

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目 次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清 (2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧 (2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌 (2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩 (2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)
信息 (2646, 2656, 2857)	

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征

毛雪静^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 李楠^{1,2}, 徐金兰^{1,2}, 苏露^{1,2}, 吕晓龙^{1,2}, 邓立凡^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 为探究分层型水源水库沉积物中磷的来源与分布特征, 以西安金盆水库为对象, 针对2017年3~11月金盆水库水体、沉降颗粒及沉积物柱状样品总磷(TP)含量及形态分布特征进行研究。结果表明, 金盆水库主库区表层沉积物总磷含量及形态分布受水体颗粒磷(PP)沉降作用明显, 相关系数 $r^2 = 0.8775$; 同时表层沉积物总磷含量还受到沉积物内部生物地球化学的共同作用。6~8月金盆水库水体藻类剧烈繁殖演替, 繁殖过程中大量失去活性、死亡的藻类不断向底部水体沉积, 形成以藻类等颗粒磷为主导的内源污染, 沉降颗粒总磷含量达 $(753.51 \pm 17.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表层沉积物总磷含量随之增加, 以铁铝结合态非活性磷(NaOH-nrP)为主; 9~11月进入汛期, 径流水体携带大量泥沙等负荷较大的污染物汇入水库, 使得水体颗粒磷浓度相应增大, 然而由于单位质量泥沙中总磷含量占比较小, 导致径流过程中表层沉积物总磷含量逐渐降低, 泥沙径流过程中颗粒磷以无机态的钙磷(Ca-P)和残渣态磷(rest-P)为主, 二者约占沉积物总磷(TP)55.8%~66.2%, 受颗粒沉降影响相对较大。活性磷(SRP)、铁锰螯合态磷(BD-P)和铁铝结合态活性磷(NaOH-srP)这3种形态磷较活跃, 在环境条件的变化(主要是氧化还原条件)下发生一系列迁移转化, 受沉积物内部生物地球化学过程作用明显。

关键词: 金盆水库; 沉积物; 磷形态; 化学连续提取; 沉降速率

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2738-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810220

Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir

MAO Xue-jing^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, LI Nan^{1,2}, XU Jin-lan^{1,2}, SU Lu^{1,2}, LÜ Xiao-long^{1,2}, DENG Li-fan^{1,2}

(1. Shanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to explore the sources and distribution of phosphorus in sediments of a stratified water source reservoir, the total phosphorus (TP) content and distribution of phosphorus fractions in sedimentation particles and sediments of the Jinpen Reservoir of Xi'an were analyzed from March to November in 2017. The results showed that the TP content in the surface sediments of the Jinpen Reservoir was obviously affected by the deposition of particulate phosphorus (PP), and the correlation coefficient was 0.8775. Besides, this TP pool was also affected by the biogeochemistry of sediments. From June to August, algae in the Jinpen Reservoir propagated intensely, and a large number of dead algae were deposited on the bottom of the water body, which resulted in a type of endogenous pollution dominated by algae. The concentration of PP reached $(753.51 \pm 17.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the content of TP increased, with NaOH-nrP as the main component. During the flood season of the Jinpen Reservoir from September to November, the runoff water carried a large amount of sediments with large pollutant loads, which resulted in increases of the concentration of PP in the water body. However, the TP content in the sediment per unit mass was relatively small. As a result, the TP content of surface sediments decreased, with inorganic Ca-P and rest-P as the main forms, which accounted for 55.8%-66.2% of the TP in sediment, and were influenced by particle sedimentation. The SRP, BD-P, and NaOH-srP, the most active fractions, underwent a series of transport and transformation processes under the changing environmental conditions (mainly redox conditions), and these forms were obviously affected by the biochemical processes in sediments and minimally affected by the sedimentation processes of the reservoir.

Key words: Jinpen Reservoir; sediments; phosphorus forms; chemical sequential extraction; sedimentation rate

环境水体中总磷浓度是限制水体富营养化的主要因素^[1~3]。一方面, 径流汇入、面源污染等带来的“外源性磷”进入水环境, 导致水体受到污染; 另一方面, 沉积物内贮藏的“内源性磷”在环境条件影响下释放进入上覆水体, 导致湖库水体富营养化^[4, 5]。目前国内外对水源水库外源污染控制已取得一定成效, 但内源污染控制问题尚未解决^[6, 7]。沉积物是水环境中各营养物质的重要源汇, 研究磷在沉积物中的生物地球化学循环过程具有非常重要

的意义^[8]。

沉积物的主要成分是泥沙底质, 包括土壤、页岩、砂砾, 大量污染物通过沉积作用在沉积物中不断积累^[9], 磷在水库中的沉积过程主要分为入库径流携带的颗粒态磷沿程快速沉降、水体中溶解态磷

收稿日期: 2018-10-27; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378)

