

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM_{2.5} 浓度影响 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM_{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM_{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM_{2.5} 来源 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM_{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM_{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象影响分析 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析

张雅然^{1,2}, 车霏霏^{2*}, 付正辉², 许野¹, 李薇¹

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206; 2. 中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 青海湖是我国最大的闭口咸水湖。近年来随着工农业及旅游业的迅速发展, 湖泊受人为活动影响不断增加, 引起广大学者关注。为了深入了解青海湖表层沉积物中的重金属分布情况, 在调查 Zn、Cu、Pb、Co、Ni、As、Cd 和 Cr 这 8 种重金属含量的基础上, 对其赋存形态进行了分析, 并对其进行来源解析和生态风险评价。结果表明: ① 青海湖表层沉积物重金属除 $\omega(\text{As})$ ($13.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 $\omega(\text{Cd})$ ($0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 超出环境背景值 1.13 倍和 1.53 倍, 其余 6 种重金属均不同程度低于环境背景值, 从空间分布来看, 除 As 外其他 7 种重金属元素空间分布特征极为相似, 高值主要分布在湖泊西北部及 151 码头附近; ② 除 Cd 外其他 7 种重金属的主要存在形态为残渣态, 而 Cd 主要以生物有效态形式存在, 对水生生物具有较高的潜在生物毒性; ③ 结合相关性分析和主成分分析, 沉积物中 Zn、Cu、Pb、Co、Ni、Cd 和 Cr 的来源以自然源为主, As 的来源则受到农业生产等人为因素影响; ④ 根据潜在风险分析结果, 青海湖沉积物重金属整体处于轻微生态危害水平, 但值得重视的是, 各点位 Cd 的潜在生态危害水平及释放风险均高于其他金属元素, 特别是在黑马河入湖口、尕海和沙岛附近等区域显示出较高的潜在释放风险, 后续需持续关注这些区域沉积物中 Cd 对水环境及生态系统的潜在影响。

关键词: 形态分析; 风险评价编码法; 来源解析; 分布特征; 青海湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3037-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108201

Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai

ZHANG Ya-ran^{1,2}, CHE Fei-fei^{2*}, FU Zheng-hui², XU Ye¹, LI Wei¹

(1. College of Environment Sciences and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environment Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Lake Qinghai is the largest closed saltwater lake in China. In recent years, because of the rapid development of industry, agriculture, and tourism, the lake has been increasingly affected by human activities, which has attracted the attention of many scholars. In order to understand the distribution of heavy metals in the surface sediments of Lake Qinghai, the contents of Zn, Cu, Pb, Co, Ni, As, Cd, and Cr were investigated, the metal fractions were extracted, and the sources, as well as potential ecological risks, were analyzed. The results showed that: ① The $\omega(\text{As})$ ($13.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and $\omega(\text{Cd})$ ($0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the surface sediments of Lake Qinghai were 1.13 and 1.53 times higher than the environmental background values, respectively, and the other heavy metal contents were all lower than the environmental background values. There were similar spatial distribution characteristics of analyzed metals except for As, with higher values measured in the northwestern area of the lake and the 151 Terminal. ② Except for Cd, the analyzed heavy metals mainly existed in the form of the residual state; by contrast, Cd mainly existed in the form of the bioavailable state, which has high potential toxicity to aquatic organisms. ③ Combined with the results of the correlation and principal component analysis, the metals including Zn, Cu, Pb, Co, Ni, Cd, and Cr were thought to mainly come from the natural environment, whereas the source of As was related to human activities, such as agricultural production. ④ According to potential risk analyses, the average of the metal potential ecological risk factors was 76.57, which indicated a slight ecological hazard level. However, it should be noted that the potential ecological hazard level and release risk of Cd at each site were higher than those of the other metals, especially in the regions nearing the estuary of Heima River, Lake Gahai, and the sand island, which showed higher levels of enrichment and potential release risk. Therefore, further attention should be paid to the potential impacts of Cd in sediments of these regions on the water environment and ecosystem.

Key words: fraction analysis; risk assessment code; source identification; distribution characteristic; Lake Qinghai

当今社会经济飞速发展, 人类活动对环境的影响日益显著。人类活动将大量的重金属元素带入表生环境中, 使得其在灰尘、土壤和湖泥等多种环境介质中有所积累。其中, 经人为或自然途径进入地表水体的重金属可通过物理、化学和生物等作用储存在沉积物中, 表现出很强的累积效应^[1]。由于重金属具有难降解、持久性强和不可逆等特点^[2], 且进入沉积物的重金属在一定的环境条件下存在二次释放风险, 并可通过生物富集和放大作用间接威胁水生态系统和人类健康, 因此近年来备受学者关

注^[3]。

国外对于重金属的研究开展相对较早, 1976 年美国 EPA 就将 As 等 12 种金属纳入优先控制的污染物名单^[4], 以重金属含量调查为主的相关研究也逐渐开展^[5,6]。我国对沉积物重金属的相关研究工作始于 1970 年后, 例如, 黄薇文等^[7]于 1985 年对黄

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907335)

作者简介: 张雅然(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊水环境管理, E-mail: 1010840371@qq.com

* 通信作者, E-mail: cheff411@126.com

河口沉积物重金属进行了检测和污染评价. 简而言之, 在过去很长时间内, 沉积物重金属富集情况都是以其总量高低来衡量的. 后当物质形态被引入到环境领域, 研究学者发现只用总量分析金属元素在环境中的活性、生物可利用性和毒性等生态环境效应是不确切的^[8,9], 重金属的形态分析因此逐渐受到关注^[10]. 随着重金属形态分析方法的发展, 对于重金属生态风险评价的研究也日益增多. Hakanson^[11]于1980年提出了潜在生态危害评价法, 从生态毒理角度综合反映沉积物中重金属对生态环境影响的潜力. 柏建坤等^[12]的研究基于雅江沉积物重金属含量和形态, 用不同评价方法对其进行了重金属潜在风险评价. 余晖等^[13]的研究则采用地累积指数和潜在生态风险指数评价了洪泽湖表层沉积物重金属的污染现状和潜在生态风险程度.

