

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭州地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪林, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴烨, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化

李冰^{1,2}, 王亚³, 郑钊², 许信², 辛英督², 黄进², 郭诗君¹, 毕升阁¹, 胡兰群², 陈兆进¹, 李玉英^{1*}

(1. 南阳师范学院农业工程学院, 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 河南省南水北调中线水源区生态安全重点实验室, 南阳 473061; 2. 南水北调中线渠首环境监测应急中心, 陶岔 474475; 3. 镇平县环境保护局, 镇平 474250)

摘要: 旨在探明中线工程调水前后(2011~2016年)丹江口水库表层沉积物中营养盐和重金属的时空分布特征和环境风险, 对丹江口水库 5 个典型生态位点表层沉积物中 pH 值、有机质(OM)、总磷(TP)、总氮(TN)及铬(Cr)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)和铅(Pb)这 6 种金属元素的含量及时空变化特征进行研究, 同时采用加拿大淡水水生环境沉积物质量指导值(CCME)为标准来进行潜在生态风险评价。结果表明, 丹江口水库表层沉积物中 OM、TP 和 TN 含量分别为 25.85、0.57 和 1.34 g·kg⁻¹; Cr、Mn、Cu、Zn、Cd 和 Pb 这 6 种重金属的含量分别为 57.96、521.78、13.91、195.74、0.37 和 12.92 mg·kg⁻¹, 6 种重金属的含量除 Zn 和 Cd 处于土壤环境质量二级标准, 其他重金属元素含量均低于土壤环境质量一级标准。TN、Mn 和 Zn 在调水后呈上升趋势, TP 及其余重金属元素在调水后呈下降趋势。除 pH 值外, 丹江口水库表层沉积物营养盐和所测重金属含量在生态空间上分布差异均达到极显著水平($P < 0.01$)。沉积物中 OM 除与 TN 和 Pb 呈负相关外, 与其他指标均呈正相关性。潜在生态风险评价结果显示, 丹江口水库表层沉积物中 Cd、Cu 和 Pb 均不会对生物产生不良效应; OM、TN、Cr 和 Zn 为低生态风险; TP 介于无生态风险与低生态风险之间; 但库心和黑鸡嘴点位 Cr、Zn 和 TN 在部分时间有较高生态风险, 需引起重视。

关键词: 丹江口水库; 表层沉积物; 营养盐; 重金属; 生态风险评估

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3591-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201801003

Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project

LI Bing^{1,2}, WANG Ya³, ZHENG Zhao², XU Xin², XIN Ying-du², HUANG Jin², GUO Shi-jun¹, BI Sheng-ge¹, HU Lan-qun², CHEN Zhao-jin¹, LI Yu-ying^{1*}

(1. Key Laboratory of Ecological Security for Water Source Region of Mid-route Project of South-North Water Diversion of Henan Province, Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Mid-route Project of South-North Water Diversion of Henan Province, College of Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China; 2. Emergency Centre for Environmental Monitoring of Mid-route Project of South-North Water Diversion, Taocha 474475, China; 3. Environmental Protection Bureau of Zhenping County, Zhenping 474250, China)

Abstract: Reservoir/lake sediments are potential pollutant acceptors and sources of pollution. The Danjiangkou Reservoir, as the largest drinking water source in China, is the source water area for the Mid-route Project of the South-North Water Diversion. To illustrate the temporal and spatial changes in the environmental risks of both nutrients and heavy metals in the surface sediments of Danjiangkou Reservoir, the levels of pH, OM, TP, TN, and six kinds of metal elements during the period 2011-2016 were measured at five ecological sites. Canadian freshwater sediment quality guidelines for aquatic environments (from the CCME) were used to assess the potential ecological risks. The results showed that the contents of OM, TP, and TN in the surface sediments were 25.85, 0.57, and 1.34 g·kg⁻¹, respectively, and those of Cr, Mn, Cu, Zn, Cd, and Pb were 57.96, 521.78, 13.91, 195.74, 0.37, and 12.92 mg·kg⁻¹, respectively. The contents of both Zn and Cd were under the corresponding II-level standards of soil environmental quality, but the contents of the other four heavy metals were lower than their corresponding I-level standards. After water diversion of the Mid-route Project, the OM, TN, Mn, and Zn contents increased, and the TP and other heavy metal contents displayed downward trends. Excluding the pH value, the distribution of measured nutrients and heavy metals in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir

收稿日期: 2018-01-01; 修订日期: 2018-02-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204, 2016YFC0402207); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108); 国家自然科学基金项目(U1704124, 231400367, 41601332); 河南省重点科技攻关项目(2016151, 17454, 18210231021); 河南省教育厅重点项目(16A210012)

作者简介: 李冰(1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学和环境监测, E-mail: benfei111@163.com

* 通信作者, E-mail: lyying200508@163.com

reached the extremely significant level ($P < 0.01$). OM in the sediments was negatively correlated with TN and Pb, but had positive correlations with the other indicators measured. The results from the potential ecological risk assessment showed that: ① Cd, Cu, and Pb had no harmful effects on organisms; ② OM had low ecological risk in most years; ③ the risk of TP was between zero and low ecological risk; and ④ Cr, Zn, and TN had low ecological risk in most cases. The K and H sites had higher ecological risk for Cr, Zn, and TN, thus attention should be paid to those cases. These results illustrate the effects of human activities on nutrients and heavy metals in surface sediments.

Key words: Danjiangkou Reservoir; surface sediment; nutrients; heavy metal; ecological risk assessment

沉积物是湖库生态系统的重要组成部分,是营养盐及其他污染物在水体中的重要归宿和主要储存场所,也是潜在的污染受体和污染源^[1]. 湖库沉积物中富含大量的有机质(organic matter, OM)、氮、磷等营养物质和重金属,在环境条件改变时,会大量释放到上覆水体中,造成水环境的二次污染,威胁水质安全^[2,3]. 众多学者对我国重要水域^[1,4~9]、湖库^[3,10~18]表层沉积物营养盐和重金属进行长期研究,发现不同水域沉积物中潜在污染因子和污染防治机制存在差异. 因此,研究沉积物中氮、磷等营养盐及重金属的含量及时空分布对水体富营养化和重金属污染防控具有重要意义.

