

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响

孙祥^{1,2}, 朱广伟^{1*}, 笄文怡³, 余茂蕾³, 杨文斌², 朱梦圆¹, 许海¹, 国超旋¹, 余丽¹, 李恒鹏¹, 李慧贇¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003; 3. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637009)

摘要: 为揭示亚热带水库热分层的季节性变化特征、影响因素及水质效应, 以最大水深 11 m 的江苏溧阳天目湖沙河水库为例, 基于对水库坝前区(TM1)3~11月逐时的水温监测及对该水库2009~2016年相关水质和气象指标监测, 分析了该水库热分层的形成和消失时间、驱动因素及其对水质的影响。结果表明, 天目湖沙河水库呈典型的亚热带单循环混合模式: 春季随着太阳辐射的增强, 水温逐渐升高, 当表层水温升至 21℃左右时, 热分层稳定形成, 在整个 5~9月期间水体热分层十分稳定; 秋季随着太阳辐射的减弱, 水温逐渐降低, 当表层水温降至 19℃左右时, 热分层基本消失, 在 10~4月期间水体呈混合状态。热分层期间, 表层和底层的水温差随太阳辐射的增强而增加; 日均气温超过 30℃的情况下, 水体热分层更加稳定; 夏季强降雨过程降低了水体表层的温度、减弱了上层 5 m 水体的温度分层, 但对 5 m 以下深度的热分层状况基本无影响。水温分层对水库水质产生一定的影响: 热分层期间, 底层水体处于厌氧状态, 底层水体氨氮浓度明显增加; 热分层消失后, 底层水体溶解氧、总磷及悬浮颗粒物含量均增加。研究表明, 对于四季分明的亚热带中等深度的水库而言, 水体热分层主要受太阳辐射的控制, 稳定的热分层有利于蓝藻门相关种属藻类的生长, 热分层形成及消散阶段改变了沉积物的营养盐释放及供给水体的强度, 对水体水质形成冲击。在水库水质监控及生态保护管理中, 应关注热分层过程的不利影响, 并探索相关灾害的防控技术。

关键词: 亚热带水库; 热分层; 极端天气事件; 浮游植物; 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2632-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710223

Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China

SUN Xiang^{1,2}, ZHU Guang-wei^{1*}, DA Wen-yi³, YU Mao-lei³, YANG Wen-bin², ZHU Meng-yuan¹, XU Hai¹, GUO Chao-xuan¹, YU Li¹, LI Heng-peng¹, LI Hui-yun¹

(1. State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: Based on the one-year hourly water temperature profiles and the associated environmental drivers during the past eight years in Shahe Reservoir, Jiangsu Province, China from 2009 to 2016, the factors underlying the seasonal variation of thermal stratification and water quality response were investigated. It was shown that the thermal stratification was a typical subtropical one-cycle mixing model, lasting from May to September. The thermal stratification appeared and disappeared when the surface water temperature was 21 °C in the late spring and 19 °C in the middle of autumn. The difference between the water temperature at the epilimnion and hypolimnion increased with increasing solar radiation. When the air temperature was above 30 °C, the stability of the thermal stratification increased. Heavy storms reduced the temperature of the surface water and weakened the temperature stratification of the column above a 5 m depth but had limited impact on the stratification of the hypolimnion deeper than 5 m. The thermal stratification greatly impacted the water quality of the lake. Hypoxia in the bottom water occurred by thermal stratification, leading to increased NH₄⁺-N. The concentrations of dissolved oxygen, total phosphorus, and suspended solids in the hypolimnion increased after the disappearance of thermal stratification. Our results indicated that the thermal stratification was mainly controlled by solar radiation and the thermal stratification favored the growth of cyanobacteria and led to the release of nutrients from the sediment, threatening the water quality. Attention should be paid to thermal stratification to prevent algal blooms and related water quality deterioration.

Key words: sub-tropical reservoir; thermal stratification; extreme weather event; phytoplankton; eutrophication

收稿日期: 2017-10-28; 修订日期: 2017-12-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405201); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008); 国家自然科学基金项目(41671494, 41501532)

作者简介: 孙祥(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境修复, E-mail: xsun1992@outlook.com

* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

随着城市地下水开采的限制, 水库已成为城市饮用水的主要水源地^[1]. 水库的修建使得库区形成了较大的滞水区, 光照的直接辐射及水体的自净作用使水库形成了与河流完全不同的水域环境^[2]. 水力停留时间延长、水动力减弱及水体的垂向对流交换受阻, 使水环境可能发生类似于天然湖泊的“湖沼学反应”^[3, 4]. 水库建成后会呈现季节性热分层的现象^[5, 6], 稳定的热分层阻碍了水体上下层的物质迁移和能量交换, 对水体的营养盐、悬浮物、溶解氧及水生生物的分布产生了重大的影响^[7-9]. 气温的骤降破坏了水体的分层现象, 使水体上下层发生等温对流, 分层时期积聚在底层的营养盐和悬浮物被交换至上层水体, 引发水体短暂的缺氧、营养盐升高^[4, 10]. 水库这些阶段性或周期性的水质污染事件, 严重的影响了城市的供水安全^[11].

近年来, 关于水库热分层水质效应的相关研究已经成为热点问题^[12]. 张垒等^[13]对龙滩水库的研究和董春颖等^[14]对千岛湖的研究, 均认为水体热分层对水库水质的变化产生了重要的影响; 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; 张运林等^[8]对天目湖沙河水库的研究, 认为水温的变化及温跃层的存在引起了水体溶解氧和营养盐的变化; 成晓奕等^[16]对天目湖沙河水库的研究, 表明水体热分层导致水体的溶解氧分层从而可能通过影响藻类活动而对水环境造成影响; Elçi^[17]对土耳其曼德拉斯的 Tahtali 水库的研究, 表明水体热分层导致了水体底层溶解氧含量大幅度降低从而引起了水质的恶化; Macintyre 等^[18]的研究表明热分层期间水体表层与底层形成了鲜明的差异, 表层水体营养贫乏但光线充足, 而底层营养丰富, 光线不足, 从而影响了水体环境及藻类的活动; Kraemer 等^[19]研究表明水体的热分层会加剧水体缺氧, 促使浮游生物的增大、蓝藻水华的暴发, 并导致水体内部营养负荷变化从而影响水体生产力.