青海湖位于青藏高原东北部, 是我国最大的内陆咸水湖, 是中国重要的生态调节功能区和水源涵养功能区^[14], 流域内生态环境的优劣对其周边地区的生态建设和农牧业发展均具有重大影响. 然而近年来, 随着青海湖流域社会经济活动显著增加和自然环境的恶化, 流域水体逐渐面临环境污染的威胁. 目前, 有关青海湖流域重金属的研究主要集中在总量调查方面, 包括湖泊及主要入湖河流沉积物^[15,16]、河流水体、土壤、植物^[17]和环湖土壤^[18]等多种介质中的重金属分布及污染分析; 结果显示湖泊、河流和土壤中重金属的整体污染程度较低, 且来源多以自然源为主, 其中Cd和As存在一定的潜在生态风险. 相对而言, 关于青海湖流域金属赋存形态的研究则鲜见报道. 由于水体沉积物中重金属的迁移转化、毒性和潜在环境危害更大程度上取决于其赋存形态, 因此, 本文在调查青海湖表层沉积物中重金属总量分布特征的基础上, 进一步研究了其化学赋存形态, 并运用潜在生态危害评价法和风险评价编码法(RAC)综合分析了重金属的污染状况和潜在生态风险, 旨在为深入了解青海湖流域金属潜在生态风险, 制定生态环境保护措施提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

青海湖位于中国青藏高原东北隅, 海拔3194 m, 流域年平均气温 $-1 \sim 4^{\circ}\text{C}$, 年降水量270~500 mm, 属于半干旱高寒气候区^[19]. 流域内主要入湖河流有6条, 其中布哈河水域面积最大, 且与泉吉河一同分布在湖泊西北方向, 河流入湖口周围以河漫滩为主^[20]; 东北方向为沙柳河和哈尔盖河, 入湖

口土质为风沙堆积; 西南及东南方向分别分布有黑马河和倒淌河.

1.2 样品采集与测定

于2020年10月采用彼得森抓斗式采泥器(etc-200, 中国)对青海湖共22个点的表层沉积物(0~10 cm)进行采集, 样点分布情况见图1, 所有采样点使用GPS定位. 采集的沉积物样品装入干净的聚乙烯自封袋中, 排出袋内空气后密封, 低温保存运输至实验室后冷冻干燥、研磨并过100目尼龙网筛, 保存备用.

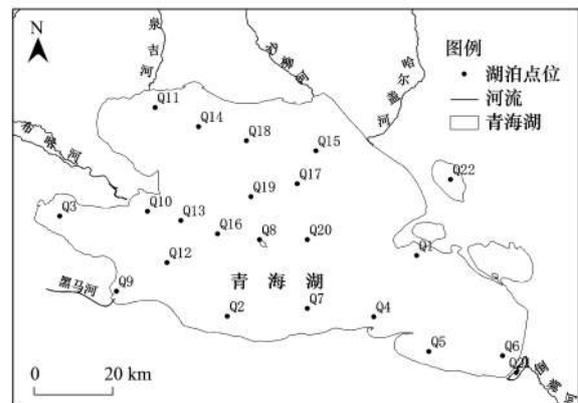


图1 青海湖表层沉积物采样点

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in Lake Qinghai

1.2.1 重金属总量及形态提取

沉积物重金属总量的提取参照EPA3051^[21]方法, 使用 $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ 的酸消解体系进行微波消解(微波消解仪, ECM, 美国). 消解后样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 混纤膜过滤, 并参照EPA200.8^[22]方法, 使用Agilent7500型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 安捷伦, 美国)测定Cu、Co、Cr、Cd、Ni、Pb、Zn和As这8种重金属的含量. 重金属形态的提取采用改进的BCR 3步连续提取法^[23,24], 主要形态包括可交换态及碳酸盐结合态、Fe-Mn氧化物结合态、有机物及硫化物结合态和残渣态, 提取后各重金属形态含量同样使用ICP-MS测定(表1). 分析过程中所有玻璃及聚乙烯器皿在使用前均用10%的 HNO_3 充分浸泡24h以上. 重金属总量及形态分析过程中, 利用国家沉积物标准品GSD-7 (GBW-07366)、空白样和平行样进行质量控制. 测定的标准物质总量回收率在94%~115%之间, 各金属元素方法检出限在 $0.02 \sim 1.82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平行样品之间的相对标准偏差均小于5%; 标准物质形态提取回收率(各形态加和与总量的比值)在88%~113%之间, 各金属元素方法检出限在 $0.01 \sim 2.12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平行样品间相对标准偏差均小于9%.

1.2.2 相关理化指标测定

此外,为分析重金属的来源及分布影响因素,对沉积物中 Fe 含量、有机质含量和粒径分布等物理化学指标进行测定. Fe 含量的提取及测定与上述 8 种金属元素相同;有机质采用油浴

加热-重铬酸钾容量法测定^[25];沉积物中黏粒 (< 4 μm)、粉粒 (4 ~ 63 μm) 和砂粒 (63 ~ 2 000 μm) 的占比分析使用粒度分析仪 (Masterizer-2000, 马尔文, 英国) 完成. 相关测定结果见表 2.

表 1 改进的 BCR 分布提取方法流程

Table 1 Improved BCR distribution extraction process

步骤	形态	提取试剂	提取方法
I	可交换态及碳酸盐结合态(F1)	HAc: 40 mL 0.11 mol·L ⁻¹	25℃下振荡 16 h
II	Fe-Mn 氧化物结合态(F2)	NH ₂ OH·HCl: 40 mL 0.50 mol·L ⁻¹	25℃下振荡 16 h
III	有机物及硫化物结合态(F3)	H ₂ O ₂ : 10 mL pH 2~3; NH ₄ Ac: 50 mL 1 mol·L ⁻¹ , pH 2~3	85℃水浴加热下振荡 1 h, 25℃下振荡 16 h
IV	残渣态(F4)	4 mL HNO ₃ + 1 mL H ₂ O ₂	微波消解

表 2 青海湖沉积物物理化学指标

Table 2 Physical and chemical parameters in sediments of Lake Qinghai

指标	ω(Fe)/g·kg ⁻¹	ω(有机质)/g·kg ⁻¹	黏粒占比/%	粉粒占比/%	砂粒占比/%
最大值	30.70	81.69	22.07	79.50	49.56
最小值	8.66	5.74	7.67	42.15	7.15
平均值	23.64	41.34	11.74	66.96	21.30
标准偏差	4.80	18.32	3.86	10.86	13.10

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 对数据结果进行相关性分析及主成分分析,采用 Arcgis 10.7 和 Origin 8.0 分别绘制重金属元素的空间分布(空间插值法)及其他图形.

此外,采用潜在生态危害指数评价法和风险评价编码法(RAC)对青海湖表层沉积物的重金属潜在风险进行评价.

1.3.1 潜在生态危害指数评价法

该评价方法可从生态毒理角度综合反映沉积物中重金属对生态环境影响的潜力. 计算公式如下:

$$RI = \sum E_r^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (2)$$

$$C_r^i = C_i / C_i^{BS} \quad (3)$$

式中,RI 为综合潜在生态危害指数, E_r^i 为单项潜在生态危害指数; C_r^i 为单项污染系数; T_r^i 为重金属的毒性响应系数^[26], Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 对应的毒性响应系数为 2、5、5、5、1、10、30 和

5; C_i 为所分析元素在沉积物中的含量, C_i^{BS} 为元素 i 的土壤环境背景值(本文参照青海省土壤背景值^[27]). 沉积物重金属生态危害程度划分标准见表 3.

