

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	崔海, 张亚红 (1507)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

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

曾明正, 黄廷林*, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为揭示我国北方温带水库——周村水库水体季节性分层现象及其水质响应特性, 于 2014 年 7 月~2015 年 6 月对周村水库进行了 37 次采样, 并对水体理化指标和浮游植物进行了原位监测。结果表明, 周村水库在 4~11 月间处于水体分层, 全年呈典型的温带单循环混合模式。水温分层对水库水环境的变化起着重要的作用, 热分层引起的底层水体季节性缺氧, 导致了沉积物中营养盐以及还原性物质的大量释放, 其中热分层期底层水体总氮、总磷、锰和硫化物的平均值分别为 1.18、0.11、0.47 和 0.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 浮游植物垂向分布受水温分层的显著影响, 热分层期上层水体浮游植物丰度较高, 其均值为 $16.35 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 下层水体浮游植物丰度维持在较低水平。

关键词: 周村水库; 热分层; 季节性; 水质; 温带

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1337-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.019

Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China

ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin*, QIU Xiao-peng, WANG Ya-ping, SHI Jian-chao, ZHOU Shi-lei, LIU Fei

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

Abstract: In order to reveal the seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir Zhoucun Reservoir in North of China. The physical, chemical and phytoplankton indexes were continuously monitored from July 2014 to June 2015. The results showed that the thermal stratification was monomictic, which lasted from April to October. The thermal stratification played an important role in the change of water environment. The hypoxia in the bottom water caused by thermal stratification led to the release of nutrients and reductants from sediment. During the stratification period, the mean concentrations of total nitrogen, total phosphorus, manganese and sulfide were 1.18, 0.11, 0.47 and 0.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The vertical distribution of phytoplankton was significantly influenced by water temperature stratification. During the thermal stratification period, phytoplankton abundance was higher and the average phytoplankton abundance was $16.35 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ in the upper water of the reservoir, while remained at low levels at the bottom.

Key words: Zhoucun Reservoir; thermal stratification; seasonal; water quality; temperate

近年来随着我国对城市地下水开采的限制, 水库/湖泊作为地表水的主要形式已成为许多城市主要的饮用水水源^[1], “河流水库化”呈现逐年增长的趋势^[2]。然而, 水库的修建与使用在带来巨大经济利益的同时, 也深刻地改变了天然河道的演替特性。水库建成后, 水动力减弱, 水力停留时间延长, 水体的垂向对流交换不佳, 使水环境可能发生类似于天然湖泊的“湖沼学反应”^[3, 4], 水体季节性热分层就是水库建成后普遍出现的现象^[5, 6]。稳定的热分层阻碍了上下水体的能量交换和物质迁移, 对水库水体溶解氧、营养盐和水生生物的分布产生重大影响^[7-9]。气温的突降使热分层结构在短期内失稳, 上下层水体在垂向上发生等温对流, 分层时期蓄积于下层水体的营养盐和还原性物质被交换至上层水体, 引发缺氧、鱼类死亡等水质恶化事件^[3, 10]。近

年来, 关于水库热分层水质响应的相关研究已成为热点问题。刘树元等^[11]对台州长潭水库研究后发现: 热分层效应引发的内源污染是水体铁锰超标的直接原因; 董春颖等^[12]和张垒等^[13]分别对同处亚热带的千岛湖和龙滩水库的研究认为: 水体分层对水库水质的变化起重要作用; 刘流等^[14]研究表明: 春季水温分层发育导致水体混合层深度突然减小是春季水华暴发的直接诱因; 夏品华等^[15]认为: 贵州高原深水水库季节性水质恶化与水体分层结构失稳有关。目前, 关于我国北方温带水库季节性热分层问题的研究尚不多见, 对于水库热分层结构形成的

收稿日期: 2015-09-20; 修订日期: 2015-11-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02)

作者简介: 曾明正(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源保护与微污染控制, E-mail: zengxiaobing2015@163.com

* 通讯联系人, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

原因、沉积物内源释放的机制以及浮游植物的垂向分布特性等方面的研究还缺乏系统的认识和研究. 本研究以我国北方温带中型水库——周村水库为例,对水库热分层形成、稳定和消亡时期的水质指标和浮游植物进行了为期 1 a 的原位监测,以期为水库水质改善、污染防治以及运行管理提供科学依据和理论指导.

