

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价

张鹏岩^{1,2}, 康国华¹, 庞博¹, 郭依¹, 何坚坚¹, 秦明周^{1*}

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004; 2. 中原经济区“三化”协调发展河南省协同创新中心, 郑州 410001)

摘要: 为了研究宿鸭湖沉积物中重金属的污染状况, 采集了宿鸭湖湖心、中围和外围这 3 个位置的沉积物, 对沉积物中重金属 Cu、Cd、Cr、Zn、Pb、Ni 的含量进行测定, 运用地积累指数法和潜在生态风险指数法对研究区的重金属含量特征和污染状况进行分析, 并采用克里格法和相关性分析对重金属的分布规律和相互关系进行评价. 结果表明: ①就平均值而言, 最大的是 Zn 达 $112.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是 Cr, 平均值最小的 Cd 仅为 $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 除 Cd 和 Cr 之外, Cu、Zn、Pb 和 Ni 的变异系数相对较小, 在 24% ~ 31% 之间, 属于中度变异程度. Cd 和 Cr 的变异系数分别为 50.41% 和 41.92%, 空间分异明显, 说明其可能受到外界的影响更为显著; ②重金属 Cu、Cd、Cr、Zn、Pb 和 Ni 之间具有很强的线性关系, 存在显著的正相关性, 且 6 种重金属具有一定的同源特征, 有着共同的外源输入; ③研究区主要的污染元素为 Cd、Cr 和 Zn, 污染程度相对比较严重, 且范围广泛, 其中, Cd 的污染程度最为严重, 整体的污染水平为中度等级, 且在部分样点区的污染程度达至重度污染, Cr、Zn、Pb 的污染状况相对比较轻缓, 属于轻度污染等级, 且 Cu、Pb 和 Ni 的整体状况较好, 不存在生态风险; ④就整体而言, 宿鸭湖东北部污染程度较轻, 西南的污染程度相对比较严重, 呈现出明显的西南向东北递减的空间分布特征, 位于库区外围的西南方向, 各样点的各重金属含量均较高, 而外围的东北部, 是低含量重金属的聚集区, Cu、Cr、Zn、Ni 为无污染状态.

关键词: 宿鸭湖; 沉积物; 重金属; 相关性分析; 空间分布; 潜在生态风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2125-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610116

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

ZHANG Peng-yan^{1,2}, KANG Guo-hua¹, PANG Bo¹, GUO Yi¹, HE Jian-jian¹, QIN Ming-zhou^{1*}

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Collaborative Innovation Center of Three-aspect Coordination of Central Plain Economic Region, Zhengzhou 410001, China)

Abstract: In order to study the pollution status of heavy metals in sediments of Suya Lake, the concentrations of heavy metals Cu, Cd, Cr, Zn, Pb and Ni in sediments were measured at three locations in the center, middle and periphery of Suya Lake, the content characteristics and the pollution status of heavy metals in the study area were analyzed by the method of geoaccumulation index and potential ecological risk index, and the distribution and interrelation of heavy metals were evaluated by Kriging method and correlation analysis. The results showed that, on average, Zn was the highest, $112.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, followed by Cr, the smallest average of Cd was only $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. In addition to Cd and Cr, the coefficients of variation of Cu, Zn, Pb and Ni were relatively small, ranging from 24% to 31%, with moderate degree of variation. The coefficients of variation of Cd and Cr were 50.41% and 41.92%, respectively, and the spatial variation was obvious, which indicated that the variation of Cd and Cr was more significant than the others; ②The heavy metals Cu, Cd, Cr, Zn, Pb and Ni had a strong linear relationship, and there was a significant positive correlation, and six kinds of heavy metals had some homologous characteristics, with a common external input; ③The main pollution elements in the study area were Cd, Cr and Zn, the pollution degree was relatively serious, and the scope was extensive. Among them, the pollution degree of Cd was the most serious, the overall pollution level was moderate, and the pollution degree in some sample areas reached up to severe pollution, the pollution status of Cr, Zn and Pb was relatively mild, the pollution status of Cu, Pb and Ni was better, and there was no ecological risk; ④On the whole, the pollution level of the northeastern part of Suya Lake was relatively light, the degree of pollution in the southwest was relatively serious, showing a significant spatial distribution characteristics of decreasing from southwest to northeast, the contents of heavy metals in the samples were higher than those in the southwest of the reservoir, while the northeastern part of the periphery was the area with accumulation of low concentrations of heavy metals., and there was no pollution from Cu, Cr, Zn and Ni

Key words: Suya Lake; sediments; heavy metals; correlation analysis; spatial distribution; potential ecological risk

河流底沙沉积物是重金属等污染物的聚积场所^[1,2], 其作为水环境中重金属污染程度的指示剂^[3-5], 能够在时间和空间维度上反映沉积物中重金属的污染状况和分布情况^[6,7]. 近年来随着城市化和工业化的迅速发展, 人类各种生产和生活活动导致无机污染物和有机污染物混杂^[8], 使宿鸭湖的

收稿日期: 2016-10-18; 修订日期: 2016-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601175); 河南省哲学社会科学规划项目(2014CJ016); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(152300410067); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(16IRTSTHN012)

作者简介: 张鹏岩(1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源利用与环境保护, E-mail: pengyanzh@126.com