1.3.2 风险评价编码法(RAC)

风险评价编码法^[28](RAC)是基于沉积物中重金属的不同存在形态对其有不同的结合力而提出的. 以可交换态和碳酸盐结合态存在的重金属,由于键合相对较弱,易与上覆水体相互交换,因而具有快速的生物可利用性,RAC 将其视为重金属的有效部分,通过计算可交换态和碳酸盐结合态含量占总量的比例来评价沉积物中重金属的有效性,进而对其环境风险进行评价. 重金属的有效性越高则环境风险性越大,反之亦然. RAC 计算公式如下:

$$RAC = ([F1] / C_T) \times 100\% \quad (4)$$

式中,[F1]为可交换态及碳酸盐结合态金属含量, C_T 为金属总含量.

上述评价方法的风险评价等级划分见表 3.

表 3 生态风险评价等级划分

Table 3 Classification of ecological risk assessment

潜在生态危害指数评价法				风险评价编码法	
单项潜在生态危害系数	单项潜在生态危害程度	潜在生态危害指数	潜在生态危害程度	RAC	风险程度
$E_r^i < 30$	轻微生态危害	$RI < 110$	轻微生态危害	$RAC < 1\%$	无
$30 \leq E_r^i < 60$	中等生态危害	$110 \leq RI < 220$	中等生态危害	$1\% \leq RAC \leq 10\%$	低
$60 \leq E_r^i < 120$	强生态危害	$220 \leq RI < 440$	强生态危害	$11\% \leq RAC \leq 30\%$	中等
$120 \leq E_r^i < 240$	很强生态危害	$RI \geq 440$	很强生态危害	$31\% \leq RAC \leq 50\%$	高
$E_r^i \geq 240$	极强生态危害			$RAC > 50\%$	很高

2 结果与讨论

2.1 重金属分布特征

2.1.1 总量分布特征

青海湖表层沉积物中 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 如表 4 所示, 8 种重金属的含量平均值依次为 45.44、8.28、21.06、18.02、57.41、13.21、0.21 和 18.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各金属元素均值与李少华等^[17] 和常华进等^[15] 的研究结果基本一致. 与青海湖流域表层土壤背景值相比, 除 As 和 Cd 的平均含量分别超出环境背景值的 1.13 倍和 1.53 倍外, 其余重金属元素平均含量均不同程度低于背景值. 总而言之, 与巢湖^[29]、洞庭湖^[30] 和太湖^[31] 等人口较密集的城市湖泊相比, 青海湖沉积物中的重金属整体上不存在显著富集现象.

各金属元素在表层沉积物中的空间分布如图 2 所示. 除 As 外, 其他 7 种重金属的分布特征十分相似, 其主要特征表现为: ① 西北部主要河流入湖口、青海湖农场附近重金属含量相对于其他区域较高, 考虑该区域的重金属富集可能受到河流入湖口沉积作用和青海湖北部农场的人为活动影响^[16]; ② 151 码头由于景点旅游和频繁车辆交通等人为活动的影响, 可能引起附近 Zn、Pb、Cu、Cd 和 Cr 等金属含量偏高^[16], 从而形成较为明显的重金属富集现象. 有研究表明交通量大、路口和拐弯等刹车使用频繁的路段^[17], 会导致附近土壤/沉积物中 Zn、Pb、Cu 和 Cr 的累积, 这与本研究结果基本一致. 此外, Q5

(151 码头)、Q10(布哈河入湖口)、Q12(孤插山/三块石) 和 Q14(青海湖农场) 点位的 Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 这 5 种重金属含量均显著高于土壤背景值, 且 Cr 在 151 码头和布哈河入湖口的含量也高于土壤背景值, 推测与入湖口泥沙堆积^[20]、旅游活动增加^[17] 和农业生产^[16] 等自然因素和人为影响有关. 相对而言, Q1(沙岛)、Q2(江西沟码头)、Q21(错果) 和 Q22(尕海) 这 4 个点位的重金属含量仅为背景值的 40%. 其中, 沙岛及其附近水域底泥以砂质为主, 不易于金属富集^[15]; 而江西沟码头和倒淌河分别位于湖泊南部及东南部, 可能由于这些区域本身水系较少, 使得河流入湖对附近重金属累积的影响较小^[32].

从变异系数来看, As 和 Cd 的变异系数分别为 50.61%、49.8%, 高于其他 6 种金属元素 (25.10%~36.78%), 表明青海湖中 As 和 Cd 的空间波动性相对较大, 其中 As 的变异系数超过 50%. 图 2 显示, As 高值主要分布在布哈河入湖口、江西沟码头、鸟岛、黑马河入湖口和 151 码头, 表明这些区域可能存在点源污染^[17]. 野外调查中发现, 目前青海湖周围道路分布广泛 (如青藏铁路、316 国道、109 国道、省道和县乡道路等), 且近十年城镇化建设和旅游业也在不断增加, 致使交通运输排放物成为主要污染物来源之一. 151 码头、布哈河入湖口和江西沟码头可能与采样点周围人口密集、车辆交通和景点旅游等人类活动有直接关系, 黑马河入口和鸟岛等, 可能与农药化肥和农场等原因有关.

表 4 青海湖表层沉积物的重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Heavy metal contents in surface sediments of Lake Qinghai/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
平均值	45.44	8.28	21.06	18.02	57.41	13.21	0.21	18.06
标准偏差	11.40	2.27	6.10	6.63	16.66	6.69	0.11	6.45
最小值	19.48	3.06	6.89	3.79	20.09	7.15	0.06	5.23
最大值	57.88	11.45	28.33	27.05	79.29	37.91	0.53	28.83
变异系数/%	25.10	27.43	28.98	36.78	29.01	50.61	49.80	35.73
青海湖土壤背景值	54.17	11.98	24.96	19.72	64.28	11.66	0.14	20.47
巢湖表层平均值 ^[29]	168.24	—	35.54	27.67	142.04	21.08	0.42	56.00
太湖表层平均值 ^[31]	82.3	15.8	43.9	32.8	109	—	0.55	35.1
洞庭湖表层平均值 ^[30]	93.27	—	34.47	37.98	147.19	21.23	1.91	36.05

2.1.2 赋存形态特征

在总量调查基础上, 进一步对各金属元素的化学赋存形态进行分析. 如图 3 所示, Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 As 均以残渣态为主要存在形态, 在总量中的平均占比分别为 93.58%、68.01%、69.21%、66.59%、75.52% 和 69.03%. 残渣态金属几乎不会被生物所利用, 只有通过化学反应先转化为可溶解