然而, 目前关于水库热分层的研究, 主要考虑热分层的形成与消失及其对水质的影响, 对于极端天气对热分层的影响及热分层形成与消失过程对浮游植物群落结构的变化关注较少. 本文选取中国东南丘陵地区大(II)型水库天目湖沙河水库为研究对象, 基于 2016 年大坝区域的逐时温度分层数据及对相关环境因子的多年逐月连续监测, 试图分析热分层的季节性变化、水质对热分层的响应特性及高温和降雨对热分层的影响, 以期对水库水质改

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 沙河水库简介

江苏省溧阳市天目湖沙河水库地处我国东南丘陵山区, 地理坐标为东经 119°25', 北纬 31°18', 水库集水面积 152 km², 水域面积 12 km², 最大蓄水量 1.1 亿 m³, 湖底高程由南向北递减^[20], 平均水深 7 m, 最大水深为 14 m^[21]. 沙河水库属北亚热带季风气候区, 多年平均气温为 15.8℃, 气候温暖多变, 冷暖空气交锋频繁; 受梅雨和台风共同影响, 年降雨量 1 155.8 mm, 其中 3~9 月降雨量占全年降雨量的 76%. 沙河水库及其周边保护区是国家 5A 级景区, 旅游及特色农业开发强度大, 其中山区茶叶、果树等特色农业的面源污染强度较大. 沙河水库也是当地特色品牌“砂锅鱼头”的发源地, 水库保持一定量的鲢鳙鱼养殖. 此外, 沙河水库是溧阳市主要饮用水源地, 供给人口约 70 万人. 水库的主要水质威胁是藻类的季节性异常增殖, 对水色、水质及水源供给产生较大威胁^[22].

1.2 采样点布设

样品的采集与测定方法见文献[23, 24]. 为分析热分层的形成与消失对水库水质的影响, 现需在水库最深的区域和水库最浅的区域分别设置采样点. 水库最深的区域在北部大坝处, 最大水深为 14 m, 本次观测的 2016 年 3~11 月水深维持在 11 m 左右, 前期监测显示夏季具有热分层现象^[8]; 水库最浅的区域在南部平桥河和下宋河来水的汇合区, 水深 1~2 m, 无热分层现象产生. 在北部大坝处设置为 TM1, 在南部交汇区域设置 TM10, 其中 TM10 主要受上游河道来水的影响^[25]. 采样点布设如图 1.

1.3 样品采集及测定

2016 年在大坝区域(TM1)放置加拿大 RBR 仪器公司 KNDTR-1060 型号的水温仪进行 3~11 月的逐时温度测定, 水温仪共分为 11 节, 一节 1 m, 对大坝区域进行垂向 1~11 m 水体温度的测定. 此外, 在 2009~2016 年对 TM1 和 TM10 分别进行每月一次的监测, 采样时间在每月中旬进行.

水样采集使用 5 L 的采水器取表层 0.5 m 水样, 现场进行叶绿素 a(CHL)、悬浮颗粒物(SS)的过滤, 过滤叶绿素的滤后水和原水进行冷藏后带回实验室进行营养盐指标分析. 用采水器采集

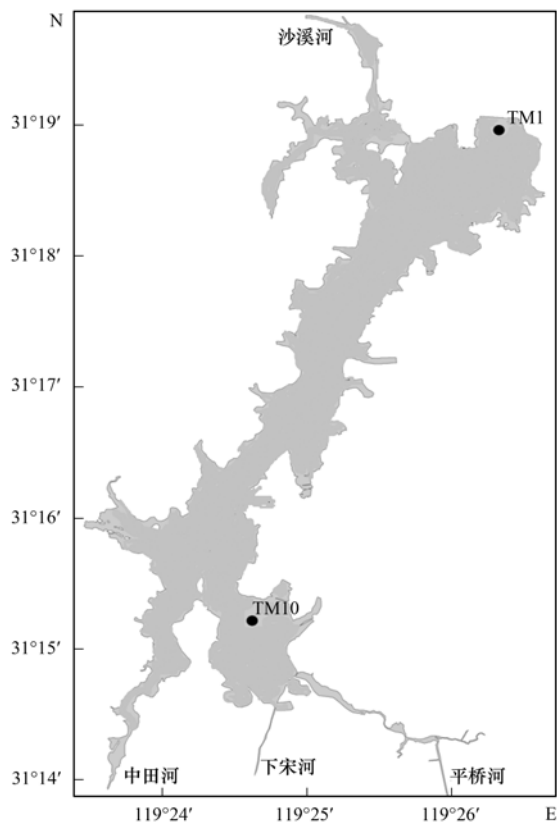


图1 天目湖沙河水库逐月监测点位示意

Fig. 1. Sampling sites for water quality analysis in Shahe Reservoir

0.5 m 深水样, 取 1 L 水样用鲁戈试剂固定, 用于浮游植物群落结构的鉴定. 现场用美国黄石仪器公司 YSI 6600V2 型多参数水质分析仪测定水温 (WT)、电导率 (Cond)、溶解氧 (DO)、浊度 (Turb) 等指标.

