

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析

刘佳¹, 雷丹¹, 李琼², 王亮², 张平², 肖尚斌^{1*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北省宜昌市水文水资源勘测局, 宜昌 443002)

摘要: 为揭示黄柏河流域饮用水源水库的磷负荷特征, 采用 SMT 分级方法对流域内 3 座梯级水库(玄庙观、天福庙、西北口水库)的沉积物磷形态特征及垂向变化特征进行了分析, 并初步估算了沉积物-水界面正磷酸盐释放通量以及各形态磷含量对磷释放的影响。结果发现, 沉积物总磷(TP)含量从流域上游至下游水库呈现递减趋势, 平均值分别为(8 070.0 ± 2 251.4)、(2 681.2 ± 1 709.8)和(2 656.6 ± 1 599.7) mg·kg⁻¹, 均处于高度污染水平。3 座水库中各个采样点磷形态之间的含量主要表现为: HCl-P > OP > NaOH-P。根据 Fick 第一定律, 计算得到流域内 3 座梯级水库均表现为上覆水正磷酸盐的源, 正磷酸盐释放通量从流域上游到下游水库呈现递减趋势, 范围为 0.017 9 ~ 0.182 5 mg·(m²·d)⁻¹。正磷酸盐释放通量与表层水体 DO 和叶绿素呈现正相关, 与 HCl-P、OP 和 TP 同样表现为显著正相关。

关键词: 磷形态; 磷释放通量; Fick 定律; 黄柏河; 磷矿开采

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1608-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201705112

Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River

LIU Jia¹, LEI Dan¹, LI Qiong², WANG Liang², ZHANG Ping², XIAO Shang-bin^{1*}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Yichang Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Yichang 443002, China)

Abstract: The Huangbai river, with a large phosphorite deposit in the basin upstream, is the drinking-water source of Yichang city, China, and water blooms often break out in it in present times. To investigate the internal contamination load, the distribution and vertical variation of sediment phosphorus and its fractions were analyzed. Phosphorus flux across the sediment-water surface was preliminarily analyzed in three reservoirs in the basin. The results showed that the concentration of total phosphorus (TP) decreased from the upstream to the downstream reservoirs of the basin, and the means of the TP were (8 070.0 ± 2 251.4), (2 681.2 ± 1 709.8), and (2 656.6 ± 1 599.7) mg·kg⁻¹, in the three reservoirs, respectively. This shows that the basin is at a highly polluted level. There were similar tendencies in the concentrations of dissolved oxygen (DO) and chlorophyll a in the surface water. The order of the phosphorus fractions was HCl-P > OP > NaOH-P in most sites. According to Fick's First Law, the flux of PO₄³⁻-P across the sediment-water surface was 0.017 9-0.182 5 mg·(m²·d)⁻¹, and it decreased from the upstream to the downstream reservoirs. The flux was positively related to HCl-P, OP, and TP in the high phosphorus concentration basin.

Key words: phosphorus fractions; phosphate diffusion fluxes; Fick's law; Huangbai River; phosphate mining

沉积物作为营养盐的“源”与“汇”^[1], 在一定条件下通过间隙水与上覆水之间的联系实现营养盐交换, 从而影响上覆水的营养盐含量, 造成湖泊和水库水环境安全隐患。随着湖库治理技术的发展, 当外源污染得到有效的控制后, 控制湖库沉积物的内源释放就成为了湖库治理的关键^[2]。沉积物-水界面作为物质交换的重要通道^[3], 为沉积物中物质的迁移转化提供了较好的条件, 沉积物中磷的含量以及其形态则是为磷的释放提供了基础。磷作为水体富营养化的重要限制因子^[4, 5], 其中底泥中释放的溶解性正磷酸盐, 正是水生生物最易吸收的形式, 这就为水生生物和藻类的生长提供了条件, 加快其生长繁殖的速度。

众多学者对沉积物中磷形态^[6, 7]、沉积物-水界面交换过程和内源释放展开了大量研究^[8], 黄柏河是宜昌市的主要河流, 近年来黄柏河流域大规模的磷矿开采, 已对流域内水库的水环境质量产生了重大影响, 2013 年 5 月和 2014 年 6 月, 流域上游玄庙观水库和天福庙水库先后发生两次水华事件, 2016 上半年黄柏河东支流域水华次数为 4 次, 较 2015 年增加了 1 次。多年来上游富含磷元素的颗粒物的大量输入和不断沉积, 导致黄柏河流域天福庙

收稿日期: 2017-05-12; 修订日期: 2017-09-15

基金项目: 宜昌市科技局项目(A15-140); 湖北省自然科学基金项目

作者简介: 刘佳(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水利, E-mail: ljia93@qq.com