态才能对生物产生一定影响^[33], 因此这 6 种金属元素在青海湖沉积物中相对稳定. Cd 和 Pb 以 Fe-Mn 氧化物结合态为主要赋存形态, 这部分金属元素在氧化还原电位降低或水体缺氧条件下, 可能形成迁移能力更高的价态并进入水体^[15]. 值得关注的是, 可交换态及碳酸盐结合态 Cd 含量占其总量的平均值达到 24.08%, 在 8 种重金属中相对最高. 该结果

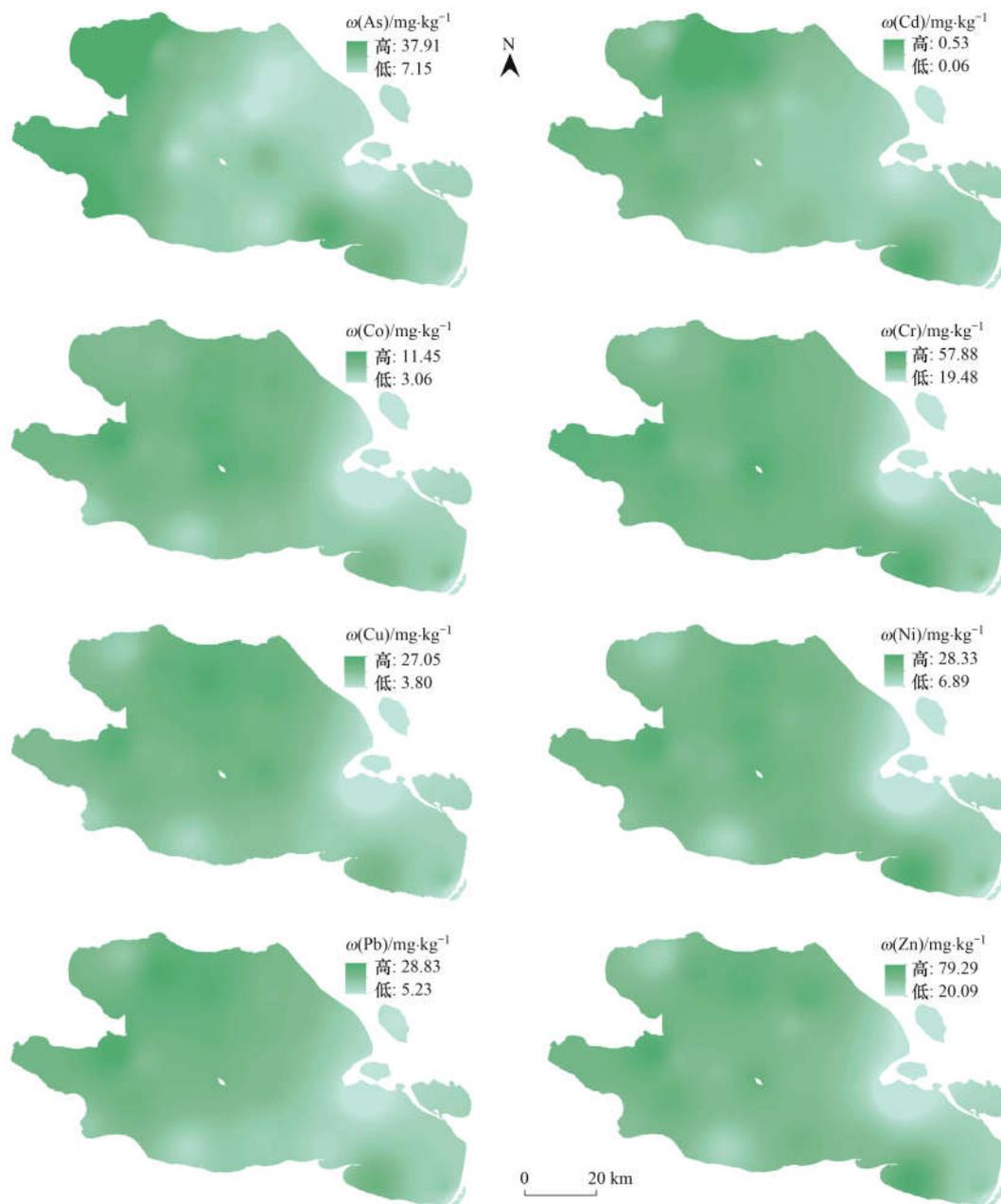


图2 青海湖表层沉积物重金属含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in surface sediments of Lake Qinghai

可能归因于 Cd(0.097 nm)和 Ca(0.099 nm)有相似的离子半径,因此 Cd 易与碳酸盐形成沉淀,并渗透入方解石晶体中产生 $Cd_nCa_{1-n}CO_3$ 固溶体^[34];此外,碳酸盐对于 Cd 具有较强的吸附能力^[35],可能也是该形态 Cd 占比较高的原因之一.已有研究显示,以可交换态及碳酸盐结合态存在的金属元素对环境变化最为敏感,可在水环境条件变化时(如 pH 下降,弱酸或中性条件)向水体迁移,并直接被生物利用,因此环境风险较大^[36].此外,Co、Ni 和 Cu 的有机物及硫化物结合态占比为 17.20%、18.79% 和 20.35%,高于其他几种金属元素.有机物及硫化物结合态金属一般情况下较稳定,但在较强的氧化条

件下也能发生释放.总的来说,各金属元素在沉积物中的赋存形态存在差异,这可能与其在环境中的赋存及迁移转化受到不同因素的影响有关,例如 pH、ORP、SOC 和黏土含量等^[37,38]都会影响金属在沉积物中的存在形式和迁移性.有关不同重金属形态的赋存及转化机制有待进一步深入研究.

与残渣态相比,可交换态及碳酸盐结合态、Fe-Mn 氧化物结合态和有机物及硫化物结合态金属的生物有效性相对较高,在一定条件下可能释放到水体中造成二次污染^[1],因此这 3 种赋存形态可被统称为生物有效态.从分析结果可知,青海湖表层沉积物中 Cd 和 Pb 的生物有效态含量占比高于其他 6 种

金属,特别是 Cd 的生物有效态达到 92.19%,反映出其存在较高的迁移风险。

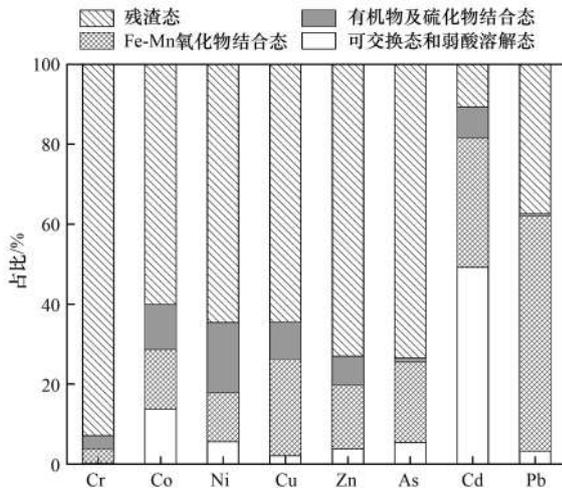


图3 青海湖表层沉积物中重金属形态的占比

Fig. 3 Percentage of heavy metal fractions in the surface sediment of Lake Qinghai

