

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)

1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)

青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)

烧结过程 NO_x 和 SO₂ 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)

废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 宋磊, 张彬, 邓文 (3674)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)

海河流域河流生态系统健康评价 郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)

台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)

岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)

废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)

大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)

辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)

地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)

地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)

茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能 万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)

紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)

水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)

二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究 王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)

碳氮比对聚氨基酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)

快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)

应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量 李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)

植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)

硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)

外生菌根真菌对 Al³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应 张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)

长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳纬莹, 苏建强 (3869)

外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔骁勇, 马栋 (3888)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)

施氮强度对不同土壤有机碳水平按树林温室气体通量的影响 李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)

¹³C₂O 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解 陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)

微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)

铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型 王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)

天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)

水生生物基准推导中物种选择方法研究 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)

生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)

金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)

CuO(-CeO₂)/Al₂O₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究 查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用 徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)

某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)

北京市再生水利用生态环境效益评估 范育鹏, 陈卫平 (4003)

我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)

环境损害评估: 构建中国制度框架 张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)

《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究

包静玥^{1,2}, 鲍建国^{1,2*}, 李立青^{1,2*}

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 重庆市园博园龙景湖是一新建的山地河道型深水湖库. 通过为期一年对龙景湖水库氮磷营养盐的监测, 研究龙景湖水氮磷营养盐的时空格局、变化特点和相互关系, 分析园博园旅游区人为活动的特点以及上游流域来水水质对水库水质的影响. 结果表明, 龙景湖水库整体总氮和总磷年均浓度分别为 $(1.42 \pm 0.46) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.09 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 存在丰水期平水期低于枯水期的季节性波动. 湖库主水体区、开阔水体区和库湾区受所在区域影响因素不同, 氮磷浓度分布存在时空异质性; 主水体区季节变化特征与湖库整体基本一致; 两个开阔水体区将主水体区分别与上游、库湾连接, 顺水流方向的氮磷浓度沿程逐渐降低, 开阔水体区氮磷营养盐受上游来水水质和周围园区功能布设影响; 典型库湾区营养盐浓度高于主水体区和开阔水体区. 湖库丰水期颗粒态的氮、磷占总氮、总磷质量分数分别为 51.7% 和 72.8%, 枯水期硝酸盐氮、活性磷酸盐分别占总氮、总磷质量分数为 42.0% 和 59.4%, 氨氮和溶解态有机氮占总氮质量分数相对稳定; 氮磷比全年均值为 18.429 ± 7.883 , 营养物限制情况下, 氮、磷为主要限制因素的时段分别为 5.3%、21.2%.

关键词: 氮磷营养盐; 时空分布; 水质; 龙景湖; 山地城市

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3709-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.010

Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake

BAO Jing-yue^{1,2}, BAO Jian-guo^{1,2}, LI Li-qing^{1,2}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Longjing Lake in Chongqing Expo Garden is a typical representative of mountainous urban lake. Based on water quality monitoring of Longjing Lake, spatiotemporal characteristics of nitrogen and phosphorus and their relations were analyzed, combined with natural and human factors considered. The results indicated that annual average concentrations of TN and TP in overall lake were $(1.42 \pm 0.46) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(0.09 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, nitrogen and phosphorus concentrations fluctuated seasonally which were lower during the flooding season than those during the dry season. Nitrogen and phosphorus concentration in main water area, open water areas and bay areas of Longjing Lake were distributed with temporal and spatial heterogeneity by different regional influencing factors. The seasonal variation of the main water area was basically consistent with overall lake. Two open water areas respectively connected the main water area with the upstream region, bay areas. TN and TP concentrations were gradually reduced along the flow direction. Upstream water quality and surrounding park functional layout impacted nitrogen and phosphorus nutrient concentrations of open water areas. Nutrient concentrations of typical bay areas were higher than those of main water area and open water areas. The mean mass fraction of PN/TN and PP/TP accounted for a large proportion (51.7% and 72.8%) during the flooding season, while NO_3^- -N/TN and SRP/TP accounted for more (42.0% and 59.4%) during the dry season. The mass fraction of ammonia nitrogen and dissolved organic nitrogen in total nitrogen were relatively stable. The annual mean of N/P ratio was 18.429 ± 7.883 ; the period of nitrogen limitation was 5.3% while was 21.2% for phosphorus limitation.

Key words: nitrogen and phosphorus nutrients; spatiotemporal distribution; water quality; Longjing Lake; mountainous city

重庆三面环山, 沟壑纵横, 地形地貌等自然条件与平原地区有较大的差异, 山地沟壑处形成的天然溪沟汇集至山谷自然成河, 在洼地处形成小湖塘, 城市建设多依山势、沿水域周围布局. 近年来, 由于工农业的发展和城市化进程的加快, 城市水环境问题越来越突出. 刘景红等对重庆市 35 座大中型水库开展富营养化调查及评价, 其中 27 座水库达到富营养, 8 座水库为中营养, 水库营养盐输出直接影响三峡库区水环境质量^[1,2].