实验室测定水质指标, 滤后水体中的硝态氮 (NO_3^- -N) 和氨氮 (NH_4^+ -N) 含量用 Skalar 流动注射分析仪光度法测定; 总磷 (TP, 原水) 测定方法为碱性过硫酸钾消解-钼锑抗显色分光光度法测定; SS 采用 Whatman GF/F 滤膜过滤, 105°C 烘干重量法, 然后采用 550°C 马弗炉灼烧, 剩余灰分为无机颗粒物 (ISS) 重量. 浮游植物群落结构的鉴定使用 Olympus CH 生物光学显微镜镜检, 鉴定到属, 首先获得细胞密度 ($\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$), 在各属细胞密度的基础上, 根据体积-重量经验公式换算为生物量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 具体方法见文献[26].

1.4 水文气象数据

2009~2016年5月的日平均降雨量、日平均气温等气象数据通过中国气象网查询而来, 2009~2016年太阳辐射数据及2016年下半年的水文气象数据则由项目组设在沙河水库西南山顶的十思园自动气象站获取.

1.5 数据处理方法

数据图表绘制及主要统计参数计算由 Excel 2010、Origin 8.5 和 SPSS 16.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 水温变化

温跃层的定义为温度铅直梯度大于或等于 $0.20\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 的水层^[27], 混合层的定义为由于风或温度引起水体混合所形成的水上层^[28]. 图2为天目湖沙河水库2016年3~11月大坝区域水体垂向温度分层状况, 其中云图色差以 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 作为基本单位. 水库水温季节性变化较大, 表层水温在 $10.8\sim 33.1\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 平均 $22.9\text{ }^\circ\text{C}$; 底层水温相比表层水温变化较小, 稳定在 $11.4\sim 25.6\text{ }^\circ\text{C}$, 平均 $16.8\text{ }^\circ\text{C}$, 垂向水温存在明显的季节变化. 由图2可知, 4月初水体表底温差较小, 约为 $2.5\text{ }^\circ\text{C}$, 5月随着太阳辐射增强, 气温增高, 表层水体热通量不断增大, 表层水体水温迅速增加, 底层水体水温增加缓慢, 到5月底水体表底层温差约为 $8\text{ }^\circ\text{C}$, 热分层稳定形成, 此时表层水温约为 $21\text{ }^\circ\text{C}$. 夏季, 受较强太阳辐射的持续影响, 水体表底层温差达到全年最大值, 约为 $14\text{ }^\circ\text{C}$, 此时水体热分层最为稳定, 温跃层下潜, 强度变大, 厚度变窄. 秋季, 太阳辐射减弱, 气温逐渐降低, 水体热分层开始减弱, 混合深度逐渐增大. 10月初水温约为 $19\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 水体垂向温差消失, 表底层水体完全混合. 之后, 水体处于混合状态, 水温逐渐降低 (图2).

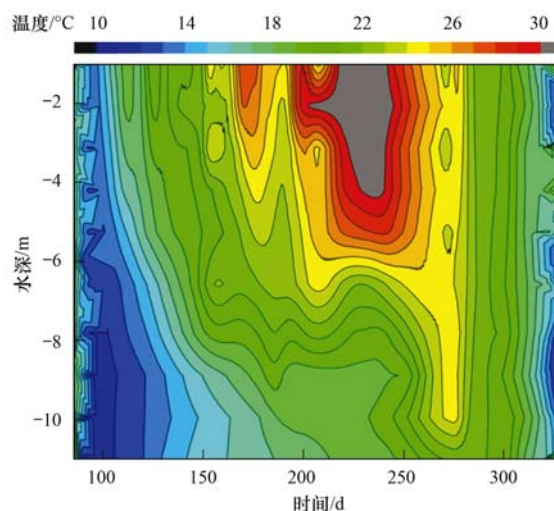


图2 TMI 水体垂向水温变化

Fig. 2. Vertical distribution of water temperature in TMI

2.2 高温对热分层的影响

根据气温与太阳辐射的相关分析, 发现气温随着太阳辐射的增强而升高 ($P < 0.01$), 相关系数达

0.84, 表明太阳辐射的强弱决定气温的高低, 因此高温对热分层的影响主要是由太阳辐射控制的. 图 3 为沙河水库 2016 年 8 月 7 ~ 30 日 (220 ~ 243 d) 大坝区域水体的热分层状况及气温的逐日变化. 其中 8 月 7 ~ 26 日平均气温 30.1℃, 为高温期间, 表层水体日均温度均超过 30℃, 水体温度分层较为明显, 温跃层强度较大. 高温期间, 水下 2 m 至水体表层水温混为一层, 其混合层厚度在 8 月 21 日达到最大, 主要是 8 月 7 ~ 20 日持续性的高温及较大的风速共同作用引起的, 期间平均气温 30.4℃, 平均风速 $3.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 8 月 21 ~ 30 日随气温的降低, 混合层水体厚度逐渐增大, 混合深度从 2 m 处下潜至 5 m 处; 而水下 5 ~ 11 m 处水温分层在 8 月 7 ~ 30 日期间较为稳定 (图 3).

