

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

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

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源: 以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化: 以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比: 以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系

罗宜富¹, 李磊², 李秋华^{2*}, 焦树林¹, 李红梅², 陈峰峰³

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 3. 贵州医科大学公共卫生学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了解阿哈水库叶绿素 a (Chl-a) 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系, 于 2012 年枯水期至 2013 年平水期、丰水期对藻类与理化指标进行分层采样。结果表明 Chl-a 季节变化明显, 与藻类生物量季节变化较为一致, 而与丰度差别较大, 平水期发生甲藻水华, 浓度最高 ($91 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 枯水期与丰水期相对较低, 分别为 $8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。枯水期与丰水期水表层 Chl-a 浓度略高于中、底层, 表层光照、溶解氧相对充足, 利于藻类生长; 平水期表层 Chl-a 浓度远高于中、底层, 易在表层聚集的甲藻水华是主要原因。大坝 Chl-a 浓度高于库中, 这可能是大坝位于金钟河入库口, 营养盐高于库中的缘故。相关性分析得出 Chl-a 与甲藻门呈极显著正相关 ($R=0.798, P<0.01$); Chl-a 与 TP、DO、pH 呈极显著正相关 ($R=0.762, P<0.01$; $R=0.792, P<0.01$; $R=0.658, P<0.01$), 与 TN 显著正相关 ($R=0.388, P<0.05$) 与 N/P、 NO_3^- -N 显著负相关 ($R=-0.37, P<0.05$; $R=-0.435, P<0.05$)。逐步回归分析得出 DO、TP、N/P 为影响阿哈水库 Chl-a 分布的主要因子。此外热分层以及水温对 Chl-a 的影响也不容忽视。

关键词: 叶绿素 a; 时空分布; 藻类; 环境因子; 逐步回归分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4151-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703177

Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir

LUO Yi-fu¹, LI Lei², LI Qiu-hua^{2*}, JIAO Shu-lin¹, LI Hong-mei², CHEN Feng-feng³

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China)

Abstract: As one of the drinking water sources for Guiyang City in southwest China, the Aha Reservoir has an area of 190 km^2 and a volume of $5.42 \times 10^8 \text{ m}^3$. The water depth is less than 30 m, with an average depth of 13 m. Regulated by subtropical humid monsoon climate, it has cool summers and warm winters, with an annual mean air temperature of about 15.3°C and an annual normal rainfall of approximately 1,129 mm. Impacted heavily by human activity (e.g., untreated industrial and domestic sewage and agricultural non-point pollution sources), the eutrophication problem in the Aha Reservoir has become more serious each year. In order to explore the spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll a (Chl-a) and its relationship to algae and the driving factors in the Aha Reservoir, phytoplankton and water samples were collected in the dry period, normal period, and flood period. The results showed a significant seasonal variation in Chl-a, same as biomass, but not the same as the algal abundance. Highest Chl-a concentration ($91 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) occurred in the mean season with the dinoflagellate bloom but during dry and wet seasons, they were only $8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. During the dry and flood periods, the Chl-a concentrations in surface waters were slightly higher than the other layers caused by sufficient light and dissolved oxygen. But in the normal period, the Chl-a concentrations in surface waters were far higher than the other layers because of the dinoflagellate bloom assembling in surface waters. Located at the reservoir entrance of Jinzhong River, Dam sampling point owned higher Chl-a concentration than Kuzhong as a result of higher nutrients. Correlation analysis indicated that Dinoflagellate was positively correlated with Chl-a ($R=0.798, P<0.01$). Chl-a was positively associated with total phosphorus, dissolved oxygen, pH value, and total nitrogen ($R=0.762, P<0.01$; $R=0.792, P<0.01$; $R=0.658, P<0.01$; $R=0.388, P<0.05$) and it had a negative correlation with the N/P ratio and nitrate nitrogen ($R=-0.37, P<0.05$; $R=-0.435, P<0.05$). Stepwise regression analysis showed that TP, N/P ratio, and DO were the most important factors influencing the temporal and spatial distribution of Chl-a. Thermal stratification and water temperature were also the significant factors that could not be ignored.

Key words: chlorophyll a; spatial and temporal distribution; algae; driving factors; stepwise regression analysis

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1612442, 41263011); 贵州省水利厅项目(KT201401); 白云区科技局项目([2014]67, 70)

作者简介: 罗宜富(1958~), 男, 副教授, 主要研究方向为环境生态学, E-mail: 1752834384@qq.com

* 通信作者, E-mail: qiuhs2002@126.com

水库、湖泊水体富营养化逐年加剧,目前已成为水环境保护突出的问题^[1]. 叶绿素 a(Chl-a)通常被用于表征水中藻类生物量,评价水体营养状态以及管理水生态系统^[2],是湖沼学、水环境科学中的关键水环境参数^[3]. 因此,研究 Chl-a 浓度的时空分布及其与藻类以及环境因子的关系能更全面地了解水体生态环境,对认识水体富营养化的机制具有重要意义.

有关学者针对河流、湖泊等不同水体 Chl-a 及其环境因子的相关性研究已经做了大量工作,理化因子(光照、水温、水动力、水深、风速、营养盐)、生物因子(牧食压力)、区域因子(水体面积、土地利用)等因子均能对 Chl-a 产生重大影响^[2,4~9]. 比如 Chen 等^[4]通过室内模拟以及太湖野外实验证明水温与磷能够改变 Chl-a 浓度; Mayora 等^[5]对中古巴拉那河理化因子的研究得出水位、水深以及电导率对 Chl-a 浓度变化具有很好的解释性. 吴召仕等^[6]认为水下光照与水体交换时间对鄱阳湖 Chl-a 分布最为关键. de Oliveira 等^[8]探讨了巴西中部亚热带湖群 Chl-a 的决定因子,最终认为湖面积以及总氮等理化因子对 Chl-a 分布至关重要, Staehr 等^[9]则认为土地利用对湖泊 Chl-a 的影响极大. 此外,有关 Chl-a 与水体藻类关系的研究也有不少^[10~13],然而综合分析 Chl-a 与藻类以及环境因子关系的研究鲜见报道^[14].

