

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应

邱晓鹏, 黄廷林*, 曾明正, 史建超, 曹占辉

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为探究极端厄尔尼诺事件对分层型水库夏季水质的影响, 分别于正常年(2012 年)和厄尔尼诺年(2015 年)的 5~8 月对枣庄周村水库主库区和入库径流的物理和化学指标进行了监测。结果表明, 周村水库正常年夏季降雨量明显高于厄尔尼诺年夏季; 正常年夏季水位由 124.26 m 上升至 127.14 m, 恒温层厚度增加 3.1 m; 而厄尔尼诺年夏季水位由 121.65 m 下降至 119.46 m, 恒温层厚度减少 3.2 m。周村水库入库径流属表层流, 其营养盐浓度明显高于库区变温层。正常年夏季外源营养盐的汇入导致库区变温层总氮由 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $2.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 硝态氮由 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $1.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷由 $0.023 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $0.088 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而厄尔尼诺年夏季库区变温层营养盐浓度变化不大。厄尔尼诺年夏季恒温层水体还原性污染物浓度明显高于正常年同期水平, 其中铁、锰、氨氮和硫化物浓度的最大值分别为 0.38、1.36、2.36 和 $1.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均超过地表水 III 类水质标准。极端厄尔尼诺事件对周村水库夏季变温层水体营养盐浓度和恒温层水体污染物浓度均有较大的影响。

关键词: 分层; 厄尔尼诺; 营养盐; 恒温层; 温跃层

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0547-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201608001

Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer

QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin*, ZENG Ming-zheng, SHI Jian-chao, CAO Zhan-hui

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Global warming can intensify the El Niño phenomenon that recurs every 2-7 years, which will lead to a great interannual variability of climate and may induce the deterioration of the water quality of reservoirs. To study the influence of the extreme El Niño events on the water quality of stratified reservoirs during summer, field surveys were conducted in Zhoucun Reservoir and its inflow rivers from May to August in a normal year (2012) and a strong El Niño year (2015). Temporal variations of physical and chemical index were investigated during monitoring. The results showed that the Zhoucun Reservoir was stratified during the study period. The precipitation in the summer of the normal year was significantly higher than that in the El Niño year at the same period. In the summer of the normal year, the water level increased from 124.26 m to 127.14 m and the hypolimnion thickness increased by 3.1 m. However, in 2015, the rapid decrease of the water level from May to August (from 121.65 m to 119.46 m) led to the decrease of the hypolimnion thickness (by 3.2 m). The inflow rivers belonged to surface current and its nutrients concentrations were obviously higher than those in the epilimnion. The inflow nutrients loads increased significantly in the summer of the normal year, as a result, total nitrogen increased from $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $2.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, nitrate increased from $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and total phosphorus increased from $0.023 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $0.088 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the lacustrine zone of the reservoir. In contrast, the nutrients concentrations changed little in the summer of the El Niño year due to the decrease in runoff. Nonetheless, the reducing pollutants concentrations of the hypolimnion in the El Niño year were significantly higher than those in the normal year, which may be due to the temporal variations of hypolimnion thicknesses. The maximum concentrations of iron, manganese, ammonium and sulfide in the summer of the El Niño year were 0.38, 1.36, 2.36 and $1.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. All these index exceeded the standards for surface water Class III. We conclude that the extreme El Niño event has an apparent influence on the nutrients concentrations in the epilimnion and the pollutants concentrations in the hypolimnion in Zhoucun Reservoir.

Key words: stratification; El Niño; nutrients; hypolimnion; thermocline

湖库作为人们重要的水源地,其夏季供水水质发生恶化的事件经常被报道。因此,湖库夏季水质演变规律正在得到越来越多的关注^[1,2]。热分层是影响湖库夏季水质的关键因素之一^[3,4]。首先,分层期间水体温跃层内存在较大的垂向密度梯度,可以阻止变温层水体和恒温层水体之间气体以及溶解性物质的交换^[5]。因此,热分层形成后湖库恒温层水体的溶解氧会因得不到补充而逐渐下降。特别是

在富营养水库中,由于沉积物的耗氧速率较高,恒温层会迅速进入厌氧状态^[6,7]。在厌氧状态下,沉积物会释放大量的还原性污染物,如氨氮、铁、锰及硫化物等^[2]。由于温跃层的阻隔,这些还原性污染

收稿日期: 2016-08-01; 修订日期: 2016-09-06

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02)

作者简介: 邱晓鹏(1988~),男,博士研究生,主要研究方向为水源水质污染与富营养化控制, E-mail: qxp2015@163.com

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

物在恒温层水体中发生富集,造成湖库局部水体水质污染^[8]。此外,热分层还为藻类的大量繁殖提供了良好的水力条件^[9, 10]。当夏季湖库水体营养盐充足时,分层型湖库容易暴发水华,从而造成水质恶化^[11, 12]。

