

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_x 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, 徐玲珍, 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价 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM₁₀ 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 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (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 卢晓漩, 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氧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, 吴夏芈, 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 A²-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, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (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 阎刚, 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 CH₄ 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 N₂O 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 O₃ 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)

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

(环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 龟石水库是贺州市主要的饮用水源, 2014 年夏季第一次暴发大规模的蓝藻水华. 本研究通过分析水体的富营养化时空变化规律、外源污染来源以及浮游藻类群落结构动态变化特征, 进而评价水体的富营养化状况, 并提出合理的防控措施. 结果表明, 水库的氮磷浓度逐年升高, TN 含量已远超过地表水 II 类标准, 部分样点的 TP 含量也超过 II 类标准, 且主要来源为规模化养殖和农业面源污染. 水华期间浮游藻类细胞密度变化范围为 $8.60 \times 10^6 \sim 5.36 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 水华优势种为惠氏微囊藻, 密度最高达到 $5.36 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 叶绿素 a 浓度最高为 $74.48 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 惠氏微囊藻细胞密度随时间推移呈现逐渐降低的趋势, 并且垂直方向集中分布在表层及水下 2 m 处. 水华期间浮游藻类总细胞密度与 TN、TP、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和高锰酸盐指数呈现显著正相关, 与透明度呈显著负相关. 微囊藻毒素监测结果表明龟石水库水质未受到微囊藻毒素的污染. 综合分析, 对于中营养水平的龟石水库而言, 蓝藻水华的防控既要关注气候和气象条件, 更要尽量削减氮、磷营养盐入库量, 维持较低营养盐水平是防范蓝藻水华的关键.

关键词: 龟石水库; 蓝藻水华; 惠氏微囊藻; 农业面源污染; 藻毒素

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4141-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201702098

Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir

GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, WANG Li, YAO Ling-ai, XU Zhen-cheng, ZHAO Xue-min*, LIANG Rong-chang, LAN Yu

(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Large-scale cyanobacteria bloom occurred in the summer of 2014 in the Guishi Reservoir that is an important drinking water source for Hezhou City. The dynamic change regularity, external pollution sources, and the phytoplankton community characteristics during the bloom were investigated to evaluate the eutrophication in the reservoir and to present effective prevention and control measures. The results showed that nitrogen and phosphorus concentrations increased year by year; water quality on some sites has been out of class II of national water quality standards; and the main pollution source was the agricultural non-point sources. Phytoplankton cell density was in the range of $8.60 \times 10^6 \sim 5.36 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ and chlorophyll a concentrations reached $74.48 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ during the bloom. The dominant species was *Microcystis wesenbergii* whose density reached $5.36 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. The cell density decreased over time and concentrated on the surface and at the depth of 2 m underwater. The total phytoplankton cell density was strongly correlated to total phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen, and the permanganate index, and was inversely correlated to transparency. The water in the Guishi Reservoir was not polluted by microcystic toxins. Moreover, Guishi Reservoir is in a meso-eutrophic state; therefore, the prevention and control of the cyanobacteria bloom should focus on weather conditions and on reducing the input of nitrogen and phosphorus to keep the nutrient levels low.

Key words: Guishi Reservoir; cyanobacteria bloom; *Microcystis wesenbergii*; agricultural non-point source pollution; microcystins

水坝是人类影响河流水体最重要的工程建筑, 筑坝拦截形成的水库发挥着供水、灌溉、防汛、发电等重要功能^[1, 2], 尤其在水资源短缺的国家, 水库是其流域内重要的水利枢纽, 同时也是战略水源地和备用水源地, 对确保国民供水安全、生态保障和区域经济发展发挥着重要作用. 但近年来水库水体的富营养化问题日益突出, 我国水功能区水质达标率小于 60%, 湖库富营养化程度为轻度富营养化水平和中度富营养化水平已经达到 54.3%, 部分水库为中营养化水平^[3]. 富营养化破坏水库生态系统结构, 引起水体生态系统功能改退化, 破坏生物多样性

和完整性^[4], 引发的蓝藻水华也是最复杂和棘手的环境问题^[5]. 当水体大规模暴发蓝藻水华后, 蓝藻产生的次级代谢产物微囊藻毒素(MCs), 具有肝毒性、肾毒性、遗传毒性以及免疫和神经系统毒性^[6, 7], 对水体环境和人类健康带来严重的危害^[8-10]. 探究水库富营养化成因主要有水库周边的

收稿日期: 2017-02-18; 修订日期: 2017-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401115); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(PM-zx703-201602-048); 广东省科技计划项目(2014A020216017)

作者简介: 苟婷(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: gouting@scies.org

* 通信作者, E-mail: zhaoxuemin@scies.org

农业面源污染^[10],规模化养殖污染,入库支流污染,携带的氮和磷以径流、淋溶等方式进入水体^[11],此外,水库底泥释放氮磷引起的内源污染^[12]等,均可导致水体中氮、磷等营养物质含量过多,造成严重的生态环境风险或直接的环境污染。

龟石水库位于贺州市北部,地处富川瑶族自治县境内,是一座以防汛抗旱、农田灌溉、水源保护、饮用水安全为主,结合发电、供水等综合利用的国家大型水库,集雨面积1 254 km²,库容 5.95 亿 m³,库区内常住人口 16.65 万人;库区内有耕地 26.08 万亩,其中水田 18.22 万亩,旱地 7.86 万亩。龟石水库作为贺州市主要的水源,确保其水质达标,对贺州社会稳定和经济发展具有十分重要的意义。研究表明 2013 年龟石水库藻细胞密度高达 10⁷ cells·L⁻¹数量级,发生蓝藻水华的潜在风险较高^[13]。本研究着重对 2014 年龟石水库水华期间的水质和浮游藻类群落特征进行分析,并检测微囊藻水华暴发后水体中的微囊藻毒素含量,以期为贺江龟石水库的水华风险防范及同类型的水库环境管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