阿哈水库为贵州高原典型的富营养化深水型水库,水体季节性热分层十分突出,而热分层的消亡往往伴随着突发性水质恶化事件^[15]. 近年来随着上游金钟河等河流大量工业以及生活污水的排入,富营养化状况逐年加剧. 目前有关阿哈水库 Chl-a 的研究仅见文献^[16],但其主要侧重 Chl-a 的水平分布,未对 Chl-a 垂直格局进行分析. 因此,本研究基于 2012 年至 2013 年阿哈水库采样的监测数据,着重对 Chl-a 的时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系进行分析,以期对阿哈水库富营养化管理提供参考.

1 材料与方法

1.1 水库概况及采样点设置

阿哈水库地处贵阳市南郊,为亚热带季风气候区,夏季凉爽多雨,冬季湿冷干燥. 年平均气温 15.3℃,其流域面积为 190 km²,总库容约 5.42 × 10⁸ m³,平均水深 13 m,最大水深达 30 m.

于枯水期(2012 年 11 月 1 日)、平水期(2013

年 4 月 10 日)和丰水期(2013 年 7 月 23 日)对阿哈水库进行 3 次分层采样. 根据该水库水域特点以及研究需求将采样点(图 1)设于大坝(DB, E106°39'12.91", N26°32'18.21")与库中(KZ, E106°38'50.72", N26°32'03.80").

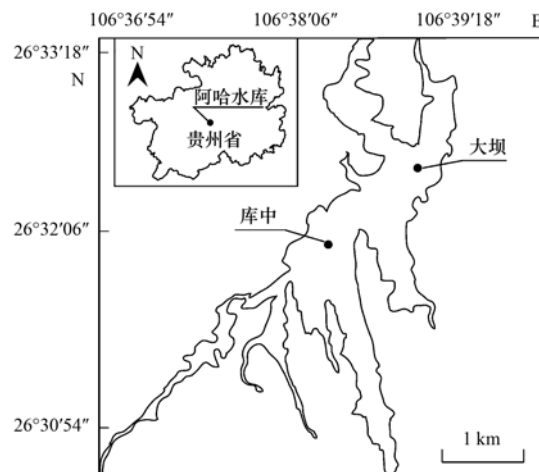


图 1 阿哈水库样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Aha Reservoir

1.2 研究方法

藻类定性样品用 25 号(64 μm)浮游生物网在水面下 0.3~0.5 m 处于水平及垂直方向“∞”字形缓慢拖网,用 3%~5% 的福尔马林固定. 定量样品使用采水器沿纵向在水深 0.5、5、10、15、20 m 处各取 1.5 L 水样,用 3%~5% 福尔马林固定,于实验室中经 48 h 沉淀后浓缩至 50 mL,用于藻细胞密度计数及藻种鉴定,藻种鉴定与分类方法见文献^[17].

使用 YSI 水质检测仪现场测定水体温度(WT)、溶解氧(DO)与 pH 等,透明度(SD)数据则通过赛氏盘(Secchi Disk)获取,按照 GB 3838-2002《地表水环境质量标准方法》测定总磷(TP)、总氮(TN)、硝氮(NO₃⁻-N)与正磷酸盐(PO₄³⁻-P)等指标. 运用丙酮萃取方法测定叶绿素 a(Chl-a)^[18].

1.3 数据分析

采用 Surfer 8.0 软件绘制 Chl-a 等值线图;环境因子垂直分布图采用 Origin 8.0 绘制;其他图表均用 Excel 2007 进行绘制;单因素方差分析(One Way ANOVA)与逐步回归分析(stepwise regression analysis)采用软件 SPSS 18.0.

2 结果与讨论

2.1 藻类组成以及丰度与生物量季节变化

3 次采样共鉴定出藻类 89 种(属),隶属于 7

个门. 其中蓝藻门 14 种; 硅藻门 20 种; 绿藻门 47 种; 裸藻门 5 种; 甲藻门, 隐藻门, 金藻门各 1 种 (定量样品中未检出). 绿藻门最多, 占 52.8%; 硅藻门和蓝藻门分别占 22.5%、15.7%.

藻类丰度季节更替特征明显, 呈现出枯水期 < 平水期 < 丰水期的特征, 在枯水期以硅藻细胞丰度最高; 平水期蓝藻与甲藻占有较大比例, 丰水期以蓝藻占绝对优势. 藻类生物量与丰度季节更替特征有所不同, 表现为枯水期 < 丰水期 < 平水期的特征, 在枯水期以硅藻细胞丰度最高, 甲藻次之; 平水期甲藻占绝对优势, 丰水期以蓝藻与硅藻共同占据优势 (图 2~3). 由此可见, 藻类丰度与生物量季节变化并不一致.