在全球变暖的大趋势下,气候变化对分层型湖库的水质演变的影响正得到越来越多的关注^[13, 14]。周洪华等^[15]研究了60 a(1951~2011年)博斯腾湖的水量和水质对气候变暖的响应;Wang等^[16]通过水动力学模型探讨了广东流溪河水库热力结构对气候和水文条件变化的响应;Zhang等^[17]通过61 a(1953~2013年)的监测数据分析了气候变暖对千岛湖溶解氧分层和热力结构的影响;Sahoo等^[18]通过一维数值模型(LCM)预测了未来气候变暖对Tahoe湖水质的影响;Kraemer等^[19]通过26个湖泊30 a(1970~2010年)的水温数据分析了气候变暖对不同类型湖库热分层的影响。目前,国内外研究主要集中在探讨气候变暖的长期变化对湖库水质和生态的直接影响。然而,气候变暖还会造成极端气候(如极端厄尔尼诺事件)发生的概率增加^[20]。目前有关湖库夏季水质变化对极端厄尔尼诺事件的响应的研究较少。

厄尔尼诺现象是太平洋表层水温异常升高的一种自然现象,周期为2~7 a,可通过大气环流对全球气候产生较大的影响,是造成全球气候年际变化的主要因素^[21]。我国因位于太平洋西海岸,东部地区气候受厄尔尼诺现象的影响较大^[22]。在厄尔尼诺年,降雨条件会发生较大的变化,湖库营养盐外源负荷也随之改变。此外,降雨条件的变化还会引起湖库水位的大幅波动,从而影响湖库热分层结构^[23~25]。本研究以枣庄周村水库为例,通过对比正常年(2012年)与厄尔尼诺年(2015年)夏季水质演变规律,着重探讨了极端厄尔尼诺事件对周村水库变温层水体营养盐以及恒温层水体还原性污染物的影响。本研究的结果对湖库的运行管理和水资源的可持续利用有一定的理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

周村水库位于山东省枣庄市东北角,是一个集供水、灌溉、防洪、发电多种功能为一体的中型水库。周村水库防洪水位为128 m,水库总库容为8 404万 m³。在水位128 m的条件下,库区表面积为6.5 km²,平均水深为13 m。周村水库属于季节性单

循环水库,4~10月为分层期,11月~次年3月为混合期。周村水库属于温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。丰水期为6~8月,枯水期为2~5月。水库流域面积为121 km²,水库有3条入库径流,分别为下拾河、徐洼河和西伽河。其中下拾河和徐洼河上游周边有居民和养殖场,水质遭受了一定程度的污染。

1.2 样品采集与监测

在2012年和2015年的5~8月分别对周村水库的主库区和入库径流进行取样分析。主库区取样间隔为一周一次,入库径流的取样间隔为两周一次。根据周村水库的地形特征,设置主库区和入库径流的取样点位置如图1所示。主库区的采样水深为0.5、2.5、5.0、10、12.5 m和底层(不同水位条件水深不同)。主库区水温(*T*)、溶解氧(DO)的垂向分布采用哈希HQ 30 d单路输入多参数数字化分析仪进行原位监测,垂向监测间隔为1 m,监测时间为10:00~12:00。入库径流浊度的检测采用WGZ-200浊度计。水样的分析在取完样24 h内完成,化学指标的检测参照文献^[26],检测指标包括总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、铁(Fe)、锰(Mn)及硫化物(S)。其中总氮的分析方法为碱式过硫酸钾消解-紫外分光光度法,硝态氮的分析方法为紫外分光光度法,氨氮采用纳氏试剂光度法,总磷采用钼锑抗分光光度法,铁采用邻菲罗啉分光光度法,锰采用高碘酸钾氧化光度法,硫化物采用对氨基二甲基苯胺光度法。

1.3 数据处理与分析

水力停留时间为水库出库量与水库库容的比值。水位、降雨量、入库和出库径流量的数据源于枣庄市遥测信息查询系统。温跃层为温度梯度大于1℃·m⁻¹的水层。本研究定义变温层厚度为温跃层上界面水深,温跃层厚度为温跃层上、下界面水深之差,恒温层厚度为库底水深与温跃层下界面水深之差,恒温层深度为温跃层下界面水深。本研究根据周村水库温跃层的位置,取0.5、2.5和5.0 m处水质指标的均值代表变温层的水质状况,取10 m、12.5 m及底层水质指标的均值代表恒温层的水质状况。

为评估入库径流对周村水库主库区水质的影响,入库径流化学指标的月均值计算公式如下:

$$\bar{c} = \frac{\sum (q_{ij} \cdot c_{ij})}{\sum q_{ij}}$$

式中, \bar{c} 为某指标的月均值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), q 为入库河流的径流量 ($\text{m}^3\cdot\text{month}^{-1}$), c 为监测值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), i 代表取样数, j 代表 3 条入库河流。