南水北调中线工程是南水北调工程的重要组成部分,对缓解京津及华北地区水资源短缺,改善受水区生态环境,促进该地区经济和社会的可持续发展具有重要战略意义. 中线水源区丹江口水库位于汉江中上游,分布于河南省南阳市淅川县和湖北省丹江口市,水域横跨鄂、豫两省,由汉江库区和丹江库区组成. 丹江口水库作为南水北调中线工程水源地,水质状况不仅仅是水库水污染和生态环境的问题,更直接关系到调水工程受水区水质的安全^[19]. 目前,关于丹江口水库沉积物重金属的相关研究较多,已有学者对丹江口水库典型库湾和支流重金属污染状况^[20]、淹没区农田^[21]和迁建区土壤^[22]重金属含量、来源及分布进行了研究,还有学者对丹江口水库沉积物背景值^[18]和重金属的形态分布特征^[23]进行了研究,而对于库体沉积物中营养盐和重金属的生态风险综合性、连续性研究鲜见报道. 本研究于中线工程调水前和调水后(2011~2016年),开展了丹江口水库5个典型生态位点表层沉积物中有机质(OM)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)以及Cr、Mn、Cu、Zn、Cd和Pb的时空分布特征研究,并对其生态风险进行评价,通过掌握重大调水工程实施中人为调控水位及人类生态活动对大型湖库沉积物中营养盐和重金属的影响,以为南水北调中线工程后调水时代防控水体富营养化和重金属污染提供基础数据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

丹江口水库位于长江中游支流汉江的上游,秦岭余脉伏牛山南麓,豫、鄂、陕三省交界处,由汉库和丹库两部分组成,汉库接纳汉江及其支流的上游来水,丹库接纳丹江及老鹳河的来水. 库区属于典型的北亚热带季风气候,年均气温 $15 \sim 16^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 $1\,000\text{ mm}$. 水库横跨豫鄂两省,控制流域 9.52 万 km^2 . 水库始建于1958年,并于1973年竣工,为亚洲最大的人工湖. 2013年丹江口水库大坝加高至 176.6 m ,2014年汛后开始蓄水,调水,水位从 157 m 提高到 170 m ,蓄水量为 290.5 亿 m^3 ,水域面积扩大到 $1\,050\text{ km}^2$.

1.2 采样点设置和采样时间

根据丹江口水库库体和中线工程取水口(渠首)的生态位置特征,选取渠首(Q)、库心(K)、宋岗(S)、台子山(T)、黑鸡嘴(H)这5个典型生态位点作为中线水源区库区表层沉积物营养盐和重金属的长期监测位点,其中,宋岗位点为受人类活动影响较大的库湾,有旅游码头和轮渡码头;黑鸡嘴位点为灌河入丹江河后经过小三峡进入水库库体的位点,同时有旅游码头和轮渡码头;台子山位点为河南与湖北两省水面交界处,调水前丹库水经过台子山处进入汉库,而工程运行后,水流方面反之;库心位点为水库库心;渠首位点为水库水进入中线工程干渠前的点位. 调查位点布设见图1.

按照底泥采集标准分别于中线工程调水前2011年7月、2011年10月、2012年7月和2013年7月,以及调水后2015年1月、2015年5月和2016年7月共计7次进行表层沉积物样品的采集. 采用抓斗式底泥采样器采集湖泊表层沉积物,放于无菌的聚乙烯自封袋内. 所有样品采集后于冰盒保存,并迅速带回实验室处理,每个位点设3个重复.

1.3 分析项目与分析方法

将采集的底泥样品于阴凉处风干,剔除其中砾石、贝壳及动植物残体等杂质后,用玻璃棒压碎,经

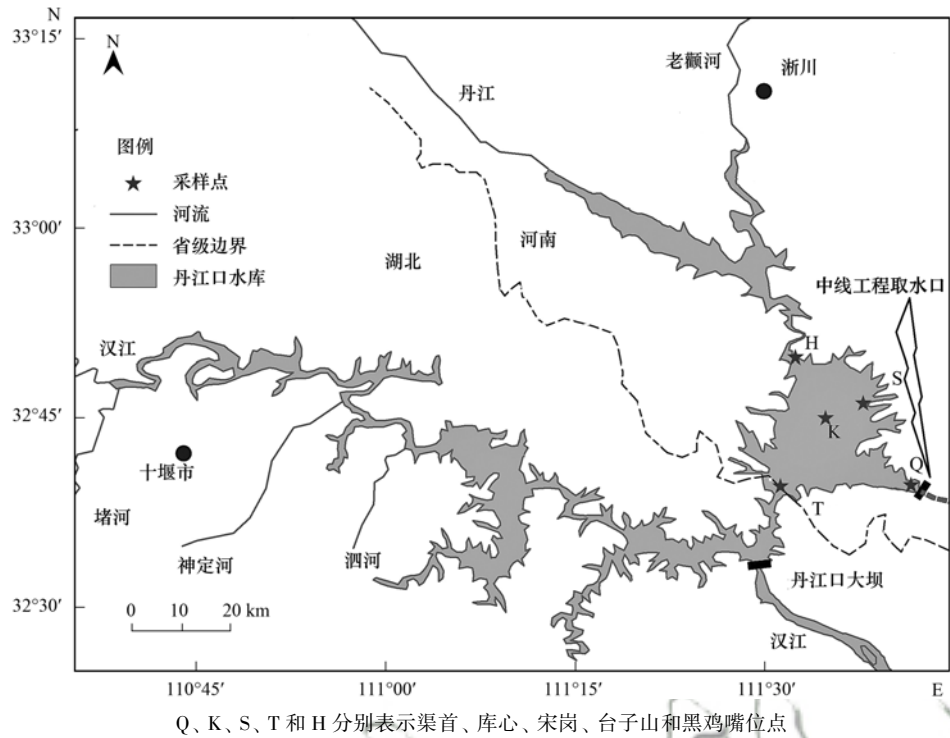


图 1 丹江口水库采样点位分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites in the Danjiangkou Reservoir