* 通信作者, E-mail: btweek@126.com

水体污染状况日益严重,库底沉积的重金属污染物逐渐显现.湖底的沉积物是水体的重要组成部分,汇集了各流域的物质,这些物质经多种途径进入水体之后,水体中的有毒有害物质最终沉降在沉积物中,一旦环境发生变化,可能产生潜在的生物毒性风险,对水体的生态环境和人类的健康构成威胁^[9].长时间积累在沉积物中的污染物浓度相对比较稳定,在水环境重金属污染评价中占据重要的位置^[10~13].由于重金属污染不易被降解,加之其持久性和高毒性以及对生态风险的诱导作用,受到了国内外学者的广泛关注^[14~19]. Wyzga 等^[20]对峡谷漫滩地形条件下不同水力特征对沉积物中重金属的分布影响进行了分析,结果表明各种重金属的浓度随着距离通道的间距的增加而逐渐增加,在洪泛区的部分,最大的重金属积累量的通道边缘附近可能由于河岸侵蚀在未来重新活化;Islam 等^[21]对河流 Korotoa 的地表水和沉积物中的重金属污染程度进行评估,结果表明污染负荷指数(PLI)值高于1,表明沉积物质量逐步恶化,重金属在 Korotoa 河的污染程度对生物群和河流附近的居民带来很严重的影响;宋静宜等^[22]对澜沧江干流及主要支流底沙沉积物中重金属污染状况进行了分析与评价,结果表明澜沧江自北向南各支流底沙沉积物重金属污染程度呈递减趋势,生态风险较低,汇入干流后并未对干流造成明显危害;周晓红等^[23]对金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险进行了评价,结果表明金山湖沉积物重金属的差异除了受到各样点沉积物环境背景值的影响外,还与各采样点周围人为活动、外源污水排放等有密切关系.这些研究探讨了研究区沉积物重金属的空间分布与污染特征,分析并评价了污染源及其风险危害,对于城市水生态系统的保护及区域经济发展具有重要的意义.但相关研究更多地关注于重金属污染物的空间分布特征及生态风险评价,研究地域更多地集中于天然湖泊、污灌区、矿区等,对于人工水库的研究相对比较少,且评价过程主要依赖于模型来分析重金属的空间分布与污染特征,缺乏元素相互之间作用及空间结构变异的研究.

宿鸭湖作为一座以防洪为主,并结合灌溉、养殖、发电等的综合性人工平原水库,对于其沉积物中重金属污染物的研究,不仅要涵盖重金属的空间分布特征以及潜在生态风险,同时需要对宿鸭湖所承载的其他功能的影响程度及规避方案进行探索.因此,本研究运用地积累指数和潜在生态风险指数

法,探索研究区重金属污染的影响因素与作用规律,同时结合 Pearson 相关系数和半方差函数来分析重金属各元素之间的相关关系与空间变异结构,并通过普通克里格法绘制各重金属空间分布格局,旨在为宿鸭湖生态安全及有序发展提供理论依据.

1 基本概况

宿鸭湖是目前亚洲面积最大的平原人工水库,建成于1958年,是全国第一批重点病险水库,也是一座以防洪为主,并与灌溉、养殖、发电等相结合的综合人工平原水库,同时也是当今中国面积最大、堤坝最长的水库,拥有“人造洞庭湖”的美誉.宿鸭湖水资源丰富,动植物种类多样,对于维护区域的生态平衡具有举足轻重的作用.

宿鸭湖位于河南省驻马店市汝南县罗店乡东2 km,北起玉皇庙,南至野猪岗,东临桂庄,西到别桥.宿鸭湖水控制流域面积约4 715 km²(其中包括板桥 762 km²,薄山 580 km²),库区面积 239 km²,大坝南北长 35.29 km,湖水面最宽处 15 km,坝顶高程达到 59.20 m,库容 8.2 × 10⁸ m³.宿鸭湖地处暖温带南段,属于北亚热带向暖温带过渡区域,气候温和,雨量充沛,多年平均降水量 962 mm,年平均径流量 12.92 × 10⁹ m³.

20世纪80年代,宿鸭湖水质较好,水量充沛,设计功能均能正常发挥;90年代以后,随着人口的增加和社会经济的快速发展,水库上游一些工矿企业排放的大量未经处理的工业废水及城镇生活用水的注入,致使水库地表水质恶化.库区现有排污企业 20 余家,包括造纸业、制药业、化工业、热电厂等,电力蒸汽生产、医疗及化工等行业排放的工业废弃物排放量为 15.97 × 10⁴ t·a⁻¹,生活污水排放量 1 362.88 × 10⁴ t·a⁻¹,再加上生活垃圾及农药、化肥等因素,导致水库污染加剧,其使用功能和生态功能受到严重威胁,湖区湿地水鸟和其他生物数量急剧减少.目前水库水质超过国家规定的五类水标准,地表水质恶化引起周围地下水污染,严重影响了水库效益的发挥和当地经济的发展.

2 材料与方法

2.1 样品的采集与处理

2.1.1 样点的布设与采集

本着均匀布点、污染处加密的原则对宿鸭湖整个库区进行布点采样,中心设置样点 9 个,中围设置样点 17 个,外围设置样点 39 个,共采集样品 65

个. 具体采样点位分布图见图 1.

使用彼得森采样器将每个样点处所采集的样品均匀混合, 去除石块和异物, 装入聚乙烯自封袋中密封, 将采取的样品编号登记后, 低温保存送达实验室进行处理分析.

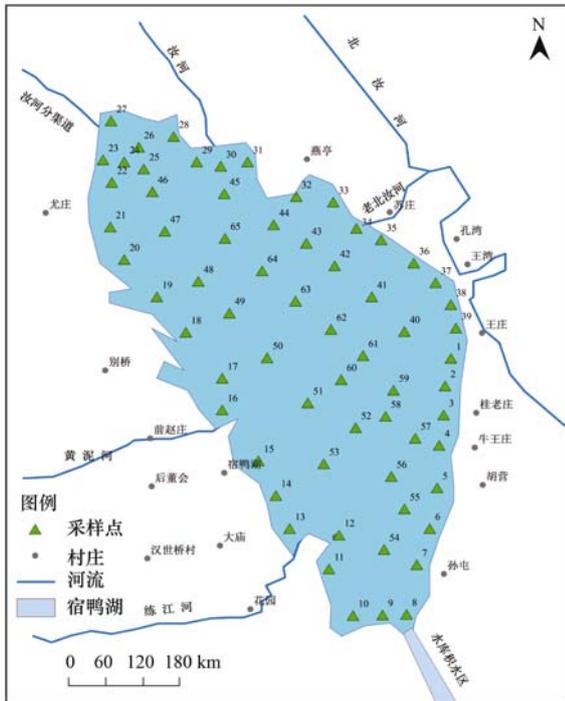


图 1 宿鸭湖沉积物样点分布示意

Fig. 1 Distribution map of sediments sampling points in Suyu Lake

2.1.2 样品的处理及测定

将采集的样本铺在吸水纸上使其自然风干, 风干后的样品用木棒碾碎, 然后用玛瑙研钵碾磨直至通过 $150\ \mu\text{m}$ 尼龙筛. 用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法 (USEPA Method. 3050B) 消煮后测定 Cu、Cd、Cr、Zn、Pb、Ni 浓度; 用石墨炉-原子吸收光谱法测定消煮液中的 Cd 含量; 用火焰-原子吸收光谱法测定 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的含量.