重庆市北部新区园博园是第八届世界园林博览

会的举办地, 为重庆市重大工程项目, 会后的园博园作为高品质的生态旅游观光景区和休闲活动场所在运营. 园博园内的龙景湖是快速发展城市化地区的湖库水体典型代表, 其主要通过在河流下游进行筑坝拦截和降雨补给以蓄水形成山地地区的新建湖库.

收稿日期: 2014-03-17; 修订日期: 2014-04-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07307001-005)

作者简介: 包静玥 (1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市地表径流污染控制, E-mail: bjiyucca@foxmail.com

* 通讯联系人, E-mail: bjianguo888@126.com; li-liqing@163.com

其水文水质特征体现为湖库深度大、水体环境相对封闭,水流流速滞缓、不易混合,水体更新周期长,易出现水质成分横向与纵向分布不均等. 龙景湖流域正处于快速城市化进程中,区域土地利用覆盖从自然的农业用地与林业用地向城市建设用地变更. 区域城市化过程中城市道路及铺砌路面等不透水地表的增加,必将影响下游水体龙景湖的水质. 特别在山地地形影响下,径流流程短、抵峰时间短,面源污染负荷强度大、初期效应突出^[3],导致城市水系水环境质量整体水平下降,影响城市水循环健康发展.

本研究对龙景湖及上游流域的水环境质量现状进行调查和监测,结合山地地形影响下的水环境特性,探讨龙景湖水库氮磷营养盐的时空格局、变化特点和相互关系,分析园博园旅游区人为活动的特点以及上游流域来水水质对水库水质的影响,以期为后续水质保持和水污染治理技术提供基础支撑.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

园博园位于重庆市两江新区核心地带,北部新区龙景湖片区核心,总面积 2.2 km²,是综合自然景观、人文景观、休闲娱乐、科普教育等多功能的大型城市生态公园. 园区中心的龙景湖是典型的山地城市水库,由上游山地城市河流汇入形成,水源补给主要来自降雨径流. 龙景湖水体面积 0.53 km²,水库水深约 20~30 m,设计常水位标高为 306 m,死水位为 296 m;总库容为 663 万 m³,调节库容为 425

万 m³. 龙景湖水库蓄水后,改变了水体的天然状态,沿湖群山山体自然形成多个湖湾和半岛,是典型的山地地区新建水库. 湖库水位深,水生生态系统简单,水环境容量小,流动性很差的半封闭缓流库湾较多,不利于污染物的扩散,自净能力差.

1.2 采样点布设与样品分析

为考察龙景湖水库氮磷营养盐分布和变化特征,本研究根据湖体形态特点及园内景区,将整个龙景湖湖体分为主水体区、开阔水体区、库湾区,分区设置采样(见图 1). 湖库的主水体区是湖体的核心水体组成部分,即 A 区,包括 2 个采样点;开阔水体区是指主水体区与上游或库湾区相连接的水域,即为 C 区与 D 区附近水域,分别设置有采样点 2 个与 3 个;库湾区是筑坝拦截蓄水后向山谷处蔓延形成的枝状水体区域,即 B、E、F、G、H 区,分别设置有采样点 1 个、3 个、2 个、2 个、2 个. 此外,对上游河流赵家溪沿水流方向沿程设置有 R1~R7 共 7 个水质监测采样点,赵家溪 R7 采样点下游即为龙景湖区域.

从 2012 年 10 月~2013 年 9 月逐月进行水样采集. 水样采集于水面下约 0.5 m 深处,采集水样 500 mL. 水质分析指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(TDN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、溶解性总磷(DTP)、活性磷酸盐(SRP)等,其中总氮和总磷采用原水样测定,其余指标将原水样过 0.45 μm 滤膜测定. 水样预处理及分析测定方法均采用相应国家标准方法进行^[4].