磨碎、混匀后全部过 100 目尼龙筛,贮存备用. 营养盐和重金属含量依据国家土壤环境质量标准 (GB 15618-1995)^[24] 测定,pH 值采用土壤浸提 pH 电极法; OM 采用重铬酸钾法; TN 采用凯氏定氮仪法; TP 采用钼锑抗分光光度法; 重金属分析选用硝酸-高氯酸-氢氟酸体系进行消解,用 PerkinElmer NexION 300 ICP-MS 测定 Cr、Cd、Mn、Cu、Zn 和 Pb 含量. 检测时设空白实验.

1.4 数据处理

1.4.1 生态风险评价

沉积物质量基准 (sediment quality guidelines, SQG) 已成为世界水环境污染研究与治理所关注的焦点之一,SQG 评价沉积物中污染物的毒性效应,可以反映污染沉积物的生态风险^[25]. 目前,国内尚

无系统针对湖库沉积物的质量基准,引入加拿大环境保护委员会为保护和管理淡水水生环境沉积物质量指导值为标准来说明沉积物中营养盐和重金属的污染状况,进行生态风险评价^[26] (表 1). 加拿大淡水水生环境沉积物质量指导值是利用生物效应数据库法制定的生物响应型水体沉积物质量基准,其中 ISQG (interim sediment quality guideline) 为最低效应水平,在此含量下,污染物很少会产生不良生物效应; PEL (probable effect level) 为可能效应水平,在此含量下,污染物可能会产生不良生物效应. 当污染物含量低于 ISQG 时,则认为其无生态风险;当污染物含量高于 PEL 时,则认为其具有较高生态风险;污染物含量在 ISQG 与 PEL 之间时,则认为其具有较低生态风险.

表 1 沉积物中营养盐和重金属生态风险评价标准^[25,26]

Table 1 Ecological risk assessment standards for nutrients and heavy metals in sediments

项目	OM/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹
ISQG	17.24	0.55	0.6	0.6	35.7	123	37.3	35	/
PEL	172.4	4.8	2.0	3.5	197	315	90	91.3	/

1.4.2 数据分析

所有数据统计、Spearman 秩相关分析和单因素方差分析均在 SPSS 21.0 软件中完成. 对调水前后丹江口水库表层沉积物中 pH 值、营养盐和重金属的年均浓度变化趋势用 Spearman 秩相关系数进行

分析. 取显著性水平 $\alpha = 0.05$,将秩相关系数 r_s 的绝对值与 Spearman 秩相关系数统计表中的临界值 W_p 进行比较. 如果 $|r_s| \geq W_p$,则表明变化趋势有显著意义,否则表明变化趋势无显著意义. 如果 r_s 为正值,则表明有上升趋势;如果 r_s 为负值,则表明

有下降趋势^[27];同时采用 Pearson 相关系数分析营养盐及重金属的相关性.

2 结果与讨论

2.1 丹江口水库表层沉积物营养盐及重金属含量分析

于 2011 ~ 2016 年间,对中线工程调水前后丹江口库区河南库区表层沉积物 pH 值、OM、TP、TN 及重金属含量进行了 7 次监测,监测结果见表 2. 从中可知,2011 ~ 2016 年丹江口水库表层沉积物 pH、OM、TP 和 TN 的变化范围分别为 6.94 ~ 7.65、16.05 ~ 34.39、0.33 ~ 0.73 和 0.72 ~ 1.91 g·kg⁻¹; 2011 ~ 2016 年丹江口水库表层沉积物重金属 Cr、Mn、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量变化范围分别为 32.54 ~ 91.65、443.96 ~ 675.61、8.38 ~ 20.66、103.09 ~ 370.05、0.23 ~ 0.56 和 9.1 ~ 23.02 mg·kg⁻¹. 丹江口水库表层沉积物中各重金属含量相差较大,其中 Mn 和 Zn 含量最高,分别为 521.78 mg·kg⁻¹ 和 195.74 mg·kg⁻¹,含量明显高于其他 5 种重金属元素;Cd 的含量最低,为 0.37 mg·kg⁻¹;Cr、Cu 和 Pb 的含量基本在一个数量级,分别为 55.96、13.91 和 12.92 mg·kg⁻¹. 丹江口水库表层沉积物中 pH 值、营养盐及重金属的变异系数均相对较小,分别为 1.98%、17.56%、21.67%、23.49%、23.08%、33.15%、23.96%、34.97%、25.95% 和 25.51%,反映了丹江口水库表层沉积物中 pH 值、营养盐及重金属含量的变化差异性相对较小.

相比于国内其他湖泊水库,丹江口水库沉积物的 OM 含量偏高,高于太湖^[13]、鄱阳湖^[14]、洞庭湖^[15]、密云水库^[16] 和官厅水库^[17];沉积物 TP 含量要高于太湖、鄱阳湖和洞庭湖,低于密云水库和