根据龟石水库水域特点及水华的分布特征,在龟石水库设置 8 个采样点(图 1)。G1:取水口;G2:碧溪山冲口(坝前 3 km);G3:峡口(坝前 5.6 km);G4:峡口上游 200 m;G5:洪水源冲口;G6:蒙家庙附近 1 km;G7:毛家大桥(下游 500 m);G8:蒙家冲和内新冲间。

1.2 样品采集与分析

2014 年 6 月 15 日水华暴发初期,每个采样点采集表层(0.5 m)水样和浮游藻类样品,后续对水库 G1 样点(取水口)和水华严重的 G3 样点(峡口)进行分层加密采样,采样时间为 6 月 16 日、6 月 17 日、6 月 19 日和 6 月 26 日(6 月 18 日因持续降雨未采样),分别采集表层、2 m、5 m、8 m 和底层水样及浮游藻类样品。现场测定 pH、水温(*T*)、溶解氧(DO)、电导(Cond)和透明度(SD),采集表层水样 1 L 带回实验室测定叶绿素 a(Chl-a)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)以及高锰酸盐指数,测定方法均参考文献[14]。浮游藻类定性样品用 25# 浮游生物网在水体表层呈“∞”形来回捞取,4% 福尔马林溶液固定,显微镜下进行种类鉴定;浮游藻类定量样品用采水器采集表

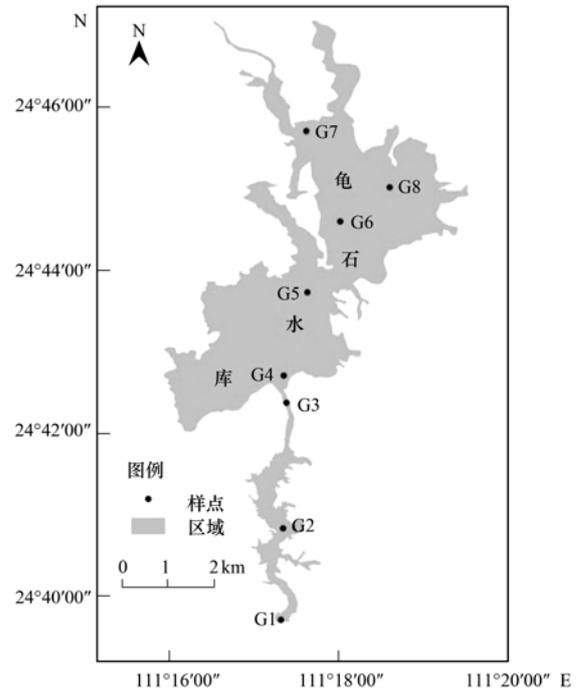


图 1 龟石水库采样点示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in the Guishi Reservoir

层水样 1 L,加入 10 mL 鲁哥试剂固定,样品经沉淀、浓缩、定容后,采用目镜视野计数法进行藻类细胞计数与鉴定^[15]。

微囊藻毒素(MCs)的测定:采集 G1~G5 样点的水样,低温遮光保存带回实验室进行测定。样品经膜过滤(Whatman GF/C, 0.45 μm 孔径),滤液即为胞外藻毒素(EMC)样品。将含有藻细胞的滤膜剪切成碎片后用 70% 甲醇水溶液进行提取,超声波水浴处理(1 h),然后再进行离心、过滤,重复两次,合并上清液,旋转蒸发仪蒸干(40℃),最后超纯水定容,即为胞内藻毒素(IMC)样品。MCs 采用酶联免疫(ELISA)试剂盒进行分析(Beacon Analytical Systems Inc.,检测限为 0.01 ng·mL⁻¹),以 MC-LR 为标准品。

1.3 数据处理

水华蓝藻的优势种根据每种藻类的优势度值(*Y*)来确定:

$$Y = f_i(n_i/N)$$

式中, f_i 为第*i*种浮游藻类在各样点出现的频度,当 $Y \geq 0.02$ 时的物种为优势种。

选取水体叶绿素 a(Chl-a)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)和高锰酸盐指数为评价指标,计算综合营养状态指数 TLI(\sum)。当 TLI(\sum) < 30,为贫营养状态;30 ≤ TLI(\sum) ≤ 50 为中营养状态;

$50 < \text{TLI}(\sum) \leq 60$ 为轻度富营养化状态; $60 < \text{TLI}(\sum) \leq 70$ 为中度富营养化状态; 当 $\text{TLI}(\sum) > 70$ 时, 为重度富营养化状态。

2 结果与分析

2.1 浮游藻类及藻毒素污染特征

2.1.1 浮游藻类群落组成

龟石水库水华期间共检出浮游藻类 7 门 35 科 65 属 106 种(表 1), 主要由蓝藻门、硅藻门和绿藻门组成, 所占比例达到 93.40%, 其他种类较少, 红藻门仅占 0.94%。

表 1 水华期间浮游藻类种类数及比例

Table 1 Species number and proportion of phytoplankton during the bloom

门类	蓝藻门	硅藻门	绿藻门	红藻门	裸藻门	隐藻门	甲藻门
种类数	17	28	54	1	2	2	2
比例/%	16.04	26.42	50.94	0.94	1.89	1.89	1.89