1 材料与方法

1.1 水库概况

周村水库位于山东省枣庄市市中区,水库流域面积 121 km²,总库容 8 404 万 m³,水面面积 8.54 km²,主库区平均水深 12 m,整个库区水深差距小,全年水位波动不大. 水库建成于 1960 年,主要的入库河流包括西伽河、下十河和徐洼河,目前是枣庄市主要的城市供水水源地. 周村水库处于中纬度暖温带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥. 早年间水库大量的网箱养鱼,造成了严重的水体污染,水库富营养化问题严重.

1.2 采样时间和采样点

本研究于 2014 年 7 月~2015 年 6 月在坝前断面最深(最大水深为 15 m)点(34°56′38″N, 117°41′14″E)实施原位监测,采样断面离水厂取水口较远,采样点受入库径流和取水口出流的影响较小,理化性质和生物特征较为稳定,且采样断面为水库最大水深处,能更为明显地反映水库垂向水质的变化规律,因此,采用主库区坝前最深处作为采样点,具有代表性和可靠性;本研究在水库垂直剖面上的各水层(上、中、下层)都分别设置了 2~3 个采样深度,其中上层(0.5、2.5、5 m),中层(7.5、10 m),下层(12.5、15 m),文中图表中各水层的数值都是对应水深采样点的平均值;采样时间一般选在天气晴朗的上午 10~12 点(现场测定温度、溶解氧),采样频率为每月 2~4 次(热分层期水质变化较大,采样频率每周 1 次,混合期水质变化较小,采样频率为每半月 1 次),共 37 次采样.

1.3 样品分析方法

水温(WT)、溶解氧(DO)用 HACH Hydrolab DS5 型多参数水质测定仪测定,深度间隔为 1 m;总氮(TN)、总磷(TP)、锰(Mn)等的测定参考文献[16];浮游植物物种鉴定和计数等参考文献[17].

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件导出和处理数据;采用 ORIGIN 8.0 软件作图;采用 SPSS 18.0 软

件进行单因素方差分析(one-way ANOVA).

2 结果与分析

2.1 水温垂向分层与季节性变化

如图 1 可见,调查期间周村水库上层水温波动较大,全年水温在 3.5~28.0℃ 之间,平均为 14.9℃;中层水温在 3.4~25.4℃ 之间,平均为 12.5℃;下层水温较为恒定,全年维持在 3.4~15.2℃,平均为 9.3℃,这与周村水库处于温带大陆性季风气候区、全年气温变化较大有关. 垂向剖面水温季节性变化较大,初春(3 月),气温升高致使上层水体热通量不断增加,水温开始增长,而下层水温增长较为缓慢,但此时期上下温差仅为 1.4℃;4 月,上下层温差为 2.3℃,最大温度梯度为 0.6℃·m⁻¹,出现在水深 7~8 m 处,热分层结构开始形成;5 月,上下层温差增至 8.6℃,最大温度梯度为 1.7℃·m⁻¹,温度梯度大于 1℃·m⁻¹的水层定义为温跃层,在水深 4~8 m 形成较为明显的温跃层,此时“三层式”水温结构已经形成. 夏季,上层水体受持续高温天气影响,水温升高至全年最高值,但底层水体受气温影响较小,上层与底层温差达到全年最大值(19℃),在水深 6~9 m 处出现了明显的温跃层. 秋末(10~11 月),气温开始下降,上层水温随之降低,上下层温差逐渐减少,温跃层厚度变薄,温度分层逐渐弱化,直至 11 月中旬,热分层失稳破坏,垂向温差消失,上下层水体混合均匀. 进入冬季,水温进一步下降,水体处于混合状态. 从调查期间的水温监测结果来看,周村水库水温垂向呈正温分布,即便在温度最低的冬季,也未出现逆分层现象,因此,周村水库热分层时期长(4~11 月),混合期短(12 月~翌年 3 月),呈典型的温带单循环混合模式. 采用水温分层类型判别方法 $a = \text{年入库水量} / \text{总库容}$,周村水库年入库水量为 5 727.1 万 m³,总库容为 8 429.3 万 m³, $a = 0.68 < 10$,水温分布呈稳定分层型,这与实际调查结果相符合.