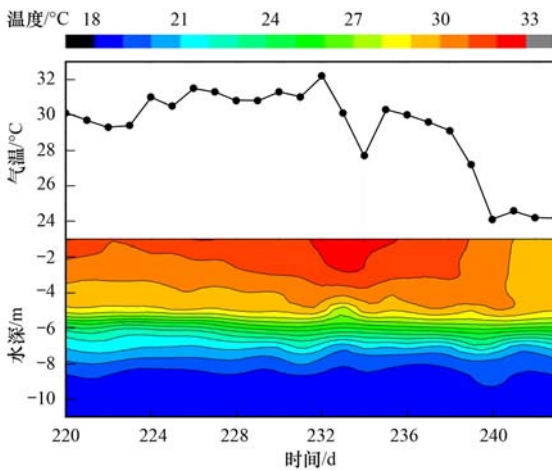


图 3 水温垂向变化及气温逐日变化

Fig. 3 Vertical distribution of water temperature and daily variations of air temperature

2.3 降雨对热分层的影响

降雨当日太阳辐射有所减弱, 由于太阳辐射对热分层的影响是持续性的作用, 因此在降雨期间热分层主要受降雨带来的低温水及动力混合的影响. 图 4 为沙河水库 2016 年 6 月 6 日至 7 月 26 日 (158 ~ 208 d) 大坝区域水体的热分层状况. 其中 6 月 18 日至 7 月 22 日降雨较多, 共降雨 723.7 mm, 平均日降雨 20.7 mm, 7 月 2 日降雨量达 149.4 mm. 在 6 月 16 ~ 25 日, 表层水体温度均较高, 热分层较为明显, 温跃层厚度较大, 但在 6 月 25 日至 7 月 13 日, 水体表层温度逐渐降低, 水下 5 m 至表层的温度分层逐渐减弱, 这主要由于 172 ~ 190 d 期间降雨量较大引起的, 之后降雨量减少, 表层水体温度又明显升高, 水下 5 m 至表层的温度分层也明显增强; 在此期间水下 5 ~ 11 m 热分层较为稳定 (图 4).

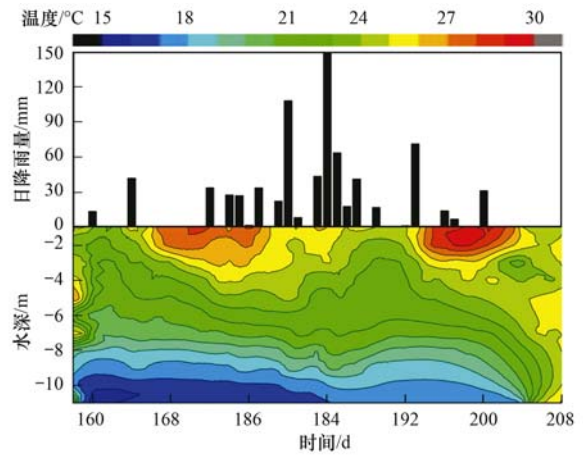


图 4 水温垂向变化及降雨量逐日变化

Fig. 4 Vertical distribution of water temperature and daily variations of rainfall

2.4 热分层形成与消亡前后水质变化

2.4.1 溶解氧变化

图 5 表明大坝区域水体底层溶解氧饱和度与水温表、底差呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数达 0.70. 说明水体未分层时, 表、底层水温一致, 水层混合机会大, 底层溶解氧饱和度较大; 随着气温的升高, 水体逐渐出现分层现象, 交换变差, 此时, 底层微生物等的耗氧作用不断消耗氧气, 水体底层溶解氧饱和度降低且长期维持. 这说明了温度分层是底层水体长期极度缺氧的诱因^[29, 30]. 10 月初气温骤降, 热分层消失, 水体上下层垂向对流混合, 复氧途径疏通, 水体底层缺氧状况得到改善, 溶解氧饱和度迅速增加.

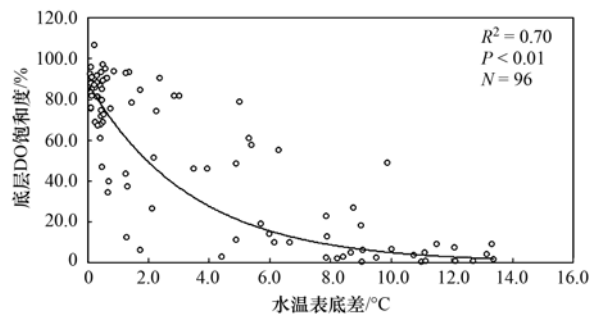


图 5 水体底层溶解氧饱和度与水温表底差的关系

Fig. 5 Relationship between dissolved oxygen and the difference in water temperature between the surface and bottom

表 1 中 DO_{4-5} 和 DO_{9-10} 分别表示底层水体溶解氧饱和度 5 月较 4 月的降低量 (以负值形式表示) 及 10 月较 9 月的增加量. 从中可知, 水体底层溶解氧饱和度在热分层形成与消失前后变化明显. 水体底层溶解氧饱和度 5 月较 4 月明显降低, 多年平均降低 41.4%, 这主要是 5 月水体热分层形成, 温跃

层的存在阻碍了上层水体 DO 的向下传递^[12]; 而水体底层溶解氧浓度 10 月较 9 月有明显的增加, 多年平均增加 41.8%, 主要是 10 月水体热分层消失, 水体上下层混合。

表 1 热分层形成与消亡前后水体底层 DO 饱和度变化/%

Table 1 Variations of dissolved oxygen in the bottom of the water body prior to and post stratification/%

年份	4 月	5 月	DO ₄₋₅	9 月	10 月	DO ₉₋₁₀
2009	79.0	5.0	-74.0	6.2	74.6	68.4
2010	78.6	48.6	-30.0	26.6	81.5	54.9
2011	57.8	51.5	-6.3	12.6	79.8	67.2
2012	49.1	18.2	-30.9	46.9	69.1	22.2
2013	90.8	27.1	-63.7	37.6	71.9	34.3
2014	46.1	11.3	-34.8	10.1	74.9	64.8
2015	55.3	6.1	-49.2	34.6	39.9	5.3
2016	61.2	19.0	-42.2	43.6	61.1	17.5
平均	64.7	23.4	-41.4	27.3	69.1	41.8