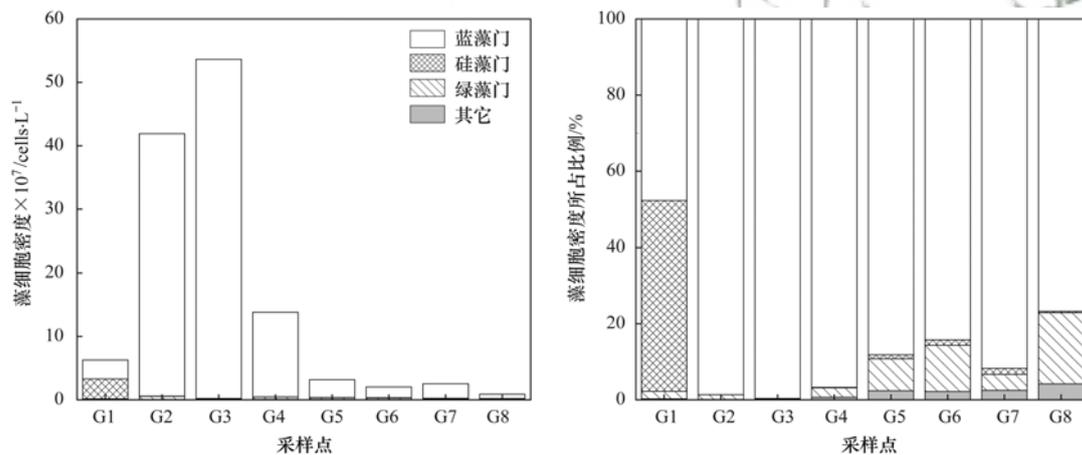


图 2 水华暴发初期各样点浮游藻类细胞密度及所占比例

Fig. 2 Phytoplankton cell densities and proportion of each sampling site in the initial phases of the bloom

G1、G3 样点浮游藻类总细胞密度时空分布结果见图 3。从空间分布来看, 浮游藻类细胞密度空间垂直分布主要集中在表层及水下 2 m 处。G1 样点的结果显示, 浮游藻类细胞密度随水深增加先升高后降低, 最高值并不是表层, 而是水下 2 m 处。各层浮游藻类细胞总密度波动范围为 $1.10 \times 10^7 \sim 2.85 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 蓝藻占浮游藻类总细胞密度的比例最低为 78.91%, 最高达到 90.37%。G3 样点各层浮游藻类细胞总密度波动范围为 $2.66 \times 10^7 \sim 1.22 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 浮游藻类细胞密度组成以蓝藻为主, 表层细胞总密度最高, 为 $1.18 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 该样点水下 2 m、5 m、8 m 和底层水体中惠氏微囊藻密度分别为 7.59×10^7 、 4.41×10^7 、 2.25×10^7 和 $2.33 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从时间分

2.1.2 浮游藻类细胞密度分布

根据水华暴发初期监测结果(图 2), 库区各样点(G1~G8)浮游藻类总细胞密度变化范围为 $8.60 \times 10^6 \sim 5.36 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $1.55 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 G3 样点藻细胞密度最高, 其次为 G2 样点, G8 样点藻细胞密度最低。G1 样点藻密度由蓝藻门和硅藻门组成, 两者所占比例相当, 但蓝藻门细胞密度仅是水华藻类微囊藻的贡献; G2~G8 样点的藻细胞密度组成均以蓝藻门为主, 其中 G2~G4 样点蓝藻门细胞密度达到 95% 以上, 且以惠氏微囊藻为主。

布来看, G1 和 G3 样点浮游藻类细胞密度均随时间的推移呈现降低趋势。G1 样点浮游藻类细胞密度变化范围为 $7.56 \times 10^6 \sim 3.27 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, G3 样点浮游藻类细胞密度变化范围为 $9.60 \times 10^6 \sim 3.90 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.1.3 浮游藻类优势种

水华期间浮游藻类优势种的种类和数量随时间变化呈现一定的变化规律(表 2)。优势种种类数随时间先减少后增加, 6 月 17 日出现种类数最少, 仅有第一优势种惠氏微囊藻和四尾栅藻; 水华后期, 浮游藻类优势种种类数增加, 蓝藻、绿藻和硅藻均有出现。监测期间第一优势种惠氏微囊藻出现的频度均达到 100%, 优势度变化范围为 0.47~0.92, 随时间先升高后降低, 最高出现在 6 月 17 日。

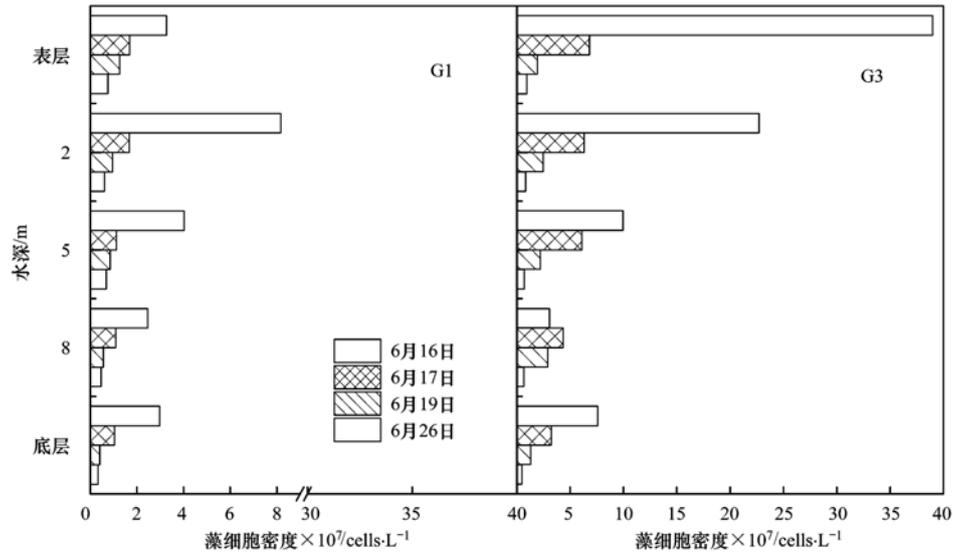


图3 G1和G3样点浮游藻类细胞总密度时空分布

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of total cell densities at G1 and G3