官厅水库;TN 含量则与鄱阳湖和洞庭湖差异不大,高于太湖和官厅水库,低于密云水库.对照土壤质量标准(GB 15618-1995),Cr、Cu 和 Pb 均在土壤环境质量一级标准以内,Zn 和 Cd 超过土壤环境质量一级标准,但在土壤环境质量二级标准以内(表 3).中线工程通水后,丹江口水库属于饮用水水源地,根据国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)的规定,执行一级标准,丹江口水库表层沉积物中 Cd 和 Zn 含量超出河南省土壤背景值^[28]、全国土壤背景值和全国水系沉积物背景值^[29],Cu、Cr、Pb 和 Mn 含量均低于河南省土壤背景值、全国土壤背景值和全国水系沉积物背景值.由此可见,丹江口水库表层沉积物中 Zn 和 Cd 存在一定程度的富集,与雷沛等^[20]在研究丹江口典型库湾及支流重金属时发现支流和库湾沉积物中 Zn 和 Cd 存在富集相一致.雷沛等^[20]认为水库沉积物 Cd 含量较高,可能与水库主要坐落于市郊及农村,农药化肥使用普遍有很大关系;张雷等^[22]认为 Cd 含量偏高可能与水库周边工业废水排放及移民搬迁遗留垃圾处理不当等造成的污染负荷输入有关,同时也与丹江河和灌河流域涵盖的农村范围较大、农药化肥使用现象较为普遍有关.胡国成等^[10]和罗燕等^[11]认为 Zn 的污染来源与库区游船、汽车尾气排放和水利工程防腐设施有关,同时农药化肥等农业活动亦会导致 Zn 含量增加.朱青青等^[30]收集已发表的不同流域沉积物重金属含量的文献,对长江、黄河、淮河、松花江、辽河、海河和珠江水系沉积物中重金属含量的数据进行统计,发现长江流域、黄河流域、珠江流域、海河流域和淮河流域主干流水系沉积物 Cd 含量均超过国家土壤环境质量一级标准,仅松花江流域和辽河流域主干流水系沉积物中 Cd 含量低于国家土壤环境质量一级标准,认为中国水系沉积物中重金属

表 2 2011 ~ 2016 年丹江口水库表层沉积物中 pH 值、营养盐和重金属监测结果

Table 2 Monitoring results of pH, nutrients, and heavy metals in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir during 2011-2016

项目	采样时间(年-月)							年均值	变异系数 /%
	2011-07	2011-10	2012-06	2013-07	2015-01	2015-05	2016-07		
pH 值	7.07 ~ 7.41	7.34 ~ 7.49	7.17 ~ 7.26	7.19 ~ 7.42	6.94 ~ 7.46	7.39 ~ 7.56	7.39 ~ 7.65	7.37	1.98
OM/g·kg ⁻¹	16.62 ~ 29.81	17.77 ~ 31.53	26.37 ~ 32.67	21.21 ~ 30.95	23.50 ~ 28.09	24.08 ~ 33.25	25.22 ~ 34.39	25.85	17.56
TP/g·kg ⁻¹	0.33 ~ 0.68	0.36 ~ 0.70	0.48 ~ 0.73	0.34 ~ 0.68	0.36 ~ 0.70	0.36 ~ 0.70	0.38 ~ 0.69	0.57	21.67
TN/g·kg ⁻¹	0.76 ~ 1.45	0.80 ~ 1.52	0.72 ~ 1.70	0.98 ~ 1.57	1.43 ~ 1.78	0.91 ~ 1.91	1.12 ~ 1.72	1.34	23.49
Cr/mg·kg ⁻¹	46.76 ~ 55.66	42.7 ~ 75.87	45.42 ~ 91.65	36.14 ~ 59.60	58.84 ~ 73.98	40.42 ~ 72.86	32.54 ~ 59.32	57.96	23.08
Mn/mg·kg ⁻¹	443.96 ~ 516.45	454.98 ~ 520.21	498.94 ~ 522.97	467.06 ~ 502.50	498.27 ~ 626.19	500.23 ~ 675.61	591.43 ~ 607.00	521.78	33.15
Cu/mg·kg ⁻¹	10.28 ~ 15.64	10.03 ~ 17.42	12.43 ~ 20.11	10.05 ~ 18.11	11.81 ~ 20.66	8.65 ~ 18.17	8.38 ~ 15.5	13.91	23.96
Zn/mg·kg ⁻¹	103.09 ~ 183.45	120.75 ~ 332.30	156.40 ~ 245.59	152.31 ~ 262.22	113.88 ~ 247.20	113.59 ~ 370.05	159.22 ~ 319.21	195.74	34.97
Cd/mg·kg ⁻¹	0.29 ~ 0.45	0.23 ~ 0.43	0.32 ~ 0.50	0.32 ~ 0.54	0.24 ~ 0.56	0.27 ~ 0.52	0.24 ~ 0.52	0.37	25.95
Pb/mg·kg ⁻¹	11.13 ~ 23.02	11.35 ~ 15.87	9.90 ~ 12.21	9.10 ~ 20.99	12.18 ~ 14.54	9.66 ~ 14.44	10.16 ~ 11.93	12.92	25.51

表 3 沉积物相关背景值^[24,28,29]
Table 3 Sediment-related background values

项目	OM/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹
河南省土壤背景值 ^[28]	12.9	/	/	0.064	20.0	62.8	63.3	21.8	560
全国土壤背景值 ^[29]	20.0	/	/	0.079	20.7	68.0	57.3	23.5	540
全国水系沉积物背景值 ^[29]	/	/	/	0.26	25.6	77.0	68.0	29.2	/
土壤环境质量一级标准 ^[24]	/	/	/	0.20	35	100	90	35	/

Cd、Pb、Cu 等的污染现状不容乐观,Cd 是潜在生态危害系数最大的重金属元素. 上述分析表明,对丹江口水库库区传统农业生产方式绿色转型和对库区综合生态管理的必要性.

2.2 丹江口水库表层沉积物中营养盐及重金属含量调水前后年际变化

2011~2016 年间丹江口水库库区表层沉积物中营养盐及重金属含量年际变化见图 2. 从中可知,OM、TP、TN 和 6 种重金属含量的变化在调水后有所不同. 其中,OM、TP 和 Cd 含量在 2012 年 6 月数值最大,TN 含量在 2015 年 1 月数值最大,Pb 含量在 2011 年 7 月数值为最大值,Mn 含量在 2016 年 7 月数值最大,Cr 和 Cu 含量在 2012 年 6 月和 2015 年 1 月数值较大,在 2016 年 7 月数值最小,Zn 含量在 2015 年 5 月数值最大;南水北调中线工程于 2013 年 10 月开始试蓄水,于 2014 年 9 月正式蓄水,12 月开始调水,OM、TN、Mn 和 Zn 在调水后呈上升趋势,TP 及其他重金属元素在调水后则呈下降趋势.