* 通信作者, E-mail: shangbinx@163.com

水库、玄庙观水库底泥总磷远远高于国内典型富营养化湖泊和水库。因此,研究这种特高含量沉积物磷形态的组成和释放通量,对于黄柏河流域的饮用水水源地保护具有重要的现实意义,并可丰富对沉积物磷生物地球化学循环的认知。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黄柏河流域位于宜昌市中部,流域分为东西两支,东支发源于夷陵区黑良山,长 126 km,西支发源于夷陵区五郎寨,长 70 km。东、西两支在两河口汇合干流,于葛洲坝三江航道前注入长江。黄柏河流域总面积 1 931.5 km²,占宜昌市总面积的 9.2%。东支内至上而下有四座大中型水库:玄庙观水库(总库容:4 054 万 m³)、天福庙水库(总库容:6 180 万 m³)、西北口水库(总库容:2.1 亿 m³)以及尚家河水库(总库容:1 692 万 m³)。经东风渠总干渠引入东风渠灌区,既是宜昌城区 100 万人的饮用水源,亦承担着当阳、枝江、夷陵区、高新区等区域内 100 万亩农田以及 100 万人的生产生活用水的任务,其水体水质受到广泛关注。目前,黄柏河流域内累计查明磷矿资源储量 11.37 亿 t,是长江流域最大的磷矿基地,主要分布于夷陵区殷家坪、樟村坪、桃坪河、丁家沟、晓峰和远安县望家、苟家垭等矿区。流域水系,开矿矿点大致分布情况如图 1 所示,天福庙水库以上有磷矿开采企业 54 家,近年来,矿区中废水的排放虽已得到有效控制,但前期积累的沉积物磷可能是引起各个水库富营养化的重要原因。

1.2 样品采集与分析

2016 年秋季分别对黄柏河流域内玄庙观水库、天福庙水库以及西北口水库 3 个水库的库首、库中、库尾进行样品的采集。使用柱状采泥器^[9]采集沉积物-水界面样品,现场进行分层处理。上覆水以 2 cm 的间隔分层采集后保存在聚乙烯塑料瓶中;柱状沉积物样品同样以 2 cm 间隔分层后保存于聚乙烯离心管中,密封后和水样一起置于便携式冷藏箱中,带回实验室做进一步分析。现场同时采用水质多参数仪(HYDROLAB DS5, 美国)测定水体理化因子。采用低速冷冻离心机(DL-5M, 杭州汇尔)离心沉积物样品得到间隙水,并使用孔径 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤间隙水和上覆水水样,采用流动注射分析仪(Skalar San++, 荷兰)进行水质的分析。本研究采用的 The Standards, Measurements and



图 1 采样点和矿点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites and phosphate mining sites

Testing(SMT 法)是利用土壤、沉积物各种形态的无机磷酸盐具有不同浸提取能力的化学提取剂,将无机磷酸盐进行逐步分离的方法^[10]。

1.3 孔隙水扩散通量模型

深水水库中,底层水受到扰动较小,则物质交换主要受到浓度梯度的控制,因此,Fick 第一定律可以满足沉积物-水界面正磷酸盐的扩散通量的计算^[11]:

$$J_s = -\varphi D_s \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (1)$$

式中, J_s 是沉积物-水界面的释放通量 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; φ 是沉积物的孔隙度; $\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0}$ 为沉积物-水界面物质的浓度梯度; D_s 是沉积物中溶质的分子扩散系数 $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。由于 D_s 是考虑了沉积物的弯曲效应,但实际中沉积物的弯曲度测量较为困难,通常通过其与孔隙度之间的关系来进行推导^[12]:

$$D_s = \varphi D_0 \quad (\varphi < 0.7)$$

$$D_s = \varphi^2 D_0 \quad (\varphi > 0.7) \quad (2)$$

式中, D_0 是无限稀释溶液的理想扩散系数,取 6.12

$\times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} (25^\circ\text{C})$.

2 结果与讨论

2.1 环境因子分析

由表1可以发现,三座水库表层水体 pH 值范围为 8.1 ~ 8.8, 呈现弱碱性; 三座水库电导率为: 423 ~ 483 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 其中以天福庙水库最高, 均值为 482 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$; 表层水体溶解氧为 7.47 ~ 10.45

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中三座水库溶解氧均值分别为 7.9、8.24 和 10.03 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均处于接近饱和或为过饱和状态; 叶绿素含量变化范围为: 1.22 ~ 9.14 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 三座水库表层水体的叶绿素均值为 1.61、4.09 和 6.92 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 藻类繁殖生长使得水体溶解氧浓度增高^[13], 叶绿素和溶解氧两者为显著正相关, 相关系数 0.884 ($P < 0.01$), 均表现为从玄庙观至西北口逐渐降低的趋势.