数据处理与分析采用 Microsoft Office 2013, 绘图采用 Origin 2016。

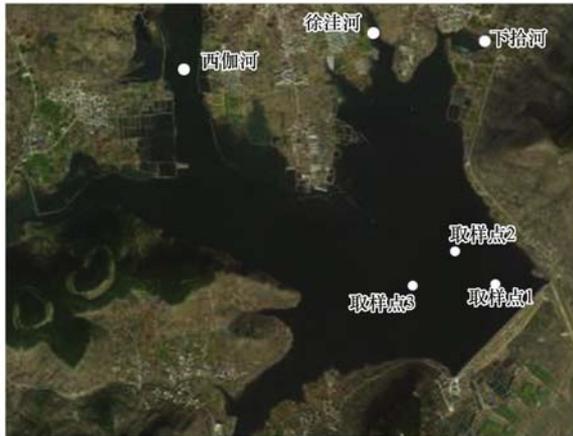


图1 周村水库主库区和入库径流取样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in Zhoucun Reservoir and inflow rivers

2 结果与分析

2.1 水文情况

由图 2 可知,周村水库正常年 7、8 月的降雨量明显高于厄尔尼诺年的同期水平。2012 年周村水库 7、8 月降雨量分别为 271 mm 和 200.5 mm, 而 2015 年 7、8 月降雨量仅为 59.5 mm 和 124.5 mm。2012 年 7、8 月入库径流量分别为 1 930 万 m^3 和 2 410 万 m^3 , 而 2015 年 7、8 月仅为 380 万 m^3 和 490 万 m^3 。2012 年出库流量也远高于 2015 年同期, 这主要是由于周村水库要控制水位不能超过洪水水位线。周村水库 5~8 月水力停留时间为 45.4~1 037.5 d。其中, 2015 年 7、8 月水力停留时间分别为 212.9 d 和 175.6 d, 明显高于 2012 年 7、8 月的 45.4 d 和 149 d。

2.2 热分层结构和溶解氧

由图 3 可知,周村水库 5~8 月均处于热分层状态。其中表层水温的变化范围为 18~31 $^{\circ}\text{C}$, 底层水温的变化范围为 8~13 $^{\circ}\text{C}$ 。对比两年水温变化可知, 正常年和厄尔尼诺年同期水温相近, 表层水温均在 5~8 月呈逐渐升高趋势, 并在 8 月达到最大值; 而底层水温在 5~8 月也有升高的趋势, 但是变化幅度远小于表层水温。

溶解氧的垂向分布与水温的垂向分布相似, 也呈分层状态。5~8 月, 周村水库表层水体始终处于

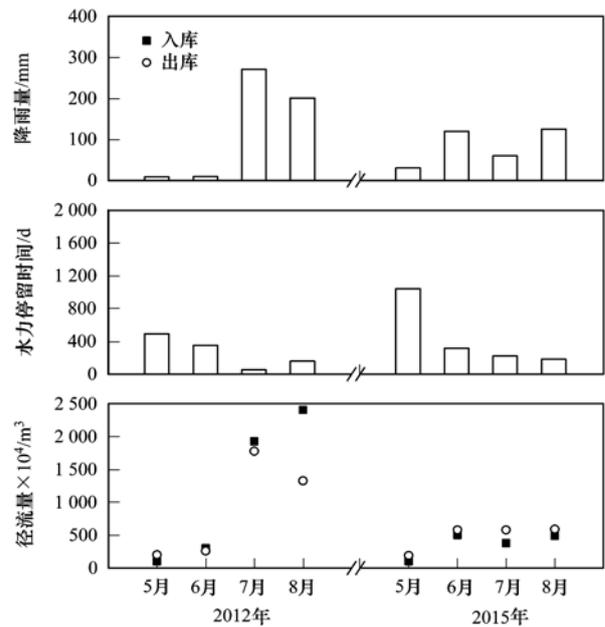


图2 2012年和2015年5~8月周村水库水文情况

Fig. 2 Hydrological conditions in Zhoucun Reservoir from May to August in 2012 and 2015

好氧状态, 溶解氧的变化范围为 6.8~14.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。对比两年溶解氧变化可知, 正常年和厄尔尼诺年 5 月初期恒温层水体均处于缺氧状态, 而后恒温层水体溶解氧继续下降, 至 5 月中旬恒温层水体完全进入厌氧状态。周村水库厌氧区范围在正常年 7、8 月变化不大, 范围为 108~118 m; 而在厄尔尼诺年 7、8 月厌氧区范围随着水位的降低而缩小。2015 年 8 月底周村水库厌氧区范围仅为 108~110.3 m。