1) DO₄₋₅ 表示底层水体溶解氧饱和度 5 月较 4 月的增加量; DO₉₋₁₀ 表示底层水体溶解氧饱和度 10 月较 9 月的增加量

2.4.2 主要理化指标变化

根据表 2 可知底层水体氮磷营养盐及悬浮物在热分层形成与消失前后均发生了变化。其中多年 4~5 月氨氮(NH₄⁺-N₄₋₅) 在数值上均有所增加, 但不显著($P > 0.05$), 多年平均增加 0.011 mg·L⁻¹。这可能是因为水体 5 月形成稳定的热分层, 底层水体形成厌氧环境, 硝化反应得到抑制而释放出氨

氮^[31]; 9~10 月总磷、氨氮及悬浮颗粒物含量均有所变化, 总磷和悬浮颗粒物 10 月较 9 月在数值上均有所增加, 但不显著($P > 0.05$), 多年平均增加分别为 0.006 mg·L⁻¹ 和 2.76 mg·L⁻¹, 这可能是因为水体 9 月热分层稳定, 热分层期间, 水体上下对流受阻, 10 月水体热分层消失, 水体上下混合扰动, 导致底层沉积物中的磷营养盐及悬浮颗粒物向水体释放, 氨氮 10 月较 9 月多年来均有减少, 多年平均减少 0.346 mg·L⁻¹。

表 2 热分层形成与消亡前后水体底层

主要理化指标变化/mg·L⁻¹

Table 2 Variations of water quality indicators in the bottom of the water body prior to and post stratification/mg·L⁻¹

年份	TP ₄₋₅	NH ₄ ⁺ -N ₄₋₅	SS ₄₋₅	TP ₉₋₁₀	NH ₄ ⁺ -N ₉₋₁₀	SS ₉₋₁₀
2013	/	/	/	0.009	-0.009	3.55
2014	0.002	0.012	1.16	0.005	-0.237	2.29
2015	-0.012	0.010	1.24	0.004	-0.389	1.42
2016	0.014	0.011	-3.74	0.004	-0.748	3.78

1) 下标中 4~5 表示 5 月较 4 月的增加量; 9~10 表示 10 月较 9 月的增加量

2.5 热分层形成与消亡前后浮游植物优势门生物量变化特征

天目湖沙河水库浮游植物优势门为硅藻门、隐藻门和蓝藻门^[25]。浮游植物优势门及总生物量 5 月较 4 月呈现明显增加的现象, 图 6 为 TM1 和

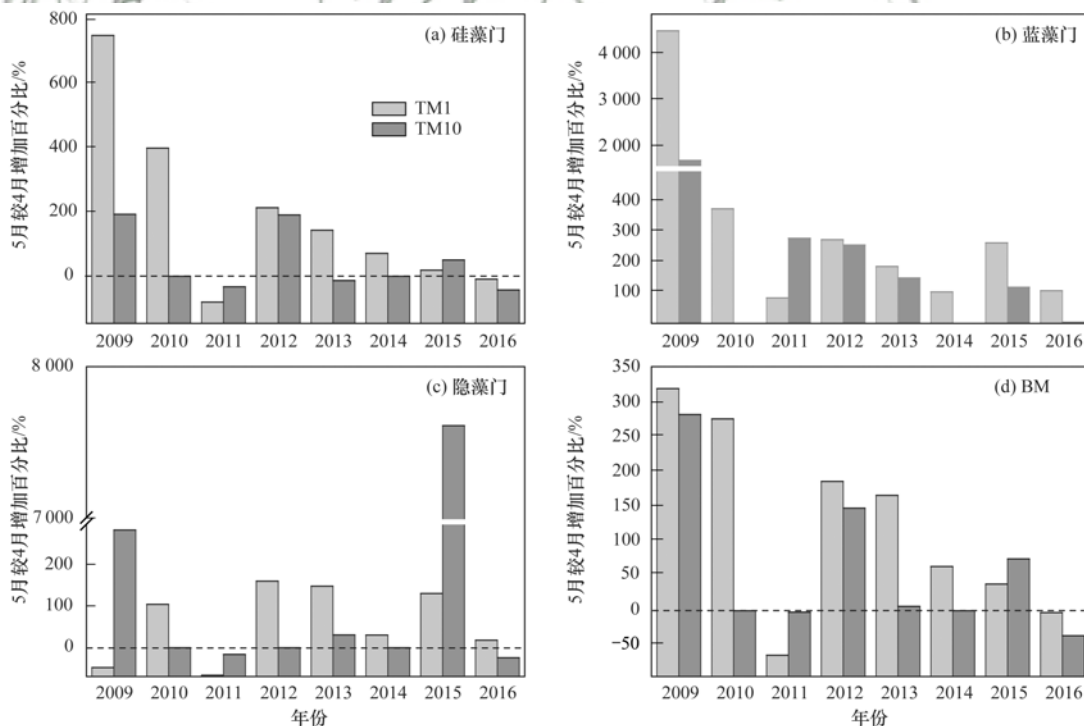


图 6 TM1 和 TM10 浮游植物优势门生物量及总生物量 5 月较 4 月的增加百分比

Fig. 6 Variations of biomass from phytoplankton from April to May in TM1 and TM10

TM10 硅藻门、隐藻门、蓝藻门及浮游植物总生物量 (BM) 5 月较 4 月的增加百分比情况. 2009 ~ 2016 年 TM1 和 TM10 的硅藻门、蓝藻门、隐藻门及浮游植物总生物量 5 月较 4 月的总体增幅无显著性差异 ($P > 0.05$), 但浮游植物生物量 5 月较 4 月的增加百分比数值在 TM1 和 TM10 情况有所不同. 其中硅藻门生物量在 TM1 的 8 a 平均增加百分比为 78%, 在 TM10 的 8 a 平均增加百分比为 41%, TM1 的 8 a 平均增加百分比较 TM10 大; 蓝藻门生物量除在 2011 年 TM1 的增加百分比较 TM10 的增加百

分比小, 其它各年 TM1 的增加百分比均明显大于 TM10 的增加百分比; 隐藻门生物量在 TM1 的 8 a 增加百分比为 23%, 在 TM10 的增加百分比为 80%, TM10 的增加百分比明显较高; 总生物量在 TM1 的 8 a 增加百分比为 75%, 在 TM10 的增加百分比为 58%, TM1 的增加百分比稍高于 TM10.