作者简介: 毛雪静(1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为水处理与微污染控制, E-mail: mao_xuejing@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

与金属元素的协同沉淀、水体藻类或其他微生物群落吸附的磷以碎屑形式沉积等^[9, 10]。目前国内外已经有一些关于外源磷沉积的研究报告,方芳等^[11]对三峡小江回水区磷赋存形态进行跟踪观测分析,发现该区域磷形态以吸附泥沙颗粒表面的颗粒态磷为主,并在降雨、径流的作用下进入水体导致总磷含量增加。林国恩等^[9]采用 SMT 法对流溪河水库不同地区收集的沉降颗粒磷形态进行分析,发现入库河流区磷浓度比较高,主要依靠外源输入磷沉降;主库区磷浓度稍低于入库河流区,可能是较强的内源生物沉降造成。沉积物不仅是污染物的汇,同时也作为污染物的源参与整个水体的生物地球化学循环过程^[7]。研究磷在沉积物中的赋存形态对于沉积物中内源磷的迁移转化机制至关重要。Wang 等^[12]采用连续分级提取方法研究了贵州红枫湖沉积物磷的赋存形态,发现了沉积物磷形态的变化容易受到环境因素的影响。Shinohara 等^[13]研究了日本 Kasumigaura 湖沉积物及间隙水中磷的形态分布特征,发现了有机质的矿化作用以及酶活性对沉积物中有机磷的吸附释放有一定的影响。

近年来,针对沉积物磷的吸附释放与迁移转化规律国内外已有很多研究,但并未综合考虑降雨径流污染负荷沉积和沉积物内源磷迁移释放的共同作用影响。本文以西安金盆水库典型温带峡谷型水库为研究对象,结合水库不同时期水体、沉降颗粒总磷含量及形态变化,对表层沉积物的季节性变化、柱状沉积物内部形态迁移转化过程进行分析,通过探明水库沉积物磷形态迁移转化过程,明确水质污染的潜在风险,并指明有效的控制方向,以期为实现水资源可持续利用提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

金盆水库位于陕西省西安市周至县境内(34°02′~34°03′N, 108°12′~108°11′E),是西安市黑河引水系统主要水源地。水库坝高 130 m,总库容 2 亿 m³,平均水深 70~100 m,属于峡谷型深水水库,夏季形成稳定的热分层。该水库目前水质状况良好,水体 TP 浓度为 0.007~0.040 mg·L⁻¹,整体处于较低水平。流域出露地层主要以前震旦系宽坪群大镇沟组变质岩与第四系松散堆积层为主,钙质石英岩分布广泛。河流上游沿线多森林覆盖,水库径流量较大,氮磷等污染物长期富集沉积于库底,沉积颗粒中污染物含量不断增加。库区流域降雨集中在 5~10 月,9~10 月为主汛期,近 60%的

全年降雨量集中于此阶段,时有暴雨出现^[14]。暴雨过程中入库径流会携带大量泥沙等高负荷污染物,破坏水库热分层结构,影响水质分布。

同时,为应对水库夏季分层期底部水体溶解氧的耗竭及沉积物内源污染物的释放,采用扬水曝气系统在水库原位进行人工强制混合充氧,8 台扬水曝气系统均匀分布于主库区(图 1),每年 9 月启动运行 1~2 个月,待水体完全混合充氧后,关闭系统,实现人工强制混合与水体冬季自然混合衔接,抑制沉积物内源污染释放。

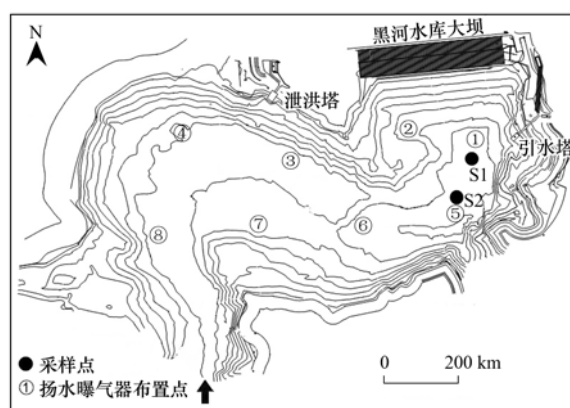


图 1 金盆水库主库区采样点及扬水曝气器布置点示意

Fig. 1 Sampling sites and layout of water-lifting aerators in the Jinpen Reservoir

1.2 采样点的选择

根据金盆水库地形及径流潜入特点,选取主库区 S1 和 S2 为采样点,其中 S1 位于引水塔取水口前以西 100 m 处,该点在水库分层期底部溶解氧消耗较快,并对饮用水供水水质产生较大影响。同时选取 S1 以南 100 m 位置的 S2 作为平行样(图 1)。

