染等级见表 4.

1.3 数据分析

本文使用 Excel 2013 进行数据统计和计算,采用 SPSS 23.0 进行相关性分析和主成分分析,采用 Origin 2018 和 ArcGIS 10.2 绘图.

表 4 地累积指数污染分级

Table 4 The I_{geo} pollution classification

污染程度	清洁	轻度污染	中度污染	偏重度污染	重度污染	严重污染	极严重污染
I_{geo} 指数	<0	$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	≥ 5
级别	0	1	2	3	4	5	6

2 结果与讨论

2.1 乌梁素海沉积物中营养盐分布特征与污染评价

2.1.1 乌梁素海表层沉积物营养盐分布特征

乌梁素海表层沉积物中总氮分布特征见图 2. 可以发现, $\omega(\text{TN})$ 介于 $3.24 \sim 11.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值达到 $7.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 27.96%; 其中最高值出现在点位 W15,最低值在点位 W8. 表层沉积物中 $\omega(\text{TP})$ 在 $0.54 \sim 3.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $1.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 43.51%,具有一定的空间差异,最大值出现在点位 W14,最小值出现在点位 W1.

与国内其他湖泊相比,如太湖表层沉积物中 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 均值分别为 $1.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[29]; 洞庭湖为 $1.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30],巢湖为 $1.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[31],

乌梁素海表层沉积物的 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ ($7.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 要显著偏高. 同样与内蒙古自治区其他湖泊(呼伦湖为 $3.63 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[32]; 岱海为 $1.42 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[33]) 相比,也是类似结果,该流域内营养盐含量较高. 可能是由于乌梁素海作为流域排水唯一的承泄区,富含大量氮磷的农田退水、工业废水和生活污水等均排入湖泊^[34],进而导致表层沉积物中营养盐含量过高. 其次乌梁素海水生植被生长茂盛,特别是挺水植物芦苇,其收割方式主要是冬季湖泊结冰后将冰面上芦苇收割,冰面下芦苇留在湖中,而这些水下部分芦苇以及植物残骸会在湖底腐烂沉积,植物腐败会释放大量的氮磷物质,进而富集到沉积物中^[35,36]. 因此乌梁素海表层沉积物中营养元素含量高,其内源污染严重,在今后的生态治理工作中需重点关注.