浮游植物优势门生物量及总生物量 10 月较 9 月明显减少. 图 7 为 TM1 和 TM10 浮游植物优势门生物量及总生物量 10 月较 9 月的减少百分比情况.

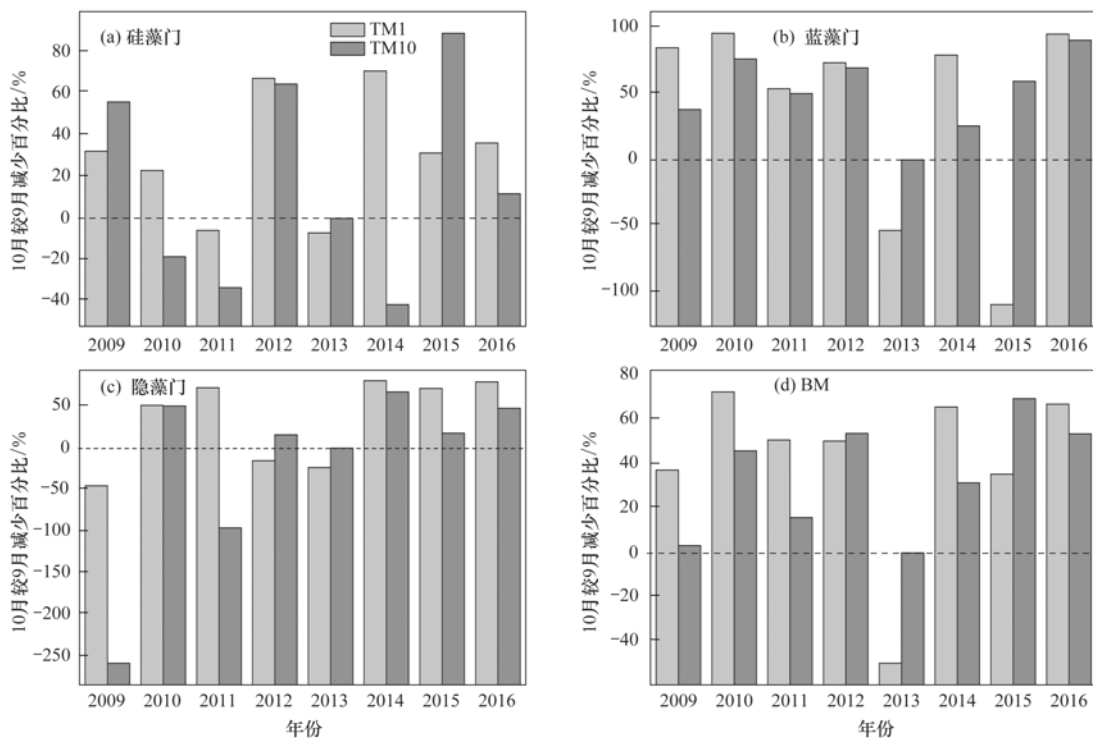


图 7 TM1 和 TM10 浮游植物优势门及总生物量在 10 月较 9 月的减少百分比

Fig. 7 Variations of biomass from phytoplankton from September to October in TM1 and TM10

2009 ~ 2016 年 TM1 和 TM10 的硅藻门、蓝藻门、隐藻门及浮游植物总生物量 (BM) 的减少百分比虽然在统计上不显著 ($P > 0.05$), 但浮游植物生物量 10 月较 9 月的减少百分比数值在 TM1 和 TM10 情况有所不同. 其中蓝藻门生物量在 TM1 的 8 a 减少百分比为 76%, 在 TM10 的减少百分比为 60%; 硅藻门生物量在 TM1 的 8 a 减少百分比为 34%, 在 TM10 的减少百分比为 50%, 硅藻门生物量在 TM1 的减少百分比较小; 隐藻门生物量在 TM1 的 8 a 减少百分比为 56%, 在 TM10 的减少百分比为 20%, 隐藻门生物量在 TM10 的减少百分比较小; 总生物量在 TM1 的 8 a 减少百分比为 53%, 在 TM10 的增加百分比为 43%, 总生物量在 TM1 的减少百分比稍高于 TM10.

3 讨论

3.1 热分层的控制因素

由于太阳辐射对水温的影响是持续的作用, 因此选择采样日前 15 d 的太阳净辐射日总量的平均值与采样日测定的水体温度进行相应的分析. 图 8 为采样日测定的水温表、底差与采样日前 15 d 的太阳净辐射日总量平均值的关系, 水温表、底差与前 15 d 太阳净辐射日总量平均值呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数达 0.69, 随着太阳辐射的增强, 水温表、底差逐渐增大, 热分层逐渐形成, 在水温表、底差达 8℃ 以上时, 水体热分层稳定形成. 高温期间 (8 月 7 ~ 22 日) 平均气温为 30.4℃, 水体日温度均超过 30℃, 此时水体温度分层最明

显, 温跃层强度最大, 而此时的温跃层略有下潜, 厚度变窄, 主要是由于长时间持续性的高温及较大的风速共同作用导致水体混合层厚度的加大而引起的. 气温降低后, 水体温度分层逐渐减弱至消失, 然而气温的高低是由太阳辐射强弱决定的, 这说明高温对热分层的影响主要是太阳辐射控制的. 在 6 月 18 日至 7 月 22 日期间降雨量较大, 水体表层温度逐渐降低, 水下 5 m 至表层的温度分层逐渐减弱, 但水下 5 ~ 11 m 温度分层基本未受影响, 说明降雨对水体的热分层影响仅在水下 5 m 至表层区间, 这主要是由于降雨带来的低温水及动力混合导致的, 从而也进一步说明了水体热分层的形成与消失主要由太阳辐射控制.