对周村水库气温与上层、中层、下层水温之间进行相关性分析,结果可知:上层水温(0~5 m)与气温存在显著线性正相关($R^2 = 0.811$) [图 2(a)],这与国内外许多学者的研究结果一致^[18~20]. 中层水温(6~10 m)与气温也存在显著线性正相关($R^2 = 0.607$) [图 2(b)],但决定系数较上层有所降低. 热分层期气温对水库水温的影响主要作用于水深 10 m 以内的上、中层水体,而对下层水温影响不大[图 2(c)],上层水体接收到的太阳辐射热

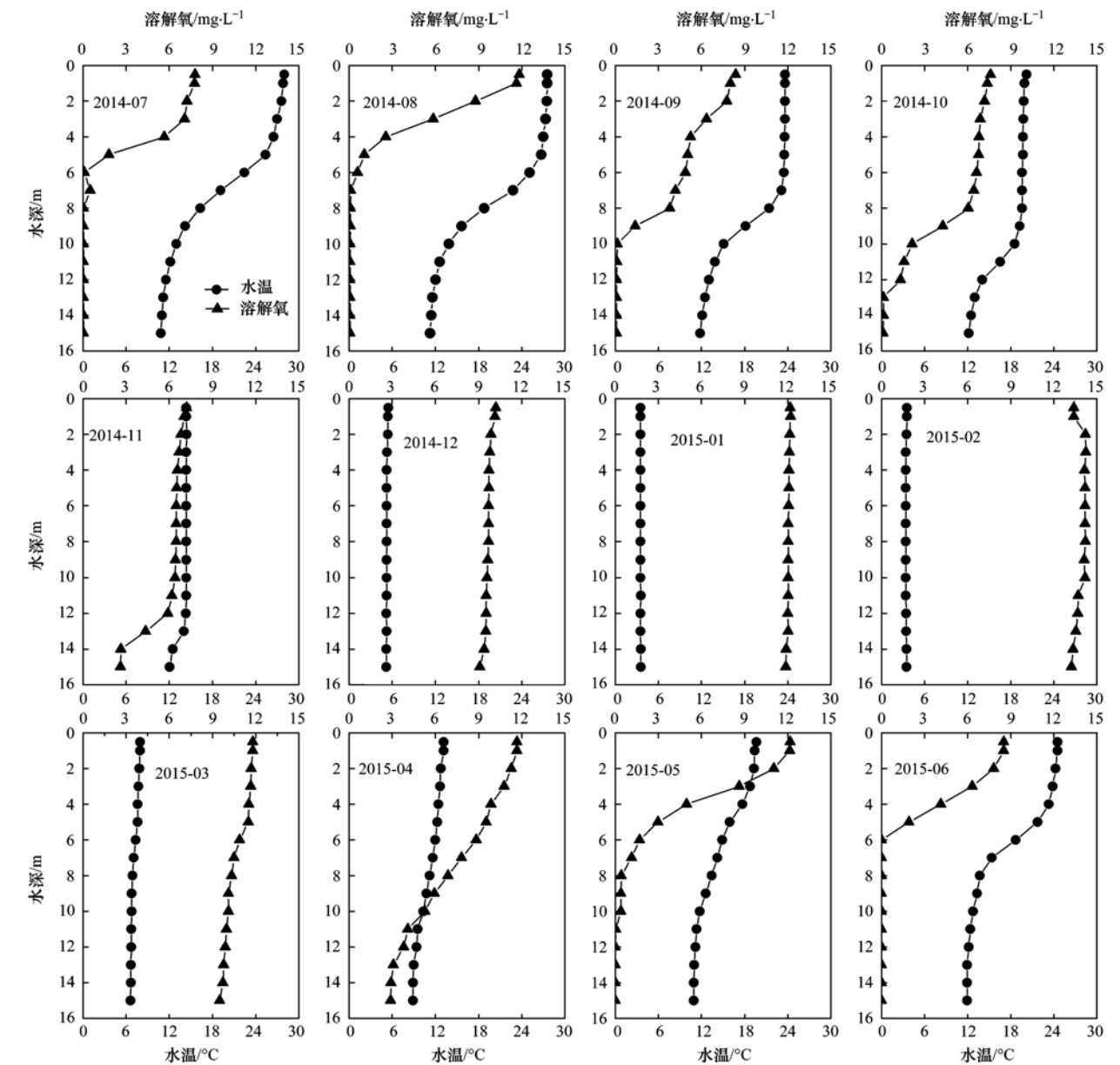


图1 周村水库水温及溶解氧垂向剖面变化

Fig. 1 Vertical profile of water temperature and dissolved oxygen in Zhoucun Reservoir

量因温跃层的阻碍而很难传递到下层水体,由图1可见,热分层期下层水体温度在10.8~14.3℃,平均为12.1℃,因此水库热分层期下层水温较为恒

定. 进入混合期,上下层水体混合均匀,传热通道疏通,下层水温与中上层水温一样受气温变化的显著影响.