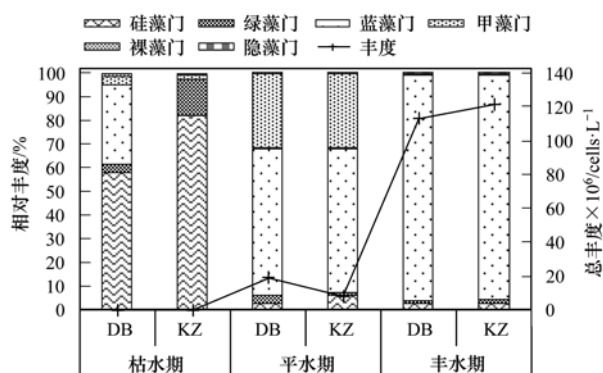


图 2 藻类丰度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of algal abundance

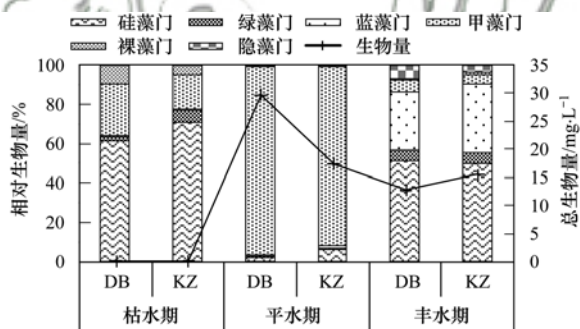


图 3 藻类生物量季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of algal biomass

2.2 环境因子

单因素方差分析发现, 环境因子存在较大的季节差异性 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 与 pH 除外), 水温波动范围为 $9.15^\circ\text{C} \sim 25.4^\circ\text{C}$ ($F=36$, $P<0.01$, $n=30$), SD 波动范围为 $0.8 \sim 1.2 \text{ m}$ ($F=94$, $P<0.01$, $n=30$), TP 波动范围为 $0.01 \sim 0.195 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($F=9$, $P<0.01$, $n=30$), TN 波动范围为 $1.132 \sim 2.665 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($F=4$, $P<0.05$, $n=30$), TN/TP 波动范围为 $13 \sim 115$ ($F=28$, $P<0.01$, $n=30$), $\text{NO}_3^- \text{-N}$

波动范围为 $0.663 \sim 1.661 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($F=5$, $P<0.05$, $n=30$), $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 波动范围为 $0.015 \sim 0.112 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($F=4$, $P<0.05$, $n=30$), TP 的最大值出现在平水期, 最小值出现在丰水期; TN 的最大值出现在枯水期, 最小值出现在丰水期 (表 1); 丰水期降水丰富, 对营养盐具有一定程度的稀释作用, 此外, 丰水期浮游植物的大量繁殖也能消耗掉水中部分营养盐.

枯水期、丰水期水温均表现出表层高于中底层的特征, 平水期水体各层变化较小. 从水温的垂直断面上可以看出: 阿哈水库的枯水期 (11 月 1 日) 为弱分层期, 平水期 (4 月 10 日) 为完全混合期, 丰水期 (7 月 23 日) 为稳定分层期 (图 4). 这与同处贵阳市内的红枫湖 (4~9 月) 与百花湖 (4~10 月) 形成分层期略有不同^[15,19]. 这可能是因为枯水期采样当天气温仍然较高 ($10 \sim 19^\circ\text{C}$), 前期未出现大幅度降温天气, 因此水温上高下低, 仍能维持一定热分层; 平水期采样前期一次大幅度降温 (降幅 10°C 左右) 的“倒春寒”来临, 表层水体温度降低, 密度下沉后产生混合, 进而推迟了 4 月分层期的到来.

DO 垂直变化明显受到水温引起的分层影响, 枯水期、丰水期由于水体稳定分层, 底层出现厌氧环境, DO 极低, 最低值仅有 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 平水期分层结束, 受水体完全混合的影响, 底层 DO 仍能保持一定浓度, 比如库中最低值为 $6.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 5). 受到水气界面的氧气补充以及浮游植物光合作用的影响, 各水期表层 DO 均能达到较高浓度. 平水期由于受水华藻类大量繁殖影响, DO 出现最大值, 为 $12.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 阿哈水库为底部季节性缺氧的水库, 这反映了该水库隐藏着极大地生态风险.

TP 枯水期与丰水期表层低于中底层, 可能是因为水体分层形成的底层厌氧环境使得底泥储存的磷大量释放并积聚于底层 (图 6). 平水期表层高于中底层则是因为自采样前 5 天起, 气温骤降 10°C (水体热分层的突发性消亡往往出现在降温的当天或稍后), 倒春寒来临, 水体分层消失, 水体混合导致湖水上翻, 底层厌氧环境消失, 而大量底泥营养盐被带入上层水体, 此外, 平水期多降雨, 上游与湖滨冲刷带来的营养物质对表层进行了补充. 外源与内源营养盐双管齐下, 为平水期甲藻水华的表层暴发提供了条件, 进而产生大量有机磷.

2.3 叶绿素 a 时空分布特征

大坝与库中 Chl-a 浓度季节变化过程一致, 均表现出平水期极高, 丰水期次之, 枯水期最低的趋

表 1 环境因子变量

Table 1 Variables of environmental factors

变量	枯水期	平水期	丰水期
WT/°C	15.4(9.15~17.3)	14.1(11.5~15.4)	23(18.4~25.4)
SD/m	1.19(1.18~1.2)	0.9(0.8~1)	0.83(0.8~0.85)
pH	7.68(7.42~7.82)	7.98(7.5~8.47)	7.72(7.15~8.23)
DO/mg·L ⁻¹	3.78(0.11~6.44)	8.39(1.89~12.39)	3.42(0.53~5.88)
TP/mg·L ⁻¹	0.061(0.042~0.147)	0.091(0.026~0.195)	0.022(0.01~0.046)
TN/mg·L ⁻¹	1.907(1.640~2.665)	1.813(1.538~2.552)	1.559(1.132~1.822)
N/P	31(18~41)	20(13~59)	70(39~115)
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	0.016(0.001~0.092)	0.001(0~0.005)	0.001(0~0.006)
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	1.28(1.144~1.488)	1.116(0.803~1.661)	1.023(0.663~1.201)
NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.058(0.04~0.083)	0.037(0.015~0.047)	0.062(0.034~0.112)