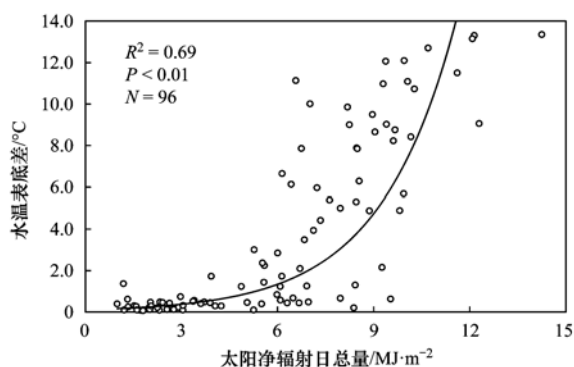


图 8 水温表、底差与太阳辐射的关系

Fig. 8 Relationship between solar radiation and the difference of water temperature between the surface and bottom

3.2 水质对热分层的响应特性

表层水体与大气进行气体交换和浮游植物的光合作用均会增加水体中的 DO 含量, 而水体中的浮游植物、微生物等水生生物的呼吸作用及有机物降解均会消耗水体中的 DO, 导致水体 DO 含量降低. 天目湖沙河水库 5 ~ 9 月热分层期间, 水体底层耗氧量大于增氧量, 导致水体底层厌氧环境形成. 热分层期间, 上层水体 DO 变化不大, 主要是因为上层水体通过水-大气界面的气体交换和浮游植物的光合作用为上层水体提供了 DO; 但是热分层期间, 温跃层的存在阻碍了上层 DO 向下传递, 底层水体 DO 得不到补充, 而且底层沉积物中有机质的矿化降解和水生生物等有机体死亡下沉进一步的氧化分解加剧底层水体 DO 的消耗, 底层水体耗氧量远超增氧量, 致使底层水体缺氧甚至厌氧, 因此热分层是天目湖沙河水库底层水体厌氧的主要原因. 这与曾明正等^[12]研究的周村水库底层水体厌氧的原因一致; 邱华北等^[32]研究的万峰湖结果也表明 DO 的分层结构是由热分层引起的. 10 月初气温降低, 水

体热分层消失, 由于上下水体的掺混作用及底层生物耗氧减弱, 底层 DO 含量迅速增加. 水体混合期间, 表、底层 DO 含量基本一致, 且均维持在较高水平.

氮、磷营养盐是生命活动所需的基本营养元素, 也是水体发生富营养化和水华的重要因素^[12]. 氮磷营养盐在水体-沉积物-微生物界面发生着剧烈的生物地球化学反应, 对库区水体的水质起到重要的控制作用. 4 ~ 5 月水体热分层逐步稳定, 底层水体形成厌氧环境, 由于底泥微生物活性增加、硝化反应得到抑制而释放出更多的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 故 5 月底层水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 较 4 月明显增加. 与 9 月相比, 10 月水体 TP 和 SS 含量在水体底层区域均明显增加. 由于 10 月为水库平水期, 降雨量较少, 入库流量小, 外来水对水体营养盐的影响不大, 因此 TP 含量增加可能是由于热分层期间底层水体处于严重缺氧甚至厌氧的环境引起的. 有研究表明, 厌氧条件下, 沉积物中的磷向水体释放且微生物的作用也有助于磷的释放^[33~35]; SS 含量的增加主要是因为 10 月水体热分层消失, 上下层水体混合对流扰动了沉积物而释放 SS.

TM1 在 5 ~ 9 月形成稳定的热分层现象, TM10 由于水深较浅, 一直处于混合状态. 温度不同, 对藻类群落结构有一定的影响. 硅藻属于相对喜凉的生物, 水位高、水量大的环境有利于硅藻的生长^[22]. 热分层形成与消失前后, TM1 与 TM10 在硅藻生物量变化比例上不同. 4 ~ 5 月隐藻门生物量在 TM10 增加百分比比较 TM1 大, 与 TM10 受上游河道来水悬浮物质和营养盐含量高的影响有关^[25], 而高悬浮质浓度和丰富有机质的生境特点更有利于隐藻的生长^[36], 热分层形成有助于水体悬浮颗粒物的沉降, 不利于隐藻生长. 而蓝藻门生物量增加百分比 TM1 比 TM10 高, 是因为水体的热分层有利于蓝藻门的生长繁殖, 这与 Kraemer 等^[19]的研究表明水体热力分层的增强会促使蓝藻水华暴发的结果一致.

9 ~ 10 月蓝藻门生物量在 TM1 减少百分比比较 TM10 大, 这也说明了稳定的热分层更加有利于蓝藻门的生长, 在热分层期间蓝藻门生长较好, 在热分层突然消失时, 蓝藻门生长受阻; 9 ~ 10 月隐藻门生物量减少百分比在 TM10 相对较小, 这可能亦是由于 TM10 水体悬浮物质和营养盐含量均较高, 为隐藻的生长提供了物质基础; 9 ~ 10 月硅藻门生物量在 TM1 减少百分比比较小, 主要与硅藻的生长

特性有关; 硅藻门、隐藻门及总生物量在 9~10 月减少百分比并未因热分层的消失产生明显变化, 而蓝藻门在热分层期间生长较好, 热分层的突然消失, 给蓝藻门的生长带来较大冲击。