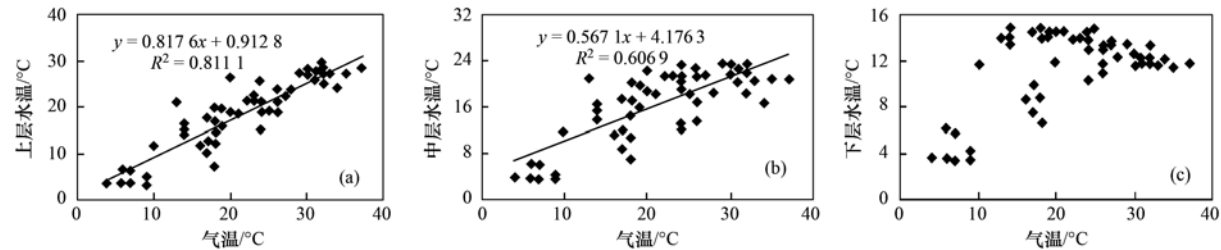


图2 气温与表层、中层和下层水温的线性关系

Fig. 2 Linear relationships between air temperature and water temperature of surface, middle and bottom layer

2.2 溶解氧垂向分层与季节性变化

周村水库水体垂向溶解氧(DO)存在显著的季节性分层特性(图1),在稳定的热分层期(2014年7~10月,2015年5~6月)上、下层水体DO分布差异明显(ANOVA, $P < 0.01$),上层DO在 $4.12 \sim 12.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $7.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;随着水深的增加,DO浓度逐渐降低,中层DO在 $0.03 \sim 6.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $1.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;下层DO在 $0.03 \sim 1.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此时期DO具有上层高、下层低的分布特性,与水温分层一样,DO在温跃层附近也存在跃层,水体DO急剧下降,其中最大DO梯度为 $3.86 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{m})^{-1}$,出现在2014年7月,温跃层以下DO基本恒定并处于缺氧甚至厌氧状态. 混合期,上下层水体DO差异性不大(ANOVA, $P > 0.05$),DO在 $9.09 \sim 13.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化,均值为 $11.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.3 氮、磷等营养盐垂向分层与季节性变化

由图3可见,周村水库热分层期TN浓度垂向差异较大,上层TN浓度在 $0.45 \sim 1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;中层TN浓度在 $0.54 \sim$

$1.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;下层TN浓度在 $0.69 \sim 1.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 混合期垂向TN浓度差异较小,平均值为 $1.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 季节性变化上,TN浓度最大值出现在1月份,总体而言混合期的TN浓度较分层期大. 热分层期上层TP浓度在 $0.04 \sim 0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,均值为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;中层TP浓度在 $0.05 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;下层TP浓度在 $0.05 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 季节性变化上有别于TN,TP浓度最大值出现在6月,混合期TP浓度明显小于分层期.

周村水库热分层期,上下层水体TN、TP浓度差异性较大,分层期下层水体的厌氧和酸性环境,促进了沉积物中氮、磷的释放,致使下层水体氮、磷浓度较高,而水体的分层又阻隔了下层高浓度的氮、磷向上层水体扩散,因此上层氮、磷浓度较低. 由图3可见,随着秋末(10、11月)气温的下降,热分层结构失稳破坏,温跃层消失,下层蓄积的高浓度营养盐在上下层对流过程中被带到中上层水体,此时表层TN、TP浓度急剧上升,其中TN浓度为 $1.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP浓度 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (全年上层最大值).