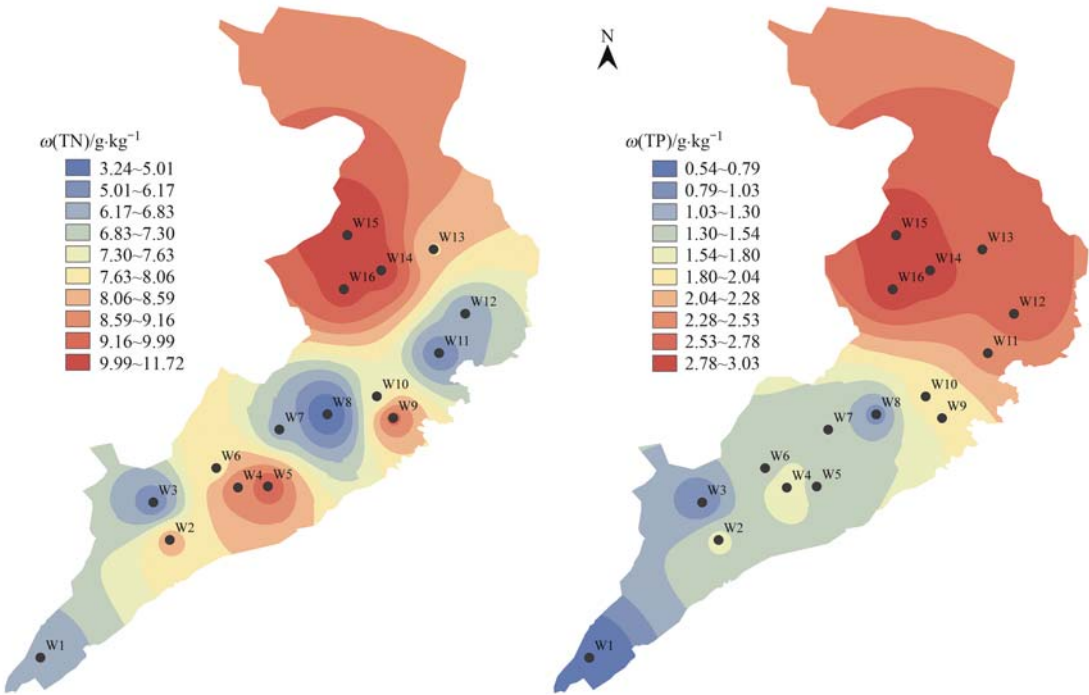


图2 乌梁素海表层沉积物中营养盐含量

Fig. 2 Concentration of nutrients in the surface sediments of Wuliangsuhai Lake

2.1.2 乌梁素海表层沉积物营养盐生态评价

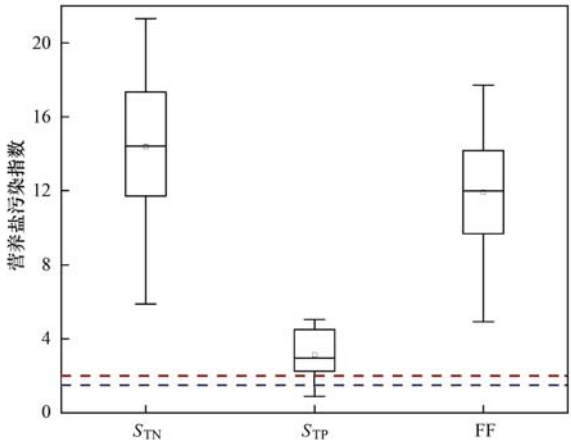
通过计算单因素污染指数法和综合污染指数法对乌梁素海表层沉积物中营养盐生态风险进行评价,结果如图3所示。从单因素污染指数来看,乌梁素海表层沉积物中 S_{TN} 在5.90~21.31之间,均值达到14.38,变异系数为27.96%,所有点位TN均为重度污染; S_{TP} 介于0.9~5.05,均值为3.15,变异系数为43.51%,除点位W1和W3外,其他点位均为重度污染。从综合污染指数(FF)来看,乌梁素海表层沉积物FF在4.93~17.71之间,均值为11.91,变

异系数为28.36%,其评价结果与 S_{TN} 一致,采样点位全部为重度污染。这意味着表层沉积物中营养盐污染严重,未来可能会对乌梁素海水生生态系统造成威胁^[37]。

2.2 乌梁素海沉积物中重金属分布特征与污染评价

2.2.1 乌梁素海表层沉积物重金属分布特征

乌梁素海表层沉积物中9种重金属(Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb和Hg)分布见图4,其含量分别为21.31~80.21、21.72~60.28、24.33~80.18、25.66~95.66、30.99~150.32、1.39~6.15、0.18~0.70、3.49~8.84和0.01~0.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值分别达到了43.11、36.83、46.33、53.74、94.69、3.64、0.43、5.86和0.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;其中Zn(43.32%)的变异系数最大,Ni(43.17%)、Cu(42.07%)、Cr(40.68%)、As(37.73%)、Cd(32.75%)和Pb(32.20%)次之,Hg(22.34%)的变异系数最小。整体而言,重金属变异系数介于22.3%~43.32%之间,表明乌梁素海表层沉积物中重金属存在空间差异,可能是由于不同的采样点位具有不同的来源^[29,38],而且沉积物的物理、化学和生物特性以及有机质含量、水力条件、氧化还原电位和污染源分布等诸多因素也会影响重金属空间分布^[39,40]。此外也有研究表明当变异系数超过20%时,人类活动也可能是导致重金属空间分布存在差异的主要驱动因子^[41]。



红色虚线以上表示 S_{TN} 和FF重度污染,
蓝色虚线以上表示 S_{TP} 重度污染

图3 乌梁素海表层沉积物中营养盐污染评价指数

Fig. 3 Evaluation index of nutrient pollution in the surface sediments of Wuliangsuhai Lake

与内蒙古自治区土壤重金属背景相比,乌梁素海表层沉积物中除 Mn、Pb 和 As 之外,其余重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Hg)均值均超过背景值,其中 Cd 超标情况最为严重,超标倍数为 8.04 倍,随之为 Hg(5.54 倍)、Cu(3.81 倍)、Ni(2.38 倍)和 Zn(1.60 倍),Cr 超标倍数最小,为 1.04 倍,这表明乌梁素海表层沉积物中 Cd 和 Hg 污染最为严重。