表 1 采样点基本情况

Table 1 Environmental parameters of the studied reservoirs

采样点	水深/m	水温/ $^\circ\text{C}$	pH	电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	叶绿素/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	
西北口水库	库首	34.8	18.06	8.4	428	7.47	1.22
	库中	41.2	17.02	8.6	425	7.90	1.31
	库尾	14.3	16.99	8.6	423	8.32	2.29
天福庙水库	库首	28.1	14.2	8.5	481	7.65	2.06
	库中	10.2	15.15	8.5	483	8.40	4.40
	库尾	11.7	14.93	8.5	482	8.66	5.82
玄庙观水库	库首	21.9	12.29	8.1	432	9.68	7.01
	库中	32.8	9.61	8.1	438	9.95	4.61
	库尾	11.3	12.43	8.8	431	10.45	9.14

2.2 沉积物各形态磷含量及分布

2.2.1 TP 含量及分布

三座水库 TP 分布如图 2 所示. 西北口水库沉积物中, TP 平均含量为 2 656.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (1 187.9 ~ 8 911.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 天福庙水库沉积物 TP 平均含量为 2 681.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (491.6 ~ 6 707.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 玄庙观水库沉积物 TP 平均含量为 8 070.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2 654.8 ~ 10 526.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 金晓丹等^[14]将 TP 含量为 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、1 300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为沉积物重污染、中等污染和轻度污染的界限; 黎睿等^[15]将 TP 含量为 600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、2 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为污染程度的分界线. 在我国长江中下游湖泊 TP 平均含量为 (601 \pm 76) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 长江河口水库总磷含量为 535.1 ~ 910.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 滇池 TP 平均含量 2 266.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16]. 西北口水库与天福庙水库 TP 平均含量是国内湖库的 2 ~ 6 倍左右, 玄庙观水库为 5 ~ 15 倍左右. 黄柏河流域中三大水库沉积物 TP 含量均超过重污染水平数倍, 这表明三大水库长期受到严重的外源污染, 具有高富营养化的风险.

由图 2 可知, TP 含量在整个流域呈现从上游到下游的递减趋势. 这主要受矿点分布的影响, 和水库的拦截作用有关. 三座水库库中、库尾 TP 含量均呈现随深度增加的趋势, 一定程度上表明了黄柏河流域存在先污染再治理的环境变化格局; 三座

水库库首受大坝阻挡, TP 含量变化波动较大; 天福庙水库库首 TP 相较于其余各点含量较低, 这与库首位于两条支流的特殊地理条件有关. 在玄庙观和天福庙水库 TP 含量的垂向变化情况更好地反映了黄柏河流域先污染再治理反复的过程.

2.2.2 OP 含量及分布

OP(有机磷)作为沉积物中磷和有机质的重要组成部分, 其在微生物和酶的作用下转化为生物活性磷, 是水体生物可利用性磷的重要来源^[17, 18]. 三座水库中, 以玄庙观水库 OP 含量最高, 天福庙水库最低. 有学者在研究中发现^[19], OP 含量与人类活动密切相关, 主要表现在农业面源污染上. 如图 1 所示, 樟村坪镇处于玄庙观水库集水面积内, 生活污水未经处理直接排入玄庙观水库支流栗林河中^[20]; 以及玄庙观水库部分区域存在的围网养殖现象均可能成为玄庙观水库 OP 含量较高的原因. 西北口水库 OP 含量相对于天福庙水库较高主要在于西北口水库多有船只开往和游客郊游, 两岸居民点较多; 天福庙水库两岸则为山地和公路, 人类活动相对较少.

对三座水库沉积物 OP 分析结果见图 2、3, 西北口水库库首、中、尾 OP 平均含量为 339.2、380.5 和 340.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量占 TP 的 22.7%、16.1% 和 9.8%. 西北口水库库首 OP 含量