为确保分析结果的准确度和精密性, 在消煮或测定过程中, 采用相同的分析程序和试剂做两个程序空白. 参照相同程序分析水系沉积物成分分析标准物质 (GBW07307, 国家地质实验中心), 以实现分析方法的有效控制. 在分析过程中, 将各形态重金属含量之和与测定的总量结果进行对比, 对测定结果进行检验, 各重金属的平均相对误差均在方法允许的误差范围内.

实验过程中使用的试剂均为优级纯, 配制溶液使用的均为超纯水, 实验所用的玻璃器皿均经过 10% 硝酸溶液浸泡冲洗, 各元素的分析测定均重复

3 次, 取其平均值, 样品回收率在 93.58% ~ 110.98% 之间, 符合质量控制标准.

2.2 研究方法

采用地积累指数^[24]、潜在生态危害指数^[25]对宿鸭湖沉积物中 Cu、Cd、Cr、Zn、Pb、Ni 进行污染评价.

地积累指数法:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C^i/kB_i) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 表示为重金属 i 的地积累指数, C^i 是实测元素 i 在沉积物中的含量, k 是因成岩作用可能引起的背景值的变动所设定的常数, 一般取值为 $k = 1.5$, B_i 是沉积物中所测重金属的地球化学背景值.

潜在生态危害指数法:

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C^i/C_n^i \quad (3)$$

式中, RI 为综合潜在生态风险指数, E_r^i 表示为重金属 i 的单项潜在生态风险指数, T_r^i 是重金属 i 的毒性系数, C^i 是样品中重金属 i 的实测含量, C_n^i 是重金属 i 的参比值.

3 结果与讨论

3.1 重金属含量的描述性统计分析

根据表 1 的统计分析, 宿鸭湖沉积物中主要富集的重金属为 Cu、Cd、Cr、Zn、Pb 和 Ni. 就平均值而言, 平均值最大的是 Zn 达 $112.87\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是 Cr, 平均值最小的 Cd 仅为 $0.41\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zn 含量的最大值和最小值相差 7 倍之多, 各个样点的 Zn 含量状况并不一致. 其次含量相差较大的则为 Cr, 差距约为 6 倍, 含量差距最小的是 Pb, 差距大致为 2.8 倍. 由于样点分布的位置有中心、边缘和中围之分, 同种重金属的含量分布也存在较大的差异, 污染等级也不一致. 就整体而言, 除 Cd 的污染分布呈中心向边缘递减的状况, 其他重金属的分布状况均服从西南向东北递减的分布规律, 明显的分布特征与宿鸭湖库区周围工厂分布密度和社会基础设施完善程度相联系. 除 Cd 和 Cr 之外, Cu、Zn、Pb 和 Ni 的变异系数相对较小, 这表明宿鸭湖各样点的重金属污染程度比较相似. Pb 的变异系数最小, 湖区各个位置的受污染情况变化不大. Cd 和 Cr 的变异系数分别为 50.41% 和 41.92%, 空间分异明显, 说明其可能受到外界的影响更加显著. 除 Cd 之外, Cu、Cr、Zn、Pb 和 Ni 部分样点区的重金属含量超过了地球化学背景值, 且所有重金属的平

均含量值均超过了背景值,以背景值为基础,含量值超出的越多,说明当地重金属的污染状况越严重,受到人类活动的影响越明显。

沉积物中重金属元素不仅与岩石和矿物等沉积母质密切相关,还受到人类生产生活的直接影响,其浓度一方面取决于自然沉积物母质含量的高低,还受制于水体中输入物质数量的多寡^[13]。外部污染物质的来源主要有3个;其一是药物注入。Cd作为施用农药和化肥等农业活动的标识性元素^[26],在我国的利用率普遍比较低,大约70%流失于土壤、水体和空气中。此外,用来进行消毒和疾病防治的CuSO₄等有机铜化物随之进入水体,致使大量的Cu、Cr、Zn在经过一系列的物理化学作用之后,

形成沉积在水体中的各种形态的重金属物质;其二是气体散入。农药喷洒和化肥挥发等融入空气中的重金属元素;汽车尾气中携带的大量Pb、Cd和Cu,一部分沉降在路基附近,还有一部分扩散在空气中;轮胎和地面摩擦会产生Zn较高的颗粒物,而润滑油在高温条件下可与空气发生氧化反应生成有机化合物,腐蚀合金的金属部件,导致金属元素释放在空气中^[27-29];其三是外源输入。宿鸭湖的周边众多耕地环绕,农田排水成为了外部污染物进入库区的重要途径,沉降在路基附近的重金属元素也会随地表径流注入水体,加之汝河、黄泥河、练江河等与宿鸭湖相连接,外源物较易随河流进入,从而加重了库区污染物质的囤积数量。

表1 宿鸭湖沉积物各重金属含量

Table 1 Content of heavy metals in sediments of Suya Lake

元素	背景值 /mg·kg ⁻¹	平均数 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	最小值 /mg·kg ⁻¹	变异系数/%
Cu	21.4	29.99 ± 7.22	47.75	16.32	24.09
Cd	0.09	0.41 ± 0.21	0.98	0.17	50.41
Cr	53.6	78.47 ± 32.90	206.46	33.36	41.92
Zn	65.1	112.87 ± 35.86	197.89	26.91	31.77
Pb	14.4	27.29 ± 5.90	39.72	14.04	21.61
Ni	24.9	37.19 ± 10.72	69.90	19.24	28.82

3.2 重金属元素的相关性分析

相关性分析对重金属元素的来源识别具有重要意义,可以用来检验相关性显著的元素之间的近似性和来源差异,确定沉积物中重金属含量变化的控制因素^[30,31]。沉积物中的重金属元素由于其在一定区域内所具备的相对稳定性,可以通过研究沉积物中重金属元素之间的相关性来反映沉积物中重金属元素的来源是否相同,相关性越大来源越相似。Pearson 相关系数用以判定两个数据集是否在同一条线上,以此来衡量定距变量之间的线性关系^[32]。计算公式如下:

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (4)$$

当两个变量均为正态连续变量且呈线性关系时,以积差相关系数来表示两个变量之间的相关程度。相关系数的绝对值越接近1,相关性越强;反之,越接近0,相关程度越弱。运用SPSS 20对宿鸭湖中沉积物中重金属含量的原始数据进行Pearson相关性分析。根据相关性系数(R)和显著性检验结果(表2),除Cd和Cr之间没有相关性之外,Cu、

Cd、Cr、Zn、Pb和Ni彼此之间存在显著的正相关关系($P < 0.01$),这说明6种重金属元素之间具有较强的线性关系,同时意味着6种重金属元素之间具有一定的同源特征,很可能是同一外源输入。沉积物中的Cu、Cd、Cr、Zn、Pb和Ni含量受到岩石和矿物等沉积母质的影响,更主要是受人为因素的干扰。由于医药、机械、化工、电子、建材等支柱产业以及农、牧、旅游产业的迅速发展,工业废水、汽车尾气、有机肥和各种农药成为大部分重金属含量的共同输入外源,而Cd作为工业建设主要的排出物,对整个研究区的影响最为显著,污染程度最高,Cr、Zn、Pb的污染状况次之,而Cu、Ni的整体状况相对比较稳定,仍然存在风险。

3.3 重金属的空间变异结构分析

半方差函数是衡量空间过程自相关性的函数,用于研究在空间上分布的变量,即区域化变量,能够反映变量空间分布的结构性和随机性^[33]。计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 |N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数值, $N(h)$ 代表距离为 h

表 2 宿鸭湖沉积物中重金属含量之间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson correlation coefficient between heavy metal contents in sediments of Suyu Lake

	Cu	Cd	Cr	Zn	Pb	Ni
Cu	1					
Cd	0.560 **	1				
Cr	0.465 **	0.119	1			
Zn	0.789 **	0.583 **	0.408 **	1		
Pb	0.860 **	0.575 **	0.487 **	0.760 **	1	
Ni	0.902 **	0.365 **	0.551 **	0.728 **	0.874 **	1

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

的点对的数目, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为点在 x_i 和 $x_i + h$ 处的样本测量值. 半方差函数需要利用模型进行拟合, 常见的数学模型有球状模型、指数模型和高斯模型, 其中球状模型最为常用, 其表达式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_0 为块金常数, $C_0 + C$ 为基台值, C 为拱高, a 为变程. 块金系数, 即 $C_0/(C_0 + C)$, 能够反映区域化变量的空间相关程度, 当 $C_0/(C_0 + C) < 0.25$ 时, 变量以结构性变异为主, 变量具有强烈的自相关性; 当 $0.25 < C_0/(C_0 + C) < 0.75$ 时, 变量为中等程度的空间自相关性; 当 $C_0/(C_0 + C) > 0.75$ 时, 变量以随机性变异为主, 变量的空间自相关性微弱^[34].

本研究运用 SPSS 20 首先对各重金属含量进行对数转换, 然后采用 GS +9.0 进行半方差函数模型

计算, 并根据拟合结果(表 3)绘制了各种重金属元素的半方差函数图(图 2). 根据表 3 可知, 除了 Cr 外, 其他元素的 R^2 均在 0.9 以上, 且 RSS 较小, 说明模型拟合效果较好; 沉积物中各重金属的空间相关性依次排列为 $Cu > Ni > Cd > Zn > Pb > Cr$, Cu、Ni、Cd 和 Zn 的块金系数均小于 0.25, 以结构变异为主, 具有强烈的空间相关性, 表明变量受自然和区域因素的影响较大(母质、矿藏、区域环境等), 这与 Pearson 相关性分析结果较一致, Cu、Cd、Zn 和 Ni 具有一定的同源特征, 受到周边环境共同影响; Pb 和 Cr 块金系数介于 0.25 ~ 0.75, 表现出中等程度的空间相关性, 表明重金属的含量受到区域自然因素和人为因素的双重制约(交通运输、旅游活动、人为污染等). 结合图 3 可知, 各变量的变程范围为 6.58 ~ 41.45 km, 其中, Pb 的变程最大达 41.45 km, 说明重金属 Pb 在较大的空间尺度具有一致性, 而 Cr 的变程最小, 属于中等程度的空间自相关性, 主要受工厂、有机肥和各种农药的影响, 在较小的空间内存在相关性.

表 3 沉积物重金属半方差函数模型拟合结果

Table 3 Fitting results of semi-variance models of heavy metals in sediments

项目	理论模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金系数 [$C_0/(C_0 + C)$]	变程/km	决定系数 R^2	残差平方和 RSS
lgCu	Spherical model	0.003 3	0.024 1	0.136 9	41.43	0.953	1.57E -05
lgCd	Gaussian model	0.014 4	0.058 6	0.245 7	25.63	0.988	3.89E -05
lgCr	Exponential model	0.011 59	0.023 28	0.497 9	6.58	0.770	2.11E -05
lgZn	Gaussian model	0.011 8	0.047 4	0.248 9	22.28	0.968	7.52E -05
lgPb	Spherical model	0.003 83	0.014 46	0.264 9	41.45	0.959	7.22E -05
lgNi	Exponential model	0.005 48	0.024 46	0.224 0	18.65	0.916	2.98E -05

3.4 重金属含量的空间分布特征

普通克里格法(Ordinary Kriging)能够很好地表达土壤化学性质的差值精度以及反映区域土壤重金属的空间分布特征^[35,36]. 通过普通克里格法对宿鸭湖的评价结果进行可视化表现, 使其重金属污染情

况分析结果更加直观地呈现, 见图 3.