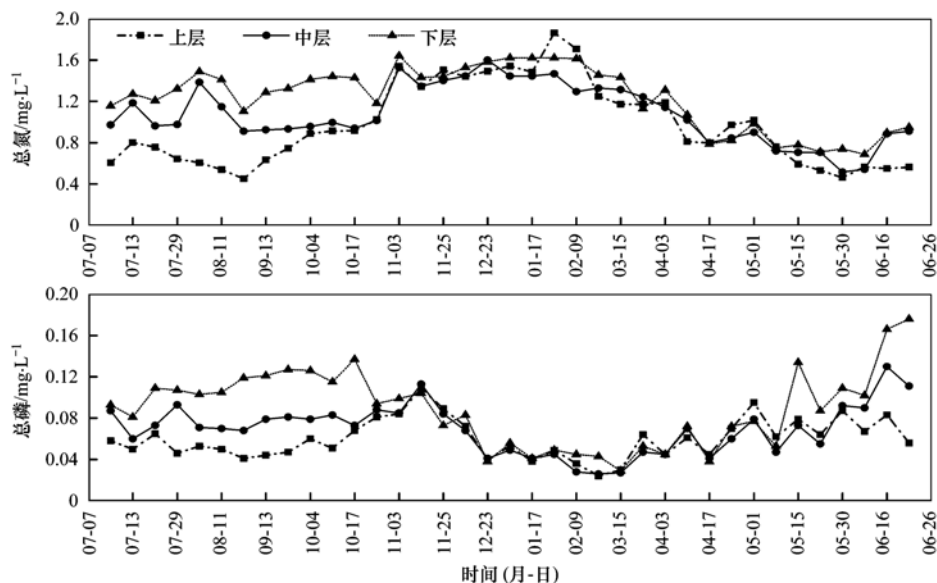


图3 周村水库总氮、总磷时空分布特性

Fig. 3 Spatial and temporal distribution characteristics of total nitrogen and total phosphorus in Zhoucun Reservoir

2.4 锰、硫化物垂向分层与季节性变化

周村水库锰、硫化物浓度变化的垂向分布和季节性特性比较明显(图4). 在热分层时期,上下层水体中的锰、硫化物浓度存在显著差异(ANOVA, $P < 0.05$, $P < 0.05$),上层锰浓度在 $0.03 \sim 0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;中层锰浓度

在 $0.04 \sim 1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;下层锰浓度在 $0.05 \sim 1.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中最大值 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超标约12倍^[21],出现在2014年9月. 分层期上层硫化物浓度变化不大,均值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;中层浓度在 $0.01 \sim 0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 0.24

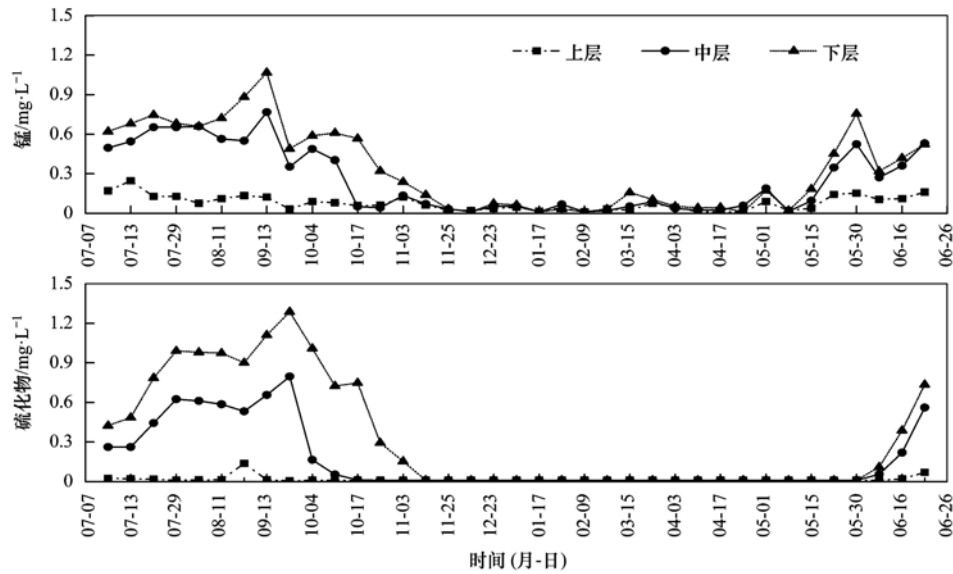


图4 周村水库锰、硫化物时空分布特性

Fig. 4 Spatial and temporal distribution characteristics of manganese and sulfide in Zhoucun Reservoir

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下层硫化物浓度在 $0.01 \sim 1.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 混合期, 锰、硫化物浓度较低, 且垂向差异性不大 (ANOVA, $P > 0.05$).

2.5 浮游植物垂向分层与季节性变化

由于不同水深所接受的光照强度和水体热力学状态的显著差异, 浮游植物在垂直剖面上的异质性也较为明显 (图 5). 热分层期, 浮游植物密度垂向差异较大 (ANOVA, $P < 0.05$), 上层浮游植物密度较大, 浮游植物密度在 $9.31 \sim 32.23 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $16.35 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$; 中层浮游植物密度在 $2.99 \sim 20.11 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $8.99 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$; 下层浮游植物密度在 1.97

$\sim 12.22 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $7.56 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 全年浮游植物密度出现两个峰值, 一个出现在 4 月末, 另一个出现在 8 月初. 从浮游植物群落结构季节性演替上来看, 夏季以耐高温且具备悬浮机制的蓝藻为主, 而以梅尼小环藻、针杆藻等代表的硅藻能适应低温、弱光条件, 成为了秋冬季的优势种群, 绿藻为广布种群, 其季节性变化不明显, 全年所占比例在 $21.7\% \sim 51.3\%$ 之间.