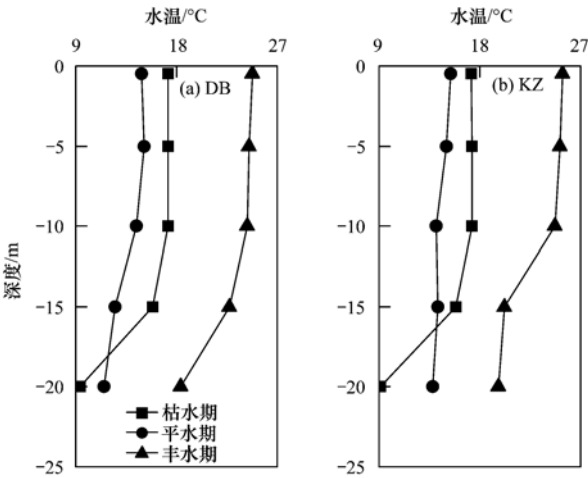


图 4 水温时空分布特征

Fig. 4 Temporal and spatial distribution of WT

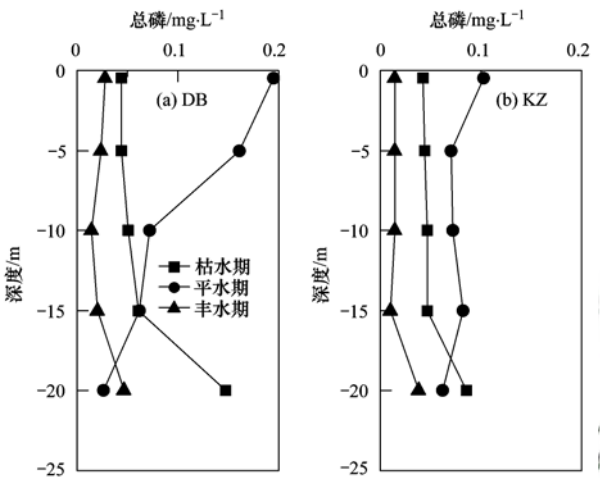


图 6 总磷时空分布特征

Fig. 6 Temporal and spatial distribution of TP

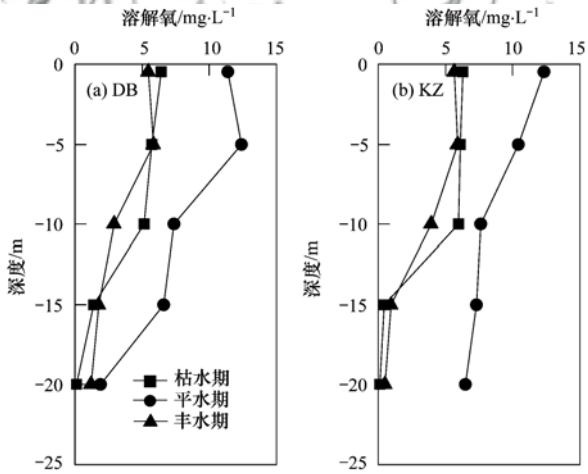


图 5 溶解氧时空分布特征

Fig. 5 Temporal and spatial distribution of DO

势(图 7). 这与该水库平水期发生了甲藻水华是一致的, 该时期藻类细胞丰度虽然不如丰水期, 然而水华藻种甲藻的细胞丰度最大值达到 6.2×10^6 cells·L⁻¹, 生物量为 24 mg·L⁻¹, 而表层生物量最大值达到 120 mg·L⁻¹, 这导致了 Chl-a 浓度的暴增

(91 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 枯水期正值秋季, 水温开始降低, 细胞丰度处于 3 个水期中的最低值, 生物量为 0.03 mg·L⁻¹, 故 Chl-a 浓度维持在最低水平 (8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); 丰水期细胞丰度最高, 达到 1×10^8 cells·L⁻¹ 之多, 远高于平水期的 10^6 cells·L⁻¹, 而其生物量却低于平水期, 仅为 14 mg·L⁻¹, 故 Chl-a 浓度相对较低 (16 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 由于此时在丰度上占绝对优势的藻种为蓝藻中的湖泊假鱼腥藻 (相对丰度达到 90% 以上), 其为小型丝状蓝藻, 单个藻体生物量极低^[20], 本研究中仅为 73×10^{-5} mg·L⁻¹. 因此对 Chl-a 贡献较小, 此外, 该时期丰富的降水对 Chl-a 具有一定稀释作用. 由此可见, Chl-a 季节分布与藻类生物量季节分布较为一致, 但与丰度差别较大. 这证明了用 Chl-a 浓度代替浮游植物生物量的可行性, 但需注意的是, 部分情况下, Chl-a 浓度无法准确反映藻类丰度.

垂直分布上看, 枯水期与丰水期水体表层 Chl-a 浓度略高于中、底层, 表层光照、溶解氧相对充足, 利于藻类生长; 平水期表层 Chl-a 浓度远高于

中、底层，这可能是因为水华暴发易在表层大量聚集，形成“藻华层”。Chl-a 浓度于平水期大坝 5 m 以上水层与库中表层水体出现 3 个峰值，均表现出甲藻生物量占据绝对优势的特征，而库中 5 m 处甲藻优势度降低，Chl-a 浓度随即下滑。枯水期与丰水期以硅藻，甲藻，蓝藻共同占据优势，Chl-a 则无明显峰值，各水层差异相对较小。因此可以看出，甲藻对 Chl-a 的贡献最大。

从样点上看，3 个水期中大坝的大多数水层 Chl-a 均高于库中，这可能是大坝位于金钟河入库口，营养盐高于库中的缘故(大坝 TP、TN 均值为 $0.066\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.837\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；库中 TP、TN 均值为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.682\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。丰水期大坝表层

Chl-a 略低于库中，则是因为该时期降雨丰沛，水库开闸泄洪导致了大坝表层藻类的部分损失。Chl-a 于大坝与库中两样点的空间异质性说明了外源输入对水库水质的影响颇大。调查发现，大坝附近恰好建有南郊与中曹司两个饮用水抽水泵站，因此从饮用水安全角度考虑，需加大对金钟河的生态整治力度。此外，根据 Chl-a 主要汇集于表层与 5 m 的垂直分布特征，泵站抽水口建议设于 10 ~ 15 m 左右，而 15 ~ 20 m 位于库底，将抽水口建于此易引起底泥上翻，亦不合理。因此从水库调水方式及水质管理上来说，抽水泵站不宜建于河流入库口附近；对于深水水库而言，中层水质相对较好，从此处调水较为合适。