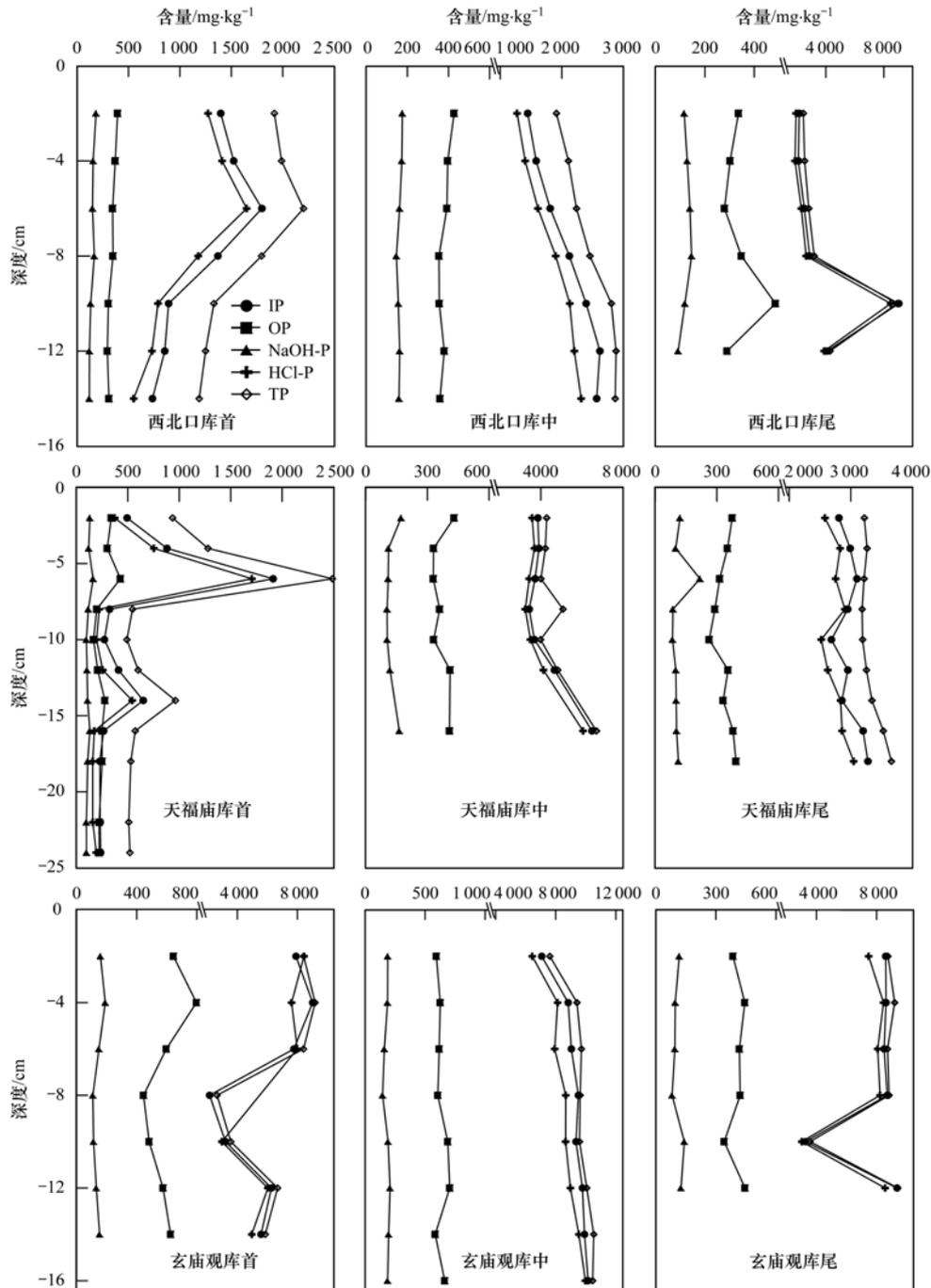


图2 水库沉积物各组分磷垂向分布

Fig. 2 Vertical profiles of the phosphorus fractions in the surface sediments

在垂向上变化较小、库中和库尾 OP 在垂向分布上呈现先减小后增加再减小的趋势。天福庙水库库首、中、尾 OP 平均含量 260.5、371.0 和 339.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量占 TP 的 38.4%、8.2% 和 10.3%, 垂向上从表层开始处于下降的趋势, 底部有 OP 含量积累的现象。玄庙观水库库首、中、尾 OP 平均含量 595.8、636.0 和 409.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量占比 10.2%、6.6% 和 9.5%。玄庙观水库库首在垂向上变化较大, 库中和库尾变化较小, 同天福庙

水库类似, 自表层开始有下降的趋势, 底部有积累的现象。洱海沉积物 OP 含量为 278.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [21]; 太湖、洞庭湖和鄱阳湖 OP 含量分别为 125.8、111.0 和 152.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [22]; 西北口、天福庙水库 OP 含量均高于洱海沉积物, 且是太湖、洞庭湖和鄱阳湖 OP 含量的 2~3 倍左右, 玄庙观水库 OP 含量为太湖、洞庭湖和鄱阳湖的 3~5 倍左右。