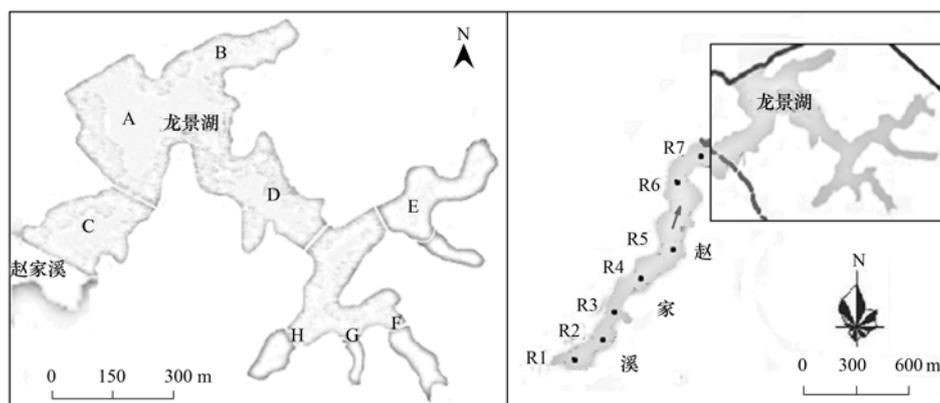


图 1 龙景湖及上游采样区示意

Fig. 1 Distribution of sampling areas in Longjing Lake and Zhaojia River

2 结果与讨论

2.1 总氮与总磷时空分布特征

龙景湖全年总氮的平均浓度为 1.42 mg·L⁻¹,

总磷的平均浓度为 0.09 mg·L⁻¹,在湖库Ⅳ类水质标准限值附近. 丰水期和平水期湖体总氮、总磷平均浓度水平低于全年均值,是夏季及春末秋初雨季多,湖体水量补给大,其浓度主要受稀释作用影响;

而枯水期总氮和总磷平均浓度有所上升,主要是湖体水量和补给水量减少,流动性和自净能力差等因素影响。

湖库主水体 A 区的部分深水区域是拦坝蓄水新建前存在的水域,是湖库新建的重要组成部分,其总氮年均质量浓度为 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷年均质量浓度为 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,波动范围分别为 $0.96 \sim 2.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.04 \sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即在湖库 IV 类水质标准限值附近波动(图 2)。质量浓度超过 IV 类水质标准的情况主要发生在 10~12 月及 1~3 月的枯水期,但超标程度均不大,总氮和总磷在枯水期的平均浓度分别超标约 5.2% 和 3.0%。4~9 月的平水期和丰水期,总氮和总磷的含量均可维持在 IV 类水质标准限值以下。A 区季节变化特征与湖库整体基本一致,枯水期湖体水位下降,总体容积减少,水体自净能力下降,呈现出总氮和总磷的水平整体较高。而丰水期和平水期湖体总容积较枯水期增加,特别是暴雨季节雨量丰沛,湖体流动性提升,稀释作用使水体自净能力有所升高,氮磷水平相较枯水期整体降低。

上游来水是湖库水体水源补给的重要来源之一,上游河流赵家溪沿程的起点处河道较窄,具有库湾特点,水质较差,随着水流方向沿程至下游,河道逐渐变宽,总氮和总磷浓度均有逐渐降低的趋势,且丰/平水期沿程逐渐降低趋势明显,而枯水期略有波动(图 3)。顺水流方向,上游河流经入湖 C 区汇入主水体 A 区,总氮浓度的年均值依次为 1.81 、 1.32 、 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷浓度的年度均值依次为 0.13 、 0.10 、 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即沿程氮磷含量:上游河流 > C 区 > A 区。随水流方向,水体的稀释作用和程度逐渐升高,C 区的开阔水体相当于上游河流入湖前的缓冲区,水质受上游来水水质直接影响^[5],汇入后对湖库水质影响明显。

湖库区 D 的开阔水体是连接主水体 A 区和各个典型库湾的过渡水体区域,总氮和总磷全年浓度平均值分别为 $1.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均在湖库 IV 类水质标准限值以内。但相较主水体区总氮含量略有升高,是由于条形水域区域毗邻的园内景区,是餐饮、码头和娱乐的聚集地,较多的人为活动累积污染物,形成的面源污染负荷输入湖体对过渡区域水体产生影响^[5]。