周村水库温跃层位置的变化与水位的变化趋势一致(图 4)。2012 年 5、6 月水位由 124.79 m 下降至 124.26 m, 7、8 月由 124.26 m 上涨到 127.14 m; 而 2015 年 5~8 月水位持续下降, 由 121.65 m 下降至 119.46 m。2012 年 5、6 月随着水位的下降, 温跃层上界面由 120.8 m 降至 117.9 m, 下界面由 115.8 m 降至 112.9 m; 7、8 月水位上涨, 跃层位置也随之上涨, 至 8 月底, 温跃层上、下界面的高程分别上升至 121.0 m 和 116.0 m, 恒温层厚度增加了 3.1 m。2015 年 5~8 月周村水库水位持续下降, 温跃层位置也随之下移, 其中温跃层上界面由 118.1 m 降至 113.9 m, 下界面由 113.1 m 降至 109.9 m, 恒温层厚度减少了 3.2 m。研究期间恒温层的厚度随着水位的升降而增减, 恒温层的深度始终保持在 9~10 m。变温层厚度的变化范围为 3~6 m, 其受光照、风力等因素的影响较大。

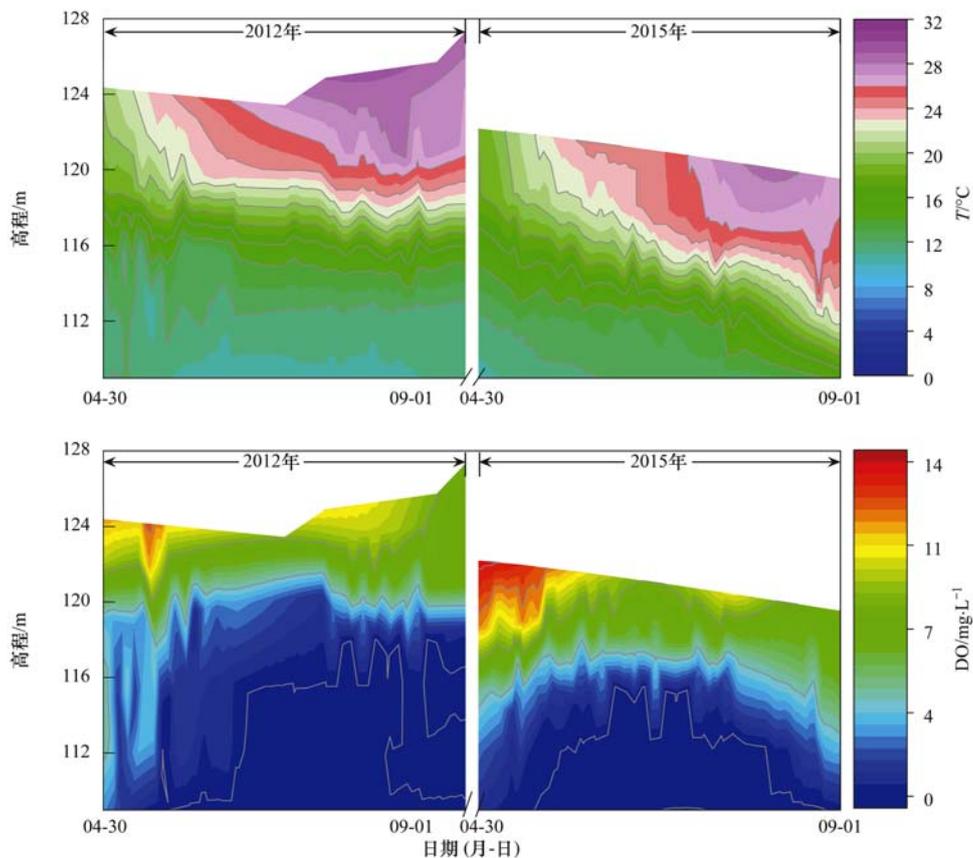


图3 2012年和2015年5~8月周村水库水温和溶解氧的时间变化和垂向变化

Fig. 3 Temporal and vertical variations of water temperature and dissolved oxygen in Zhoucun Reservoir from May to August in 2012 and 2015

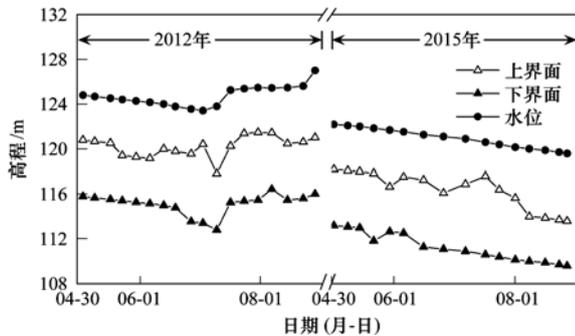


图4 2012年和2015年5~8月周村水库温跃层位置变化

Fig. 4 Temporal variations of thermocline position in Zhoucun Reservoir from May to August in 2012 and 2015

2.3 变温层营养盐

由图5可知,在2012的5~7月周村水库变温层水体总氮浓度由 $2.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 7、8月随着降雨量的增大,总氮浓度迅速上升,至8月底总氮浓度升至 $2.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 2015年的5、6月总氮浓度也呈下降趋势,但7、8月总氮浓度并未像正常年一样上升,依然呈下降趋势. 厄尔尼诺年5~8月总氮浓度的变化范围为 $0.30 \sim 1.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