4 结论

(1) 天目湖沙河水库春季表层水温升至 21℃ 时热分层逐步稳定, 在 5~9 月期间水体处于热分层状态; 秋季表层水温降至 19℃ 时热分层消失, 呈亚热带单循环混合模式。高温增大了水体热分层的稳定性, 降雨降低了水体表层的温度、减弱了水下 5 m 至表层的温度分层, 但没有全部破坏温度分层。

(2) 沙河水库在热分层期间, 底层水体处于厌氧状态, 底层水体 NH_4^+ -N 含量明显增加; 热分层消失后, 底层水体 DO、TP 及 SS 含量均增加; 稳定的热分层有利于蓝藻门的生长繁殖, 在水库环境保护中应当予以关注, 研发相应的应对措施。

致谢: 溧阳市天目湖水源地生态环境保护领导小组办公室在样品采集等方面提供了大力帮助, 中国科学院南京地理与湖泊研究所周永强助理研究员在数据统计方面给予指导, 查慧铭、胡耀躲硕士生在野外采样给予帮助, 张成英、郑泽霖、夏忠实验员协助了样品处理及水质分析, 在此一并表示感谢。

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] 吴莉莉, 王惠民, 吴时强. 水库的水温分层及其改善措施 [J]. 水电站设计, 2007, 23(3): 97-100.
- [3] 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.
Lin G E, Wang T, Lin Q Q, *et al.* Spatial pattern and temporal dynamics of limnological variables in Liuxihe Reservoir, Guangdong [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 387-394.
- [4] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化 [J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 54-60.
Wang Y C, Zhu J, Ma M, *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a Canyon-Reservoir, southwestern China [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1): 54-60.
- [5] 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.
Zhang S J, Peng W Q. Water temperature structure and influencing factors in Ertan Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1254-1258.
- [6] 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.
- [7] Yi Z Q, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Water temperature structure and impact of which on the bloom in spring in Xiangxi Bay at Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(5): 6-11.
- [7] 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.
- [8] 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.
Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, *et al.* Monitoring and analysis of thermodynamics in Tianmuhu Lake [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 61-67.
- [9] 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.
Lin J, Su Y P, Zhong H Z, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi reservoir (Fujian) during summer stratification [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(2): 244-250.
- [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.
Wang J F, Chen J A, Yang Y Q, *et al.* Physical and chemical characteristics of water in Lake Hongfeng during the disappearance of seasonal stratification [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(8): 845-851.
- [11] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏. 周村水库季节性热分层消亡期水质响应特性 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5695-5702.
Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P. Response of water quality of Zhoucun reservoir during the disappearance of seasonal thermal stratification [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10): 5695-5702.
- [12] 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.
- [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.
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.
- [14] 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.
Dong C Y, Yu Z M, Wu Z X, *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2574-2581.
- [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.

- 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): 1477-1485.
- [16] 成晓奕, 李慧贇, 戴淑君. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 818-826.
- Cheng X Y, Li H Y, Dai S J. Modeling of seasonal vertical variation of dissolved oxygen and its impacts on water environment in Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 818-826.
- [17] Elçi Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. *Limnology*, 2008, **9**(2): 135-142.
- [18] Macintyre S, Flynn K M, Jellison R, *et al.* Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, **44**(3): 512-529.
- [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] 贺冉冉, 罗淑葱, 朱广伟, 等. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(4): 344-349.
- He R R, Luo L C, Zhu G W, *et al.* Variation of dissolved oxygen and its influence on release of endogenous nitrogen in Tianmuhu reservoir in Liyang, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(4): 344-349.
- [21] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖 2001~2002 年环境调查及富营养化评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(1): 99-103.
- Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, *et al.* Main physical and chemical factors in Tianmuhu Lake, with evaluation of eutrophication from 2001 to 2002[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(1): 99-103.
- [22] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 等. 太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 9-21.
- Zhu G W, Jin Y W, Ren J, *et al.* Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 9-21.
- [23] Zhu G W, Cui Y, Han X X, *et al.* Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(1): 41-58.
- [24] 崔扬, 朱广伟, 李慧贇, 等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系[J]. *水生态学杂志*, 2014, **35**(3): 10-18.
- Cui Y, Zhu G W, Li H Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir and its relationship with phytoplankton community[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(3): 10-18.
- [25] 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- Sun X, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [26] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [27] 王银珠, 濮培民. 抚仙湖水温跃层的初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1982, (4): 1-9.
- [28] Kalf J. *Limnology: Inland water ecosystems*[M]. New Jersey, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002. 10, 154.
- [29] Obenour D R, Michalak A M, Zhou Y T, *et al.* Quantifying the impacts of stratification and nutrient loading on hypoxia in the northern Gulf of Mexico[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(10): 5489-5496.
- [30] 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.
- [31] Boatman C D, Murray J W. Modeling exchangeable NH_4^+ adsorption in marine sediments: process and controls of adsorption[J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, **27**(1): 99-110.
- [32] 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.
- Qiu H B, Shang L H, Li Q H, *et al.* Impacts of seasonal thermal stratification on the water environment of Wanfeng Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 1039-1044.
- [33] 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.
- Cai J B, Ding X F, Peng H Y, *et al.* Impact of environmental factors and submerged plant on phosphate release from sediment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(2): 151-154.
- [34] 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.
- Sun X H, Zhang Y, Zhang B L, *et al.* Microbial effects on phosphorus release in Taihu Lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, **25**(1): 24-27.
- [35] 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.
- Wang J Q, Sun Y M, Qian J Z, *et al.* Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment[J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*, 2002, **22**(6): 738-742.
- [36] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖北部隐藻生物量时空动态[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(1): 142-148.
- Liu X, Lu X H, Chen Y W. Temporal and spatial dynamics of Cryptophytes biomass in the north of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(1): 142-148.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing; An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)