2.2.2 乌梁素海表层沉积物重金属污染评价

基于重金属地累积指数(I_{geo})分析结果显示,乌梁素海表层沉积物中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的 I_{geo} 分别介于 $-1.54 \sim 0.37$ 、 $-5.17 \sim -3.69$ 、 $-0.27 \sim 1.45$ 、 $0.28 \sim 2.18$ 、 $-1.52 \sim 0.76$ 、 $-3.02 \sim -0.87$ 、 $1.18 \sim 3.14$ 、 $-2.89 \sim$

-1.55 和 $0.74 \sim 2.32$ 之间.根据 I_{geo} 评价标准可以得出,乌梁素海表层沉积物的重金属 Mn、As 和 Pb 处于清洁水平;表层沉积物中 Cr 污染也较小,仅仅只有 12.5% 采样点位处于轻度污染,其余点位均处于清洁水平;采样点位中 Zn 的清洁水平和轻度污染相当,各占比为 50%;沉积物中 Ni 的地累积指数差异较大,根据评价结果,大多数采样点位处于轻度污染,占比达到了 56.25%,25% 为中度污染;Cu 污染较为严重,基本处于轻度污染到偏重度污染,有 43.75% 处于轻度污染,37.5% 处于中度污染;沉积物中 Hg 和 Cd 污染最为严重,其中 31.25% 采样点位的 Hg 处于偏重度污染,62.5% 为中度污染;而采样点位中 75% 的 Cd 为偏重度污染,6.25% 为重度污染(表 5).

表 5 乌梁素海表层沉积物中重金属地累积指数污染评价结果

Table 5 Valuation of accumulation index of heavy metals in the surface sediments of Wuliangsu Lake

项目	污染程度	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
$I_{geo} \leq 0$	清洁	87.5	100	18.75		50	100		100	
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染	12.5		56.25	43.75	50				6.25
$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染			25	37.50			18.75		62.5
$2 < I_{geo} \leq 3$	偏重度污染				18.75			75		31.25
$3 < I_{geo} \leq 4$	重度污染							6.25		

基于潜在生态风险系数(E_r)分析结果,可以看出乌梁素海表层沉积物中重金属(Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb)潜在生态风险系数(E_r)分别介于 $1.03 \sim 3.87$ 、 $0.04 \sim 0.12$ 、 $6.24 \sim 20.56$ 、 $9.10 \sim 33.92$ 、 $0.52 \sim 2.54$ 、 $1.85 \sim 8.20$ 和 $1.01 \sim 2.57$ 之间,其值均低于 40^[24],潜在风险等级为低,该结果与地累积指数评价结果类似;而表层沉积物中 Cd 和 Hg 的风险等级最高,潜在生态风险系数分别在 $101.89 \sim 396.23$ 和 $100 \sim 300$ 之间,均值达到了 241.27 和 221.88,其中 93.75% 点位中 Hg 处于很强风险程度($160 \leq E_r < 320$);62.5% 的采样点位中 Cd 处于很强的生态风险($160 \leq E_r < 320$),25% 处于极强的生态风险($E_r \geq 320$),其余采样点为强的生态风险($80 \leq E_r < 160$)(图 5).

通过潜在生态风险指数(RI)结果可以得出,乌梁素海表层沉积物中重金属 RI 值范围为 $337.82 \sim 681.88$,均值为 504.39,所有点位 RI 值超过 300,个别点位 RI 值大于 600,其中采样点位有 81.25% 处于强的生态风险($300 \leq RI < 600$),18.75% 为很强的生态风险($RI > 600$)(图 5).此外,表层沉积物中重金属 Cd 和 Hg 不仅仅是主要的重金属污染物,也是重金属的潜在生态风险的主要来源,贡献率分别达到了 47.83% 和 43.99%;Cu 和 Ni 贡献率分别达到了 3.78% 和 2.35%,其他 5 种重金属的总贡献率

仅为 2.05%.乌梁素海表层沉积物中重金属对 RI 的平均贡献大小依次为: Cd > Hg > Cu > Ni > As > Cr > Pb > Zn > Mn(图 5).该结果与已有研究的结果相同,Cd 和 Hg 是乌梁素海表层沉积物中重金属潜在生态风险的主要重金属元素^[16,42].有研究也在其他湖泊、水库和湿地发现了类似结果^[30,43,44].因此,未来也应对乌梁素海表层沉积物重金属污染问题给予重视,特别是重金属 Cd 和 Hg.