2.2 重金属来源分析

2.2.1 相关性分析

母质不但决定了沉积物中重金属的含量,而且在很大程度上决定了重金属含量之间原始的相关特征.另外,在沉积物发育过程中,各种地球化学作用以及人为因素也能改变沉积物中重金属的含量及其相互之间的相关关系^[39].本文借助相关性分析,对青海湖沉积物中的重金属来源进行了初步探讨.如表5所示,青海湖中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 这7种金属元素间都有很强的相关性($P < 0.01$),表明这7种金属元素具有一定的同源性;其中 Zn-Ni 的相关性最强,相关性系数达到 0.974.此外,根据已有研究^[40],Fe 作为环境中大量存在的金属元素,对人为干扰不敏感,因此可作为金属自然源的表征,用于区分沉积物中金属元素的自然与人为来源.本次调查中,上述7种元素均与 Fe 元素呈显著正相关性,表明其在沉积物中的分布很大程度上受到自

表5 青海湖表层沉积物重金属相关性分析($n=22$)¹⁾

Table 5 Correlation analysis of heavy metals in surface sediments of Lake Qinghai ($n=22$)

	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Cr	0.953 **	0.898 **	0.953 **	0.849 **	0.927 **	0.181	0.583 **	0.762 **
Fe	1	0.949 **	0.949 **	0.868 **	0.913 **	0.296	0.530 *	0.799 **
Co		1	0.942 **	0.945 **	0.894 **	0.178	0.541 **	0.865 **
Ni			1	0.929 **	0.974 **	0.141	0.659 **	0.843 **
Cu				1	0.916 **	0.036	0.691 **	0.930 **
Zn					1	0.141	0.760 **	0.865 **
As						1	0.149	0.131
Cd							1	0.818 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

然因素的影响.相对而言,As 与其他金属元素不存在显著相关性,表明可能受到一定的人为活动影响。

2.2.2 主成分分析

在相关分析的基础上,进一步采用主成分分析对青海湖的金属来源进行解析.通过前述相关性分析,发现大部分重金属元素之间具有显著的相关性,且主成分分析中 Bartlett 球形度检验相伴概率为 0.00,小于显著性水平 0.05, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计值为 0.99,表明本研究中的数据适合进行主成分分析.分析结果显示(表6),根据特征值大于 1 的原则,共筛选出 2 个因子,解释了 88.47% 的变量信息.其中,第一主成了解释了 76.23% 的方差变异,Fe、Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的载荷均在 0.900 以上,且 Fe 与这些金属属于同一个主成分. Cd 和 As 的正载荷相对最低,分别为 0.739 和 0.195.由此可见,第一主成分主要支配着沉积物中 Fe、Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 Pb 这 7 种元素

的来源,同时还支配着 Cd 和 As 的部分来源,结合相关性分析基本可以确定第一主成分为自然来源,与已有的研究结果相似^[16].第二主成分的方差贡献率为 12.25%,其中 As 具有较高的载荷量,可认为第二主成分主要支配着沉积物中 As 的来源.结合空间分布可知,As 的高值主要出现在靠近青海湖农场的湖泊西北部等区域,据此推测沉积物中 As 的来源在一定程度上受到周边农场农药过度使用等人为活动的影响^[41,42].该结果与李少华等^[17]的调查结果相似,即 As 高值主要出现在农业灌溉区,表明农田也是青海湖表层沉积物重金属来源之一.已有研究显示^[43],过去农业生产中对含 As 除草剂、杀虫剂和杀菌剂等的频繁使用,使得 H_3AsO_3 、 $Ca_3(AsO_4)_2$ 和 $Na(CH_3)HAsO_3$ 等含 As 物质逐渐累积在地表环境中.综上,根据主成分分析结果,青海湖沉积物中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的主要来源为自然来源,而 As 的累积则受到人为来源的影响。

表 6 主成分分析结果

项目	第一主成分	第二主成分
Fe	0.947	0.146
Cr	0.938	0.33
Co	0.954	0.06
Ni	0.979	-0.036
Cu	0.958	-0.168
Zn	0.976	-0.048
As	0.195	0.974
Cd	0.739	0.059
Pb	0.922	-0.086
特征值	6.95	1.01
方差贡献率/%	76.23	12.25
累计方差贡献率/%	76.23	88.47

2.3 潜在风险分析

2.3.1 潜在生态危害指数法

本研究在调查金属元素分布的基础上,以青海省土壤重金属元素背景值作为参考,计算了 8 种重金属元素的生态危害指数 E_r^i 。结果表明,青海湖沉积物中重金属的生态危害指数均值从高到低依次为: Cd > As > Cu > Pb > Ni > Co > Cr > Zn (表 7), 其中 Cd 的 E_r^i 均值为 46.01, 对应中等生态危害水平, 其他重金属则处于轻微生态危害水平; 该结果与朱阳春^[16] 等对青海湖沉积物重金属的风险评价结果一致。从空间分布来看, Cd 在 151 码头附近以及青

海湖西北部区域的生态危害水平相对较高(E_r^i 值处于 60 ~ 120 之间), 海心岛、以及鸟岛附近区域的生态危害水平次之(E_r^i 值在 30 ~ 60 之间), 这些区域应予以重视。此外, As 在泉吉河入湖口处的 E_r^i 值为 32.51, 处于中等风险水平, 表明该区域表层沉积物具有一定的潜在生态危害, 其他点位 As 大多数都属于轻微生态危害水平。

从综合潜在生态危害指数(RI)计算结果来看, 8 种金属元素的 RI 值在 27.70 ~ 148.34 之间, 平均为 76.57, 反映出青海湖沉积物中重金属整体处于轻微生态危害水平。其中, 151 码头以及青海湖北部(靠近青海湖农场及三角地羊场)面临的金属风险相对最高, 均大于 110, 属于中等生态危害。总的来看, 与其他人为影响较大的平原内陆湖泊沉积物中重金属污染情况^[13,31] 相比, 青海湖由于地广人稀且外源污染少, 因此目前重金属潜在生态危害水平整体较低。但与青海湖沉积物中 Cd 生态危害水平较高的现象相似, 过去一些研究结果显示, 太湖^[31]、洞庭湖^[30] 和巢湖^[29] 等湖泊中同样存在 Cd 元素含量超出环境背景值的现象, 说明 Cd 富集在我国湖泊沉积物中较为普遍, 工业、旅游交通、农业活动和大气沉降带来的面源污染等均可能造成 Cd 在表环境中的富集^[44,45]。