Spearman 秩相关系数分析显示,TN、Mn 和 Zn 的 r_s 分别为 0.893、0.893 和 0.857, $r_s > W_p = 0.714$ ($n = 7$), 2011~2016 年呈显著上升趋势;Pb 的 $r_s = -0.429$, 2011~2016 年呈显著下降趋势;pH、OM、TP、Cr、Cu 和 Cd 的 r_s 分别为 0.679、0.607、0.273、0.071、0.071 和 0.218, 2011~2016 年变化不显著. 为保证调水需要,丹江口大坝经过加高工程,蓄水位由原来的 157 m 提高到 170 m,新增淹没区 302.5 km²,其中农田面积近 26 万亩,水库新增淹没区农田营养盐及重金属物质的释放对库区表层沉积物的营养盐及重金属含量变化产生了重要影响,蓄水同时导致库容大幅增加,流速降低,各项水文要素均发生了很大变化,而这些水文要素的变化也导致了表层沉积物营养盐及重金属含量的变化. 侯立军等^[31]认为在缺氧条件下,大量的含氮物质会从沉积物中释放出来. 丹江口水库自蓄水、调水后,大量淹没区农田中含氮物质释放出来,通过扩散作用进入上覆水体中,随着水位下降及水文条件的稳定,

上覆水体中的含氮物质又重新进入表层沉积物中,进而导致了丹江口水库表层沉积物中的 TN 含量在调水后出现明显的升高.

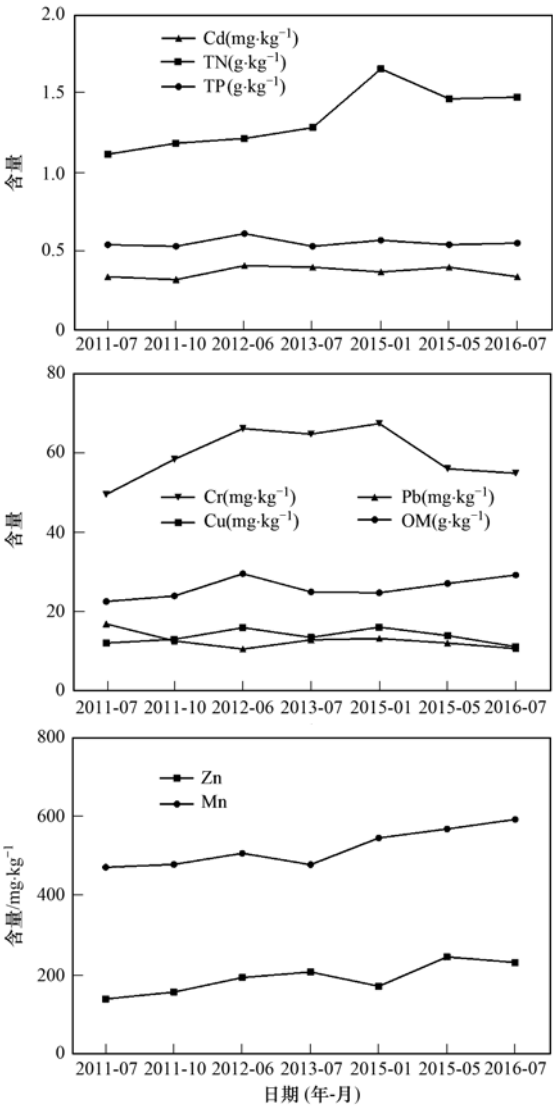
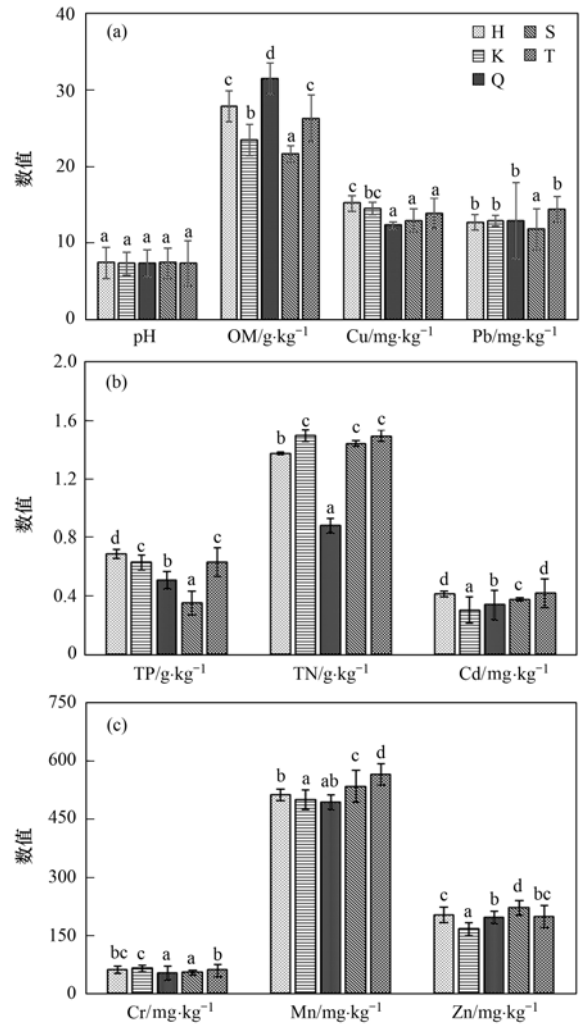


图 2 丹江口水库表层沉积物中营养盐及重金属平均含量的年际变化

Fig. 2 Annual variations of average contents of nutrients and heavy metals in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir

2.3 丹江口水库表层沉积物中营养盐及重金属含量空间变化

如图 3 所示,从生态环境位置分析,营养盐和



图中数值为年算术平均值,误差线值为标准误;每个指标中不同小写字母表示在 $P < 0.01$ 水平下差异极显著,相同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异不显著;H、K、Q、S和T分别表示黑鸡嘴、库心、渠首、宋岗和台子山点位

图3 丹江口水库表层沉积物中pH、营养盐和重金属含量

Fig. 3 Contents of pH, nutrients and heavy metals in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir

重金属的地理位置分布略有不同. 从中可知,除 pH 值外,丹江口水库表层沉积物营养盐和所测重金属含量在这 5 个生态位点间差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$). pH 值、TP 和 Cu 最大值出现在黑鸡嘴点位,OM 最大值出现在渠首点位,TN 最大值出现在渠首和台子山点位;Cr 最大值出现在库心点位,Zn 最大值出现在宋岗点位,Pb、Mn 和 Cd 含量最高点出现在台子山点位. 以超过土壤环境质量一级标准^[24]的 Zn 和 Cd 为例,库心、台子山和宋岗点位 Zn 和 Cd 含量略高于渠首点位和库心点位,原因在于黑鸡嘴点位为丹江河和老鹤河交汇后入库处,且有码头;宋岗点位位于河南库区最大的宋岗码头库湾,这两个点位受人为活动影响较大;渠首点位为南水北调中线取水口,库心点位为河南区域丹库库心,受人为活动干扰较小. 由于调查点位相对较少,整个库区平面分布趋势不明显. 研究结果说明人类活动和河流流域对水库沉积物的影响,进而说明人类活动会影响到水质保护.

2.4 丹江口水库表层沉积物营养盐与重金属间的相关性分析

丹江口水库表层沉积物理化性质及重金属间的相关分析结果如表 4 所示. 从中可知,pH 值与 OM、TN、Mn 和 Zn 呈正相关性,其中与 Mn 的相关性达显著水平;pH 值与 TP、Cr、Cu、Cd 和 Pb 呈负相关性. OM 与 TP、Cr、Mn、Cu、Zn 和 Cd 呈正相关性,说明 OM 与 TP 及所测定的重金属在沉积物活动中存在密切关系,OM 与 Zn 的相关性较为显著;OM 与 TN 和 Pb 呈负相关性,这可能是由 OM 与 TN 的沉积过程不同所导致. Mn 与 Zn 和 Cd 呈一定的正相关性,Mn 与 Cr 和 Pb 呈负相关性. Zn 与 Cd 之间呈极显著性正相关关系,

表 4 丹江口水库表层沉积物中营养盐及重金属的 Pearson 相关性¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficient of nutrients and heavy metals in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir

	pH	OM	TP	TN	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
pH	1									
OM	0.125	1								
TP	-0.086	0.325	1							
TN	0.116	-0.169	0.204	1						
Cr	-0.303	0.064	0.346 *	0.201	1					
Mn	0.488 **	0.227	0.007	0.544 **	-0.212	1				
Cu	-0.247	0.092	0.264	0.214	0.589 **	-0.131	1			
Zn	0.255	0.350 *	-0.084	0.327	0.154	0.280	0.214	1		
Cd	-0.020	0.196	0.123	0.234	0.328	0.047	0.387 *	0.740 **	1	
Pb	-0.254	-0.120	0.238	-0.063	0.084	-0.274	0.117	-0.020	0.265	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ (双尾检验)

Cu 与 Cr 之间呈极显著性正相关关系, Cu 与 Cd 之间呈显著性正相关关系, 说明这4种金属迁移过程具有相似的规律, 这也说明了它们可能具有一定的同源性。Pb 与 Mn 呈负相关性, 与其他各元素之间的相关性均不显著。

2.5 沉积物中营养盐和重金属的生态风险

根据加拿大淡水水生环境沉积物质量指导值(表1), 由图4可知, 所设的5个采样点位表层沉积物中 Cd、Pb 和 Cu 含量均低于 ISQG 值, 表明 Cd、Pb 和 Cu 均无生态风险, 不会产生不良生物效应;