2.3 乌梁素海沉积物中重金属来源分析

2.3.1 乌梁素海表层沉积物重金属相关分析

本文通过重金属相关性和因子分析来推测乌梁素海表层沉积物中重金属来源.相关性分析结果如表 6 所示,其中重金属 Zn 与 Cu 显著正相关($P < 0.01$),Mn 和 Cd、Pb 显著正相关($P < 0.05$),Cd 与 Pb 之间也显著正相关($P < 0.01$).其他金属元素之间没有显著相关性,表明乌梁素海表层沉积物中重金属来源具有多源性.

2.3.2 乌梁素海表层沉积物重金属主成分分析

乌梁素海表层沉积物重金属主成分分析结果见图 6 和表 7,前 3 个成分的方差累积贡献率达到 72.98%,经矩阵旋转之后提取的 3 个主成分累积贡献率也为 72.98%.其中主成分 1(PCA1)的贡献率是 26.95%,重金属 Zn 和 Cu 具有高荷载(载荷 > 0.8),Ni 具有较高的荷载,可推测这 3 种重金属具

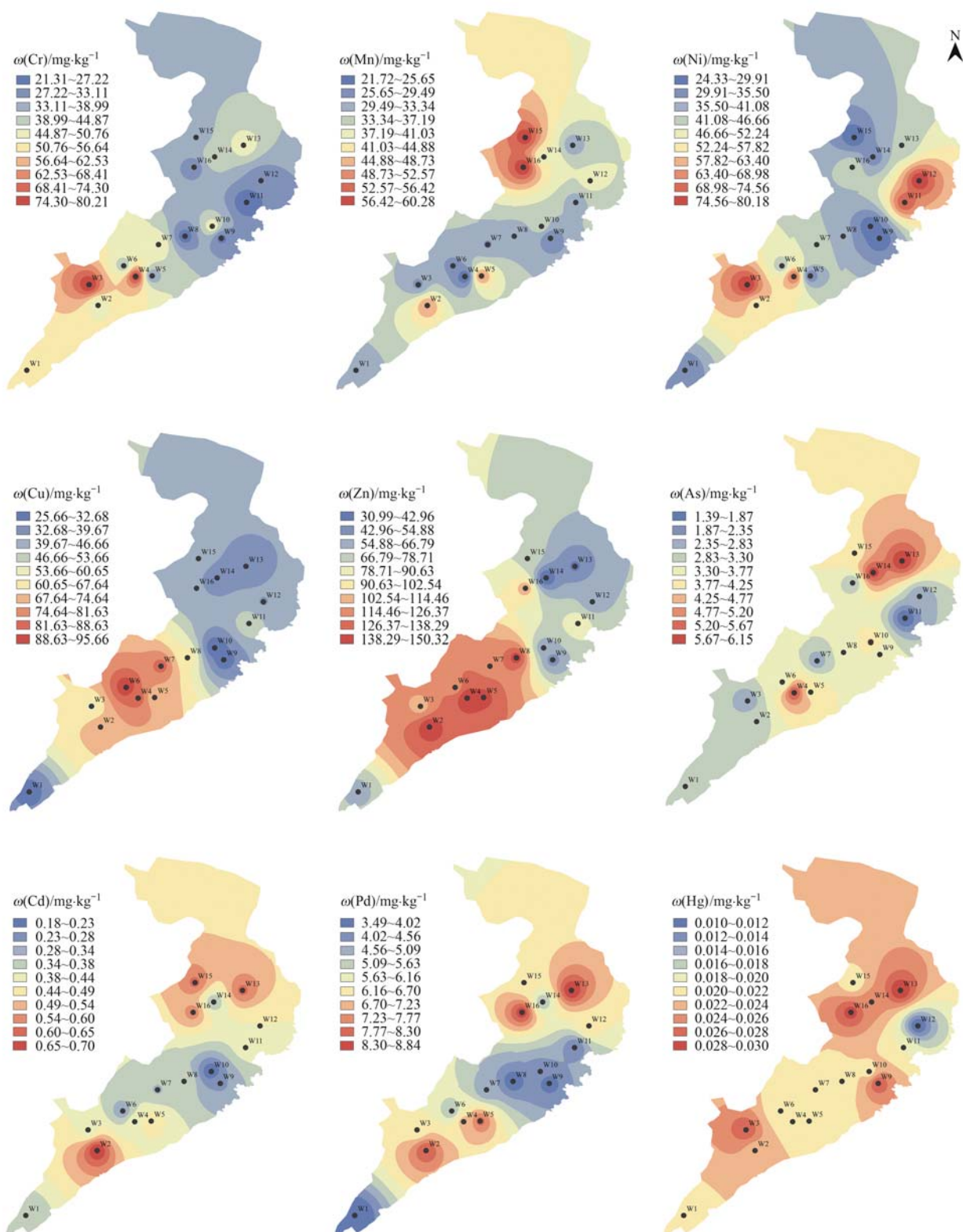


图4 表层沉积物中重金属含量

Fig. 4 Content of heavy metals in the surface sediments of Wuliangsu Lake

有相同的来源. 有研究表明重金属 Zn 和 Cu 含量与农药和化肥等农业活动有关^[45,46], 而乌梁素海作为最主要的排水承泄区, 河套灌区的农田退水等进入湖区, 可能会造成沉积物中 Zn 和 Cu 等重金属累积. 因此在本研究中 PCA1 代表该轴的重金属主要