表2 水华期间浮游藻类优势种变化

Table 2 Changes in dominant species and the dominance of phytoplankton during the bloom

日期(月-日)	浮游藻类种类数(N)	优势种(优势度/频度)
06-15	4	惠氏微囊藻(0.88/100%)、色球藻(0.05/78.95%)、伪鱼腥藻(0.02/73.68%)、小环藻(0.02/89.74%)
06-16	3	惠氏微囊藻(0.91/100%)、色球藻(0.02/80%)、伪鱼腥藻(0.03/90%)
06-17	2	惠氏微囊藻(0.92/100%)、四尾栅藻(0.02/87.50%)
06-19	7	惠氏微囊藻(0.61/100%)、隐藻(0.02/100%)、色球藻(0.03/100%)、伪鱼腥藻(0.13/100%)、小环藻(0.02/100%)、四尾栅藻(0.05/100%)、单角盘星藻(0.02/100%)
06-26	7	惠氏微囊藻(0.47/100%)、空星藻(0.12/100%)、单角盘星藻(0.06/100%)、卵囊藻(0.03/100%)、空球藻(0.07/84.62%)、小环藻(0.07/100%)、四尾栅藻(0.03/84.62%)

2.1.4 微囊藻毒素含量

水华期间浮游藻类细胞外藻毒素 EMC 和细胞内藻毒素 IMC 的浓度变化范围分别为 $0.072 \sim 0.096 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.044 \sim 0.057 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图4). EMC 浓度高于 IMC 的浓度,且 G1 ~ G5 样点 EMC 逐渐升高,而 IMC 逐渐降低,说明有微囊藻细胞死亡藻体破裂释放藻毒素到水体中,且 G5 样点藻类死亡量较多. 根据中华人民共和国环境保护部、卫生部规定地表饮用水源中 MC-LR 浓度的标准限值 ($1.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[16] 以及世界卫生组织推荐的 MC-LR 浓度的安全限值 ($1.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 龟石水库 EMC 和 IMC 浓度均远远小于 $1.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明龟石水库藻毒素风险较低,未影响供水安全.

2.2 水质及水体富营养化特征

水质监测结果显示(表3), 龟石水库 TN 和 TP 浓度变幅分别为 $2.03 \sim 4.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.01 \sim 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 各样点 TN、TP 浓度差异显著 ($P < 0.05$), 从坝首向库尾方向先升高后降低, G3 样点浓度显著

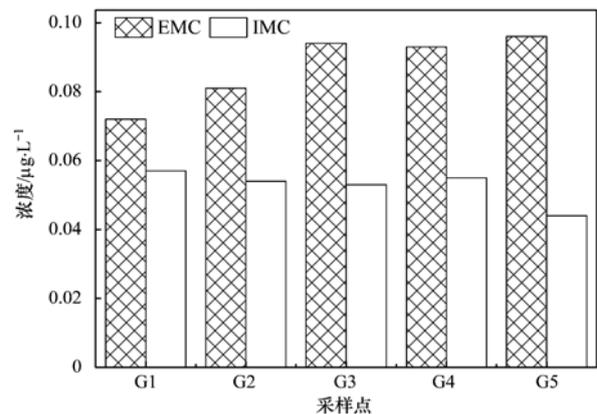


图4 水库水华期间微囊藻毒素浓度变化

Fig. 4 Concentration variations of microcystins in Guishi Reservoir

高于其它样点. 各样点 TN 浓度远超过龟石水库水功能区水质标准:《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中 II 类水标准; TP 浓度除 G2 ~ G4 样点超过《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中 II 类水标准外,其它均符合饮用水要求. 根据综合营养状态指数(TLI), 龟石水库 TLI 在 41.2 ~ 67.1 之间波

动,平均值为 50.1,表明龟石水库已处于中营养水平,部分样点处于轻度或中度富营养化状态.

G1 和 G3 样点 TN、TP 浓度时空分布结果见图 5. 从空间分布来看, G1 样点 TN 浓度波动范围为 1.68 ~ 2.10 mg·L⁻¹, 随水深先降低后升高, 底层水

体 TN 浓度与表层相当; TP 浓度在水深纵向分布上变化差异不大. G3 样点 TN、TP 浓度变化范围分别为 1.93 ~ 2.35 mg·L⁻¹、0.016 ~ 0.032 mg·L⁻¹, 均随水深下降. 从时间分布来看, G1 和 G3 样点的 TN、TP 浓度均随时间推移呈现降低趋势.