1.3 样品采集

(1)水样 2017 年 1 月 1 日起,每周用直立式有机玻璃采样器沿垂向进行水样采集和监测,采集间隔为:表层 0.5 m 至底部每隔 10 m 采取一个样品,为研究藻类生长内源磷沉降及沉积物内源磷释放过程,分别于表层水体 3~5 m 处(叶绿素最大值区域)及沉积物界面以上 0.5 m 处增设采样点进行监测,采集好的水样放入 4℃ 冰箱保存,于 24 h 内完成水质检测。

(2)沉积物样品 从 2017 年 3 月起,每隔 2~3 个月在主库区采集表层 30 cm 柱状沉积物,用于探究磷形态的季节性变化。样品由柱状采泥器采集。采集的样品立即运回实验室以 1 cm 为尺度进行分割,样品装至培养皿内于 -20℃ 冷冻后,利用真空冷冻干燥机(FD-1D-50)进行冷冻干燥,干燥后的样品用研钵研磨、过筛至 200 目以下,装入封口袋

中备用. 其中表层沉积物采用 0~1 cm 的沉积物样品进行研究.

(3) 沉降颗粒收集 沉积物上 0.5 m 处设置捕捉点, 将特制 PVC 沉降颗粒收集器(含支架)垂直放置于沉积物界面处, 进行沉降颗粒收集, 收集时间为 (30 ± 2) d, 于 2017 年 3 月起每月采集沉降颗粒进行分析.

1.4 分析方法

水中总磷采用钼-锑-抗分光光度法(GB 11893-89)测得, 水体藻密度分布采用血球计数板的镜检法检测.

沉积物中各形态的磷含量的测定采用化学连续提取法^[15], 每个样品采用 3 个平行. 将沉积物中的磷分为活性磷(SRP)、铁锰螯合态磷(BD-P)、铁铝结合态磷(NaOH-P)、钙磷(Ca-P)、残渣态磷(rest-P), 具体分级提取分析测试步骤如下: ①称取 1 g 沉积物样品, 加入 50 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4Cl , 振荡 0.5 h 后离心($5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 20 min), 取上清液利用钼-锑-抗分光光度法测定磷含量, 得到 SRP; ②残渣加入 50 mL $0.11 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NaHCO}_3/0.11 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, 即 BD 溶液, 振荡 1 h 后离心, 提取 BD-P; ③残渣加入 50 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH , 振荡 16 h 后离心, 提取 NaOH-srP; ④将上步骤中的提取液利用过硫酸钾消解后测定 NaOH-TP, 该值与 NaOH-srP 的差值即为 NaOH-nrP; ⑤残渣加入 50 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl , 振荡 16 h 后离心, 提取 Ca-P; ⑥残渣加入 50 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH , 121°C 消煮 2 h, 取上清液, 提取 rest-P.

沉积物总磷采用 SMT 法^[16, 17]测得, 沉积物中的 TOC 采用 EAS VarioTOC 测得.

1.5 沉降速率计算

根据单位时间沉降颗粒沉积厚度或单位时间单位面积沉降颗粒质量进行估算.

$$S_d = \frac{D}{t} \quad (1)$$

式中, S_d 为沉积速率(以沉降颗粒沉积厚度计)($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); D 为沉降颗粒沉积厚度, 一定时间内沉降颗粒收集器采集的沉降颗粒厚度(mm); t 为对应时间, 取 30 d.

$$S_m = \frac{m}{a \cdot t} \quad (2)$$

式中, S_m 为沉积速率(以沉降颗粒质量计) $[\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$; m 为沉降颗粒质量, 一定时间内沉降颗粒收集器采集的沉降颗粒干重(g); t 为对应时间, 取 30 d; a 为沉降颗粒收集器的截面面积, 为 0.0177 m^2 .

2 结果与讨论

2.1 金盆水库水体总磷年平均变化

金盆水库水体颗粒态总磷年平均变化如图 2 所示, 水体上、中和底部总磷分别为 $0.009 \sim 0.022$ 、 $0.010 \sim 0.026$ 和 $0.011 \sim 0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均值分别为 0.014 、 0.015 和 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2). 总体上金盆水库总磷浓度处于较低水平. 水体分层期, 上部水体总磷在 3 月最低, 为 $0.009 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着 3~8 月金盆水库气温逐渐升高, 日照增长, 水体藻类及浮游动植物开始剧烈繁殖(图 3), 表层水体总磷以颗粒态有机磷为主, 随藻类生殖活动不断持续增长, 在 6~7 月总磷达到最大值 $0.022 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时随着死亡藻类、有机碎屑不断向底部水体沉降, 底部水体总磷浓度迅速增大, 在 8 月达到最大值 $0.040 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进一步影响表层沉积物有机磷的分布, 从图 4 和图 5 可看出, 3~8 月随着藻类持续死亡沉降, 水体中颗粒磷含量不断增加, 表层沉积物磷含量(主要为有机磷)也相应增加.