2.2.3 IP 含量及分布

IP(无机磷)主要以 NaOH-P 和 HCl-P 形式存

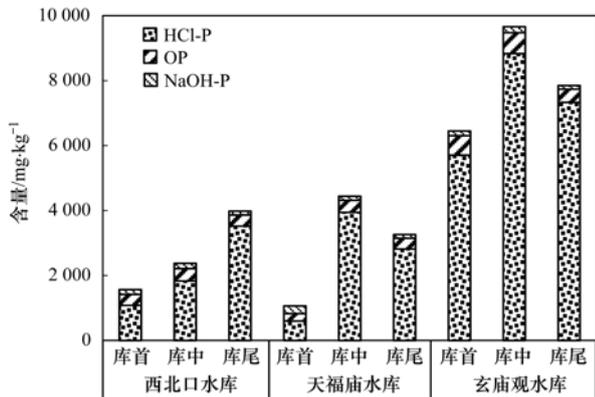


图3 沉积物各组分磷含量

Fig. 3 Concentrations of the phosphorus fractions in the surface sediments

在,受 pH 值影响较大^[23]. 本研究中,西北口水库沉积物 IP 含量介于 733.6 ~ 9 034.2 mg·kg⁻¹;天福庙水库为 228.2 ~ 6 488.7 mg·kg⁻¹;而玄庙观作为最上游的水库,其 IP 含量介于 2 124.8 ~ 9 954.6 mg·kg⁻¹. 在本次采样的 9 个点中 IP 在 TP 的占比为 47.7% ~ 95.8%,均值为 84.8%.

NaOH-P 是一种非稳态的磷形态,对沉积环境的氧化还原电位等条件的改变较为敏感,其迁移转化是沉积物向上覆水释放磷的主要机制之一^[24]. 有研究表明^[25],NaOH-P 与人类活动有关,主要来自生活污水和工业废水. 三座水库沉积物 NaOH-P 含量表现为玄庙观水库 > 西北口水库 > 天福庙水库,这一分布情况同 OP 含量类似. 从图 2 可知,在垂向分布上,西北口水库库首和库中沉积物 NaOH-P 含量随深度呈现先增加再减小的趋势;天福庙水库各点沉积物 NaOH-P 含量有随深度而增加的趋势;玄庙观水库各点沉积物 NaOH-P 含量随深度变化不大或有增加的趋势. 由图 3 可知,自库首到库尾,西北口水库沉积物 NaOH-P 含量分别为: 148.1、162.2 和 123.3 mg·kg⁻¹,占 TP 的 9.8%、6.9% 和 3.8%;天福庙水库为 116.7、126.0 和 114.4 mg·kg⁻¹,占 TP 的 18%、2.8% 和 3.8%;玄庙观水库表现为 143.9、184.4 和 110.2 mg·kg⁻¹,占 TP 的 2.5%、1.9% 和 3.9%. 玄庙观水库 NaOH-P 含量高于西北口水库和天福庙水库,这与玄庙观水库受村镇生活和工业废水污染有紧密关系.

HCl-P 又称为 Ca-P,其主要由磷灰石组成,是一种很稳定的磷形态. HCl-P 含量与地区的地质-地球化学背景密切相关,宜昌地区固有的碱性土壤地球化学环境特点决定了三座水库中沉积物磷最主要以磷灰石存在^[26]. 西北口水库沉积物 HCl-P 含量

为 551.0 ~ 8 474.7 mg·kg⁻¹,这主要是水库水力作用. 部分颗粒状磷灰石堆积在库尾,使得 HCl-P 呈现从库首至库尾逐渐增大的趋势. 天福庙水库沉积物 HCl-P 含量介于 159.9 ~ 6 053.0 mg·kg⁻¹,玄庙观水库沉积物 HCl-P 含量介于 1 967.9 ~ 9 970.2 mg·kg⁻¹,天福庙水库和玄庙观水库均表现为库中高库首库尾低的情形. 从整个流域来看,三座水库 HCl-P 含量变化与 IP 和 TP 变化为相同的趋势,表现为玄庙观水库 > 天福庙水库 > 西北口水库.

2.3 磷释放通量

离子在间隙水中的扩散服从 Fick 第一定律,将间隙水上端扰动层和上覆水 5 cm 左右的 PO₄³⁻-P 含量对深度进行指数拟合,求得 $(\partial c/\partial x)_{x=0}$ 的值,通过公式(1)计算各个水库沉积物-水界面的磷释放通量^[27]. 各水库沉积物-水界面磷释放通量如图 4 所示,3 座水库均呈现由沉积物向水中释放,沉积物表现为磷的“源”. 沉积物-水界面的 PO₄³⁻-P 主要通过有机质分解,铁氢氧化物解吸以及水体底部的扰动等方式向水体释放^[28]. 沉积物中有机磷亦可以被磷酸酶水解转化为可被植物和微生物利用的无机磷^[6]. 三座水库释放通量有所差别,这与沉积物-水界面浓度梯度、沉积物理化性质、粒径等性质密切相关. 释放通量整体上呈现玄庙观水库 > 天福庙水库 > 西北口水库,各采样点磷释放的潜力亦不相同. 其中西北口水库磷释放通量 0.053 8 ~ 0.082 mg·(m²·d)⁻¹,天福庙水库释放通量 0.017 9 ~ 0.127 6 mg·(m²·d)⁻¹,玄庙观水库磷释放通量为 0.156 6 ~ 0.182 5 mg·(m²·d)⁻¹. 其中三座水库与其他采用该方法的磷释放通量进行比较,三峡库区 0.15 ~ 2.47 mg·(m²·a)⁻¹^[27],滇池福保湾 0.118 ~ 0.265 mg·(m²·d)⁻¹^[29],香溪河 0.01 ~ 0.04