表 3 水华暴发初期各样点理化指标变化

Table 3 Physico-chemical parameters of water in the initial phases of the bloom

采样点	pH	DO /mg·L ⁻¹	T /°C	SD /m	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	Chl-a /μg·L ⁻¹	TLI
G1	8.35	17.47	30.9	1.0	0.035	1.70	2.07	0.02	3.1	19.15	48.1
G2	8.68	20.76	31.2	0.8	0.184	1.92	3.00	0.04	9.5	47.63	60.2
G3	8.58	22.56	30.2	0.7	0.320	2.14	4.72	0.08	13.3	74.48	67.1
G4	8.79	23.08	31.9	1.4	0.315	1.72	2.54	0.03	5.0	18.64	51.0
G5	8.71	22.45	31.5	1.5	0.111	1.69	2.69	0.01	6.9	10.58	47.5
G6	8.22	17.47	30.6	1.8	0.225	1.65	2.23	/	3.7	8.81	42.7
G7	8.70	17.26	32.4	1.3	0.172	1.54	2.06	0.01	2.5	13.46	42.9
G8	8.64	17.59	30.5	2.0	0.063	1.64	2.03	0.01	3.2	8.35	41.2
平均值	8.58	19.83	31.2	1.3	0.18	1.75	2.67	0.03	5.9	25.14	50.1

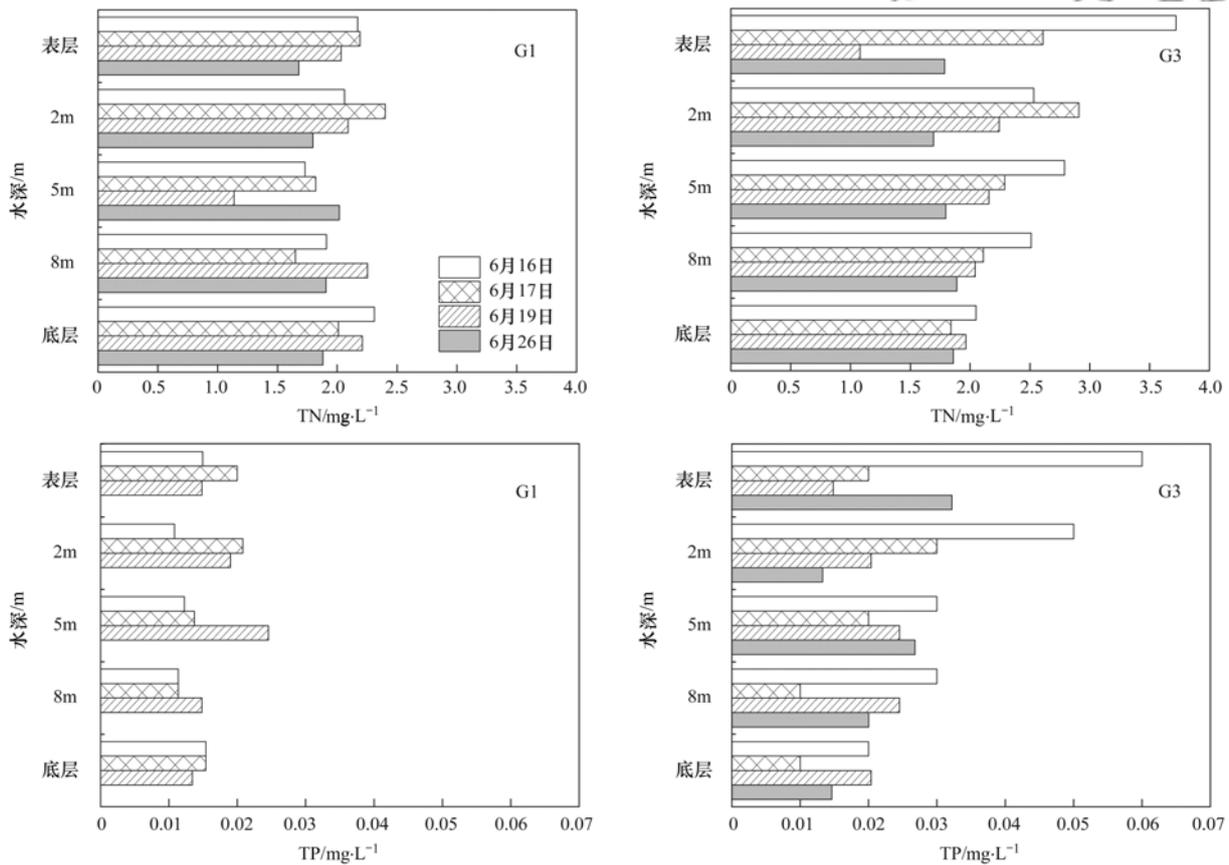


图 5 G1 和 G3 样点总氮、总磷时空分布

Fig. 5 Spatio-temporal distribution of TN and TP at G1 and G3

2.3 污染来源及成因分析

龟石水库集水区污染源调查分析见表 4, 影响水质的污染源主要为农村生活污染、规模化养殖污染及农业面源污染. 运用排污系数法计算 2014 年污染负荷的排放量, 入河系数的确定参照《全国水环

境容量核定技术指南》, 并根据实地调查和资料分析, 对龟石水库产生直接影响的周边乡镇取较大值, 集水区内距离水库较远的乡镇根据其到河流远近情况取较低的入河系数. 估算龟石水库 2014 年接受的污染物负荷为总氮和总磷分别 208.51 t 和 31.65 t.

从各类污染源的贡献率看,规模化养殖污染负荷较大,对总氮、总磷的贡献率分别为 69.35%、80.16%,其次为农村生活污染和农业面源污染,二者对总氮、总磷的贡献率相当,分别为 13.06%、

11.24%、9.57%、8.37%,其他污染负荷较小.集水区内农村生活污染随着污水厂的投入运营而逐年减小,而规模化养殖和农业面源污染仍然是主要的污染源.