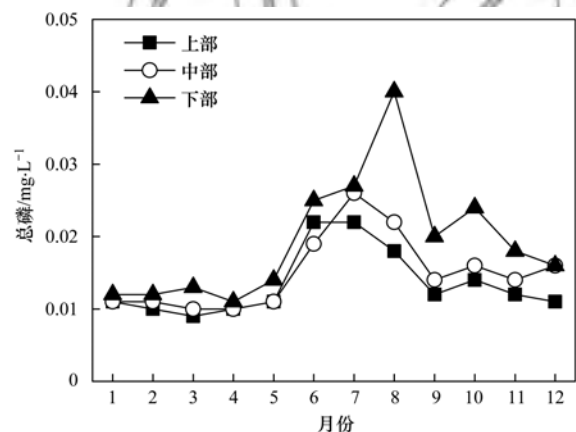


图 2 金盆水库总磷含量的时空分布

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of the TP content in the water column of the Jinpen Reservoir

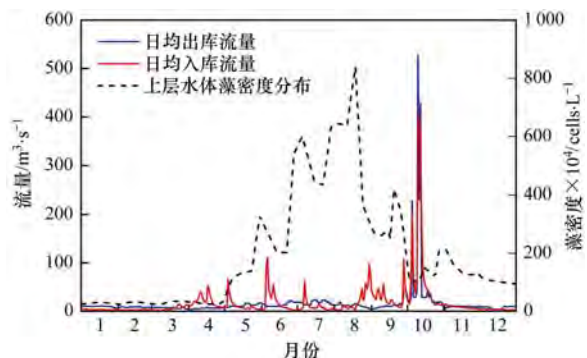


图 3 金盆水库主库区入库流量及水体藻密度分布情况

Fig. 3 Temporal distribution of the inflow and algae density in the water column of the Jinpen Reservoir

9~11 月金盆水库进入汛期(图 3), 由于径流携带的大量泥沙等高负荷污染物使潜流水体密度增

加,形成泥沙异重流,导致中下部水体浊度、总磷含量和沉降颗粒不断增加,其中下部水体总磷含量在10月出现极大值 $0.042\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.但由于泥沙中磷的质量占比较小,尽管颗粒沉积速率在10月达到最大值 $62.2963\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ (图4),表层沉积物中总磷含量依然相对较低.可见2017年全年水体中颗粒态总磷的含量在藻类沉积与径流汇入的共同影响下整体呈先增加后减小的趋势,并进一步影响了表层沉积物磷的分布规律.

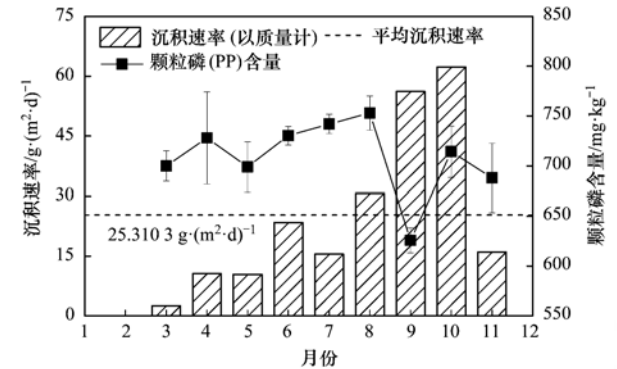


图4 2017年金盆水库的沉积速率的时间变化
Fig. 4 Temporal variation of the sedimentation rate in the Jinpen Reservoir

2.2 金盆水库沉积物磷的分布规律

图5为金盆水库不同时间表层沉积物总磷含量及形态变化,从中可看出,全年表层沉积物总磷含量先增加后减小,受沉降颗粒总磷沉积作用影响显著.其中3~8月,表层沉积物总磷含量由 $(725.15 \pm 16.75)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 逐渐增加至 $(797.02 \pm 27.90)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,8~11月表层沉积物总磷含量逐渐降低至 $(733.01 \pm 25.66)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,整体呈现先增大后减小到趋势(图5).同期颗粒磷的含量变化也呈现出相同的规律,3~8月逐渐增大,8~12月逐渐减小(图4).表明金盆水库主库区表层沉积物总磷含量与水体沉降颗粒磷含量变化较为一致,相关系数 $r^2=0.8775$ (图6).

水体沉降颗粒磷来源一般包括内源藻类的死亡沉降及外源径流的汇入^[9]两种形式.3~8月为藻类繁殖期,上层水体藻密度持续增加,8月达到全年最高值 $840 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3).随着死亡藻类的不断沉降,大量有机磷(以NaOH-nrP计)沉积到表层沉积物中,使得颗粒磷沉积量较小,但颗粒磷的含量持续增加,至8月底达到 $(753.51 \pm 17.11)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图4),表层沉积物总磷含量随之在8月达到最大 $(797.02 \pm 15.90)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图5).9~10月为金盆水库汛期,入库流量较大,暴雨径流携带大量的泥沙汇入主库区,沉降颗粒的沉积速率在10月达到最大值 $62.2963\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ (图4).由于外

源径流多携带大颗粒的泥沙,污染物负荷较大,导致水体颗粒磷浓度增大,然而由于单位质量泥沙中总磷含量占比较小,因此导致9、10月径流过程中表层沉积物总磷(TP)含量反而逐渐降低.