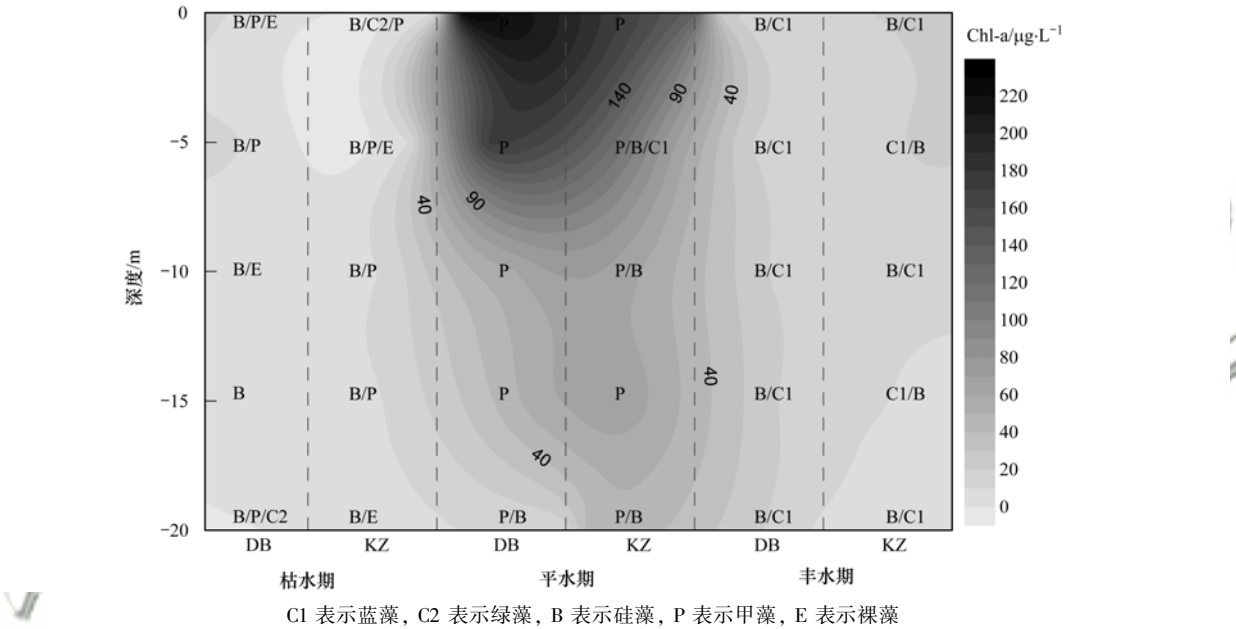


图 7 Chl-a 与优势藻类时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution between Chl-a and dominant algae

2.4 叶绿素 a 与藻类以及环境因子之间的关系

2.4.1 相关性分析

Chl-a 与藻类生物量的 Pearson 相关性分析表明(表 2)，Chl-a 仅与甲藻门呈极显著正相关，与其余门类无显著相关性，故甲藻门为 Chl-a 主要贡献藻种；这说明了研究期间甲藻对 Chl-a 贡献最大，其生物量的变化对 Chl-a 浓度的影响较其他藻类显著。蓝藻门虽然丰度最高，但由于占绝对优势的假

鱼腥藻单个藻体生物量极低，未对 Chl-a 产生较大的贡献。因此，不为 Chl-a 主要贡献藻种，这与王震等^[14]的研究结果有所不同，主要原因可能是太湖优势藻种为铜绿微囊藻，比假鱼腥藻单个藻体生物量更高，能产生更多 Chl-a 的缘故。

由 Chl-a 与环境因子的 Pearson 相关性分析可知(表 3)：Chl-a 与 TP、pH、DO 呈极显著正相关，与 TN 显著正相关，与 N/P 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈显著负相关。

表 2 Chl-a 与藻类的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of Chl-a and algae

项目	硅藻门	绿藻门	蓝藻门	甲藻门	裸藻门	隐藻门
Chl-a	-0.142	-0.058	-0.135	0.798 **	0.172	-0.163

1) * 为 $P < 0.05$ ，** 为 $P < 0.01$

表 3 Chl-a 与环境因子的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of Chl-a and environmental factors

项目	TP	TN	N/P	PO ₄ ³⁻ -P	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	WT	EC	pH	DO	SD
Chl-a	0.762 **	0.388 *	-0.37 *	-0.168	-0.435 *	-0.328	-0.225	-0.212	0.658 **	0.792 **	-0.328

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

2.4.2 逐步回归分析

由于相关性分析中 Chl-a 仅与甲藻门呈极显著正相关,故不再对其进行逐步回归分析.一般而言,pH 是 Chl-a 的被动影响因子,不为其限制因子^[21].藻类光合作用(特别是发生水华时)大量吸收水中的 CO₂,释放 O₂,进而增加了 pH 值,调查中平水期发生甲藻水华时,pH 均值恰好达到最大值(pH=7.98),而平水期位于大坝水体 0.5 m 与 5 m 处的两个 pH 极大值(pH=8.47,8.39)恰好对应甲藻的两个峰值,因此 pH 值虽与 Chl-a 呈显著正相关,但不是影响 Chl-a 的主要因子.因此,在选择与 Chl-a 显著相关的环境因子作为逐步回归方程的自变量之前优先去除 pH 环境因子,故与 Chl-a 显著相关的自变量 TP、TN、N/P、NO₃⁻-N 与 DO 被选入,最终建立环境因子对 Chl-a 的回归方程,找出影响 Chl-a 浓度与时空分布的主要环境因子.逐步回归的分析结果如表 4 所示.在极显著水平下仅有 DO、TP、N/P 这 3 个因子入选.因此,TP、DO、N/P 为影响阿哈水库 Chl-a 时空分布的主要环境因子.