龙景湖水库典型的枝状库湾区水动力条件的共性特征体现在,水体环境相对封闭,水流迟缓、不易混合,水体更新周期长,易产生成分横向与纵向分布

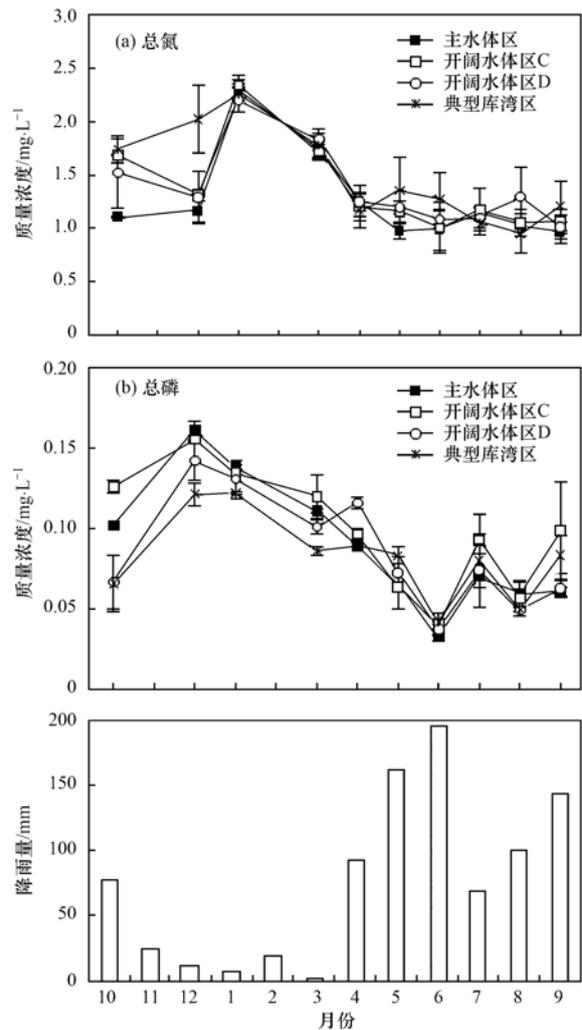


图 2 湖库总氮、总磷区域季节性变化特征

Fig. 2 Characteristics of TN and TP in Longjing Lake

不均。库湾区的这类特点相较主水体区较大的水环境容量等对水质的影响有较大不同,根据实际情况将存在此类共性且典型特征的龙景湖各个库湾区进行合并分析。库湾区总氮平均水平 $1.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高于湖库中心开阔区域,分别高出主水体 A 区和开阔水体 C 区、D 区总氮平均质量浓度的 18.3% 和 11.2%。总磷浓度和变化情况相较稳定,与 A 区及 C 区、D 区基本相似,在降雨量较大的暴雨季节 5、6 月,大量的降雨入湖稀释,总磷浓度有明显的下降。湖库典型库湾区也基本呈现出较明显的枯水期浓度较大,丰水期和平水期较小的季节性变化特点。在降雨补给较少的枯水期,库湾区水深自然变浅,库湾区域水容量变小,水体交换和稀释作用更差,水体中氮磷累积,也是枯水期氮磷浓度较大的原因之一。相较于 A 区和 C 区、D 区,其总氮浓度的波动更大,由于湖体库湾区水域的半封闭缓流特点,稀释扩散

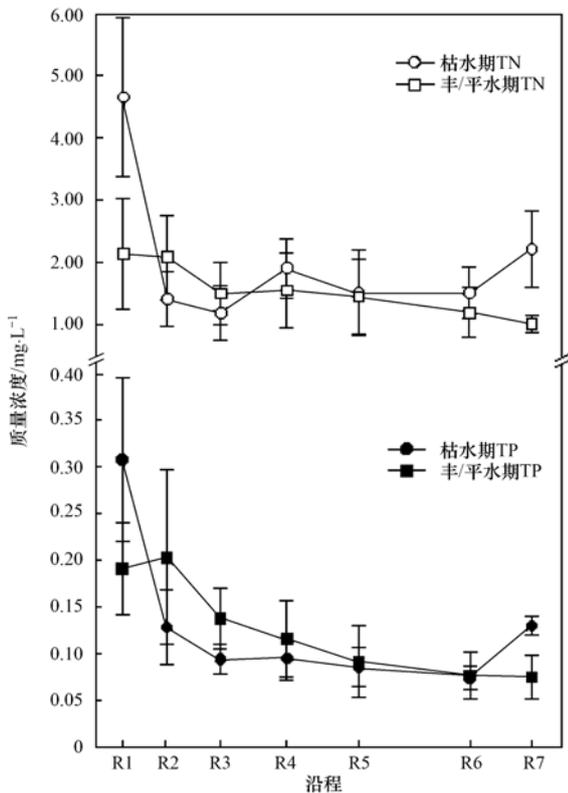


图3 上游沿程总氮、总磷变化特征

Fig. 3 Variation of TN and TP concentration along the Zhaojia River

的自净能力较差;加上沿库湾设置有园区污水管道排出口,同时库湾靠近游客活动区,此类点源和面源生活污水以库湾区水体作为受体;而处于低洼地

带的库湾区周围环湖不透水道路覆盖率高,亦接收较多地表径流冲刷带来的颗粒污染物等.

2.2 水体氮磷形态组成特征

湖体溶解态的总氮(TDN)和溶解态总磷(TDP)浓度随季节时间呈现出变化趋势,与区域TN、TP浓度变化趋势一致,即丰水期浓度较低,枯水期浓度相对高的变化特征[图4(a)、4(c)]. 同样表现出这种季节性变化特征的有 NO_3^- -N和SRP[图4(a)、4(c)];而 NH_4^+ -N的浓度对于这种变化趋势表现不及 NO_3^- -N和SRP显著,其质量浓度在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近波动,枯水期浓度极大值 $0.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图4(a)],没有超过IV类水质标准限值.