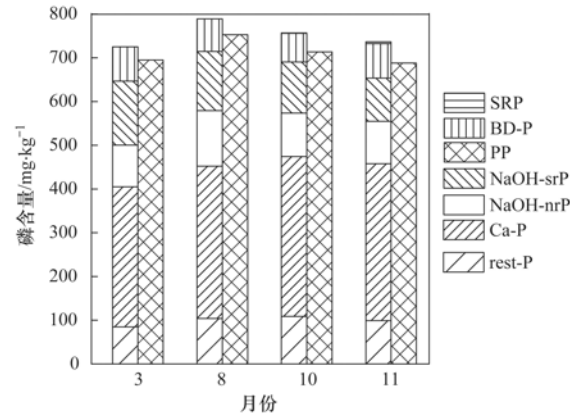


图5 金盆水库表层沉积物磷形态时间分布
Fig. 5 Temporal distribution of different forms of phosphorus in the surface sediments of the Jinpen Reservoir

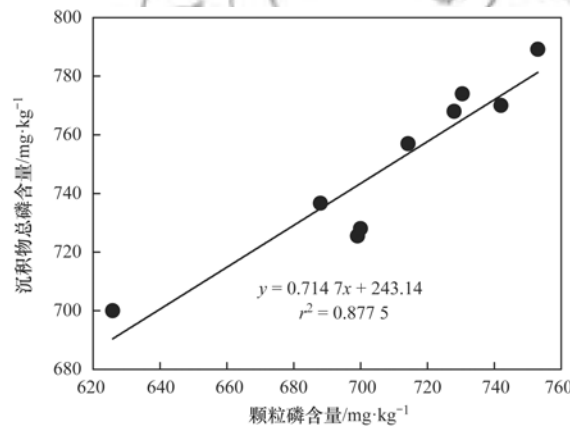


图6 表层沉积物总磷与颗粒磷含量的相关关系
Fig. 6 Correlation between the TP and PP content in surface sediments

2.2.1 沉降颗粒与表层沉积物磷的形态分布特征

针对8月(水体藻密度最大)和10月(入库流量最大)两个重要时期,对金盆水库表层沉积物及沉降颗粒中磷形态进行分析,采用化学连续提取法,将沉积物中的磷分为SRP、BD-P、NaOH-srP、NaOH-nrP、Ca-P和rest-P.其中NaOH-nrP为微生物磷,主要由碎屑中的有机磷组成^[15],其含量的变化与藻类的死亡沉降关系较大.从图7可以看出,8月随着藻类生殖活动不断延续,死亡藻类不断向底部水体沉降,沉降颗粒中携带大量有机磷(以NaOH-nrP计),表层沉积物中NaOH-nrP含量随之在8月达到最大,占总磷的16.08%,10月随着暴雨径流的汇入,水体藻密度降至 $97 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3),颗粒态磷主要以无机磷为主,沉降颗粒中NaOH-nrP的占比从23.01%降至14.71%,表层沉

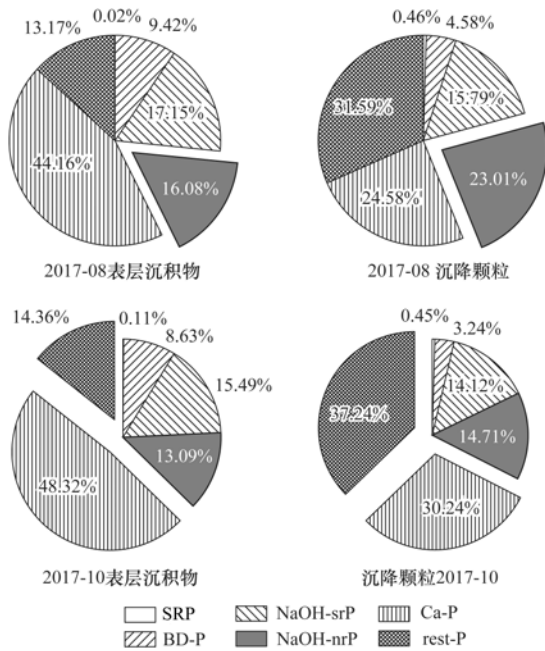


图7 金盆水库表层沉积物和沉降颗粒磷形态分布

Fig. 7 Distribution of phosphorus forms in the surface sediments and sedimentation particles of the Jinpen Reservoir