表 4 Chl-a 与环境因子的回归分析

Table 4 Regression analysis of Chl-a and environmental factors

回归方程	R 值	综合 F 值
Chl-a = -70.984 + 8.49DO + 809.88TP + 0.373N/P	0.931	56.358

作为藻类生长必要条件之一,营养盐的变化可以影响藻类的群落结构,丰度以及生物量,进而对 Chl-a 产生一定影响.为研究 Chl-a 与理化因子之间的关系,某机构在 264 次实验中发现^[22],水体磷为唯一主导因子的占 80%,氮为唯一主导因子的占 11%.本研究中,回归分析得出 TP 为影响 Chl-a 时空分布的主要因子,TN 与 Chl-a 相关性相对较低,这与 OECD 所做的大多数结果吻合.Parinet 等^[23]认为,当 N/P 值大于 7.2 时,磷为限制性因素.本研究中,绝大多数样点 N/P 值均高于 16,表明阿哈水库为磷限制性水库,故 N/P 是影响 Chl-a 时空分布的重要因子,这与毕京博等^[24]的研究结论是一致的.

DO 是浮游植物新陈代谢的重要物质,浮游植

物呼吸作用需要 DO 的参与,而光合作用又释放出氧气,影响 DO 的浓度,两者互为因果.平水期水体发生甲藻水华,光合作用大于呼吸作用,其浓度的两个极大值恰好对应了甲藻的两个峰值,且水体混合,底层不存在厌氧环境,因此主要是浮游植物影响了 DO.枯水期与丰水期由于水体热分层导致水体底层出现厌氧,极低的 DO 限制了底层浮游植物的生长,进而 Chl-a 浓度降低;由于空气中氧离子的补充,水体表层 DO 通常较为丰富,这一定程度上有利于浮游植物的增长.因此 DO 也是影响 Chl-a 时空分布的主要因子,这有别于部分学者认为的 DO 为浮游植物的被影响因子^[21],而与钱昊钟等^[25]的研究结果一致.

水体热分层广泛存在于自然界,其形成主要受水体深度、流动性以及气候条件等因素影响^[26].通常认为,水体分层影响水体中诸多生物、化学和物理的过程^[15].枯水期与丰水期,阿哈水库正值水体分层期,浮游植物垂直迁移不便,这一定程度上影响着浮游植物丰度,生物量,以及群落结构的垂直变化;此外,由于热分层,水体底层缺氧,进而限制了浮游植物生长,Chl-a 浓度较低.平水期分层结束,水体完全混合,湖水“上翻”,大量底泥营养盐及甲藻孢囊被带入水体,进而为甲藻水华提供优厚条件,极大地提高了水体 Chl-a 浓度.这与一般认为的水体分层更易引发水华暴发的结论有所不同^[27],阿哈水库甲藻水华暴发于水体完全混合的平水期,这可能是因为甲藻具有主动运动的能力,即使水体处于混合状态,亦可通过鞭毛垂直迁移至光照充足的表层^[28].姚绪姣等^[29]亦认为当混合层高于真光层时不会完全限制甲藻的生长.

此外,水温也经常成为影响 Chl-a 时空分布的重要因素^[7],然而本研究中两者相关性极低.这可能是因为平水期水华的暴发导致水温最高的丰水期 Chl-a 浓度远低于平水期,且枯水期、平水期水温差别较小,而 Chl-a 差别却较大.本文中水温虽然与 Chl-a 相关性较小,但仍可通过直接影响热分层等环境因子进而间接地影响 Chl-a,而李磊等^[30]亦认为水温为影响阿哈水库浮游植物功能群时空分布的主要因子,

故水温仍一定程度上影响着 Chl-a 的分布。

3 阿哈水库与国内其他富营养化水体 Chl-a 的主要影响因子比较

由表 5 可以看出,不同富营养化水体中 Chl-a 的主要影响因子各有不同,这一定程度上反映了不同地域水体生态系统的多样性与复杂性。其中,磷在国内很多富营养化水体中为主要影响因子^[21,25,31~34],而氮通常十分丰富,不再成为影响 Chl-a 分布的限制因子,这与本研究的结论一致。与以往研究不同^[7,31,35~37],本文水温与 Chl-a 并无显著相关性,主要通过间接影响 Chl-a 的关键环境因子(热分层等)进而对 Chl-a 的分布产生一定影响。pH、DO 虽与 Chl-a 相关性较强,但通常被认为 Chl-a 的被影响因子^[21],这与本文认为的 DO 亦为 Chl-a 的主要影响因子有所差异。在某些风速较大的水体中^[7,35],风速对 Chl-a 时空分布的影响极为显著,特别是水华期间,藻华往往聚集在湖泊盛行风下方向区域。然而,本研究中 3 次采样期间均为微风,且采样方式为分层采样,微风难以影响到下层水体,因此风速的影响可能较小。深水水库(湖泊)