相较于溶解态氮、磷,颗粒态氮(PN)和颗粒态磷(PP)在丰水期比例较高,分别达到51.7%和72.8%[图4(b)、4(d)],是由于丰水期基本为春季和夏季,气温等各方面条件适宜藻类生长繁殖,大量生长的藻类有部分贡献^[6]. 此外,丰水期降雨发生较多,地表径流会冲刷颗粒物形成对湖体的面源输入^[7];进入枯水期,颗粒态的PON和PP浓度较丰水期分别下降了23.2%和38.5%,活性磷酸盐(SRP)占TP的质量分数则从丰水期的13.2%增至59.4%[图4(d)].

各采样区在枯水期占TN质量分数较大的溶解态氮的形态均为 NO_3^- -N,可达28.1%~49.1%[图5

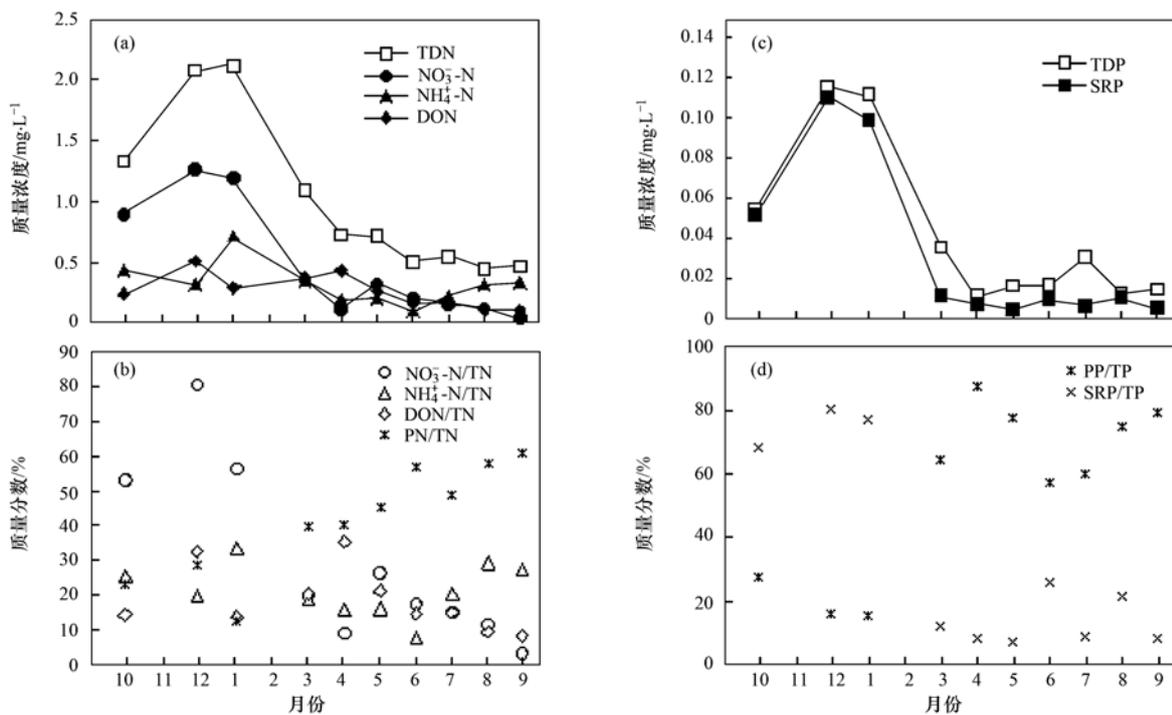


图4 氮磷不同形态分布特征

Fig. 4 Composition of nitrogen and phosphorus

(b)],是由于枯水期湖库整体水量减少,且水源补给途径可能多为地下水补给,而冬季藻类因老化和缺氧等大量死亡后,经微生物分解等作用最终形成硝酸盐累积于水体中;而进入丰水期 NO_3^- -N占TN的质量分数不超过19.9% [图5(d)],质量浓度也不超过枯水期质量浓度的一半 [图5(c)],丰水期湖库补给水源途径和补给量均增多,暴雨季节较大降雨带来的地表径流入湖补给量显著增加,同时气温转暖致动植物活动将冬季累积的硝酸盐利用,湖库整体显示出受丰水期稀释作用影响明显的特征。