表 4 龟石水库库区污染源负荷分布

Table 4 Distribution of pollution sources in Guishi Reservoir

类别	排放量/ $t \cdot a^{-1}$		入河系数	入河量/ $t \cdot a^{-1}$	
	总氮	总磷		总氮	总磷
城镇生活	42.29	4.69	0.2~0.3	1.90	0.21
农村生活	209.47	23.27	0.1~0.2	27.23	3.03
规模养殖	602.50	105.70	0.2~0.4	144.60	25.37
农业面源	97.68	11.03	0.1~0.3	23.44	2.65
工业污染	11.34	0.39	1.00	11.34	0.39
入库总量	963.28	145.08		208.51	31.65

2.4 浮游藻类分布的环境影响因子

在对藻类与环境因子做相关性分析之前,对各采样点进行聚类分析(图 6).选择参数包括常规水体理化指标(pH、DO、T、SD、 NH_4^+-N 、 $NO_3^- -N$ 、TN、TP、高锰酸盐指数).图 6 显示,龟石水库各点位水生境可划分 2 类,G3 为一类,其余点位为第二类.

Pearson 相关性分析结果如表 5 所示,龟石水库藻细胞密度、蓝藻细胞密度与 TN、TP、 $NO_3^- -N$ 和高锰酸盐指数呈现显著正相关($P < 0.01$),蓝藻细胞密度与藻细胞密度也呈现显著正相关($P < 0.01$),藻细胞密度与透明度呈显著负相关($P < 0.05$).由此说明,龟石水库水华期间总藻细胞密度由蓝藻细胞密度为主贡献,氮磷营养盐和高锰酸盐指数是影响龟石水库浮游藻类分布的关键环境因素,如果集

水区内营养污染进一步加剧,将会增加水库发生蓝藻水华的风险.

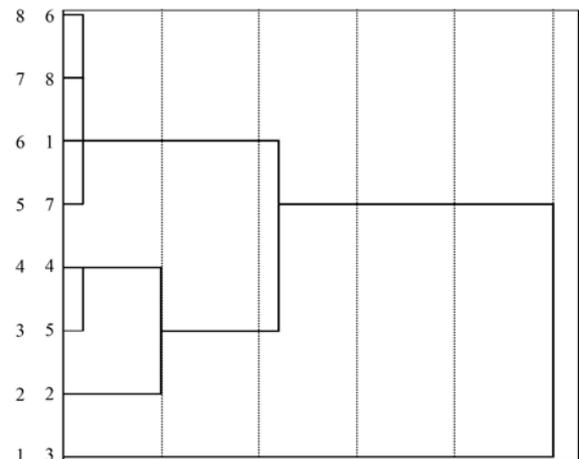


图 6 龟石水库采样点聚类分析树状图

Fig. 6 Dendrogram of sampling points in Guishi Reservoir

表 5 龟石水库浮游藻类与环境因子的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 5 Pearson correlation of phytoplankton data and environmental factors in Guishi Reservoir

	pH	DO	T	SD	$NH_4^+ -N$	$NO_3^- -N$	TN	TP	高锰酸盐指数	藻细胞密度	蓝藻
pH	1										
DO	0.569	1									
T	0.556	0.068	1								
SD	-0.114	-0.388	0.014	1							
NH_4^+	0.198	0.592	0.039	-0.297	1						
NO_3^-	0.071	0.600	-0.529	-0.725 *	0.512	1					
TN	0.156	0.663	-0.418	-0.651	0.621	0.942 **	1				
TP	0.228	0.601	-0.349	-0.779 *	0.573	0.945 **	0.926 **	1			
高锰酸盐指数	0.223	0.712 *	-0.389	-0.675	0.533	0.954 **	0.959 **	0.883 **	1		
藻细胞密度	0.184	0.556	-0.348	-0.798 *	0.562	0.959 **	0.894 **	0.940 **	0.925 **	1	
蓝藻	0.205	0.567	-0.339	-0.775 *	0.584	0.955 **	0.899 **	0.936 **	0.931 **	0.999 **	1

1) * 表示显著相关, $P < 0.05$; ** 表示极显著相关, $P < 0.01$

3 讨论

3.1 龟石水库水质现状与富营养化趋势

龟石水库作为贺州市最重要的饮用水源,水质

保护目标为 II 类标准.目前水体中 TN 含量已远超过 II 类标准,部分样点的 TP 含量也超过 II 类标准.对比历年水库营养盐浓度的变化(表 6),水华期间的 TN 浓度远高于未发生水华期的浓度,而 TP 浓度

与未水华时期相当. 2006 ~ 2014 年 TN 浓度呈现逐年上升的趋势, 2009 年以前 TN 保持在 II 类水标准, 2009 年 TN 含量开始急剧上升, 甚至超过 IV 类标准; TP 含量呈现波动变化, 基本维持在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 保持在 II 类水标准. 可见龟石水库的氮污染比磷污染严重, 是影响龟石水库水质的主要污染因子, 并且有逐年恶化的趋势. 水库 TN 污染问题严重, 但硝酸盐浓度较高而氨氮和化学需氧量含量除个别样点外, 并无明显异常, 说明主要污染来自无机氮而非有机氮类, 根据水库周边污染情况调查, 分析认为污染源主要与富江、莲山河、巩塘河等 3 条主要入库河流的输入以及河道沿线点源、面源污染物排放有关. 研究认为 $N/P < 7$ 的水体为氮限制, $N/P > 7$ 的水体为磷限制^[17,18], 龟石水库从 2010 年开始氮磷比已超过 50, 为典型的磷限制性水体^[19]. 龟石水库氮负荷明显过高, 同时水库为磷限制性, 若集水区磷污染进一步加剧, 水库发生蓝藻水华的风险将会增加. 这与韩龙等^[20]对于桥水库的研究结论一致. 综合营养状态指数显示龟石水库大部分处于中营养水平,