就整体而言, 宿鸭湖东北部污染程度较轻, 西南部的污染程度相对比较严重, 呈现出明显的西南向东北递减的空间分布特征. 这种规律性的分布趋势与其周围的区域环境和社会状态具有密切的

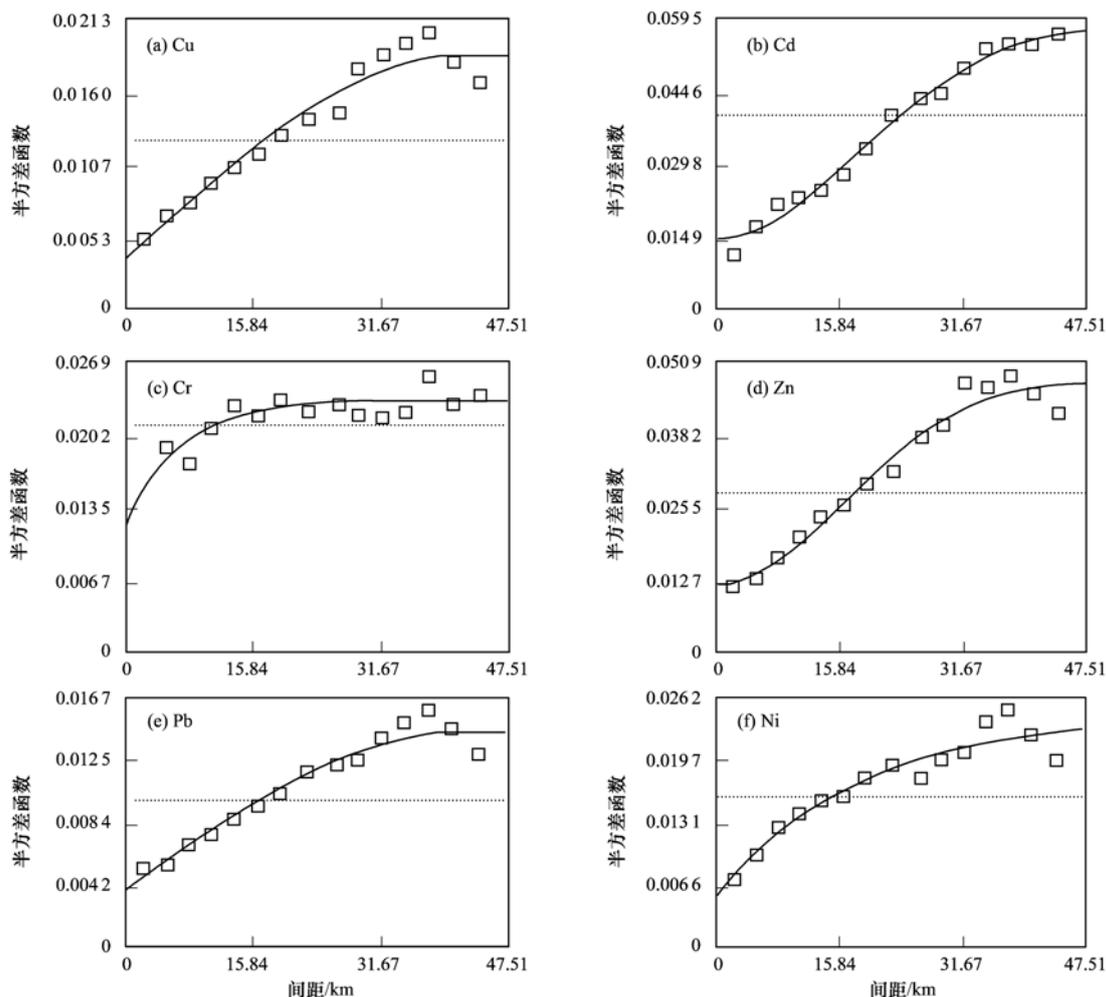


图 2 宿鸭湖沉积物中重金属元素半方差函数

Fig. 2 Semi-variograms of heavy metals in sediments of Suya Lake

联系。

整个库区 Cd 的金属含量在 $0.13 \sim 0.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 污染重心在湖中心以及南部和偏东南地区, 西北部和东北部的重金属含量分布相对较低, 该区域的 Cd 分布相对比较极端, 最高与最低含量值所占区域面积较大, 过渡区面积狭小, 呈现出狭细的带状围绕着污染重心分布。

Cr 和 Cd 的分布特征不太符合库区整体的分布趋势, 外部因素对其的影响可能更加直接, 表现出从西部向东北部呈弧状递减的分布规律, 最低值和最高值在 $55.11 \sim 101.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 区间内, 含量值的分布梯度比较明显, 各梯度含量值所占比重都比较均匀, 但最高值和最低值之间差距较大, 最高含量值约是最低含量值的两倍。

Cu 的分布特征遵循整体的分布特征, 由西南向东北递减, 含量的最大值和最小值分别为 $36.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $22.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 重金属的高含量区约占整个库区的 1/2, 高值区和低值区之间有一条西

北—东南走向的带状分布的过渡地带, 低值区和过渡区所占面积均较小, 而整个库区的南端 Cu 含量较高, 污染较重。

Ni 含量的分布特征表现出明显的西南—东北递减的分布规律, 金属含量值在 $27.31 \sim 46.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 最高值和最低值之间具有一定差距, 整个库区的 Ni 污染重心在西部地区呈西北—东南走向的带状分布, 含量低值区位于库区的最北段, 但面积有限, 整个区域的 Cu 污染状况并不乐观。

Pb 的含量分布也符合整体的分布特征, 最低值和最高值在 $21.55 \sim 33.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 最高值和最低值之间的差异相对比较小, 高含量和低含量均占地比较小, 共占据整个研究区约一半的面积, 中间值覆盖面积在湖心地带, 也占了整个区域面积的一半, 整个研究区 Pb 的污染状况不容乐观。

Zn 含量的最高值为 $145.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最低值为 $68.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高值约是最低值的两倍, 分布较不稳定, 空间差异性明显, 低含量区域面积所