来源于农业污染, 即 Zn、Cu 和 Ni 主要属于人为来源. 主成分 2 (PCA2) 的贡献率是 26.32%, 其中 Cd、Mn 和 Pb 具有高荷载 (>0.8), 相关性分析也表明 Mn 和 Cd、Pb 显著正相关, 为此这 3 种重金属可能具有同源性. 根据地累积指数结果 (I_{geo}), 乌梁素海

中所有点位中重金属 Mn 和 Pb 含量低于内蒙古背景值,均处于清洁水平,因此推测乌梁素海表层沉积物中 Cd、Mn 和 Pb 等可能与自身的物理化学性质有关,属于自然来源. 主成分 3 (PCA3) 的贡献率 19.71%,其中 As、Cr 和 Hg 具有较高的荷载,地累

积指数评价结果显示乌梁素海表层沉积物的重金属 As 处于清洁水平,而 Cr 污染也较小,仅仅只有 12.5% 采样点位处于轻度污染,其余点位均处于清洁水平;因此可以推测成分 PCA3 也属于重金属的自然来源(图 6 和表 7).

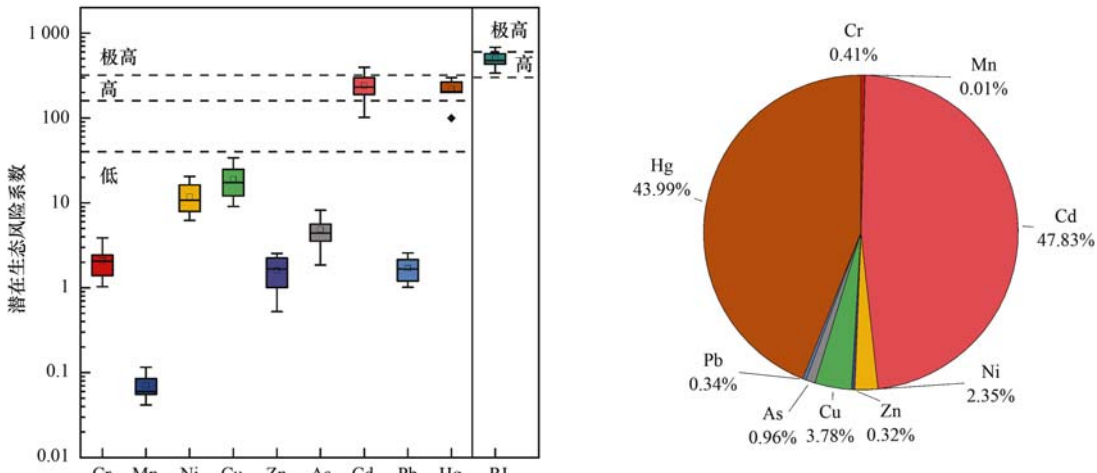


图 5 乌梁素海表层沉积物重金属的潜在生态风险指数和重金属对其的贡献率

Fig. 5 Potential ecological risk coefficient and potential ecological risk index of heavy metals and contribution rate of heavy metals to potential ecological risk index in the surface sediments of Wuliangsuhai Lake