表 7 青海湖流域表层沉积物中重金属的潜在生态危害水平

项目	单一元素的潜在生态危害指数(E_r^i)								综合潜在生态危害指数(RI)
	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	
最大值	2.14	4.78	5.67	6.86	1.23	32.51	113.59	7.04	148.34
最小值	0.72	1.28	1.38	0.96	0.31	6.13	13.82	1.28	27.70
平均值	1.68	3.46	4.22	4.57	0.89	11.33	46.01	4.41	76.57
标准差	0.41	0.93	1.19	1.64	0.25	5.60	22.39	1.54	28.20

2.3.2 风险评价编码法

与基于重金属总量的潜在生态危害指数评价相比, 风险评价编码法主要考虑了重金属的化学活性及生物可利用性。Singh 等^[8] 的研究认为, 在多种金属赋存形态中, 由人类活动引起的可交换态和碳酸盐结合态含量升高会增加沉积物重金属的生物有效性或活性形态, 其在金属形态中所占比例越高, 说明在沉积物中的迁移能力越强, 生物利用性越强, 因此潜在风险水平越高。

RAC 指数分析结果显示, 青海湖表层沉积物中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的 RAC 指数范围分别为 0.05% ~ 1.22%、1.11% ~ 7.79%、1.00% ~ 5.06%、0.04% ~ 5.40%、0.14% ~ 7.98%、0.51% ~ 9.87%、3.38% ~ 66.84% 和 0.02% ~ 7.57%; 各金属元素的 RAC 均值由大到小为: Cd > As > Zn >

Co > Pb > Cu > Ni > Cr (图 4)。其中, Cr、Cu、Zn 和 Pb 处于无风险至低风险水平, Co、Ni 和 As 处于低风险水平; Cd 大体处于中风险水平, 个别采样点(例如 Q1、Q9、Q21 和 Q22)风险指数超过 50%, 达到极高风险水平, 该结果与 Cd 在沉积物中较高的生态危害指数及生物有效性相对应。

结合重金属含量的空间分布发现, 8 种重金属总量在布哈河入湖口、青海湖农场、南部 151 码头和中部海心岛周围区域均达到最高值, 但 RAC 值较低, 除 Cd 以外, 其他 7 种金属元素均处于无风险-低风险水平; 这表明虽然这些区域金属含量较高, 但是生物可利用性较低, 因此对水环境的潜在生态危害不大。值得注意的是, Cd 在南部黑马河入湖口、尕海和沙岛附近区域的 RAC 风险水平均高于其他区域(图 5), 该结果可能受到不同区域沉积物理化

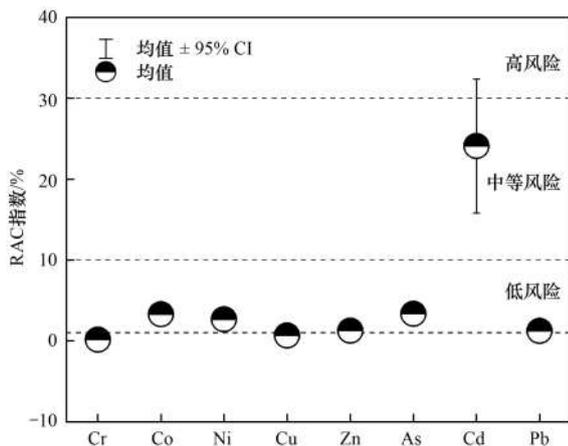


图4 青海湖表层沉积物中重金属的RAC指数

Fig. 4 RAC index of heavy metals in surface sediments of Lake Qinghai

性质差异的影响. 例如, 已有研究表明 CdCO_3 的沉淀多发生在低有机质的砂质土壤中^[46]; 本研究中 Cd 的 RAC 值等同于可交换态及碳酸盐结合态 Cd 在其总量中的占比, 因此表现为 Cd 的 RAC 值分别与沉积物砂粒组分和有机质含量呈显著正相关和负相关(图6). 此外, Cd 的亲有机性较弱, 使得有机质对 Cd 吸附量较小^[46,47], 可能同样使有机质含量与 Cd 的 RAC 值呈负相关关系.

从两种评价结果来看, RAC 与潜在生态危害指数评价法的评定结果存在较大差异, 这是因为 RAC 法是基于元素赋存形态进行的潜在风险评价, 不考虑重金属的绝对量, 且生物有效性并不等同于基于金属总量的生物毒性^[48]. 而潜在生态危害评价能反映重金属可能存在的生态危害水平, 却忽略了重金

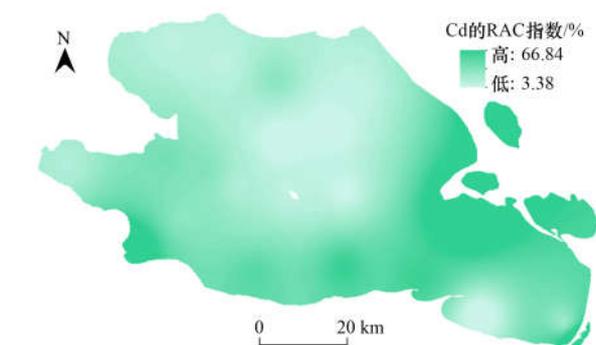


图5 青海湖表层沉积物中 Cd 的 RAC 指数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Cd RAC index in surface sediments of Lake Qinghai

属的生物可利用性, 因而可能导致对污染程度的低估或夸大. 因此, 为了有效评价重金属的迁移特性与潜在生态危害, 本研究综合考虑了基于总量和基于形态的重金属潜在风险评估手段, 两种评价方法结论互补, 可以更准确地反映青海湖沉积物中重金属的潜在风险情况.

综合上述潜在风险分析结果, 青海湖表层沉积物中整体生态风险水平较低, 但 Cd 表现出相对较高的潜在风险. 已有研究表明, 青藏高原水体及土壤等不同介质中都存在一定的 Cd 污染现象, 其主要来源除自然源外, 还包括交通及采矿业^[49]. 相应地, 本研究在野外调查中发现, 151 码头周围区域存在旅游交通方面的污染, 而位于青海湖北部的刚察县周围存在一些小工厂及采矿业, 可能均影响着 Cd 的地表富集. 综上, 后续应特别关注青海湖北部、黑马河入湖口和 151 码头区域沉积物中 Cd 的累积情况及潜在释放风险.