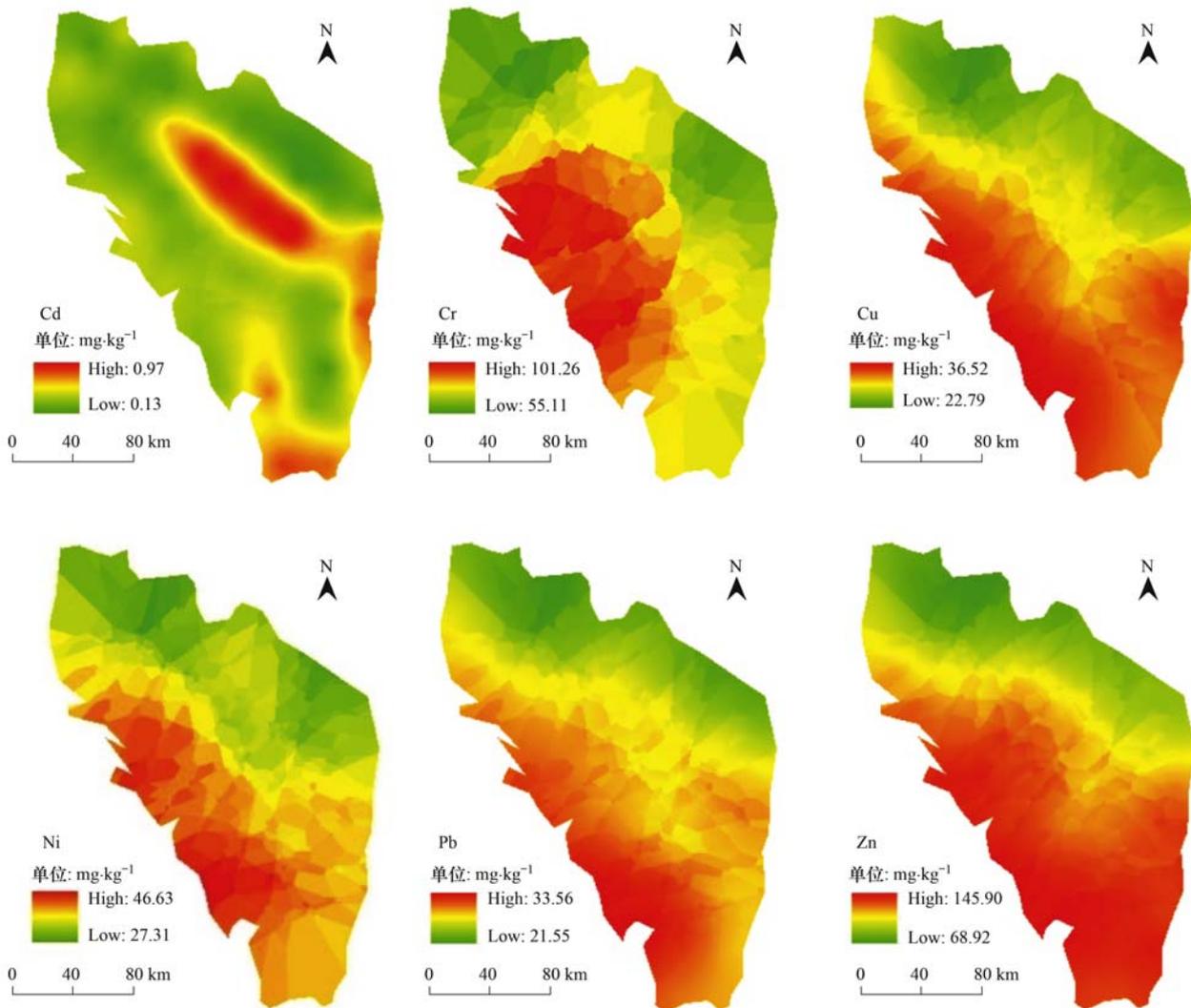


图3 宿鸭湖重金属含量分布

Fig. 3 Distribution map of heavy metals in the Suyu Lake

占整个库区比重较小,高含量面积比重较大,超过区域的1/2,整个中、南部地区均受到Zn的威胁,最高含量和最低含量均高于其他元素,污染情况较严重.

宿鸭湖沉积物中的主要重金属污染物为Cu、Cd、Cr、Zn、Pb、Ni,就整体而言,受到轻度污染等级,部分样点分布区的污染等级达到中度甚至重度污染,均无重度以上污染(表4).结合ArcGIS 10.1生成的重金属含量分布(图3),库区的西南方向,各样点的各重金属含量均较高,而库区的东北部,则是低含量重金属的聚集区.根据环境统计资料得知,练江河是驻马店市最大的纳污河,也是宿鸭湖最大的污染源,汇集了主要的工业废水(造纸、制药、化工、电镀、食品加工、纺织等),还接纳多数城市的生活用水.东、北部的三条河流注入,在一定程度上稀释了水体中重金属的浓度.除了外

物输入,湖底天然母质也是主要的影响因素,宿鸭湖底为第四系松散的沉积物,地层分布自下而上依次为灰色重粉质壤土、褐黄色粉质壤土、粉质黏土,粒径自南向北变细,北部结构紧密,质地均匀,南部结构相对松散,间隙较大,更易于重金属的沉积.在这些影响因素的综合作用下,导致宿鸭湖水库的重金属污染状况呈现西南向东北递减的分布规律.

3.5 重金属污染的潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法从沉积学的角度对沉积物中重金属污染情况进行评价,并将生物毒性系数与重金属的生态效应和环境效应相联系,具有元素丰富性、水体敏感性和毒性响应性等特征^[25,37].沉积物中重金属污染程度及潜在生态危害水平共有5个等级,每一等级均有明确的划分标准,见表5.

从单项重金属的潜在生态风险指数来评价(表

表 4 宿鸭湖各方位重金属 I_{geo} 及污染等级比重Table 4 The I_{geo} and pollution level proportion of heavy metals in all directions of Suyu Lake

位置	编号	元素	最大值	最小值	平均值	无污染/%	轻度污染/%	中度污染/%	重度污染/%
外围	1 ~ 39	Cu	0.573	-0.976	-0.090	29.23	30.77	0	0
		Cd	2.530	0.384	1.450	0	13.85	32.31	13.85
		Cr	0.740	-1.244	-0.240	41.54	18.46	0	0
		Zn	1.019	-1.860	0.110	24.62	33.85	1.54	0
		Pb	0.846	-0.621	0.309	7.69	52.31	0	0
		Ni	0.556	-0.957	-0.056	33.85	26.15	0	0
中围	40 ~ 51 53 ~ 57	Cu	0.085	-0.864	-0.355	23.08	3.08	0	0
		Cd	1.974	0.305	1.001	0	10.77	15.38	0
		Cr	1.156	-1.269	-0.153	13.85	10.77	1.54	0
		Zn	0.728	-0.758	-0.078	15.38	10.77	0	0
		Pb	0.879	-0.168	0.211	9.23	16.92	0	0
		Ni	0.424	-0.739	-0.246	18.46	7.69	0	0
中心	52、58 ~ 65	Cu	0.254	-0.305	0.016	7.69	6.15	0	0
		Cd	2.859	1.310	2.211	0	0	4.62	9.23
		Cr	1.081	-0.404	0.068	7.69	4.62	1.54	0
		Zn	0.894	-0.175	0.425	1.54	12.31	0	0
		Pb	0.841	0.081	0.463	0	13.85	0	0
		Ni	0.458	-0.447	0.055	4.62	9.23	0	0