积物中有机磷占比也随之减少。

Ca-P 和 rest-P 是沉积物磷的主要赋存形态,二者之和约占表层沉积物总磷的 57.33% ~ 62.68%,属于沉积物中较为稳定的磷形态。10 月随着金盆水库汛期的来临,径流水体携带大量泥沙,水体中颗粒磷以无机态的 Ca-P 和 rest-P 为主,从图 7 可看出,8 ~ 10 月,随着入库流量的增加,沉降颗粒中无机磷的占比从 56.17% 增至 67.48%,表层沉积物中的 Ca-P 和 rest-P 也随之增加。

活性磷 (SRP) 属于弱吸附态磷^[15], 容易释放

到孔隙水中,但 SRP 在沉积物中含量非常低,约占沉积物总磷的 0.07% ~ 0.13%,对沉积物污染物分布影响较小。BD-P 主要是被铁的氢氧化物和锰的化合物约束的磷^[15],对氧化还原很敏感。NaOH-srP 主要为铁铝结合态磷,是可与 OH⁻ 离子进行交换的铁铝金属氧化物约束的磷^[15]。这 3 种磷形态较为活跃,受沉积物-水界面的环境条件(温度、溶解氧、pH 等)的改变影响较大^[18],会在沉积物-水界面的生物地球化学作用下发生一系列的迁移转化,影响表层沉积物污染物的分布。

2.2.2 沉积物中磷在生物地球化学作用下的迁移过程

沉积物总磷含量及形态分布除受水体颗粒物沉积作用以外,还受到沉积物内部生物地球化学的共同作用影响。一方面,不同时期沉降颗粒性质、污染物含量及其形态对表层沉积物性质影响较为显著。另一方面在表层沉积物与上覆水之间强烈的生物地球化学作用影响下,污染物在沉积物内部发生一系列的迁移转化。

选取 2017 年 11 月表层 25 cm 柱状沉积物,采用化学连续提取法对其形态变化进行分析,用于探究沉积物内部磷的迁移转化规律如图 8 所示。从中可看出,水库沉积物中总磷含量沿垂向呈降低趋势,其中表层沉积物总磷含量全年维持在相对较高的水平,在 708.48 ~ 831.63 mg·kg⁻¹。沉积物垂向深度 18 cm 以下总磷含量逐渐趋于稳定,数值在 600.42 ~ 671.22 mg·kg⁻¹ 之间。垂向深度总磷含量梯度的存在使得沉积物磷通过孔隙水有向上层迁移转化的趋势。表层沉积物总磷含量变化一方面受水

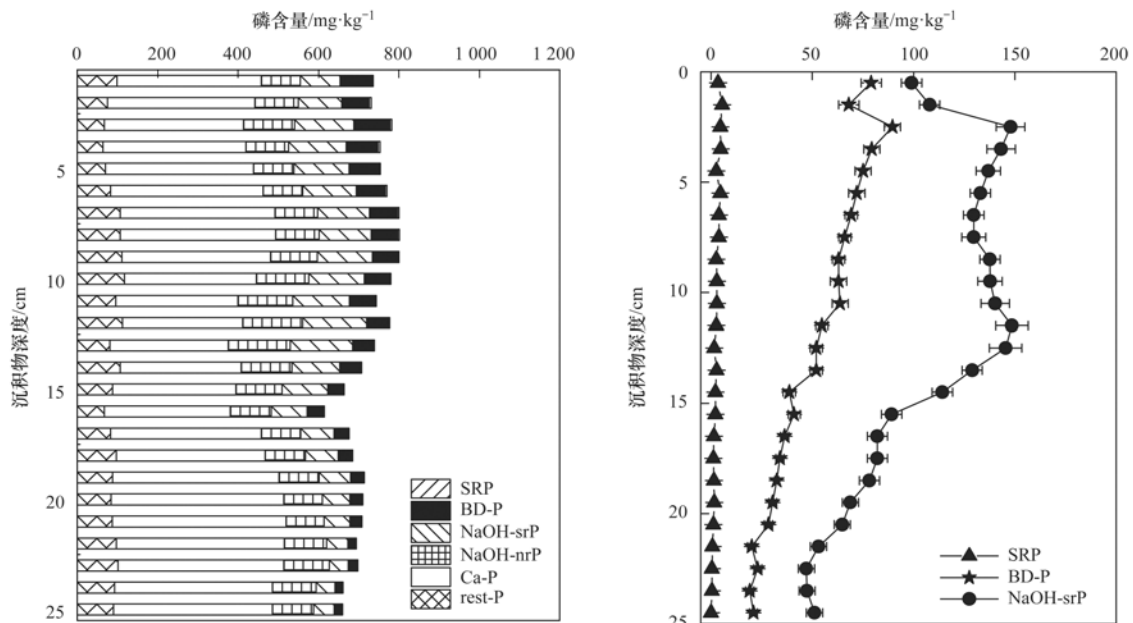


图8 金盆水库沉积物磷形态的垂向迁移转化规律

Fig. 8 Vertical migration of different forms of phosphorus in the sediments of the Jinpen Reservoir

体沉降颗粒总磷含量影响,另一方面受表层沉积物与上覆水之间强烈的生物地球化学作用影响,大量含磷污染物在沉积物中不断被微生物分解并以可溶态向表层迁移.不同形态磷在沉积物内部的迁移转化规律也大不相同.