表 6 乌梁素海沉积物重金属相关系数¹⁾

Table 6 Correlation analysis of heavy metals in the surface sediments of Wuliangsuhai Lake

	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
Cr	1								
Mn	-0.355	1							
Ni	0.312	-0.248	1						
Cu	0.259	-0.186	0.325	1					
Zn	0.169	0.071	0.277	0.835 **	1				
As	0.353	-0.061	-0.377	-0.136	-0.228	1			
Cd	-0.046	0.616 *	0.184	0.069	0.250	0.070	1		
Pb	0.176	0.537 *	0.227	0.113	0.224	0.296	0.796 **	1	
Hg	0.198	-0.017	-0.246	-0.299	-0.276	0.329	0.054	0.157	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

表 7 乌梁素海表层沉积物重金属主成分载荷分布

Table 7 Principal component load distribution of heavy metals in the surface sediments of Wuliangsuhai Lake

变量	因子载荷		
	成分 1	成分 2	成分 3
Cu	0.870	-0.16	-0.057
Zn	0.818	0.211	-0.162
Ni	0.678	0.001	-0.050
Cd	0.156	0.910	0.055
Pb	0.215	0.859	0.335
Mn	-0.251	0.842	-0.266
As	-0.235	0.108	0.786
Cr	0.466	-0.172	0.740
Hg	-0.364	0.083	0.624
特征值	2.426	2.369	1.774
贡献率/%	26.95	26.32	19.71
累计贡献率/%	26.95	53.27	72.98

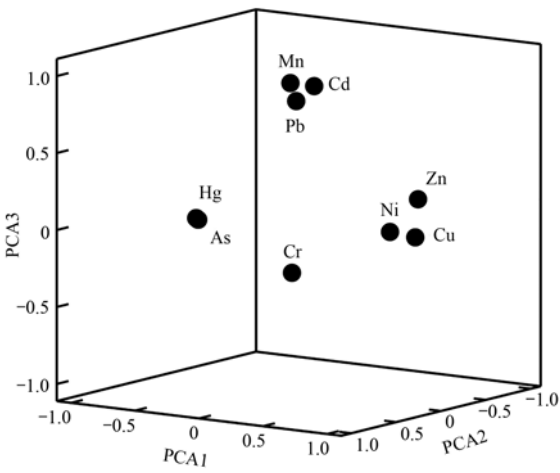


图 6 乌梁素海表层沉积物中重金属的载荷

Fig. 6 Loading plot of heavy metals in the surface sediments of Wuliangsuhai Lake

3 结论

(1) 乌梁素海表层沉积物中 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 均值分别为 $7.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 从营养盐污染指数评价结果来看, 表层沉积物中营养盐 (TN 和 TP) 均处于重度污染。

(2) 乌梁素海表层沉积物中重金属只有 Mn、Pb 和 As 没有超过背景值, 其余重金属 (Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Hg) 均值均超过背景值, 其中 Cd 和 Hg 超标最为严重。

(3) 从地累积指数 (I_{geo}) 来看, 表层沉积物中 Mn、As 和 Pb 指数均低于 0, 处于清洁水平; 其他重金属均有一定程度的污染, 其中 Cd 和 Hg 污染最为严重。

(4) 根据潜在生态风险指数 (RI), 乌梁素海表层沉积物中重金属 RI 均值为 504.39, 生态风险等级为强, 乌梁素海表层沉积物中重金属对 RI 的平均贡献大小依次为: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Mn}$, 其中 Cd 和 Hg 是造成乌梁素海流域水体沉积物重金属生态风险的主要重金属, 总贡献率达到了 91.82%。

(5) 根据相关性分析和主成分分析表明, 乌梁素海表层沉积物重金属主要有两种来源, 分别为人为来源 (农业污染) 和自然来源。

参考文献:

- [1] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1537-1551.
Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- [2] Yang H Q, He K K, Lu D P, *et al.* Removal of phosphate by aluminum-modified clay in a heavily polluted lake, Southwest China: effectiveness and ecological risks[J]. Science of the Total Environment, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135850.
- [3] Wang S H, Wang W W, Chen J Y, *et al.* Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments: a case study in Lihu Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 978-986.
- [4] He Z F, Li F L, Dominech S, *et al.* Heavy metals of surface sediments in the Changjiang (Yangtze River) Estuary: distribution, speciation and environmental risks[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, **198**: 18-28.
- [5] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 216-223.
- [6] Zhang G L, Bai J H, Xiao R, *et al.* Heavy metal fractions and ecological risk assessment in sediments from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Estuary, China[J]. Chemosphere, 2017, **184**: 278-288.
- [7] Qiu J D, Liu J Q, Li M N, *et al.* Assessment of heavy metal contamination in surface sediments from the nearshore zone, southern Jiangsu Province, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **133**: 281-288.
- [8] Omwene P I, Öncel M S, Çelen M, *et al.* Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpaşa stream located in the world's largest borate basin (Turkey)[J]. Chemosphere, 2018, **208**: 782-792.
- [9] Peng J F, Song Y H, Yuan P, *et al.* The remediation of heavy metals contaminated sediment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 633-640.
- [10] Arifin Z, Situmorang S P, Booi K. Geochemistry of heavy metals (Pb, Cr and Cu) in sediments and benthic communities of Berau Delta, Indonesia[J]. Coastal Marine Science, 2010, **34**(1): 205-211.
- [11] Suresh G, Ramasamy V, Sundarajan M, *et al.* Spatial and vertical distributions of heavy metals and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background-radiation area, Kerala, India[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **91**(1): 389-400.
- [12] 李宏, 潘晓洁, 万成炎, 等. 重金属对鱼类的生态毒理学研究进展[J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(5): 104-111.
Li H, Pan X J, Wan C Y, *et al.* Advances in ecotoxicology research on fish exposed to heavy metals[J]. Journal of Hydroecology, 2019, **40**(5): 104-111.
- [13] Malassa H, Al-Qutob M A, Al-Khatib M, *et al.* Determination of different trace heavy metals in ground water of south west bank/palestine by ICP/MS[J]. Journal of Environmental Protection, 2015, **4**(8): 818-827.
- [14] 赵胜男, 史小红, 李畅游, 等. 乌梁素海水体汞的分布特征及污染风险评估[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 221-227.
Zhao S N, Shi X H, Li C Y, *et al.* Distribution characteristics of mercury and pollution risk assessment in the water of Lake Ulansuhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(2): 221-227.
- [15] 姜忠峰, 张生, 李畅游, 等. 乌梁素海表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(6): 1810-1816.
Jiang Z F, Zhang S, Li C Y, *et al.* Distribution features and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Wuliangsu Lake[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(6): 1810-1816.
- [16] 王爽, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物中重金属形态分布特征及污染状况评价[J]. 环境化学, 2012, **31**(10): 1555-1561.
Wang S, Li C Y, Shi X H, *et al.* Heavy metal speciation and pollution evaluation in the sediments of Wuliangsu Lake[J]. Environmental Chemistry, 2012, **31**(10): 1555-1561.
- [17] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(9): 1770-1776.
Zhang X J, Li C Y, Zhang S, *et al.* Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Lake Wuliangsu with respect to its effects on the environment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(9): 1770-1776.
- [18] 赵胜男, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物重金属生物活性及环境污染评估[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(3): 481-489.
Zhao S N, Li C Y, Shi X H, *et al.* Bioavailability and environment pollution evaluation of sediments heavy metals in Wuliangsu Lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(3): 481-489.