表 5 重金属污染程度及潜在生态风险等级划分标准

Table 5 Pollution degree and criteria for classification of potential ecological risks of heavy metals

单项重金属潜在生态风险系数		综合潜在生态风险系数	
阈值区间	生态风险程度	阈值区间	生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻度污染	$RI < 150$	轻度污染
$40 \leq E_r^i < 80$	中度污染	$150 \leq RI < 300$	中度污染
$80 \leq E_r^i < 160$	重度污染	$300 \leq RI < 600$	重度污染
$160 \leq E_r^i < 320$	严重污染	$600 \leq RI < 1200$	严重污染
$E_r^i \geq 320$	极重污染	$RI > 1200$	极重污染

6), 各重金属的风险等级排序依次为 $Cd > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn$. Cd 的潜在生态风险等级最高, 这表明该区域内 Cd 污染程度也相对最严重, 这与地积累指数法分析结果一致, 说明宿鸭湖库区已经受到重金属 Cd 的严重威胁, 污染程度达到重度水平, Pb 的生态风险等级次之, 处于轻度风险状态, Zn 的生态风险指数最小, 但仍受到轻度的生态风险威胁. Pb、Ni、Cu、Cr、Zn 的潜在生态风险指数均较小, 与最高值 Cd 的指数相差数十乃至近百倍, 但依然存在轻度的生态污染. 医药、机械、化工、电子、建材等作为驻马店的支柱产业, 在近年迅速发展, 同时也推动着交通运输业的壮大, 工业废气、废水以及汽车尾气等导致 Cd、Ni、Pb 等以气体形

式随空气颗粒物散入水体, 或者以水体形式随地表径流或工业废水注入水库, 使这些重金属元素在湖中聚积沉淀. 而 Cu、Cr、Zn 污染的主要来源则是有机肥和各种农药, 库区周边耕地环绕, 且水产养殖产业兴盛, 导致重金属元素进入水体, 经过各种物理化学作用赋存在湖水沉积物中. 此外, 由于驻马店市的矿产资源丰富, 开采、加工、运输过程使重金属 Cr、Cd、Cu 等随降水或空气进入水体, 导致宿鸭湖的水环境质量下降, 面临生态风险.

从重金属的综合潜在生态风险指数分析(表 6), 综合生态风险指数的最高值和最低值差距悬殊, 相差近 5 倍, 平均值为 164.385, 属于中度污染. 湖心位置的指数明显高于外围和中围区域, 污染情况最为严重, 处于中度污染水平, 外围区的污染程度次之, 仍为中度污染, 中围区域的污染程度比较轻微. 这与地积累指数法计算结果整体比较一致, 但存在一定的差异, 两者的分析结果均表明外围和中心的污染程度比较高, 结合 ArcGIS 生成的重金属含量空间分布图, 各种重金属污染最为严重的区域在库区的西南方向, 并向东北方向呈递减的空间分布规律. 相关研究显示, 汽车尾气进入环境中的强度依次为 Cu、Pb、Co、Fe 和 Zn, 这些元素经自然或降水沉降于土壤或水体中^[38]. 宿鸭湖在

表 6 宿鸭湖沉积物中重金属单项及综合潜在生态风险指数

Table 6 Single and comprehensive potential ecological risk index of heavy metals in sediments of Suya Lake

类别	E_r^i						RI			
	Cu	Cd	Cr	Zn	Pb	Ni	全区	外围	中围	中心
最大值	11.156	326.538	6.684	3.040	13.793	11.023	356.089	286.709	212.592	356.089
最小值	3.812	55.595	1.245	0.413	4.876	3.864	73.756	75.532	73.756	139.389
平均值	6.998	136.015	2.816	1.722	9.498	7.336	164.385	162.976	119.470	255.331

驻马店市区的东面, 库区的西面有一条南北贯通的京港澳高速, 南边为东西连通的新阳高速, 并在库区的西南部形成交叉。便利的交通运输条件, 推动着当地工农业迅速发展, 同时也为重金属的富集提供了条件, 这些重金属元素以空气、雨水及地表径流等为载体进入湖中, 并经过一系列反应后, 以各种形态赋存于水体之中, 致使宿鸭湖西南方向的重金属富集情况和生态风险程度较库区的其他方位严重。

4 结论

(1) 从重金属的富集情况分析, Cd 的含量最高, 富集程度最明显, 受人为因素的干扰最为显著, 这与研究区周围机械厂、化工厂、电子厂等密切相关; Cr、Zn、Cu 也受到人类活动的一定制约, 可能与该区附近农业生产活动和水产养殖有关; Pb 和 Ni 主要污染来源是工业废水、废气。对于宿鸭湖沉积物中重金属的研究, 不仅要对外源的输入方式、输入强度、输入途径进行深入剖析, 还要研究其对水库经济、生态、社会等其他功能的影响程度。

(2) 根据相关系数和显著性检验结果得出, Cu、Cd、Cr、Zn、Pb 和 Ni 之间具有很强的线性关系, 存在显著的正相关性, 这说明 6 种重金属有共同的输入外源, 即工业废水、汽车尾气、有机肥及各种农药。本研究对 6 种重金属之间的相关性进行了评价, 还需进一步了解 Cu、Cd、Cr、Zn、Pb 和 Ni 之间的相关程度及作用特征, 以保证宿鸭湖的长远发展。