中,光照往往成为影响 Chl-a 垂直分布的重要因子,本文 Chl-a 浓度表现出表层高于中、底层的垂直分布特征证实了这一点。此外,水动力条件在部分水体也表现出直接或间接地影响 Chl-a 分布的能力。比如三峡正常蓄水后 Chl-a 峰值区向口门内位移^[38];古夫河着生藻类生物量时间变化主要受水动力(流速)的影响^[13],本研究中水动力条件影响能力在丰水期较为突出,此时多大到暴雨,正值洪水防范期,人为地开闸泄洪减少了水体滞留时间,冲刷作用变强,浮游植物损失率大,进而 Chl-a 浓度降低。李柱等^[35]认为降水对浮游植物造成冲击,进而稀释了 Chl-a 浓度,这在本研究中也体现。丰水期水温最高,Chl-a 浓度并未出现大的增长,这很有可能是丰富的降水对 Chl-a 浓度进行了稀释,此外,丰富的降水迫使水库开闸泄洪,从而水力冲刷作用变强,进而导致了浮游植物的损失,这也有可能间接地造成了 Chl-a 浓度的降低。值得一提的是,深水水体中热分层通过影响生物、化学和物理因子的垂直迁移,也能间接地对 Chl-a 分布产生一定影响。比如李培培等^[39]和王琳杰等^[40]均认为热分层显著影响 Chl-a 动态分布,这与本研究的结果一致。

表 5 阿哈水库与国内其他富营养化水体 Chl-a 的主要影响因子比较¹⁾

Table 5 Comparison of critical impact factor on Chl-a between Aha Reservoir and other eutrophic water bodies							
水体	Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	N/P	营养水平	主要影响因子	文献
秦淮河	73.7	0.24	5.25	26.9	富营养	磷	[21]
太湖	4.65~37	—	—	—	严重富营养	总磷、水温、溶解氧	[25]
苏州浅水湖区	26	—	—	—	富营养	水温、磷	[31]
鄱阳湖	10.58	0.07	1.38	—	富营养	水下光照条件、水体交换时间	[6]
乌梁素海	1.54~26.87	—	—	—	富营养	浊度、悬浮物、总磷、总氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮	[32]
红枫湖	0.47~62	0.003~0.12	0.5~3.5	>7.2	富营养	磷	[33]
滴水湖	3~56	0.161	0.882	10.7	富营养	磷	[34]
洱海	10.4	0.028	0.63	22.5	富营养	水温、营养盐、捕食、风速	[7]
南淝河	83.5	0.31	5.68	26.9	严重富营养	水温、风速、降雨、磷	[35]
巢湖	27.01	0.16	1.05	6.6	严重富营养	水温、磷、氮	[36]
临江河	22.7~66.1	—	—	7.9~25.9	富营养	水温、流速、磷	[37]
阿哈水库	8~91	0.058	1.76	49.5	富营养	总磷、溶解氧、氮磷比、热分层、水温	本研究

1) “—”表示数据缺失

4 结论

(1) Chl-a 表现出平水期高,枯水期与丰水期相对较低的季节特征,这与生物量季节变化一致,而与丰度有所不同,这证明了用 Chl-a 代替浮游植物生物量的可行性,但需注意的是,部分情况下,Chl-a 无法准确反映藻类丰度。垂直断面上看,枯水期与丰水期水体表层 Chl-a 浓度高于中、底层,表层较高的光照与溶解氧是主要原因;平水期表层远高于中、底层则是因为表层发生甲藻水华。从空间

点位上看,位于金钟河附近,营养盐更为丰富的大坝 Chl-a 浓度高于库中。

(2) 逐步回归分析表明 TP、DO、N/P 为影响阿哈水库 Chl-a 分布的主要因子,此外水体热分层以及水温对 Chl-a 的影响也不容忽视。

参考文献:

[1] Zhu W, Wan L, Zhao L F. Effect of nutrient level on phytoplankton community structure in different water bodies[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(1): 32-39.
[2] Carneiro F M, Nabout J C, Vieira L C G, et al. Determinants of chlorophyll-a concentration in tropical reservoirs [J].

- Hydrobiologia, 2014, **740**(1): 89-99.
- [3] 郭劲松, 陈园, 李哲, 等. 三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 976-981.
- Guo J S, Chen Y, Li Z, *et al.* Seasonal variation of chlorophyll a and its potential relationship with various algal species in Xiaojiang River backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 976-981.
- [4] Chen M J, Li J, Dai X, *et al.* Effect of phosphorus and temperature on chlorophyll a contents and cell sizes of *Scenedesmus obliquus* and *Microcystis aeruginosa*[J]. Limnology, 2011, **12**(2): 187-192.
- [5] Mayora G, Devercelli M, Giri F. Spatial variability of chlorophyll-a and abiotic variables in a river-floodplain system during different hydrological phases[J]. Hydrobiologia, 2013, **717**(1): 51-63.
- [6] 吴召仕, 张路, 刘宝贵, 等. 鄱阳湖丰水期水体中叶绿素 a 含量空间分布及其与环境因子的关系[J]. 湿地科学, 2014, **12**(3): 286-292.
- Wu Z S, Zhang L, Liu B G, *et al.* Spatial distribution of chlorophyll a in Poyang Lake during wet season and its relationship with environmental factors[J]. Wetland Science, 2014, **12**(3): 286-292.
- [7] 杨威, 邓道贵, 张赛, 等. 洱海叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 858-864.
- Yang W, Deng D G, Zhang S, *et al.* Seasonal dynamic and spatial distribution of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(6): 858-864.
- [8] de Oliveira Marcionilio S M L, Machado K B, Carneiro F M, *et al.* Environmental factors affecting chlorophyll-a concentration in tropical floodplain lakes, Central Brazil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(11): 611.
- [9] Staehr P A, Baastrup-Spohr L, Sand-Jensen K, *et al.* Lake metabolism scales with lake morphometry and catchment conditions[J]. Aquatic Sciences, 2012, **74**(1): 155-169.
- [10] Gregor J, Mařálek B. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods[J]. Water Research, 2004, **38**(3): 517-522.
- [11] Boyer J N, Kelble C R, Ortner P B, *et al.* Phytoplankton bloom status: chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA[J]. Ecological indicators, 2009, **9**(S6): S56-S67.
- [12] 张军毅, 陆敏, 叶凉, 等. 夏季梅梁湖蓝绿藻密度和叶绿素的时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(S1): 97-100.
- Zhang J Y, Lu M, Ye L, *et al.* Temporal and spatial distributions of blue-green algae density and chlorophyll in summer Meiliang Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, **19**(S1): 97-100.
- [13] 吴述园, 葛继稳, 苗文杰, 等. 三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2013, **33**(21): 7023-7034.
- Wu S Y, Ge J W, Miao W J, *et al.* Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(21): 7023-7034.
- [14] 王震, 邹华, 杨桂军, 等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 567-575.
- Wang Z, Zhou H, Yang G J, *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(4): 567-575.
- [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] 薛飞, 夏品华, 林陶, 等. 喀斯特深水水库叶绿素 a 与环境因子关系的研究——以阿哈水库为例[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(16): 9811-9814.
- Xue F, Xia P H, Lin T, *et al.* Study on the relationship between chlorophyll-a and environmental impact factors in deep reservoir in Karst Areas[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(16): 9811-9814.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China—systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [18] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J]. 生态科学, 2005, **24**(1): 9-11.
- Lin S J, He L J, Huang P S, *et al.* Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton[J]. Ecology Science, 2005, **24**(1): 9-11.
- [19] 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.
- [20] 李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4436-4443.
- Li L, Li Q H, Jiao S L, *et al.* Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4436-4443.
- [21] 周贝贝, 王国祥, 徐瑶, 等. 南京秦淮河叶绿素 a 空间分布及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 267-272.
- Zhou B B, Wang G X, Xu Y, *et al.* Spatial distribution of chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Qinhuai River, Nanjing[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(2): 267-272.
- [22] Vollenweider R A, Kerekes J. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control[M]. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD), 1982. 156.
- [23] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management—application to a tropical lake system[J]. Ecological Modelling, 2004, **178**(3-4): 295-311.
- [24] 毕京博, 郑俊, 沈玉凤, 等. 南太湖入湖口叶绿素 a 时空变