- [19] 乌云, 朝伦巴根, 李畅游, 等. 乌梁素海表层沉积物营养元素及重金属空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(4): 143-148.
- Wu Y, Chao L B G, Li C Y, *et al.* The spatial distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals in surface sediments of Lake Wuliangsu [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, **25**(4): 143-148.
- [20] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [21] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 398-402.
- Li R W. Contamination of sediments and environmental sedimentology[J]. Advances in Earth Science, 1998, **13**(4): 398-402.
- [22] Leivuori M, Niemistö L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia[J]. Chemosphere, 1995, **31**(8): 3839-3856.
- [23] Liu M X, Yang Y Y, Yun X Y, *et al.* Distribution and ecological assessment of heavy metals in surface sediments of the East Lake, China[J]. Ecotoxicology, 2014, **23**(1): 92-101.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [26] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [27] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [28] 姜会敏, 郑显鹏, 李文. 中国主要湖泊重金属来源及生态风险评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, **28**(S1): 108-112.
- Jiang H M, Zheng X P, Li W. Source and risk assessment of heavy metal in sediment of China [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, **28**(S1): 108-112.
- [29] 邓延慧, 王正文, 丁润楠, 等. 太湖湖体沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 环境生态学, 2020, **2**(12): 67-72.
- Deng Y H, Wang Z W, Ding R N, *et al.* Study on pollution characteristics of nutrient salts and heavy metals in sediment of Taihu Lake[J]. Environmental Ecology, 2020, **2**(12): 67-72.
- [30] 尹宇莹, 彭高卓, 谢意南, 等. 洞庭湖表层沉积物中营养元素、重金属的污染特征与评价分析[J]. 环境化学, 2021, **40**(8): 2399-2409.
- Yin Y Y, Peng G Z, Xie Y N, *et al.* Characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals pollution in sediments of Dongting Lake[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(8): 2399-2409.
- [31] 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 699-711.
- Wang Y P, Xu W W, Han C, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and pollution evaluation [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 699-711.
- [32] Chuai X, Chen X, Yang L, *et al.* Effects of climatic changes and anthropogenic activities on lake eutrophication in different ecoregions[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2012, **9**(3): 503-514.
- [33] Lü C W, He J, Wang B, *et al.* Environmental geochemistry of dissolved and biogenic silicon and its nutrient limitation effects in an inland lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 11137-11147.
- [34] 肖博文, 成文连, 姚荣, 等. 内蒙古乌梁素海 N、P 的变化趋势研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(1): 43-46, 51.
- Xiao B W, Cheng W L, Yao R, *et al.* Study on variation trend of nitrogen and phosphorus in Wuliangsu Lake of Inner Mongolia [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, **26**(1): 43-46, 51.
- [35] 魏江明, 王立新, 刘东伟, 等. 乌梁素海芦苇枯落物分解动态及营养元素释放研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(5): 364-370.
- Wei J M, Wang L X, Liu D W, *et al.* On the decomposition dynamics and nutrient release of *Phragmites australis* litter in Wuliangsu Lake[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(5): 364-370.
- [36] 叶华香, 臧淑英, 肖海丰, 等. 扎龙湿地表层沉积物营养盐空间分布特征及评价[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1966-1976.
- Ye H X, Zang S Y, Xiao H F, *et al.* Spatial distribution and evaluation of nutrients in surface sediments of Zhalong Wetland [J]. Journal of Natural Resources, 2013, **28**(11): 1966-1976.
- [37] Horppila J. Sediment nutrients, ecological status and restoration of lakes[J]. Water Research, 2019, **160**: 206-208.
- [38] Lu X Q, Werner I, Young T M. Geochemistry and bioavailability of metals in sediments from northern San Francisco Bay [J]. Environment International, 2005, **31**(4): 593-602.
- [39] Li L, Jiang M, Liu Y, *et al.* Heavy metals inter-annual variability and distribution in the Yangtze River estuary sediment, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **141**: 514-520.
- [40] Liu M, Chen J B, Sun X S, *et al.* Accumulation and transformation of heavy metals in surface sediments from the Yangtze River estuary to the East China Sea shelf [J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 111-121.
- [41] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- Zhang J, Guo X Y, Ceng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [42] 段志斌, 蔡雄飞, 王济, 等. 我国高原型湖泊沉积物重金属污染评价研究[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(S1): 293-298.
- Duan Z B, Cai X F, Wang J, *et al.* Heavy metal pollution of sediments of plateau lakes in China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(S1): 293-298.
- [43] 陈姗, 许凡, 谢三桃, 等. 合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4932-4943.
- Chen S, Xu F, Xie S T, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrients and heavy metals in surface sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4932-4943.
- [44] 朱宜平, 李小飞, 梁霞. 上海青草沙水库表层沉积物重金属含量水平及其生态风险评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021, (2): 54-62.
- Zhu Y P, Li X F, Liang X. Content and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Qingcaosha Reservoir in Shanghai [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021, (2): 54-62.

- [45] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15** (1): 163-178.
- [46] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41** (12): 5410-5418.
- Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5410-5418.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021 年 12 月 27 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了 2020 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2020 年度总被引频次 12 709, 影响因子 2. 736, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

环境科学

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qi, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)