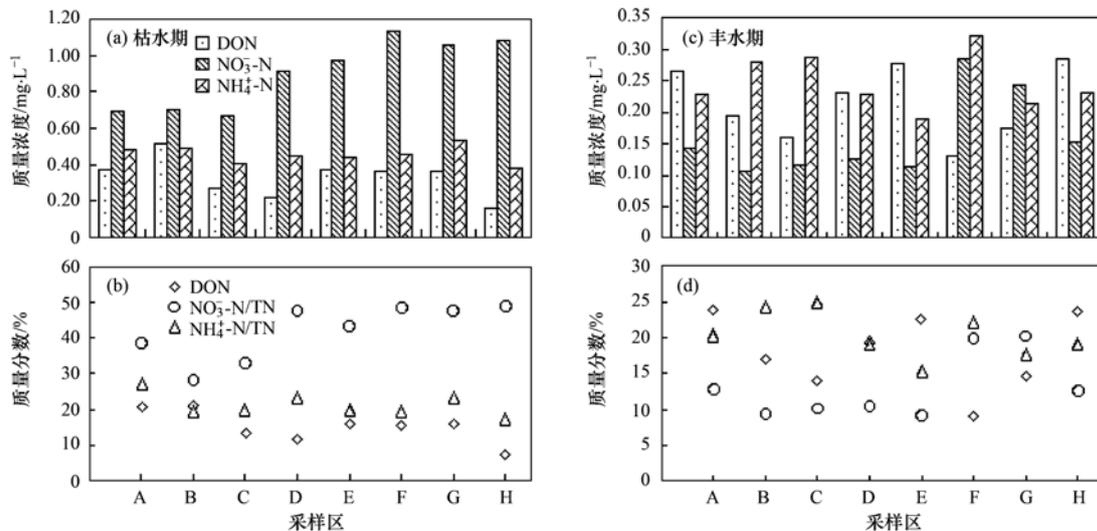


图5 溶解态氮区域分布特征

Fig. 5 Regional distribution of dissolved nitrogen

主水体A区及开阔水体C区、D区是整个湖库的中心区域和主要组成部分,其营养盐浓度的季节性变化特征与湖体情况基本一致,枯水期浓度较高而丰水期浓度相对低,其中 NH_4^+ -N的质量浓度在丰水期降低了44.4%, NO_3^- -N区域平均质量浓度降为 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图5(a)、5(c)]. 丰水期各溶解态氮的形态中, NO_3^- -N在TN占的质量分数由42.0%减少至13.1% [图5(b)、5(d)], NH_4^+ -N占TN的比例较多 [图5(d)],改变了枯水期 NO_3^- -N在TN中比例占绝对优势的情况。

丰水期的库湾B区有较高的 NH_4^+ -N浓度 [图5(c)],是其所在景区处于园区主入口附近,有较多的游客活动;库湾F区和D区的 NH_4^+ -N浓度相较其他区域高 [图5(b)],其分别设置有游船码头和园内餐饮集中区. 库湾附近景点集中、游客量大,同时设置有园区污水管道排出口,受纳来源于附近厕所、餐饮及游客活动等产生的生活污水. 园区厕所及部分餐饮生活污水主要经化粪池

NH_4^+ -N所占TN的质量分数保持在20%左右 [图5(b)、5(d)],在丰水期人为活动多, NH_4^+ -N较其他形态溶解氮占TN比例略占优 [图5(d)],但枯水期平均质量浓度 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 仍显著高于丰水期 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图5(a)、5(c)],枯水期浓度极大值未超过IV类水质标准限值. 溶解态有机氮(DON)在质量浓度和TN的贡献率上相对稳定,其质量浓度基本保持在 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近波动 [图5(a)、5(c)],占TN的质量分数的变化范围主要在15%~20%之间 [图5(b)、5(d)].

池简单处理和一体化污水处理设施处理,排入湖库湾;地表累积的人为活动污染物,在丰水期随降雨径流冲刷进入洼地地势的库湾区,形成面源污染来源. 丰水期和平水期的气温适宜,园区游客活动增多,人为因素和生活类污水的排放增多对湖库水体影响增大. 此外,园区内的绿化园林养护施肥也是龙景湖水库潜在的面源污染负荷来源。

山地地势形成的各库湾B、E、F、G、H区具有相似的周边环境条件和水力条件,水流缓慢、稀释自净能力差,接受面源污染负荷大,污染累积致营养盐浓度高于湖库主要组成部分A区和C区、D区 [图5(a)、5(c)]. 库湾区的营养盐浓度与组成,同周围的园区景点布设类型及季节变化带来的人为活动量变化等因素有关。