- 化及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(6): 7-13.
- Bi J B, Zheng J, Shen Y F, *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a concentration and its relationship with environmental factors in the inlets of South Taihu Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(6): 7-13.
- [25] 钱昊钟, 赵巧华, 钱培东, 等. 太湖叶绿素 a 浓度分布的时空特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 789-796.
- Qian H Z, Zhao Q H, Qian P D, *et al.* Spatial-temporal characteristic and influential factors of the chlorophyll-a concentration of Taihu Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(5): 789-796.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Pollinger U. Freshwater armored dinoflagellates: growth, reproduction strategies, and population dynamics [A]. In: Sandgren C D, (Ed.). *Growth and Reproduction Strategies of Freshwater Phytoplankton* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 134-174.
- [29] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(6): 645-651.
- Yao X J, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Preliminary studies on the mechanism of winter dinoflagellate bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(6): 645-651.
- [30] 李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3604-3611.
- Li L, Li Q H, Jiao S L, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in aha reservoir and their influencing factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3604-3611.
- [31] 阮晓红, 石晓丹, 赵振华, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 556-562.
- Ruan X H, Shi X D, Zhao Z H, *et al.* Correlation between chlorophyll-a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(5): 556-562.
- [32] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海叶绿素 a 与理化因子的统计分析[J]. 环境化学, 2010, **29**(2): 315-319.
- Zhang X J, Li C Y, Zhang S, *et al.* Statistical analysis between chlorophyll-a concentration and physical-chemical factors in the lake of Wuliangsu Hai [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **29**(2): 315-319.
- [33] 邓河霞, 夏品华, 林陶, 等. 贵州高原红枫湖水叶绿素 a 浓度的时空分布及其与环境因子关系[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1630-1637.
- Deng H X, Xia P H, Lin T, *et al.* Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a concentration and its relationship with environmental factors in Hongfeng reservoir, Guizhou plateau, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(8): 1630-1637.
- [34] 梅卫平, 江敏, 阮慧慧, 等. 滴水湖叶绿素 a 时空分布及其与水质因子的关系[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(5): 1249-1254.
- Mei W P, Jiang M, Ruan H H, *et al.* Spatiotemporal distribution of chlorophyll-a and the relation to water quality variables in Dishui Lake of Shanghai, East China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1249-1254.
- [35] 李柱, 郭伟杰, 成水平, 等. 南淝河叶绿素 a 时空分布特征及环境因子影响分析[J]. 水生生物学报, 2014, **38**(2): 342-350.
- Li Z, Guo W J, Cheng S P, *et al.* The spatial and temporal distribution of chlorophyll-a and its correlation with environmental factors in the Nanfeihe River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(2): 342-350.
- [36] 缪灿, 李堃, 余冠军. 巢湖夏、秋季浮游植物叶绿素 a 及蓝藻水华影响因素分析[J]. 生物学杂志, 2011, **28**(2): 54-57.
- Miao C, Li K, Yu G J. Analysis of phytoplankton chlorophyll-a concentration in summer and autumn in Chaohu Lake and the impact factors of cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Biology*, 2011, **28**(2): 54-57.
- [37] 罗固源, 郑剑锋, 许晓毅, 等. 次级河流回水区叶绿素 a 与影响因子的多元分析——以临江河为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(10): 964-968.
- Luo G Y, Zheng J F, Xu X Y, *et al.* Multiple stepwise regression analysis between chlorophyll-a and influencing factor in branch backwater region——a case study of Linjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(10): 964-968.
- [38] 崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6309-6316.
- Cui Y P, Wang B D, Chen Q W. The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6309-6316.
- [39] 李培培, 史文, 刘其根, 等. 千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 568-574.
- Li P P, Shi W, Liu Q G, *et al.* Spatial and temporal distribution patterns of chlorophyll-a and the correlation analysis with environmental factors in Lake Qiandao [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(4): 568-574.
- [40] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1387-1392.
- Wang L J, Yu H, Niu Y, *et al.* Distribution characteristics of water temperature and water quality of Fuxian Lake during thermal stratification period in summer [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1387-1392.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)