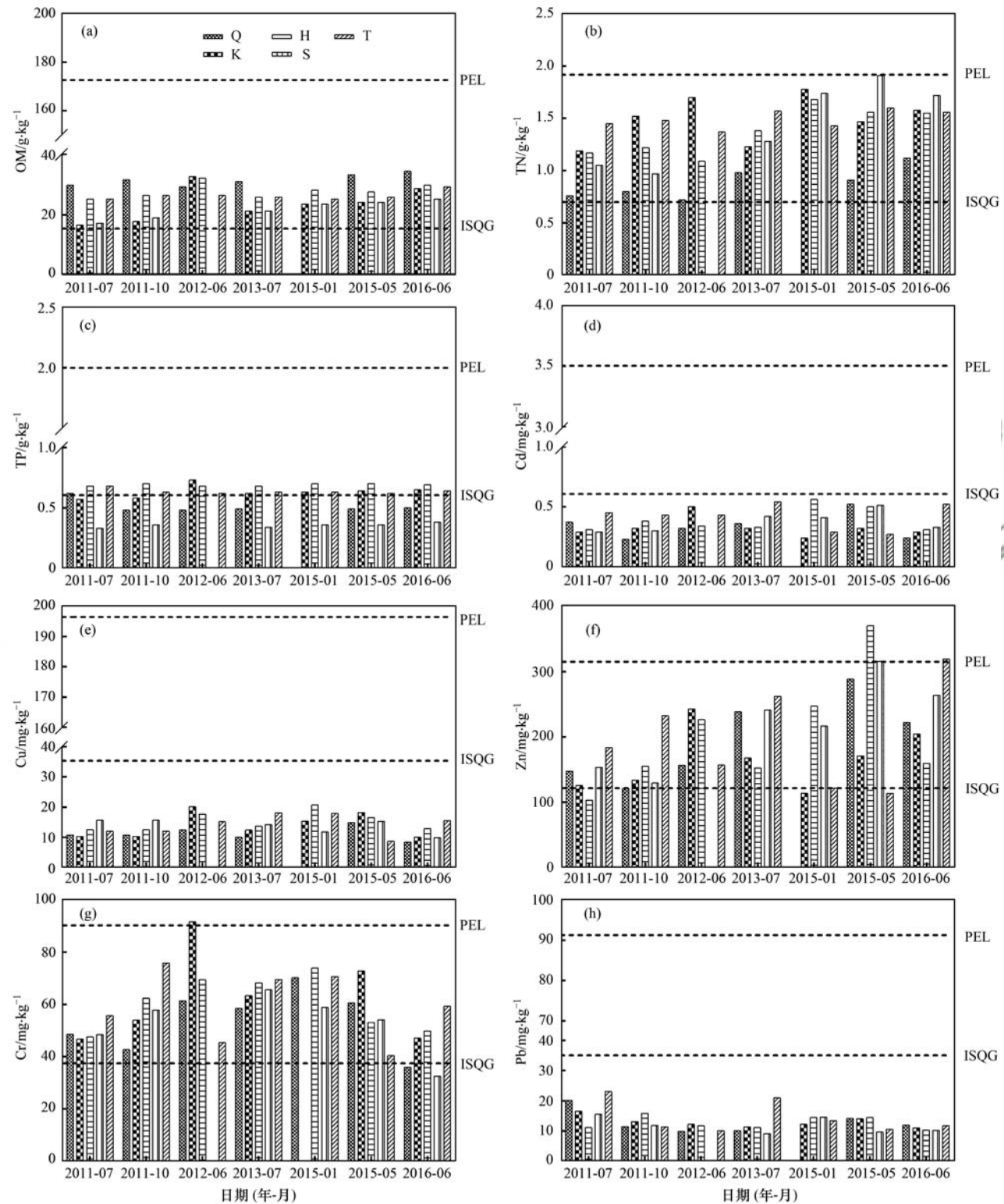


图4 丹江口水库表层沉积物中营养盐和重金属含量及生态风险评价

Fig. 4 Contents and ecological risk assessments of nutrients and heavy metals in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir

这 5 个采样点位表层沉积物中 TN 含量均高于 ISQG 值,但低于 PEL 值,表明 TN 具有较低生态风险;各点位 OM 含量除 2011 年 7 月库心和宋岗点位低于 ISQG 值外,其他点位各年份均略高于 ISQG 值,具有较低生态风险;渠首和宋岗点位 TP 含量在各年份均低于 ISQG 值,无生态风险,其他点位 TP 含量介于 ISQG 和 PEL 之间,略高于 ISQG 数值,具有较低生态风险;Cr 含量除 2016 年 7 月部分渠首和宋岗点位外,其余各点位均高于 ISQG 值,其中 2012 年 6 月库心点位 Cr 含量高于 PEL 数值,具有较高生态风险,其他年份均介于 ISQG 和 PEL 值之间;2015 年 5 月黑鸡嘴点位 Zn 含量高于 PEL 值,具有较高生态风险,其他年份各点位均介于 ISQG 和 PEL 值之间。对比相关研究,Cd 的生态风险评价与赵丽等^[18]对丹江口水库表层沉积物进行的潜在生态风险评价得出了不同的结论,原因在于:一方面,加拿大淡水沉积物基准有其应用范围和局限性^[26],地域及生物种类的差异会导致不同的评价结果,迫切需建立我国的淡水沉积物环境质量基准来进行更为科学的评价;另一方面,瑞典学者 Hakanson 的潜在生态风险评价方法具有不足之处^[32]。刘成等^[5]认为需要对底泥污染物污染程度(C_d)、潜在生态风险参数(E_r)和生态分享指数(RI)值的分级标准进行调整后开展评价,以便能更真实地反映该水库的重金属污染程度和生态风险。刘志杰等^[4]认为重金属元素,如 Zn 和 Cr 等具有亲颗粒性,容易被细颗粒悬浮物迁移,进入沉积物中矿化埋藏使他们毒性降低,从而生态风险程度也降低,但丹江口水库表层沉积物中 Zn 和 Cr 的生态风险仍需引起重视。