2.3 氮、磷营养盐关系研究

表1是龙景湖水库TN、TP及其比值结果的全年和季节性变化波动情况. 全年龙景湖水库TN浓

度介于 $0.68 \sim 2.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $(1.42 \pm 0.46) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在湖库 IV 类水质标准限值 ($1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 附近; TP 浓度变化范围 $0.03 \sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $(0.09 \pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 基本可达到湖库 IV 类水质浓度限值 ($0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 以内. 丰水期和平水期, 受雨季湖体雨水补给量大, 对营养盐

浓度稀释作用等因素影响, TN、TP 平均浓度的水平不高, 分别为 $(1.15 \pm 0.27) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(0.07 \pm 0.02) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 气温相对较低的枯水期, 湖体水量和补给水量减少, 流动性和自净能力差, TN 和 TP 的浓度上升, 平均浓度分别为 $(1.81 \pm 0.39) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.11 \pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 龙景湖水库 TN、TP 和 TN/TP 值统计结果¹⁾

Table 1 Statistics of TN, TP and TN/TP ratio in Longjing Lake

指标	项目	全年 ($n=170$)	丰水期 ($n=102$)	枯水期 ($n=68$)
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	均值 \pm S. D.	1.42 ± 0.46	1.15 ± 0.27	1.81 ± 0.39
	变化范围	$0.68 \sim 2.86$	$0.68 \sim 2.86$	$1.03 \sim 2.70$
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	均值 \pm S. D.	0.09 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.11 ± 0.03
	变化范围	$0.03 \sim 0.17$	$0.03 \sim 0.16$	$0.04 \sim 0.17$
TN/TP	均值 \pm S. D.	18.43 ± 7.88	18.61 ± 7.75	18.16 ± 8.13
	变化范围	$6.60 \sim 49.38$	$8.22 \sim 49.38$	$6.60 \sim 46.68$

1) n 为统计样本数

根据 Wetzel 提出的湖泊、水库营养状态划分标准^[8], 湖库中营养状态对应的氮磷浓度值界限分别为 $0.753 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \leq \text{TN} < 1.875 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.0267 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \leq \text{TP} < 0.0844 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过此 TN、TP 对应上界限范围的则属富营养状态. 图 6 为龙景湖水库丰水

期和枯水期 TN、TP 质量浓度分布情况. 在龙景湖 TN 和 TP 的样本中, 分别有 80.6%、51.2% 的 TN、TP 质量浓度在中营养状态湖库对应浓度界限以内, 而超过富营养状态对应浓度值的 TN、TP 分别占 18.8%、48.2%, 龙景湖水库总体在中营养状态.

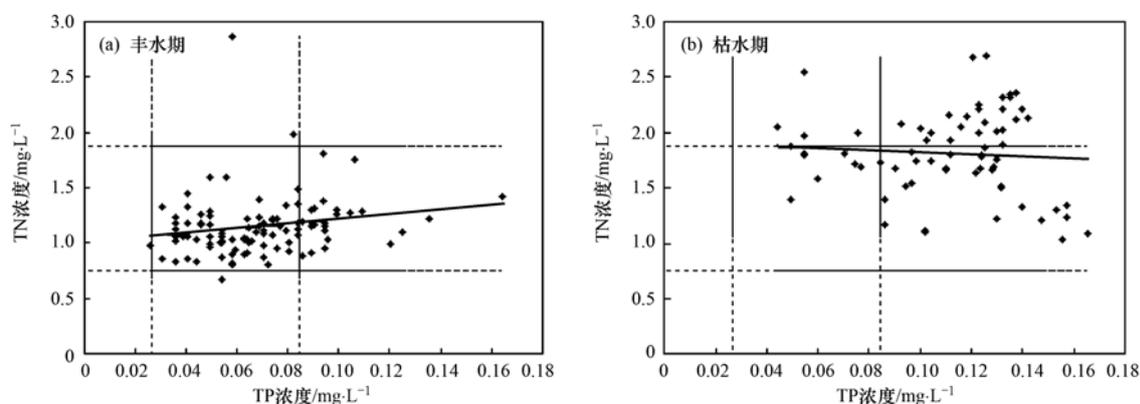


图 6 龙景湖水库 TN、TP 浓度分布

Fig. 6 TN and TP distribution in Longjing Lake

TN/TP 是对湖库营养结构的关键表征, 可以一定程度上反映营养物输入负荷对水体营养结构的影响, 同时也是水中浮游生物种群营养结构特点的重要影响因素和体现, 对掌握湖库限制性营养物类型及季节性变化以便对浮游生物生长情况进行调控有重要意义^[8~12]. 龙景湖全年 TN/TP 的均值为 18.429 ± 7.883 , 变化范围为 $6.6 \sim 49.4$. 依据 Michael 等^[13] 提出的水中营养物限制性分类标准, 质量比 $\text{TN}/\text{TP} \geq 22.6$ 时, 磷为主要限制因素; $\text{TN}/\text{TP} \leq 9.0$ 时, 氮为主要限制因素. 就龙景湖全年营养物限制情况而言, 磷为主要限制因素

的时段为 21.2%, 氮为 5.3%, 其余时段为氮、磷双重限制时期. TN/TP 处于磷限制状态的样本数据丰水期、枯水期分别有 8.8%、16.2%, 而处于氮限制状态的样本数据在丰水期、枯水期分别有 2.9%、24.5%, 湖库枯水期相较于丰水期受氮、磷因素影响限制较大.