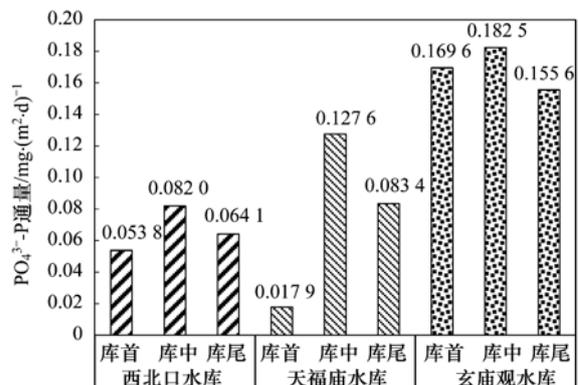


图4 各水库沉积物-水界面磷释放通量估算

Fig. 4 Phosphate diffusion fluxes across the sediment-water interface of the reservoirs

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 三座水库释放通量为三峡库区的 27 倍以上, 最大值为水华频繁的香溪河 4.5 倍以上^[30], 其中玄庙观水库磷释放通量更是和滇池接近. 三座水库磷释放通量均呈现库中 > 库尾 > 库首, 其中天福庙水库库首采样点位于两条支流的汇合口, 释放通量较低.

2.4 磷释放通量与不同磷形态和环境因子的关系

沉积物特征与磷释放通量相关分析显示(表 2), OP 中活性较高的部分在一定环境下分解或矿化分解为溶解性的小分子有机磷或磷酸根^[31], 通过迁移转化释放到水体, 转化为可以被藻类生长利用的磷^[32, 33]; HCl-P 作为 TP 和 IP 的主要成分, 该磷组分较为稳定^[34], 不容易再释放出来, 但结

果显示磷释放通量 J_s 与 HCl-P 呈现极显著相关关系, 可能是在高磷含量的背景下, 微生物活动使得 HCl-P 降解释放到水体中, 现有学者发现有异养细菌对矿物中的磷酸钙的溶解具有促进作用^[35]. 库区高磷含量环境以及与扩散通量的显著关系, 使得沉积物可以向水体不断释放 PO_4^{3-} -P, 促进藻类生长, 进一步可能引起水质恶化. J_s 与叶绿素和溶解氧均表现为显著相关. 除 NaOH-P, 各磷形态组分之间呈现显著相关, 且由图 3 可知各组分在垂向分布上基本保持相同变化趋势. NaOH-P 含量较低, 在垂向分布上变化波动较低, 且三座水库均值含量差异性较小, 与其余各组分相关性较差.

表 2 沉积物特征与磷释放通量的关系¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between the sediment characteristics and the phosphate release flux

	J_s	电导率	DO	叶绿素	HCl-P	OP	NaOH-P	TP	IP
J_s	1	-0.24	0.886 **	0.728 *	0.924 **	0.890 **	-0.35	0.937 **	0.925 **
电导率		1	-0.228	0.055	-0.278	-0.41	0.211	-0.291	-0.295
DO			1	0.884 **	0.943 **	0.725 *	-0.335	0.930 **	0.934 **
叶绿素				1	0.715 *	0.447	-0.477	0.698 *	0.697 *
HCl-P					1	0.822 **	-0.274	0.998 **	0.999 **
OP						1	-0.104	0.839 **	0.827 **
NaOH-P							1	-0.3	-0.288
TP								1	0.999 **
IP									1

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)相关

3 结论

(1) 黄柏河流域三座水库沉积物 TP 含量差异性较大, 且含量处于高度污染水平, 呈现从上游至下游减小的趋势: 玄庙观水库 $8\,070.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、天福庙水库 $2\,681.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和西北口水库 $2\,656.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 尤其在玄庙观水库以及天福庙库中、库尾更是达到一个极高的水平, 这主要是受矿点分布影响以及大坝的阻挡作用.

(2) 三座水库磷形态主要分布为 TP > IP > HCl-P > OP > NaOH-P, 其中在各个形态磷中以 HCl-P 为主, 这与流域内碱性土壤地球化学环境特点有关, 且 HCl-P 成为影响 TP 和 IP 变化的主要因素, OP 含量受各库区内人类活动的影响, 表现为玄庙观水库 > 西北口水库 > 天福庙水库. NaOH-P 在玄庙观水库含量高于其余两座水库, 主要原因为玄庙观水库受村镇生活和工业废水污染较为严重. 除 NaOH-P, 各个磷形态成分之间呈现显著正相关关系, 尤其是 HCl-P、IP、TP 相关性最为密切.