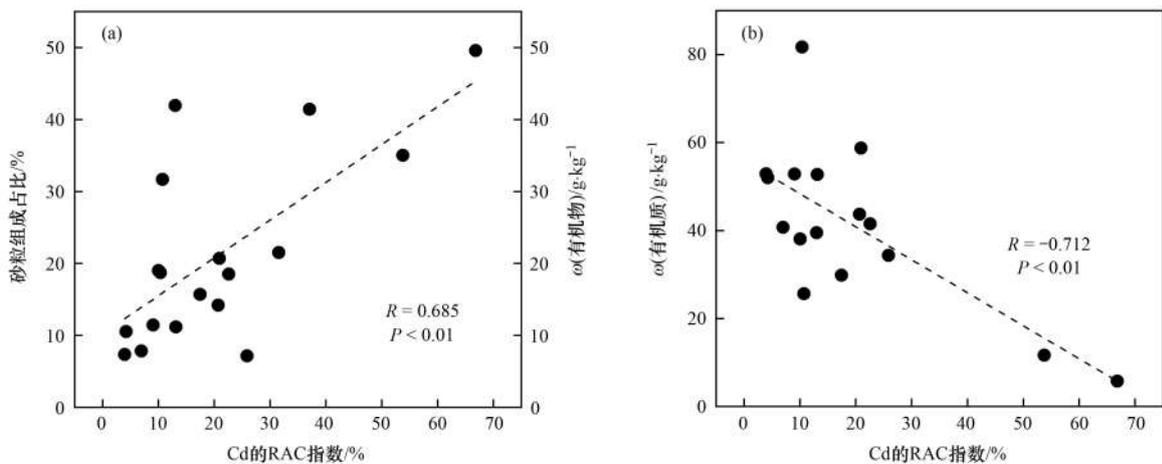


图6 青海湖表层沉积物中 Cd 的 RAC 指数与环境因子的相关性

Fig. 6 Correlations between the RAC index of Cd and the environmental factors

3 结论

(1) 青海湖表层沉积物中 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Pb})$

的平均值分别为 45.44、8.28、21.06、18.02、57.41、13.21、0.21 和 18.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 As 和 Cd 含量平均值高于环境背景值; 除 As 外, 其余 7 种金属的空间分布极为相似, 即在西北部布哈河入

湖口、青海湖农场附近、以及南部 151 码头附近存在较明显富集现象。

(2) 赋存形态方面, Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 As 主要以残渣态存在, Cd 和 Pb 主要以 Fe-Mn 氧化物结合态和残渣态存在; 8 种金属元素中 Cd 的生物有效态含量相对最高, 其中可交换态及碳酸盐结合态 Cd 在总量中的平均占比达到 24.08%, 具有较高的潜在生物毒性。

(3) 相关分析及主成分分析结果表明, Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 与 Fe 之间均有较强的相关性, 表明其分布主要受到自然沉积作用的影响; As 与其他金属无明显相关性, 其分布一定程度上受到农业生产等人为来源影响。

(4) 根据潜在生态危害指数, 除 Cd 外, 其他 7 种重金属均处于低风险水平; 相对而言, Cd 在湖区的生态风险介于中风险和低风险之间, 个别区域达到强生态风险。RAC 评价结果显示, Cd 的潜在释放风险较高, 处于中~高风险级水平, 其中布哈河入湖口、青海湖农场及 151 码头附近区域的潜在风险最为突出。

参考文献:

- [1] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Jiulong river [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- [2] He P J, Xiao Z, Shao L M, *et al.* In situ distributions and characteristics of heavy metals in full-scale landfill layers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **137**(3): 1385-1394.
- [3] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 355-364.
- [4] Matsumoto E, Wong C S. Heavy metal sedimentation in Saanich Inlet measured with ²¹⁰Pb technique [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(34): 5477-5482.
- [5] Basu A, Molinaroli E. Toxic metals in Venice lagoon sediments: model, observation, and possible removal [J]. *Environmental Geology*, 1994, **24**(3): 203-216.
- [6] Hornberger M I, Luoma S N, Van Geen A, *et al.* Historical trends of metals in the sediments of San Francisco Bay, California [J]. *Marine Chemistry*, 1999, **64**(1-2): 39-55.
- [7] 黄薇文, 张经, 刘敏光, 等. 黄河口底质中重金属的存在形式 [J]. 山东海洋学院学报, 1985, **15**(1): 137-145.
- Huang W W, Zhang J, Liu M G, *et al.* Speciation of heavy metals in the Huanghe river estuarine sediments [J]. *Journal of Shandong College of Oceanology*, 1985, **15**(1): 137-145.
- [8] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [9] Farkas A, Erratico C, Viganò L. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(4): 761-768.
- [10] Segura R, Arancibia V, Zúñiga M C, *et al.* Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, **91**(1-3): 71-80.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [12] 柏建坤, 李潮流, 康世昌, 等. 雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 [J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3346-3351.
- Bai J K, Li C L, Kang S C, *et al.* Chemical speciation and risk assessment of heavy metals in the middle part of Yarlung Zangbo surface sediments [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3346-3351.
- [13] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 437-444.
- Yu H, Zhang W B, Yu J P. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Hongze lake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 437-444.
- [14] Wünnemann B, Wagner J, Zhang Y Z, *et al.* Implications of diverse sedimentation patterns in Hala Lake, Qinghai Province, China for reconstructing Late Quaternary climate [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2012, **48**(4): 725-749.
- [15] 常华进, 曹广超, 陈克龙, 等. 青海湖流域沙柳河下游沉积物中重金属污染风险评价 [J]. 地理科学, 2017, **37**(2): 259-265.
- Chang H J, Cao G C, Chen K L, *et al.* Pollution and potential ecological risk of heavy metals in sediment from the lower reaches of Shaliuhe river, Qinghai lake watershed [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(2): 259-265.
- [16] 朱阳春, 陈学民, 伏小勇. 青海湖表层沉积物重金属富集特征及其来源 [J]. 生态学杂志, 2013, **32**(7): 1862-1869.
- Zhu Y C, Chen X M, Fu X Y. Enrichment characteristics and sources of heavy metals in surface sediments of Qinghai Lake, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(7): 1862-1869.
- [17] 李少华, 王学全, 兰岚, 等. 青海湖流域主要河口区沉积物中重金属元素生态风险评价 [J]. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(6): 940-945.
- Li S H, Wang X Q, Lan L, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in sediments at estuaries of major inlets of the Qinghai Lake basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(6): 940-945.
- [18] 王若锦, 邵天杰, 卫佩茹. 环青海湖地区表层土壤重金属富集含量及其生态风险评价 [J]. 干旱区研究, 2021, **38**(2): 411-420.
- Wang R J, Shao T J, Wei P R. Enrichment content and ecological risk assessment of heavy metal in surface soil around Qinghai Lake [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(2): 411-420.
- [19] 李岳坦, 李小雁, 崔步礼, 等. 青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量变化 (1961-2007 年) 及趋势分析 [J]. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 616-624.
- Li Y T, Li X Y, Cui B L, *et al.* Trend of pan evaporation and its impact factors over Lake Qinghai basin from 1961 to 2007 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(4): 616-624.
- [20] 王平, 曹军骥, 吴枫. 青海湖流域表层土壤环境背景值及其影响因素 [J]. 地球环境学报, 2010, **1**(3): 189-200.
- Wang P, Cao J J, Wu F. Environmental background values and