(3) 从重金属的空间分布特征来看, 宿鸭湖的西南地区各重金属的含量较高, 除了受到农业活动和水产养殖产业的影响, 还与其西南部便利的交通运输条件和靠近市区的地理优势有着密切的联系。本研究运用克里格最优插值法对重金属的空间分异进行了研究, 还应借助其他不同的空间模型和方法来更深入地探讨宿鸭湖沉积物中重金属污染物的空间分异的规律性和趋势。

(4) 根据数据模型的计算结果推论, 湖泊环境中的重金属元素除了一定数量的自然赋存之外, 最主要的来源为人类活动的外部作用力, 他们通过固体或气体状态, 以空气和水流为进入途径, 从而导致水环境发生变化。外部作用力的影响程度、干扰力度、作用频度决定着重金属在研究区的存量和浓度, 为确保宿鸭湖水库各种生产和生活功能, 应依据国家土壤质量环境标准对宿鸭湖的水质情况进行分析评价, 以达到经济和环境的各项标准。

参考文献:

- [1] Kaushik A, Kansal A, Santosh, *et al.* Heavy metal contamination of River Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(1): 265-270.
- [2] Salomons W, Stigliani W M. Biogeochemistry of pollutants in soils and sediments; risk assessment of delayed and non-linear responses [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- [3] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 490-496.
Zhang Z Y, Abuduwaili J, Jiang F Q. Sources, pollution status and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, Northwest China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 490-496.
- [4] Çevik F, Gökse M Z L, Deric O B, *et al.* An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **152**(1-4): 309-317.
- [5] Rowlett S M, Lovell D R. Lead, Zinc and Chromium in sediments around England and Wales [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, **28**(5): 324-329.
- [6] Michelutti N, Simonetti A, Briner J P, *et al.* Temporal trends of pollution Pb and other metals in east-central Baffin Island inferred from lake sediment geochemistry [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(21): 5653-5662.
- [7] Zhang W G, Feng H, Chang J N, *et al.* Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1533-1543.
- [8] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng

- city, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [9] Adams W J, Kimerle R A, Barnett Jr J W. Sediment quality and aquatic life assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(10): 1864-1875.
- [10] 关莹, 臧淑英, 肖海丰. 连环湖马圈泡沉积物重金属污染及潜在生态风险[J]. *地理科学*, 2014, **34**(4): 505-512.
Guan Y, Zang S Y, Xiao H F. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in core sediments from Majuan Lake in Lianhuan Lake, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(4): 505-512.
- [11] Ankley G T, Lodge K, Call D J, *et al.* Integrated assessment of contaminated sediments in the lower Fox River and Green Bay, Wisconsin[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1992, **23**(1): 46-63.
- [12] El Nemr A. Assessment of heavy metal pollution in surface muddy sediments of Lake Burullus, southeastern Mediterranean, Egypt[J]. *Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 2003, **7**(4): 67-90.
- [13] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估: 以永康市为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4486-4493.
Qi P, Yu S Q, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4486-4493.
- [14] Gao X L, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [15] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 945-951.
- [16] 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 等. 鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1759-1765.
Jian M F, Li L Y, Xu P F, *et al.* Spatiotemporal variation characteristics of heavy metals pollution in the water, soil and sediments environment of the Lean River-Poyang Lake wetland [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1759-1765.
- [17] 孙晋伟, 黄益宗, 石孟春, 等. 土壤重金属生物毒性研究进展[J]. *生态学报*, 2008, **28**(6): 2861-2869.
Sun J W, Huang Y Z, Shi M C, *et al.* The review of heavy metals biotoxicity in soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(6): 2861-2869.
- [18] 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.
- [19] Golia E E, Dimirkou A, Mitsios I K. Levels of heavy metals pollution in different types of soil of central Greece [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **80**(3): 206-210.
- [20] Wyzga B, Ciszewski D. Hydraulic controls on the entrapment of heavy metal-polluted sediments on a floodplain of variable width, the upper Vistula River, southern Poland [J]. *Geomorphology*, 2010, **117**(3-4): 272-286.
- [21] Islam M S, Ahmed M K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 282-291.
- [22] 宋静宜, 傅开道, 苏斌, 等. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. *地理学报*, 2013, **68**(3): 389-397.
Song J Y, Fu K D, Su B, *et al.* Spatial distribution of heavy metal concentrations and pollution assessment in the bed loads of the Lancang River system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(3): 389-397.
- [23] 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 等. 金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4127-4134.
Zhou X H, Liu L M, Chen X, *et al.* Heavy metals distribution characteristics and ecological risk evaluation in surface sediments of Dammed Jinshan Lake [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4127-4134.
- [24] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [26] Filzek P D, Spurgeon D J, Broll G, *et al.* Pedological characterisation of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works [J]. *Ecotoxicology*, 2004, **13**(8): 725-737.
- [27] Turer D G, Maynard B J. Heavy metal contamination in highway soils. Comparison of Corpus Christi, Texas and Cincinnati, Ohio shows organic matter is key to mobility [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2003, **4**(4): 235-245.
- [28] Wang X S, Qin Y, Chen Y K. Heavy metals in urban roadside soils, part I: effect of particle size fractions on heavy metals partitioning [J]. *Environmental Geology*, 2006, **50**(7): 1061-1066.
- [29] Sutherland R A, Tolosa C A. Variation in total and extractable elements with distance from roads in an urban watershed, Honolulu, Hawaii [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **127**(1-4): 315-338.
- [30] 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属空间分异规律[J]. *地理研究*, 2013, **32**(3): 421-430.
Zhang P Y, Qin M Z, Yan J H, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in the beach of Lower Yellow River: a case study in Kaifeng Section [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(3): 421-430.
- [31] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 387-397.
- [32] 陶澍. 应用数理统计方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [33] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [34] Goovaerts P. *Geostatistics for natural resources evaluation* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [35] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes M D C, *et al.* Analysis of

- spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce [J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, **24**(1): 1-10.
- [36] Yasrebi J, Saffari M, Fathi H, *et al.* Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters [J]. *Research Journal of Biological Sciences*, 2009, **4**(1): 93-102.
- [37] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [38] 杨景辉. 土壤污染与防治[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Yang J H. *Soil pollution and control* [M]. Beijing: Science Press, 1995.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper (II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)