表 2 的相关性分析结果显示, 在 TN 与各溶解态氮的相关关系中, TN 与硝氮、氨氮呈正相关关系, 通过关系系数可发现硝氮对于 TN 的增长贡献大于氨氮, 湖库整体呈氧化性环境^[14], 同时硝氮和氨氮间也有显著正相关关系. TN 与 TP 呈显著正相

关系,湖库氮磷的输入和输出途径基本一致^[10]. 总磷、活性磷酸盐也与总氮、硝氮和氨氮相互之间呈现出显著的正相关关系. TN/TP 与 TN 呈显著正

相关关系,与 TP 呈显著负相关关系,也显示出湖库氮磷营养物中没有显著的限制因素^[15],需综合调控 TN/TP 并削减氮磷营养盐含量.

表 2 龙景湖水库部分监测指标相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of partial monitoring indicators in Longjing Lake

	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DON	SRP	TP	TN	TN/TP
NO ₃ ⁻ -N	1						
NH ₄ ⁺ -N	0.413 **	1					
DON	0.198 *	—	1				
SRP	0.849 **	0.492 **	0.206 *	1			
TP	0.514 **	0.359 **	0.206 *	0.626 **	1		
TN	0.633 **	0.433 **	—	0.484 **	0.431 **	1	
TN/TP	—	—	—	—	-0.632 **	0.315 **	1

1) ** 表示显著性水平为 0.01; * 表示显著性水平为 0.05

3 结论

(1) 龙景湖水库整体总氮和总磷的年平均质量浓度分别为 $(1.42 \pm 0.46) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.09 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在湖库 IV 类水质标准限值附近. 湖库主水体区、开阔水体区和库湾区水质存在差异. 季节性水量补给变化影响水体总氮与总磷浓度.

(2) 颗粒态的氮磷占总氮、总磷的质量分数在丰水期大于枯水期. 溶解态氮磷营养盐中, 硝氮占总氮质量分数枯水期大于丰水期, 质量浓度丰水期不超过枯水期的一半; 氨氮占总氮的质量分数保持在 20% 左右; 溶解态有机氮占总氮质量分数的变化范围主要在 15% ~ 20%; 活性磷酸盐占总磷的质量分数枯水期达 59.4%. 硝氮和活性磷酸盐表现出与总氮、总磷类似的季节性变化特征.

(3) 丰水期和平水期龙景湖景区游客增多, 厕所、餐饮、游客活动等产生的污水, 对湖库水体中不同形态溶解氮的比例构成影响增大, 氨氮占总氮的比例上升, 改变了枯水期硝氮在总氮中比例占绝对优势的情况.

(4) 氮磷比全年均值为 18.43 ± 7.88 , 多数处于氮、磷营养物为限制因素交替发生的中间状态, 枯水期相较于丰水期受氮、磷因素影响限制大.

参考文献:

[1] 刘景红, 张晟, 陈玉成, 等. 重庆市水库富营养化调查及评价[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 131-134.
 [2] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 64-69.
 [3] 李立青, 单保庆, 赵建伟. 山地城市地表径流源区水质特征监测研究[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3397-3403.

[4] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
 [5] 潘延安, 雷沛, 张洪, 等. 重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1727-1734.
 [6] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 341-345.
 [7] Taylor G D, Fletcher T D, Wong T H F, et al. Nitrogen composition in urban runoff-Implications for stormwater management[J]. Water Research, 2005, 39(10): 1982-1989.
 [8] Wetzel R G. Limnology: Lakes and river ecosystems [M]. United States: Academic Press, 2001.
 [9] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3038-3045.
 [10] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 509-517.
 [11] Downing J A, Mcauley E. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes[J]. Limnology & Oceanography, 1992, 37(5): 936-945.
 [12] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
 [13] Michael F P, Julianne D, Pia H M, et al. Effects of modified nutrient concentrations and ratios on the structure and function of the native phytoplankton community in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA [J]. Aquatic Ecology, 2002, 36: 371-385.
 [14] 范俊楠, 赵建伟, 朱端卫. 湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4924-4931.
 [15] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(6): 1213-1223.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行