金盆水库沉积物磷以 Ca-P 和 rest-P 为主,二者属于沉积物中最为稳定的磷形态,基本不参与地球化学作用,其垂向分布特征与总磷分布特征相似,主要受不同时间颗粒磷的沉积作用影响. NaOH-nrP 为微生物磷,可用来表征有机磷的含量.有机质作为有机磷的载体^[19],其含量直接影响了 NaOH-nrP 的含量变化.从图 8 中可看出 NaOH-nrP 的沿垂向总体呈现略微下降的趋势,主要因为随着深度增加,沉积物内部处于缺氧状态,有机质会被细菌等微生物利用而发生矿化分解,造成有机磷(以 NaOH-nrP 计)随之向孔隙水释放,在浓度差的驱使下有向上层沉积物迁移转化的趋势.

另一方面,SRP、BD-P 和 NaOH-srP 这 3 种形态磷沿垂向出现明显降低趋势,主要是由于 NaOH-srP 和 BD-P 的大幅度减小导致,这 3 种磷形态较为活跃,受沉积物内部生物地球化学作用影响大,在环境条件的变化下发生一系列迁移转化.分层型深水水库沉积物中磷的释放主要随季节呈现周期性变化^[20].研究表明,金盆水库水体温度上高下低,2017 年全年库底水温在 7.2~9.9℃ 之间,随季节变化差异较小.主要在夏季库底水温较高时,沉积物-水界面微生物生命活动有所增强,沉积物中少量有机磷可能随着有机质的降解被释放到上覆水体中,对沉积物内部磷形态迁移转化影响较小.

pH 值也是影响磷释放的重要因素^[21, 22],一般认为,碱性条件下 OH⁻ 会与 PO₄³⁻ 竞争 Fe(Ⅲ) 的配体,促使磷释放(主要为 NaOH-srP 的释放)^[23],金盆水库底部的 pH 值一般在 7.5~8.2 之间,使得沉积物中 NaOH-srP 沿垂向有向上释放的趋势.因此沉积物中 NaOH-srP 表层相对较高,底层逐渐减小.

溶解氧含量是影响磷在沉积物-水界面交换过程中的重要因素^[24, 25],研究认为水体底部的溶解氧可以决定沉积物-水界面磷的迁移转化方向,氧化还原电位被认为是 NaOH-srP 能否发生释放的转折点^[24],在富氧环境下,沉积物-水界面处于氧化状态,Fe(Ⅲ) 易与磷结合,以磷酸盐形式沉淀,利于沉积物对上覆水磷酸盐的吸附^[24];在厌氧和缺氧环境下,不溶性 Fe(OH)₃ 变成可溶性 Fe(OH)₂,使 NaOH-srP 释放到水里^[25].2017 年全年金盆水库库底溶解氧浓度在(1.88~9.4) mg·L⁻¹ 之间,热分层期间,溶解氧浓度较低,促使 NaOH-srP 向上覆

水体释放.此外,对氧化还原条件敏感的 BD-P 一般会在厌氧条件下伴随铁、锰等还原性污染物的厌氧释放而释放到上覆水体中.同时,沉积物内部还原性条件更加强烈,进一步促使底部沉积物中 NaOH-srP 和 BD-P 通过向孔隙水中释放逐步向上层迁移,其含量沿深度增加明显降低.

3 结论

(1) 金盆水库表层沉积物总磷含量和磷形态分布受水体颗粒磷沉降作用明显($r^2=0.8775$).3~8 月随着死亡藻类的不断沉降,大量有机磷(主要为 NaOH-nrP) 沉积到表层沉积物中,使得颗粒磷沉积量较小,但颗粒磷的含量持续增加,9~11 月为金盆水库汛期,暴雨径流携带大量的泥沙汇入主库区,污染物负荷较大,然而由于单位质量泥沙中总磷含量(主要为 Ca-P 和 rest-P 等无机磷) 占比较小,表层沉积物 TP 含量反而逐渐降低.

(2) 金盆水库表层沉积物总磷含量和磷形态分布同时也受沉积物内部生物地球化学共同作用,主要体现在 SRP、BD-P 和 NaOH-srP 这 3 种磷形态上.在环境条件的改变下发生一系列迁移转化,金盆水库水体较深,水体温度上高下低,底部溶解氧浓度较低,整体处于季节性缺氧或厌氧状态,存在较大的 SRP、BD-P 和 NaOH-srP 等内源磷释放风险,在今后的研究中需大力加强对该类型水库沉积物内源磷释放机制和控制措施的研究.