3 讨论

3.1 水体热分层的 DO 响应特性

水中 DO 的含量主要受到复氧机制和耗氧机制

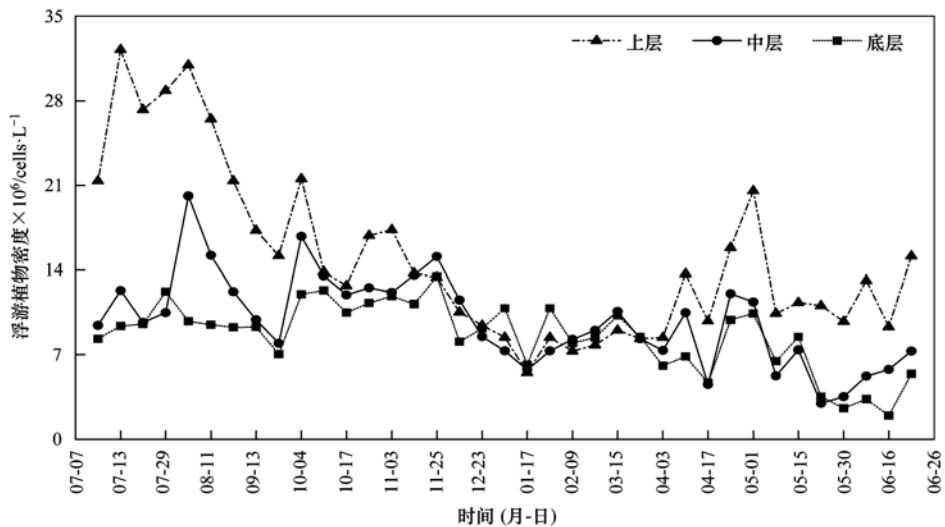


图5 周村水库浮游植物密度时空分布特性

Fig. 5 Spatial and temporal distribution characteristics of Phytoplankton abundance in Zhoucun Reservoir

的双重作用。水体中的复氧途径一方面是表层水体与大气进行气体交换,大气中的氧溶入表层水体并通过分子扩散向下传播,根据 Fick 扩散定律,随着水深的增加,DO 的浓度逐步降低,大气对水体的 DO 传递是水体中 DO 的主要来源;另一方面浮游植物光合作用增氧以及富氧的入库径流也可在一定程度上提高水体的 DO 浓度。水体中的耗氧主要是浮游植物、微生物等水生生物的呼吸耗氧,亚铁、硫化物等还原性离子的化学氧化耗氧,有机物降解耗氧以及底泥耗氧。

周村水库热分层期中下层水体厌氧环境的形成是水体复氧和耗氧失衡导致的,上层水体通过水-气界面的气体交换以及浮游植物的光合作用,为上层水体提供了 DO,而温跃层的存在阻碍了上层水体 DO 的向下传递,下层水体 DO 得不到充分的补充,加之沉积物中有机质的矿化降解和有机体死亡下沉分解进一步加剧了下层水体氧的消耗,下层水体耗氧远远超过复氧,致使下层水体处于缺氧甚至厌氧状态,因此,热分层是周村水库 DO 垂向分层以及下层水体厌氧的主要原因,这与国内外许多学者的研究结果相似。例如 Lee 等^[22]对韩国 Yeongsan 水库的研究表明,温度分层是底层水体缺氧的一个主要因素。董春颖等^[12]对千岛湖的研究以及邱华北等^[23]对万峰湖的研究也表明 DO 的分层结构是由温度的热分层结构所引起的。初秋(10 月末至 11 月初),由于气温的骤降,上层水温随之下降,水体密度增大而下沉,稳定的分层结构被打破,上下水层发生等温对流,此时热分层时期蓄积在下层的营养盐和还原性物质被交换至上层,不仅引起表层水体氮、磷等浓度的升高, H_2S 等厌氧产物的释放以及亚铁等还原性物质的氧化,还会导致水体变臭,DO 下降,局部水域出现鱼类等水生生物的死亡。近年来国内外因热分层消亡期分层结构失稳而引发的水质突发性污染事件时有发生报道,如土耳其 Tahtali 水库冬季营养盐浓度的剧增^[24],贵州百花湖水库的“黑潮”问题^[3],贵州红枫湖秋初鱼类等水生生物的死亡等^[15]。进入混合期,上下层水体混合均匀,下层水体复氧途径疏通,此外,冬季水温较低,生物耗氧减弱,水中氧气的溶解度增大,整个库区 DO 都维持在较高水平。