个别样点已处于轻度或中度富营养化状态, 造成水库富营养化的来源主要是规模化养殖和农业面源污染, 另外, 龟石水库及其支流周边分布有大量农村和耕地, 农村生活污水和垃圾也造成水体氮较高的原因之一. 研究认为, 水体污染的主要驱动因素为人口、产业结构和土地利用格局等^[21~23], 而农业用地面积与水质指标 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 呈显著正相关^[24,25]. 龟石水库 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为氮素的主要赋存形式, 水体中的氮素主要来源于不合理施用而流失的化肥和农药. 龟石水库集水区内的富川县主要以种植业为主, 且是我国著名的脐橙之乡, 据统计脐橙种植面积在 2015 年已达 187 km^2 , 每年产量达 30 万 t, 脐橙生长时期施用的化肥、农药遇到雨水的冲刷进入水库, 造成水库耗氧有机物和营养盐积累, 加快了水库富营养化进程. 这与欧阳威等^[26]对巢湖流域、蔡金洲等^[27]对三峡库区以及陈能汪等^[28]对福建山仔水库流域地区的研究结果相似, 说明土地利用类型的变化和化肥的大量施用已成为很多流域水环境污染的主要影响因素.

表 6 龟石水库(坝首)近年总氮、总磷变化/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Table 6 Concentration variations in TN and TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
TN	0.47	0.42	0.34	0.58	1.15	1.02	1.51	1.40	2.67
TP	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03

3.2 龟石水库浮游藻类群落特征与水华防治措施

龟石水库浮游藻类主要由绿藻门、硅藻门和蓝藻门组成, 是水体常见的浮游藻类群落结构组成形式, 与国内其它众多水库的藻类群落结构相似^[29~32]. 水华时期龟石水库浮游藻类总细胞密度从坝首至库尾呈现先升高后降低的变化趋势, 且以蓝藻细胞密度占主导. 坝首(G1)蓝藻细胞密度相对较低, 与硅藻细胞密度相当, 峡口(G3)藻细胞密度最高, 这与峡口狭窄特殊的地理位置相关. 库尾由于支流富川江的汇入, 浮游藻类群落结构发生变化, 蓝藻细胞密度相对降低, 绿藻占的比例升高. 整个水体总体表现为蓝藻-绿藻型, 且蓝藻门惠氏微囊藻为优势种. 已有研究表明^[33,34], 蓝藻与水体富营养化密切相关, 蓝藻细胞密度越高, 水质状况越差. 龟石水库水华期间惠氏微囊藻细胞密度最高达到 $5.36 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 根据郑丙辉等^[35]建立的三峡水库营养状态评价标准: 浮游藻类细胞密度 ($121 \sim 1612$) $\times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时, 三峡水库小江、香溪河等湖泊类型区的水体营养状态为中营养至轻度富营养级别. 据此, 结合本次浮游藻类分析结果, 龟石水库水

华暴发期间水体评价总体为中度富营养型, 水华期间尽管中层和底层水体浮游藻类密度低于表层水体, 但在浮游藻类群落特征方面已处于中营养化或富营养化水平^[36]. 至水华末期区域水体状况明显好转(浮游藻类密度为 $7.56 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$).

蓝藻水华发生的驱动因素很多, 既与蓝藻能够适应低光^[37], 有些种类具有固氮能力, 易形成群体^[38]等特性有关, 也与水体氮磷营养盐浓度升高, 气候变暖^[39~42]等因素相关. 因此, 蓝藻水华防治具有较高的复杂性, 然而, 水体氮磷浓度的削减仍是最有效的措施. 与其它发生微囊藻水华的水库相比, 三峡水库^[43]、高州水库^[44]、洋河水库^[45]和汤溪水库^[46]主要优势种为铜绿微囊藻, 福建山仔水库^[47]优势种为水华微囊藻, 本研究龟石水库水华优势种为惠氏微囊藻. 从氮磷营养盐来看, 各水库的总氮和总磷浓度都较高, 龟石水库水华期间的总氮浓度处于较高水平, 平均值 ($2.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 仅低于洋河水库; 总磷浓度处于相对较低水平, 平均值 ($0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 与高州水库总磷浓度相当, 均低于其他水库. 因此, 基于龟石水库作为水源的重要性和水华暴

发原因的复杂性,应从产业结构调整、控制化肥使用量、集中处理生活污水、控制并逐步取消水库网箱养鱼等多方面削减进入水库的氮磷污染,并通过在库区建设浮床、人工湿地等措施吸收水体营养盐,修复水生态环境以提高水体自净能力^[44],逐步减缓水体富营养化进程,才能从根本上控制蓝藻水华暴发,保障饮用水安全。

4 结 论

(1) 龟石水库氮、磷浓度较高, TN 浓度波动范围为 $2.03 \sim 4.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 为 $0.01 \sim 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 从坝首向库尾方向先升高后降低, 峡口 (G3) 样点浓度显著高于其它样点. 水库 TN 浓度远超过龟石水库水功能区水质标准 II 类水标准; TP 浓度除 G2 ~ G4 样点超过 II 类水标准外, 其它均符合饮用水要求. 龟石水库各点位的综合营养状态指数 TLI 在 41.2 ~ 67.1 之间波动, 已处于中营养水平, 部分样点处于轻度或中度富营养化状态. 氮磷的主要污染来源是规模化养殖和农业面源污染。

(2) 调查期间库区内检出浮游藻类 7 门 35 科 65 属 106 种, 总细胞密度变化范围为 $8.60 \times 10^6 \sim 5.36 \times 10^8 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 靠近大坝样点明显高于河流入库口. 浮游藻类细胞密度空间垂直分布主要集中在表层及水下 2 m 处, 各层均以蓝藻中的惠氏微囊藻为主. 龟石水库水体中微囊藻毒素和细胞内藻毒素浓度均远远小于 $1.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 龟石水库水质未受影响。