周村水库变温层硝态氮与总氮的变化规律相似. 正常年和厄尔尼诺年在5、6月硝态氮浓度均呈下降趋势,2012年硝态氮由 $2.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2015年由 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 但是2012年7月中旬,随着雨季的来临,硝态氮的浓度随之增加,到2012年8月底,硝态氮升至 $1.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而2015年7、8月硝态氮浓度始终处于较低水平,在 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

周村水库正常年与厄尔尼诺年夏季变温层水体总磷的变化规律也不同. 2012年的5、6月总磷处于较低水平,浓度范围为 $0.023 \sim 0.051 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在7、8月,总磷也呈上升趋势,与总氮和硝态氮类似. 2012年总磷最高达 $0.088 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而在厄尔尼诺年,总磷浓度在5~8月变化不大,且始终处于较高水平,变化范围为 $0.054 \sim 0.087 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.4 恒温层还原性污染物

由图6可知,周村水库恒温层内还原性污染物浓度在厄尔尼诺年的5、6月与正常年同期差别不大,但是其7、8月的浓度要高于正常年的同期水平. 恒温层铁的浓度在正常年的夏季没有明显的升

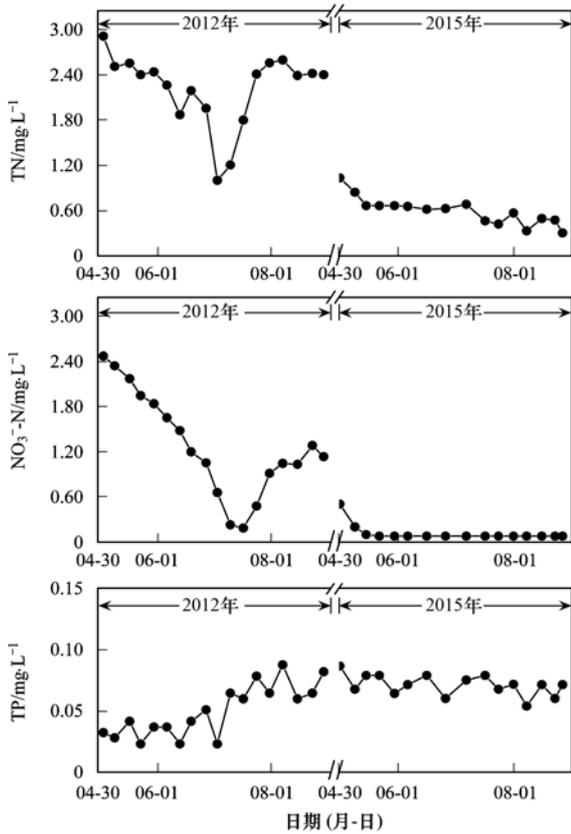


图5 2012年和2015年5~8月周村水库变温层营养盐变化
Fig. 5 Temporal variations of nutrients in the epilimnion of Zhoucun Reservoir from May to August in 2012 and 2015

高,浓度变化范围为0.07~0.22 mg·L⁻¹,而在厄尔尼诺年最高升至0.38 mg·L⁻¹. 恒温层锰浓度的明显升高均始于5月中旬,2012年和2015年5~6月锰浓度的差别不大,变化范围分别为0.085~0.471

mg·L⁻¹和0.021~0.556 mg·L⁻¹. 2012年7、8月锰的浓度增长速度明显低于2015年7、8月. 2012年锰最高浓度为0.752 mg·L⁻¹,而2015则高达1.365 mg·L⁻¹. 恒温层氨氮的浓度在5月初均已经有较明显的上升趋势,在正常年的7月中旬至8月底,氨氮浓度变化不大,在1.90 mg·L⁻¹左右徘徊. 而厄尔尼诺年8月氨氮浓度继续上升,浓度最高升至2.36 mg·L⁻¹. 恒温层硫化物的浓度均在6月中旬开始明显升高,厄尔尼诺年硫化物浓度的增长速率明显高于正常年. 2012年硫化物的最高浓度为1.02 mg·L⁻¹,而2015年则高达1.67 mg·L⁻¹. 由地表水环境质量标准(GB 3838-2002)可知,Ⅲ类水体铁、锰、硫化物和氨氮的浓度阈值分别为0.3、0.1、0.2和1.0 mg·L⁻¹. 厄尔尼诺年周村水库夏季恒温层水体水质严重超标.

2.5 入库径流物理化学指标

周村水库夏季入库径流物理化学指标如表1所示. 周村水库入库径流7、8月水温的变化范围为24.7~25.5℃,与周村水库变温层水体水温相近(图3). 此外,入库径流的浊度较低(<4.0 NTU),因此周村水库入库径流的密度与主库区变温层水体的密度相近,属于表层流^[27]. 周村水库入库径流7、8月总氮浓度和硝态氮浓度的变化范围分别为3.42~8.35 mg·L⁻¹和2.88~7.22 mg·L⁻¹,明显高于主库区变温层总氮和硝态氮的浓度,0.30~2.91 mg·L⁻¹和0.08~2.47 mg·L⁻¹; 入库径流总磷的浓度范围为0.055~0.074 mg·L⁻¹.