3 结论

(1) 中线工程通水后,丹江口水库库体表层沉积物中 OM、TN、Mn 和 Zn 呈上升趋势,TP 及其他重金属元素呈下降趋势。

(2) 丹江口水库表层沉积物中重金属含量相差较大,Zn 和 Cd 存在富集现象,其他指标在土壤环境质量一级标准以内。

(3) 丹江口水库表层沉积物中营养盐和重金属含量在不同水域间差异达到极显著水平,受人为活动影响较大。

(4) 沉积物中 OM 除与 TN 和 Pb 呈负相关外,均呈正相关性。

(5) 潜在生态风险评价结果显示,丹江口水库表层沉积物中 Cd、Cu 和 Pb 均不会对生物产生不良

效应;OM、TN、Cr 和 Zn 为低生态风险;TP 介于无生态风险与低生态风险之间。

致谢:2011~2012 年沉积物中营养盐指标由长江水利委员会长江水资源保护科学研究所尹炜研究员课题组帮助测定,尹行、杨秀华、凡盼盼、王晨溪、张斐洋和朱静亚等在采样和实验方面给予了帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2005.
Zhang M. The mechanisms of eutrophication and heavy metal pollution in shallow lakes along the Yangze River[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [2] Ting D S, Appan A. General characteristics and fractions of phosphorus in aquatic sediments of two tropical reservoirs[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(7-8): 53-59.
- [3] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 393-398.
Lu S Y, Xu M S, Jin X C, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of lake Changshouhu in Chongqing, China[J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 393-398.
- [4] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1182-1188.
Liu Z J, Li P Y, Zhang X L, et al. Regional distribution and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments from coastal wetlands of the Yellow River delta[J]. Environmental Science, 2012, 33(4): 1182-1188.
- [5] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33-37.
Liu C, Wang Z Y, He Y, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay[J]. Research of Environmental Sciences, 2002, 15(5): 33-37.
- [6] 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 等. 黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4501-4512.
Tang Y, Sun Y Y, Shi X Y, et al. Distribution characteristics of chromophoric dissolved organic matter and nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in autumn[J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4501-4512.
- [7] 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 等. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5020-5031.
Zhuo H H, Qiu G S, Zhai W Y, et al. Evaluation of temporal and spatial variation characteristics of nutrients in surface sediment in the Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5020-5031.
- [8] 张明, 鲍征宇, 陈国光, 等. 华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4513-4524.
Zhang M, Bao Z Y, Chen G G, et al. Characteristics and risks of heavy metals content in surface sediment of Tidal Flat areas in Eastern China[J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4513-4524.

- [9] 张晓晶, 李畅游, 贾克力, 等. 乌梁素海表层沉积物重金属与营养元素含量的统计分析[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(9): 1955-1960.
Zhang X J, Li C Y, Jia K L, *et al.* Statistical analysis between heavy metals and nutrient elements in surface sediments of Wuliangsu Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(9): 1955-1960.
- [10] 胡国成, 许振成, 彭晓武, 等. 广东长潭水库表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(6): 1166-1171.
Hu G C, Xu Z C, Peng X W, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment from Changtan Reservoir, Guangdong Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(6): 1166-1171.
- [11] 罗燕, 秦延文, 张雷, 等. 大伙房水库表层沉积物重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 987-995.
Luo Y, Qin Y W, Zhang L, *et al.* Analysis and assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Dahuofang reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(5): 987-995.
- [12] 张杰, 陈熙, 刘倩纯, 等. 鄱阳湖主要入湖口重金属的分布及潜在风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(1): 95-100.
Zhang J, Chen X, Liu Q C, *et al.* Distribution and potential risk assessment of heavy metals in the main estuaries of lake Poyang's tributaries [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(1): 95-100.
- [13] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰. 太湖重金属和营养盐污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 649-657.
Yuan H Z, Shen J, Liu E F. Assessment and characterization of heavy metals and nutrients in sediments from Taihu lake [J]. Environmental Science, 2011, **32**(3): 649-657.
- [14] 王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. 环境工程技术学报, 2012, **2**(4): 23-28.
Wang S R, Ni D, Jiao L X, *et al.* Space-time variety of organic matter and nutrient in surface sediments from Poyang Lake [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, **2**(1): 23-28.
- [15] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. 水生生态学杂志, 2015, **36**(2): 25-31.
Zhang G G. Characterization and ecological risk assessment of nutrients and heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2015, **36**(2): 25-31.
- [16] 徐清, 刘晓端, 王辉锋, 等. 密云水库沉积物内源磷负荷的研究[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, **35**(S1): 281-287.
Xu Q, Liu X D, Wang H F, *et al.* Study on the endogenous phosphorus load of sediments in Miyun Reservoir [J]. Science in China Series D Earth Sciences, 2005, **48**(S2): 333-340.
- [17] 苏德纯, 胡育峰, 宋崇渭, 等. 官厅水库坝前疏浚底泥的理化特征和土地利用研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1319-1323.
Su D C, Hu Y F, Song C W, *et al.* Physicochemical properties of guanting reservoir sediment and its land application [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1319-1323.
- [18] 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 等. 丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2113-2120.
Zhao L, Wang W W, Jiang X, *et al.* Determination of background value and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2113-2120.
- [19] 谭香, 夏小铃, 程晓莉, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2875-2882.
Tan X, Xia X L, Cheng X L, *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 2875-2882.
- [20] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型库湾及支流沉积物重金属污染分析及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(1): 110-117.
Lei P, Zhang H, Shan B Q. Analysis of heavy metals pollution and ecological risk assessment in the sediments from the representative river mouths and tributaries of the Danjiangkou Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, **22**(1): 110-117.
- [21] 韩培培, 谢俭, 王剑, 等. 丹江口水库新增淹没区农田土壤重金属源解析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2437-2443.
Han P P, Xie J, Wang J, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil from new submerged area in Danjiangkou Reservoir [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2437-2443.
- [22] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 108-115.
Zhang L, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil of relocation areas from the Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 108-115.
- [23] 李佳璐, 姜霞, 王书航, 等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1207-1217.
Li J L, Jiang X, Wang S H, *et al.* Heavy metal in sediment of Danjiangkou Reservoir chemical speciation and mobility [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1207-1217.
- [24] GB 15618-1995 土壤环境质量标准[S].
- [25] Chapman P M, Mann G S. Sediment quality values (SQVs) and ecological risk assessment (ERA) [J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, **38**(5): 339-344.
- [26] Canadian freshwater sediment quality guidelines of aquatic environment value (CCME). Sediment quality guidelines for the protection of aquatic life [S]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007.
- [27] 刘秀花, 胡安焱. 汉江丹江口水库水质变化趋势研究[J]. 人民长江, 2008, **39**(15): 36-38.
Liu X H, Hu A Y. Research on water quality change of Danjiangkou Reservoir on the Hanjiang River [J]. Yangtze River, 2008, **39**(15): 36-38.
- [28] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. 河南农业, 1998, (10): 29.

- [29] 鄯明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [30] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 305-313.
Zhu Q Q, Wang Z L. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China[J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 305-313.
- [31] 侯立军, 刘敏, 许世远. 环境因素对苏州河市区段底泥内源磷释放的影响[J]. 上海环境科学, 2003, 22(4): 258-260.
Hou L J, Liu M, Xu S Y. Effect of environmental factors on phosphorus release from sediments in urban reaches of suzhou creek[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(4): 258-260.
- [32] Hakanon L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017年10月31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公布了2016年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次10 024,影响因子1.878,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.



CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorus Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)