3.2 水体热分层的水质响应特性

氮、磷等营养盐是生命活动所需的基本营养物质,也是引起水体富营养化和水华重要因素,其在水体-沉积物-微生物多相界面发生着剧烈的生物地球

化学作用,对库区的营养状态和水质都有重要影响。

沉积物是湖、库中营养盐重要的蓄积库,并在一定条件下向上覆水体中释放。沉积物中磷的释放受控于诸多因素,其中最主要是水体中的 DO、温度、pH、扰动和生物等。研究表明:厌氧条件下,沉积物中的磷向水体释放且温度的升高、微生物的作用有利于磷的释放^[25-27],周村水库沉积物磷以铁结合态磷为主要赋存形态,热分层期库区下层水体的厌氧环境使磷酸铁中的 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,铁结合的磷溶解释放。相关分析表明:周村水库热分层期下层 TP 浓度与 DO 浓度间存在显著负相关($y = -0.0065x + 0.115$, $R^2 = 0.4892$)。水体混合后,下层水体缺氧环境得以改善,加之微生物在冬季低温环境影响下生物活性下降,沉积物磷的释放停止,有研究表明:在好氧条件下,沉积物非但没有向水体释放磷,反而从水体中吸收磷^[25]。周村水库 TP 浓度在热分层消亡期突增,但是混合期 TP 浓度有所下降,这可能是由于枯水期外源性磷输入的减少,沉积物对磷释放的停止甚至“负释放”,虽然浮游植物在混合期丰度下降,但其对磷的吸收利用仍会对磷的下降产生影响。

沉积物中各种氮化合物可以相互转化,不同形态氮的释放和转化能力存在差异。上覆水体 DO 水平是控制沉积物氮释放的关键因子,在厌氧条件下硝化作用强度减弱,沉积物中有机氮通过氨化作用形成的氨氮不能完全转化为硝氮,大量的氨氮释放到水体中。而在好氧条件下,硝化作用强烈,大部分的氨氮转化为硝氮,使得沉积物向上覆水体释放氨氮的作用受到一定的抵消,从而造成水体硝氮浓度大幅升高,氨氮浓度显著下降。周村水库热分层期,下层水体厌氧致使沉积物中氨氮的大量释放,下层水体氨氮平均浓度为 $1.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而上层水体因温跃层的阻碍,氨氮浓度较低,其均值为 $0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体中因硝化作用受到抑制,硝氮浓度较低,尤其在夏季,硝氮浓度仅为 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时期水体 TN 主要由氨氮贡献。水体混合后,硝氮浓度逐渐升高,均值为 $0.84\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而氨氮由于不断的转化和利用,浓度逐渐减小,其均值为 $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时期水体 TN 主要由硝氮贡献。

20 世纪 80 年代, Davison^[28]根据水温分层及相应的缺氧状况,提出了一个铁-锰循环的氧化还原边界层转化模式,指出该边界层的季节性迁移控制了铁、锰循环的季节性变化。罗莎莎等^[29]认为除了考虑氧化还原层这个化学界面外,沉积物-水界面这

个地质界面对铁、锰循环的作用也不容忽视。沉积物中的铁、锰氧化物在有机质降解过程中被还原成溶解态的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} , 这些溶解态的铁、锰通过间隙水向上覆水体中扩散迁移, 当水库下层水体好氧时, 氧化还原边界在沉积物-水界面附近, Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 在沉积物表面重新被氧化而形成颗粒态的铁、锰氧化物; 当水库下层水体缺氧时, 氧化还原边界向上覆水体迁移, 铁、锰也随之扩散至上覆水体。泥水界面处的专性微生物(主要为硫酸盐还原菌 SRB)在代谢过程以硫酸盐作为电子受体并产生高浓度的 H_2S , 而还原态的 Fe^{2+} 在向上覆水体扩散时, Fe^{2+} 与 S^{2-} 反应形成铁的硫化物 FeS 并抑制了 Fe^{2+} 向上覆水体释放。