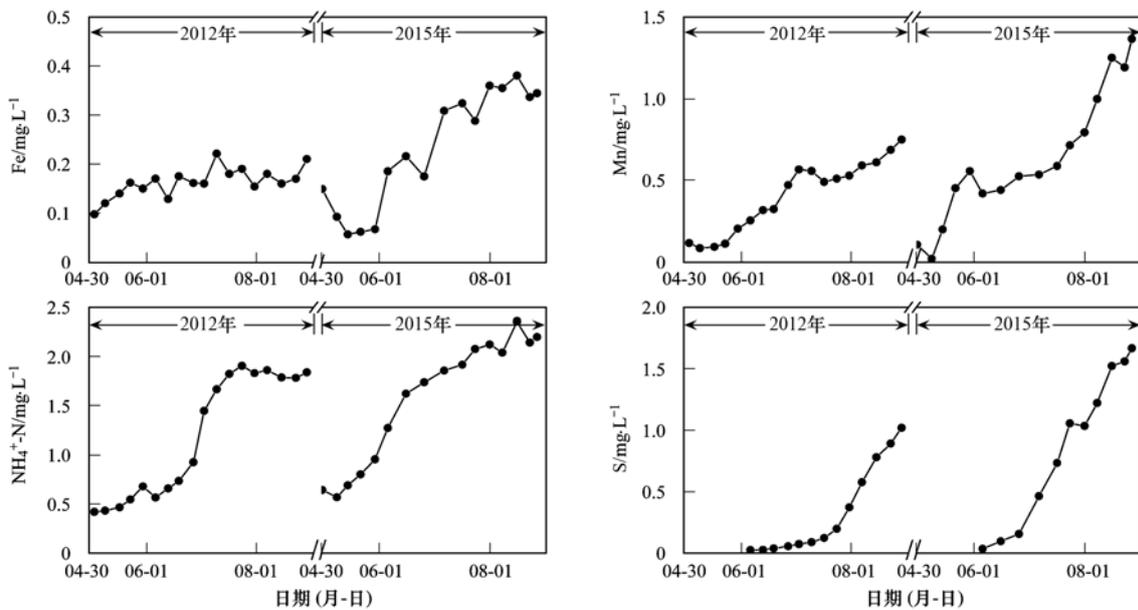


图6 2012年和2015年5~8月周村水库恒温层还原性污染物变化

Fig. 6 Temporal variations of reducing pollutants in the hypolimnion of Zhoucun Reservoir from May to August in 2012 and 2015

表 1 2012 年和 2015 年周村水库 7、8 月入库径流物理化学指标

Table 1 Physical and chemical conditions in the inflow rivers in July and August in 2012 and 2015

年份	月份	水温 /°C	溶解氧 /mg·L ⁻¹	浊度 /NTU	总氮 /mg·L ⁻¹	硝态氮 /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹
2012	7	24.7	8.28	3.9	8.35	7.22	0.074
	8	25.3	7.96	3.3	6.46	5.89	0.065
2015	7	24.9	8.44	2.3	4.87	3.62	0.069
	8	25.5	8.97	2.1	3.42	2.88	0.055

3 讨论

自 2014 年开始, 全球各地出现厄尔尼诺现象, 并在 2015 年达到高潮, 成为极端厄尔尼诺事件^[28, 29]. 厄尔尼诺年我国北方通常会出现大旱天气, 而南方则容易发生洪涝灾害^[22]. 周村水库位于淮河流域, 在厄尔尼诺事件下容易出现高温干旱气候^[30]. 周村水库 2015 年夏季降雨量明显低于 2012 年同期水平(图 2). 已有研究表明, 较大、较集中的降雨会形成较大的入库径流量^[31]. 因此, 正常年(2012 年)7、8 月的入库径流量高于厄尔尼诺年(2015 年)同期水平. 在正常年的 7、8 月, 周村水库水位随着降雨量的增加而升高. 但在厄尔尼诺年的夏季, 为满足对枣庄的供水需求, 周村水库出库流量并不会随着入库流量的减少而大幅降低, 这就造成水库出库流量和蒸发量之和大于入库流量, 从而使得 2015 年 5~8 月水位持续降低.