(3) 黄柏河流域 3 座水库磷释放通量为玄庙观

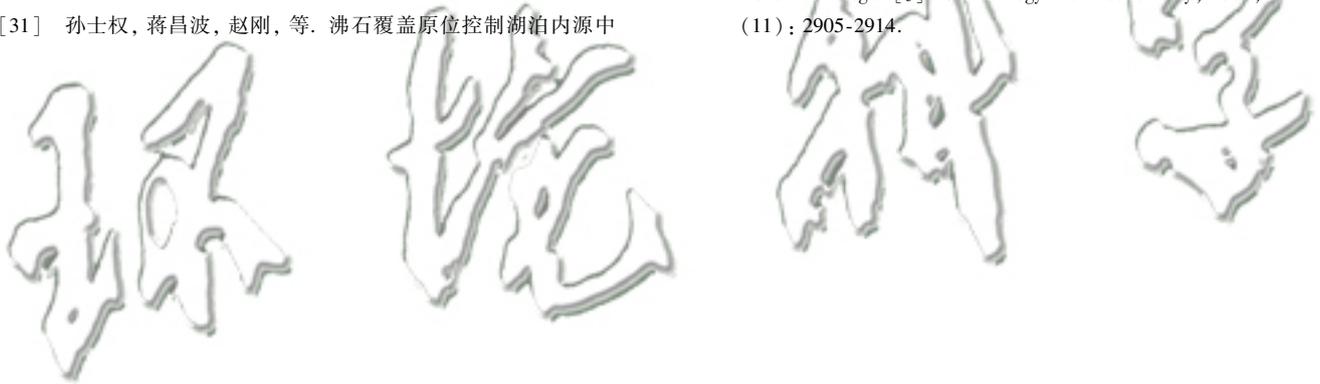
水库 $0.053\,8 \sim 0.082 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、天福庙水库 $0.017\,9 \sim 0.127\,6 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、西北口水库 $0.155\,6 \sim 0.182\,5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 整体上沉积物均表现为磷的“源”, 向上覆水进行扩散, 当流域外源得到控制以后, 沉积物不断向上覆水体进行 PO_4^{3-} -P 的释放, 成为各水库水体富营养化的驱动力. 其中磷扩散通量与 TP、IP、HCl-P、OP 为显著正相关, 扩散通量与 HCl-P 呈现的显著正相关性, 这可能与微生物的活动有关, 具体关系还需做进一步研究.

参考文献:

- [1] Herbert R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1999, 23(5): 563-590.
- [2] Søndergaard M, Bjerring R, Jeppesen E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes[J]. Hydrobiologia, 2013, 710(1): 95-107.
- [3] 范成新, 秦伯强, 孙越. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面的物质交换[J]. 湖泊科学, 1998, 10(1): 73-78.
Fan C X, Qing B Q, Sun Y. Substance exchange across water-sediment interface in Meiliang Bay and Wuli Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(1): 73-78.
- [4] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments; a review of recent evidence