- its impact factors of topsoil within the Lake Qinghai catchment, Northeast Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2010, **1**(3): 189-200.
- [21] EPA Method 3051, Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils[S].
- [22] Creed J T, Broekhoff C A, Martin T D. Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasmamass spectrometry[Z]. USEPA200.8, 1994.
- [23] Lee P K, Kang M J, Jo H Y, *et al.* Sequential extraction and leaching characteristics of heavy metals in abandoned tungsten mine tailings sediments [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **66**(7): 1909-1923.
- [24] Wen J, Yi Y J, Zeng G M. Effects of modified zeolite on the removal and stabilization of heavy metals in contaminated lake sediment using BCR sequential extraction [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **178**: 63-69.
- [25] 和向东, 陈积颖, 丁德鼎, 等. 异龙湖表层沉积物有机质含量空间分布初步研究[J]. *环境科学导刊*, 2020, **39**(6): 18-22.
- He X D, Chen Z Y, Ding D D, *et al.* Preliminary study on spatial distribution of organic matter content in surface sediments of Yilong Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2020, **39**(6): 18-22.
- [26] Akoto O, Eshun F B, Darko G, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metals in fish from the Fosu Lagoon [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2014, **8**(2): 403-410.
- [27] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. *中国环境监测*, 1991, **7**(1): 1-6.
- [28] Jain C K. Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India[J]. *Water Research*, 2004, **38**(3): 569-578.
- [29] 夏建东, 龙锦云, 高亚萍, 等. 巢湖沉积物重金属污染生态风险评价及来源解析[J]. *地球与环境*, 2020, **48**(2): 220-227.
- Xia J D, Long J Y, Gao Y P, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metal pollutions in sediments of the Chaohu Lake[J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(2): 220-227.
- [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] 任杰, 白莉, 李军, 等. 太湖表层沉积物重金属污染评价与来源分析[J]. *地球与环境*, 2021, **49**(4): 416-427.
- Ren J, Bai L, Li J, *et al.* Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Taihu Lake[J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(4): 416-427.
- [32] 张志杰, 周玉文, 陈嵘, 等. 1960 年以来青海湖沉积物粒度的时空分布及其控制因素[J]. *高校地质学报*, 2019, **25**(4): 623-632.
- Zhang Z J, Zhou Y W, Chen R, *et al.* Spatio-temporal distributions and controls of grain size in the sediments from the Qinghai Lake since the 1960 AD[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, **25**(4): 623-632.
- [33] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, *et al.* Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **57**(3): 475-487.
- [34] Iwegbue C M A, Nwajei G E, Eguavoeno O, *et al.* Chemical fractionation of some heavy metals in soil profiles in vicinity of scrap dumps in Warri, Nigeria [J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2009, **21**(2): 99-110.
- [35] 王立夫, 赵淑雯, 李彬彬, 等. 不同阴离子钠盐对土壤 Cd 形态与微生物群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(9): 4221-4230.
- Wang L F, Zhao S W, Li S S, *et al.* Effect of sodium salt with varied anions on Cd fractions and microbial community in soil [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 4221-4230.
- [36] 姜时欣, 翟付杰, 张超, 等. 伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2653-2663.
- Jiang S X, Zhai F J, Zhang C, *et al.* Speciation distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from the Yitong River city area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2653-2663.
- [37] Wang Z S, Wang Y S, Chen L Q, *et al.* Assessment of metal contamination in coastal sediments of the Maluan Bay (China) using geochemical indices and multivariate statistical approaches [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **99**(1-2): 43-53.
- [38] 朱晨阳, 付国威, 李光耀, 等. 西湖和东苕溪沉积物重金属化学形态分析[J]. *四川环境*, 2021, **40**(1): 136-142.
- Zhu C Y, Fu G W, Li G Y, *et al.* Chemical speciation of heavy metals in the sediments of West Lake and East Tiaoxi basin [J]. *Sichuan Environment*, 2021, **40**(1): 136-142.
- [39] Liu L L, Wang Z P, Ju F, *et al.* Co-occurrence correlations of heavy metals in sediments revealed using network analysis [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1305-1313.
- [40] Schiff K C, Weisberg S B. Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments [J]. *Marine Environmental Research*, 1999, **48**(2): 161-176.
- [41] 李玄添, 张凤宝, 杨明义. 渭河陕西段沉积物重金属空间分布及来源解析[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(12): 4225-4234.
- Li X T, Zhang F B, Yang M Y. Spatial variation and source identification of heavy metals in sediments in Shaanxi section of Weihe River, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(12): 4225-4234.
- [42] 李悦昭, 陈海洋, 孙文超. “河湖”沉积物重金属环境特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2646-2652.
- Li Y Z, Chen H Y, Sun W C. Environmental characteristics and source apportionment of heavy metals in the sediments of a river-lake system [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2646-2652.
- [43] 齐文启, 汪志国, 孙宗光, 等. 关于 As 和 Hg 在环境中的形态及其监测分析[J]. *中国环境监测*, 2000, **16**(3): 9-15.
- Qi W Q, Wang Z G, Sun Z G, *et al.* The form and monitoring of As and Hg in environment [J]. *Environmental monitoring in China*, 2000, **16**(3): 9-15.
- [44] Barakat A, El Baghdadi M, Rais J, *et al.* Assessment of heavy metal in surface sediments of day River at Beni-Mellal region, Morocco [J]. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2012, **4**(8): 797-806.
- [45] Yu Y, Luo H J, He L H, *et al.* Level, source, and spatial distribution of potentially toxic elements in agricultural soil of typical mining areas in Xiangjiang River basin, Hunan Province [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(16), doi: 10.3390/ijerph17165793.
- [46] Bradl H B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils

- constituents[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, **277**(1): 1-18.
- [47] 李雨清, 何江, 吕昌伟, 等. 富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1008-1015.
- Li Y Q, He J, Lü C W, *et al.* Effects of fulvic acid on absorption and form distribution of heavy metals on sediments [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1008-1015.
- [48] 杨新明, 庄涛, 韩磊, 等. 小清河污灌区农田土壤重金属形态分析及风险评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(3): 644-652.
- Yang X M, Zhuang T, Han L, *et al.* Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the farmland soil from the sewage irrigated area of Xiaoqing River [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(3): 644-652.
- [49] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 886-894.
- Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102; E-mail: hjcx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Autochthonic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)