极端厄尔尼诺事件对周村水库变温层水体营养盐浓度有较大的影响. 周村水库 5、6 月出现了总氮和硝态氮持续降低的现象. 张春华等^[32]研究表明, 周村水库表层沉积物的反硝化作用是导致水体氮元素减少的重要因素. 此外, 较长的水力停留时间有利于水体中反硝化作用对硝态氮的去除^[33, 34]. 周村水库水力停留时间较长, 最小值高达 45d, 为库区水体反硝化作用提供了有利条件. 硝态氮是周村水库氮元素的主要存在形式, 硝态氮浓度的大幅降低会导致总氮浓度的降低. 特别是在厄尔尼诺年的 7、8 月, 周村水库水力停留时间明显高于正常年的同期水平, 这使得厄尔尼诺年周村水库除氮作用更强. 由表 1 可知, 周村水库入库径流属于表层流, 且入库径流营养盐浓度较高. 因此, 在正常年的夏季, 由于入库径流量的增加, 外源营养盐负荷增加, 导致周村水库变温层水体氮、磷等营养盐浓度同时增加. 而在厄尔尼诺年的夏季, 周村水库入库径流量较小, 入库径流对周村水库营养盐水平影响较小, 因此厄尔尼诺年夏季氮磷浓度均变化不大. 而厄尔尼诺年 5、

6 月周村水库总磷浓度高于正常年, 可能是由于水库水位下降, 水体的浓缩作用所致. 这与 Sánchez-Carrillo 等^[35]在 Álvaro Obregón 水库观察到的现象相似.

在厄尔尼诺年的 5~8 月, 周村水库水位持续降低, 导致恒温层的厚度随之降低. 这主要是因为温跃层下界面水深不会随着湖库水位的变化而变化. Hudson 等^[23]研究表明 Diefenbaker 湖夏季的混合深度在正常年和干旱年相近; Baldwin 等^[24]研究表明 Hume 湖变温层厚度始终保持在 6 m 左右, 当水位下降时, 变温层厚度并没有发生变化, 而恒温层厚度随水位下降而减少; Naselli-Flores 等^[25]研究表明夏季水位的下降导致了温跃层高程的下移, 而混合层厚度不变. 这均与周村水库厄尔尼诺年(2015 年)夏季温跃层的垂向迁移现象相似.

周村水库厄尔尼诺年 7、8 月恒温层污染物(如铁、锰、硫化物、氨氮)浓度均高于正常年同期水平. 这可能是由于温跃层的垂向迁移造成的. 厄尔尼诺年温跃层上、下界面水深随着水位的下降而下移, 恒温层厚度也随之减少. 而在正常年的 7、8 月, 随着雨季的来临, 周村水库水位上涨, 温跃层上、下界面高程随之上移, 恒温层的厚度也随之增加. 恒温层厚度的增加表明恒温层水体容积增大, 这对水库恒温层内的污染物浓度起到稀释作用, 导致正常年 7、8 月恒温层污染物浓度的增长速率小于厄尔尼诺年同期水平.

4 结论

(1) 正常年周村水库夏季降雨量较大, 水位上涨, 恒温层容积增加; 而厄尔尼诺年夏季水库水位持续降低恒温层容积减少.

(2) 周村水库夏季入库径流属表层流, 正常年外源营养盐的汇入使变温层氮磷浓度同时升高, 其中总氮由 1.00 mg·L⁻¹ 升高至 2.60 mg·L⁻¹, 硝态氮由 0.19 mg·L⁻¹ 升高至 1.28 mg·L⁻¹, 总磷由 0.023 mg·L⁻¹ 升高至 0.088 mg·L⁻¹. 极端厄尔尼诺事件

导致周村水库夏季外源营养盐负荷减少, 入库径流对变温层营养盐的影响变小. 厄尔尼诺年夏季变温层总氮、硝态氮和总磷的浓度分别为 $0.30 \sim 1.03$ 、 0.1 和 $0.054 \sim 0.087 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 周村水库夏季恒温层污染严重, 正常年铁、锰、氨氮和硫化物的浓度分别为 0.22 、 0.75 、 1.90 和 $1.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而厄尔尼诺年分别高达 0.38 、 1.36 、 2.36 和 $1.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 明显高于正常年同期水平.

参考文献:

- [1] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(9): 1477-1485.
Xia P H, Lin T, Li C X, *et al.* Features of the water column stratification and the response of water quality of Hongfeng Reservoir in Guizhou, China[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(9): 1447-1485.
- [2] 刘树元, 郑晨, 袁琪, 等. 台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3702-3708.
Liu S Y, Zheng C, Yuan Q, *et al.* Analysis on the variation characteristics of iron and manganese concentration and its genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province [J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3702-3708.
- [3] 张垒, 李秋华, 黄国佳, 等. 亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 438-447.
Zhang L, Li Q H, Huang G J, *et al.* Seasonal stratification and eutrophication characteristics of a deep reservoir, Longtan Reservoir in subtropical area of China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 438-447.
- [4] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1337-1344.
Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir-Zhoucun Reservoir in north of China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [5] Moreno-ostos E, Marcé R, Ordóñez J, *et al.* Hydraulic management drives heat budgets and temperature trends in a Mediterranean Reservoir [J]. International Review of Hydrobiology, 2008, **93**(2): 131-147.
- [6] 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正. 溶解氧对湖库热分层和富营养化的响应——以枣庄周村水库为例[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1547-1553.
Qiu X P, Huang T L, Zeng M Z. Responses of dissolved oxygen on thermal stratification and eutrophication in lakes and reservoirs-an example in Zhoucun Reservoir in Zaozhuang City [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1547-1553.
- [7] Foley B, Jones I D, Maberly S C, *et al.* Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication [J]. Freshwater Biology, 2012, **57**(2): 278-289.
- [8] Elçi S. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality [J]. Limnology, 2008, **9**(2): 135-142.
- [9] Chung S W, Imberger J, Hipsey M R, *et al.* The influence of physical and physiological processes on the spatial heterogeneity of a *Microcystis* bloom in a stratified reservoir [J]. Ecological Modelling, 2014, **289**: 133-149.
- [10] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3046-3050.
Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [11] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2061-2069.
Zhang L, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- [12] 施玮, 吴和岩, 赵耐青, 等. 淀山湖水水质富营养化和微囊藻毒素污染水平[J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 55-61.
Shi W, Wu H Y, Zhao N Q, *et al.* Eutrophication and pollution level of microcystin in Dianshan Lake [J]. Environmental Science, 2005, **26**(5): 55-61.
- [13] 张晨, 来世玉, 高学平, 等. 气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 691-700.
Zhang C, Lai S Y, Gao X P, *et al.* A review of the potential impacts of climate change on water environment in lakes and reservoirs [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(4): 691-700.
- [14] Visser P M, Verspagen J M H, Sandrini G, *et al.* How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms [J]. Harmful Algae, 2016, **54**: 145-159.
- [15] 周洪华, 李卫红, 陈亚宁, 等. 博斯腾湖水盐动态变化(1951-2011年)及对气候变化的响应[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 55-65.
Zhou H H, Li W H, Chen Y N, *et al.* Water-salt succession patterns (1951-2011) and its response to climate change in Lake Bosten [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(1): 55-65.
- [16] Wang S, Qian X, Han B P, *et al.* Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China [J]. Water Research, 2012, **46**(8): 2591-2604.
- [17] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. Water Research, 2015, **75**: 249-528.
- [18] Sahoo G B, Schladow S G, Reuter J E, *et al.* The response of Lake Tahoe to climate change [J]. Climatic Change, 2013, **116**(1): 71-95.
- [19] Kraemer B M, Anneville O, Chandra S, *et al.* Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change [J]. Geophysical Research Letters, 2015, **42**(12): 4981-4988.
- [20] Cai W J, Borlace S, Lengaigne M, *et al.* Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming [J]. Nature Climate Change, 2014, **4**(2): 111-116.
- [21] Liu Z Y, Lu Z Y, Wen X Y, *et al.* Evolution and forcing mechanisms of El Niño over the past 21, 000 years [J]. Nature,

- 2014, **515**(7528): 550-553.
- [22] 许武成, 马劲松, 王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. 气象科学, 2005, **25**(2): 212-220.
Xu W C, Ma J S, Wang W. A review of studies on the influence of ENSO events on the climate in China [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, **25**(2): 212-220.
- [23] Hudson J J, Vandergucht D M. Spatial and temporal patterns in physical properties and dissolved oxygen in Lake Diefenbaker, a large reservoir on the Canadian Prairies [J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, **41**(S2): 22-33.
- [24] Baldwin D S, Gigney H, Wilson J S, *et al.* Drivers of water quality in a large water storage reservoir during a period of extreme drawdown[J]. Water Research, 2008, **42**(19): 4711-4724.
- [25] Naselli-Flores L, Barone R. Water-level fluctuations in Mediterranean reservoirs: setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality [J]. Hydrobiologia, 2005, **548**(1): 85-99.
- [26] 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.
- [27] Alavian V, Jirka G H, Denton R A, *et al.* Density currents entering lakes and reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, **118**(11): 1464-1489.
- [28] Cook A. Seasonal climate summary southern hemisphere (autumn 2015): El Niño arrives [J]. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 2015, **65**(3-4): 409-433.
- [29] Song Z Y, Shu Q, Bao Y, *et al.* The prediction on the 2015/16 El Niño event from the perspective of FIO-ESM [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, **34**(12): 67-71.
- [30] Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. Journal of Climate, 2003, **16**(22): 3742-3758.
- [31] Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, *et al.* The changing character of precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, **84**(9): 1205-1217.
- [32] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4187-4193.
Zhang C H, Huang T L, Fang K K, *et al.* Analysis of factors on the nitrogen decrease in the early stage of the thermal stratification in Zhoucun Reservoir [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- [33] Windolf J, Jeppesen E, Jensen J P, *et al.* Modelling of seasonal variation in nitrogen retention and in-lake concentration: a four-year mass balance study in 16 shallow Danish lakes [J]. Biogeochemistry, 1996, **33**(1): 25-44.
- [34] David M B, Wall L G, Royer T V, *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape [J]. Ecological Applications, 2006, **16**(6): 2177-2190.
- [35] Sánchez-Carrillo S, Alatorre L C, Sánchez-Andrés R, *et al.* Eutrophication and sedimentation patterns in complete exploitation of water resources scenarios: an example from northwestern semi-arid Mexico [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **132**(1-3): 377-393.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172