- on the effects of enrichment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(4): 796-822.
- [5] Nixon S W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns[J]. *Ophelia*, 1995, **41**(1): 199-219.
- [6] 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- Xiong Q, Jiao L X, Wang S R, *et al.* Characteristics and bioavailability of organic phosphorus from different sources of sediments in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- [7] 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 等. 黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 942-950.
- Yu Z Y, Du J T, Yao Q Z, *et al.* Distribution of phosphorus in surface sediments from the Yellow River estuary wetland [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 942-950.
- [8] 王志齐, 李宝, 梁仁君, 等. 南四湖沉积物磷形态及其与间隙水磷的相关性分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 139-146.
- Wang Z Q, Li B, Liang R J, *et al.* Correlation analyses of sediment phosphorus forms and soluble phosphorus concentrations in the interstitial water of Nansi Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 139-146.
- [9] 王雨春, 黄荣贵, 万国江. SWB-1 型便携式湖泊沉积物-界面水取样器的研制[J]. *地质地球化学*, 1998, (1): 94-96.
- Wang Y C, Huang R G, Wan G J. A newly developed sampler for collecting samples near the lacustrine sediment-water interface [J]. *Geology-Geochemistry*, 1998, (1): 94-96.
- [10] Boenke A. The Standards, Measurements and Testing Programme (SMT), the European support to standardisation, measurements and testing projects [A]. In: Love G, Nicholson W A P, Armigliato A (Eds.). *Modern Developments and Applications in Microbeam Analysis*[M]. Vienna: Springer, 1998.
- [11] Fick A. Ueber diffusion[J]. *Annalen der Physik*, 1855, **170**(1): 59-86.
- [12] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, central Great Barrier Reef lagoon (Australia) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, **24**(3): 289-303.
- [13] 郑丙辉, 曹承进, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河水华特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3218-3226.
- Zheng B H, Cao C J, Zhang J L, *et al.* Analysis of algal blooms in Da-ning River of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3218-3226.
- [14] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
- Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze estuary reservoir, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [15] 黎睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- Li R, Wang S R, Xiao S B, *et al.* Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- [16] 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3384-3393.
- Li L, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Vertical variation of phosphorus forms in Lake Dianchi and contribution to release [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3384-3393.
- [17] Zhang T X, Wang X R, Jin C X. Variations of alkaline phosphatase activity and P fractions in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Taihu) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **150**(2): 288-294.
- [18] 霍守亮, 李青芹, 咎逢宇, 等. 我国不同营养状态湖泊沉积物有机磷形态分级特征研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1000-1007.
- Huo S L, Li Q Q, Jiu F Y, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes, China[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1000-1007.
- [19] 汪艳雯, 岳钦艳, 刘庆, 等. 山东省南四湖底泥中磷的形态分布特征[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(2): 125-129.
- Wang Y W, Yue Q Y, Liu Q, *et al.* Phosphorus species and distribution characteristics in sediment of Nansi Lake[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(2): 125-129.
- [20] 李琼, 周翰林, 张平. 宜昌市黄柏河流域污染源调查及对策[J]. *广州化工*, 2015, **43**(9): 155-156, 164.
- Li Q, Zhou H L, Zhang P. Investigation and countermeasures of east branch watershed of Huangbo River in Yichang City [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, **43**(9): 155-156, 164.
- [21] 孙静, 王圣瑞, 曾清如, 等. 洱海表层沉积物有机磷形态分布特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(11): 1226-1232.
- Sun J, Wang S R, Zeng Q R, *et al.* Distribution characteristics of organic phosphorus fractions and influencing factors in surface sediments of Lake Erhai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(11): 1226-1232.
- [22] 廖剑宇, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 东部平原不同类型湖泊沉积物中有机磷的特征[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(9): 1142-1150.
- Liao J Y, Wang S R, Yang S W, *et al.* Characteristics of organic phosphorus in different forms of lake sediments from east plain region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(9): 1142-1150.
- [23] 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.
- [24] 张俊杰. 再悬浮条件下河口沉积物内源磷迁移-转化机制研究-以青岛李村河为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [25] Ruban V, López-Sánchez J, 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.
- [26] Wang K, Lin Z B, Zhang R D. Impact of phosphate mining and separation of mined materials on the hydrology and water environment of the Huangbai River basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 347-356.

- [27] 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1308-1314.
Niu F X, Xiao S B, Wang Y C, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorous in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- [28] 王雨春, 万国江, 黄荣贵, 等. 湖泊现代化沉积物中磷的地球化学作用及环境效应[J]. 重庆环境科学, 2000, **22**(4): 39-41.
Wang Y C, Wan G J, Huang R G, *et al.* Geochemistry and environmental effect of modern sediments in Lake Baihua[J]. Chongqing Environmental Science, 2000, **22**(4): 39-41.
- [29] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 114-120.
Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 114-120.
- [30] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2345-2354.
Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- [31] 孙士权, 蒋昌波, 赵刚, 等. 沸石覆盖原位控制湖泊内源中等活性有机磷迁移转化[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 550-557.
Sun S Q, Jiang C B, Zhao G, *et al.* Influencing factors of zeolite in-situ remediation system to control moderately labile organic phosphorus migration and transformation in shallow water[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 550-557.
- [32] Gao L, Zhou J M, Yang H, *et al.* Phosphorus fractions in sediment profiles and their potential contributions to eutrophication in Dianchi Lake [J]. Environmental Geology, 2005, **48**(7): 835-844.
- [33] Trojanowska A A, Izydorczyk K. Phosphorus fractions transformation in sediments before and after cyanobacterial bloom: implications for reduction of eutrophication symptoms in dam reservoir[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, **211**(1-4): 287-298.
- [34] 赵雪松, 胡小贞, 卢少勇, 等. 不同粒径方解石在不同 pH 值时对磷的等温吸附特征与吸附效果[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9): 1872-1877.
Zhao X S, Hu X S, Lu S Y, *et al.* Phosphorus sorption by natural calcite and the effects of pH and grain size[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(9): 1872-1877.
- [35] Pérez E, Sulbarán M, Ball M M, *et al.* Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust in the south-eastern Venezuelan region[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(11): 2905-2914.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)