参考文献:

- [1] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990.114-137.
- [2] 黄廷林,延霜,柴蓓蓓,等.水源水库沉积物磷形态分布及其释放特征[J].天津大学学报,2011,44(7):607-612.
Huang T L, Yan S, Chai B B, et al. Phosphorus forms and its distribution in source water reservoir sediment[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(7): 607-612.
- [3] 刘军,臧家业,冉祥滨,等.长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义[J].环境科学,2017,38(8):3243-3253.
Liu J, Zang J Y, Ran X B, et al. Sedimentary phosphorus speciation in the coastal hypoxic area of Changjiang estuary and its environmental significance[J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3243-3253.
- [4] 王晓蓉,华兆哲,徐菱,等.环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J].环境化学,1996,15(1):15-19.
Wang X R, Hua Z Z, Xu L, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. Environmental Chemistry, 1996, 15(1): 15-19.
- [5] 袁和忠,沈吉,刘恩峰,等.太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J].环境科学,2010,31(4):954-960.
Yuan H Z, Shen J, Liu E F, et al. Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2010, 31(4): 954-960.

- [6] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 273-282.
Wang G X, Cheng X Y, Pu P M. Lake eutrophication control in technology, theory and application [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, **14**(3): 273-282.
- [7] Gurkan Z, Zhang J J, Jørgensen S E. Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark [J]. Ecological Modelling, 2006, **197**(1-2): 89-102.
- [8] 李学刚, 宋金明, 李宁, 等. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征[J]. 海洋与湖沼, 2005, **36**(6): 562-571.
Li X G, Song J M, Li L, *et al.* Source and biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in JiaoZhou Bay sediments[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, **36**(6): 562-571.
- [9] 林国恩. 流溪水库氮磷营养盐动态与收支分析[D]. 广州: 暨南大学, 2009. 3-5.
Lin G E. The dynamics and budget of nitrogen and phosphorus in Reservoir Liuxihe [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009. 3-5.
- [10] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 22-40.
- [11] 方芳, 李哲, 田光, 等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3488-3493.
Fang F, Li Z, Tian G, *et al.* Seasonal variation of phosphorus in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3488-3493.
- [12] Wang J F, Chen J G, Ding S M, *et al.* Effects of seasonal hypoxia on the release of phosphorus from sediments in deep-water ecosystem: A case study in Hongfeng Reservoir, Southwest China [J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 858-865.
- [13] Shinohara R, Hiroki M, Kohzu A, *et al.* Role of organic phosphorus in sediment in a shallow eutrophic lake [J]. Water Resources Research, 2017, **53**(8): 7175-7189.
- [14] Ma W X, Huang T L, Li X, *et al.* Impact of short-term climate variation and hydrology change on thermal structure and water quality of a canyon-shaped, stratified reservoir [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(23): 18372-18380.
- [15] Hupfer M, Gächter R, Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis [J]. Aquatic Sciences, 1995, **57**(4): 305-324.
- [16] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—a synthesis of recent works [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [17] 徐康, 刘付程, 安宗胜, 等. 巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3255-3263.
Xu K, Liu F C, An Z S, *et al.* Spatial and temporal variations of phosphorus forms in surface sediments of Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3255-3263.
- [18] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 789-796.
Wang J F, Chen J A, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of phosphorus forms in sediment of Lake Hongfeng, Guizhou Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(5): 789-796.
- [19] 高海鹰, 刘韬, 丁士明, 等. 滇池沉积物有机磷形态分级特征[J]. 生态环境, 2008, **17**(6): 2137-2140.
Gao H Y, Liu T, Ding S M, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of Lake Dianchi [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(6): 2137-2140.
- [20] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 54-60.
Wang Y C, Zhu J, Ma M, *et al.* Thermal Stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir, Southwestern China [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, **17**(1): 54-60.
- [21] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及pH值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(6): 707-711.
Jin X C, Wang S R, Pang Y. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2004, **24**(6): 707-711.
- [22] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 951-957.
Chuai X M, Yang L Y, Cheng S B, *et al.* Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun [J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 951-957.
- [23] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 207-217.
Fan C X, Zhang L, Bao X M, *et al.* Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 207-217.
- [24] 金相灿, 姜霞, 姚扬, 等. 溶解氧对水质变化和沉积物吸磷过程的影响[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(S1): 34-39.
Jin X C, Jiang X, Yao Y, *et al.* Effects of dissolved oxygen on the changes of overlying water quality and the uptake of phosphate by sediment [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, **17**(S1): 34-39.
- [25] Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂ and loading influence [J]. Water Research, 1999, **33**(10): 2437-2447.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)