周村水库热分层期, 水库下层厌氧, 氧化还原边界上移至上覆水体, 沉积物中的锰、硫元素大量释放至水体, 而温跃层的稳定存在又阻碍了上下水层的物质交换, 致使下层水体中的锰、硫化物的浓度显著大于上层水体。相对于锰, 铁的氧化还原较为平缓, 调查期间水体中铁的浓度较低, 即便是释放最为严重的夏季, 下层水体铁的浓度也并未超标, 这与罗莎莎等^[29]和万曦等^[30]对阿哈湖的研究结果较为相似。进入混合期后, 周村水库上下水体均处于富氧状态, 被重新氧化的难溶铁锰氧化物, 在沉积物表面沉淀、富集, 水体中的铁锰含量较低(小于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

4 建议

沉积物氮磷主要来源于水体中颗粒有机物的沉降积累, 资料表明:1990~2008 年期间, 周村水库曾大面积投饵网箱养鱼, 养殖过程中饵料、肥料输入以及其较低的利用率导致水库沉积物中氮磷的积累较为明显, 虽然近年来政府部门取缔了网箱养鱼, 但是热分层引起的内源污染, 致使水体仍处于富营养状态。因此, 在水源水库水质的修复和改善工作中, 除了控制农业农村的面源污染, 减少流域氮磷等营养盐的入库负荷等外源污染外, 对于热分层引起的内源污染应引起足够重视, 而破坏水体分层结构, 增加水体底层水体溶解氧含量的扬水曝气技术被认为是预防热分层失稳引起的突发性水质污染事件的有效措施。

5 结论

(1)周村水库水体呈典型温带单循环混合模式, 在 4~11 月形成稳定的热分层。气温是引起热

分层结构年度变化的主要因素, 其中上层水温受气温影响显著, 而气温对底层水温的影响较小。

(2)周村水库热分层期, 温跃层的稳定存在阻碍了垂向水体间氧的传递交换, 致使底层水体处于厌氧状态。厌氧环境下, 沉积物中氮磷等营养盐以及锰、硫化物等还原性物质大量释放并扩散至上覆水体。

(3)周村水库秋末分层结构失稳破坏, 蓄积于下层的营养盐和还原性物质被交换至上层, 引起上层水体氮、磷等浓度的升高。

(4)不同水深所接受的光照强度和水体热力学状态的显著差异, 浮游植物分布在垂直上的异质性也较为明显, 热分层期, 浮游植物丰度垂向差异较大。

参考文献:

- [1] 黄廷林, 丛海兵, 柴蓓蓓. 饮用水水源水质污染控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 406-415.
- [3] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 54-60.
- [4] 林国恩, 望甜, 林秋奇, 等. 广东流溪河水库湖沼学变量的时空动态特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 387-394.
- [5] 易仲强, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(5): 6-11.
- [6] 张士杰, 彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1254-1258.
- [7] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖热力学状况的监测与分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 61-67.
- [8] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 244-250.
- [9] Ryabov A B, Rudolf L, Blasius B. Vertical distribution and composition of phytoplankton under the influence of an upper mixed layer[J]. Journal of Theoretical Biology, 2010, 263(1): 120-133.
- [10] 王敬富, 陈敬安, 杨永琼, 等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征[J]. 环境科学研究, 2012, 25(8): 845-851.
- [11] 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.
- [12] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2574-2581.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科技出版社, 2006.
- [18] O'Reilly C M, Alin S R, Plisnier P D, *et al.* Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 766-768.
- [19] Jones J R, Knowlton M F, Obrecht D V, *et al.* Temperature and oxygen in Missouri reservoirs [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2011, **27**(2): 173-182.
- [20] 刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 447-454.
- [21] GB 38382-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [22] Lee Y G, Kang J H, Ki S J, *et al.* Factors dominating stratification cycle and seasonal water quality variation in a Korean estuarine reservoir [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, **12**(5): 1072-1081.
- [23] 邱华北, 商立海, 李秋华, 等. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 1039-1044.
- [24] Elçi Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. *Limnology*, 2008, **9**(2): 135-142.
- [25] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 738-742.
- [26] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云, 等. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(2): 151-154.
- [27] 孙晓杭, 张昱, 张斌亮, 等. 微生物作用对太湖沉积物磷释放影响的模拟实验研究[J]. 环境化学, 2006, **25**(1): 24-27.
- [28] Davison W. Soluble inorganic ferrous complexes in natural waters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, **43**(10): 1693-1696.
- [29] 罗莎莎, 万国江. 云贵高原湖泊沉积物-水界面铁、锰、硫体系的研究进展[J]. 地质地球化学, 1999, **27**(3): 47-52.
- [30] 万曦, 万国江, 黄荣贵, 等. 阿哈湖 Fe、Mn 沉积后再迁移的生物地球化学机理[J]. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 129-134.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行