(3) 龟石水库藻细胞密度、蓝藻细胞密度与 TN、TP、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和高锰酸盐指数呈显著正相关 ($P < 0.01$), 与透明度呈显著负相关 ($P < 0.05$). 氮磷营养盐和高锰酸盐指数是影响龟石水库浮游藻类分布的关键环境因素, 如果集水区内营养污染进一步加剧, 将会增加水库发生蓝藻水华的风险。

参 考 文 献:

- [1] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 151-160.
Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(2): 151-160.
- [2] 黄成, 侯伟, 顾继光, 等. 珠江三角洲城市周边典型中小型水库富营养化与蓝藻种群动态[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17**(3): 295-302.
Huang C, Hou W, Gu J G, et al. Eutrophication and dynamics of cyanobacterial population in small and medium-sized reservoirs nearby urban districts in the Pearl River Delta[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, **17**(3): 295-302.
- [3] 张萍, 高丽娜, 孙翀, 等. 中国主要河湖生态综合评价[J]. 水利学报, 2016, **47**(1): 94-100.
Zhang P, Gao L N, Sun C, et al. Integrated evaluation on aquatic ecosystems of main rivers and lakes in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(1): 94-100.
- [4] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences[J]. Estuaries, 2002, **25**(4): 704-726.
- [5] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here? [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, **24**(4): 201-207.
- [6] Pitois S, Jackson M H, Wood B J B. Problems associated with the presence of cyanobacteria in recreational and drinking waters [J]. International Journal of Environmental Health Research, 2000, **10**(3): 203-218.
- [7] Li Y, Chen J A, Zhao Q, et al. A cross-sectional investigation of chronic exposure to microcystin in relationship to childhood liver damage in the Three Gorges Reservoir region, China [J]. Environmental Health Perspectives, 2011, **119**(10): 1483-1488.
- [8] Gała I, Izydorczyk K, Skowron A, et al. Appearance of toxigenic cyanobacteria in two Polish lakes dominated by *Microcystis aeruginosa* and *Planktothrix agardhii* and environmental factors influence [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2010, **10**(1): 25-34.
- [9] Smutná M, Babica P, Jarque S, et al. Acute, chronic and reproductive toxicity of complex cyanobacterial blooms in *Daphnia magna* and the role of microcystins[J]. Toxicon, 2014, **79**: 11-18.
- [10] 王丹宇, 杨利民, 韩梅. 尼尔基水库水质及水体富营养化评价研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2016, **48**(3): 162-166.
Wang D Y, Yang L M, Han M. Assessment of water quality and eutrophication in Nierji reservoir[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2016, **48**(3): 162-166.
- [11] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system; a review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, **162**(2): 145-173.
- [12] 黄宇波, 罗浩, 陈隽, 等. 底泥再悬浮对东湖水体初级生产力的影响[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 574-579.
Hung Y B, Luo H, Chen J, et al. Effects of re-suspended sediment on the primary production in the Donghu Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, **40**(3): 574-579.
- [13] 苟婷, 许振成, 李杰, 等. 珠江流域西江支流贺江浮游藻类群落特征及水质分析[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(3): 412-420.
Gou T, Xu Z C, Li J, et al. Phytoplankton community structure and water quality assessment of Hejiang River, a branch of Xijiang River, Pearl River drainage basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(3): 412-420.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] WHO. Guidelines for drinking-water quality (3rd ed.) [M].

- Geneva: World Health Organization, 2004. 407-408.
- [17] 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 352-358.
- Shan B Q, Jian Y X, Tang W Z, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in downstream river network areas of North Canal River Watershed [J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 352-358.
- [18] Gibson G, Carlson R, Simpson J, *et al.* Nutrient criteria, technical guidance manual: lakes and reservoirs[R]. EPA-822-B00-001, Washington: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [19] Vollenweider R A, Kerekes J. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control[M]. Paris: OECD, 1982.
- [20] 韩龙, 梅鹏蔚, 武丹, 等. 于桥水库浮游植物群落结构与营养特征[J]. 生态科学, 2014, **33**(5): 909-914.
- Han L, Mei P Y, Wu D, *et al.* Phytoplankton community structure and its eutrophic state in Yuqiao Reservoir [J]. Ecologic Science, 2014, **33**(5): 909-914.
- [21] Wang L F, Yang L Y, Kong L H, *et al.* Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, **140**: 87-95.
- [22] Guo Y, Shen Y J. Quantifying water energy budgets and the impacts of climatic and human factors in the Haihe River Basin, China: 1. Model and validation [J]. Journal of Hydrology, 2015, **528**: 206-216.
- [23] Yuan Y J, Zeng G M, Liang J, *et al.* Variation of water level in Dongting Lake over a 50-year period: implications for the impacts of anthropogenic and climatic factors [J]. Journal of Hydrology, 2015, **525**: 450-456.
- [24] Bahar M M, Ohmori H, Yamamuro M. Relationship between river water quality and land use in a small river basin running through the urbanizing area of Central Japan [J]. Limnology, 2008, **9**(1): 19-26.
- [25] Shen Y N, Lü J, Chen D J, *et al.* Response of stream pollution characteristics to catchment land cover in Cao-E River basin, China [J]. Pedosphere, 2011, **21**(1): 115-123.
- [26] 欧阳威, 黄浩波, 蔡冠清. 巢湖地区无监测资料小流域面源磷污染输出负荷时空特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 1024-1031.
- Ouyang W, Huang H B, Cai G Q. Temporal and spatial characteristics of diffuse phosphorus pollution in the watershed without monitoring data at Chaohu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(4): 1024-1031.
- [27] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1421-1430.
- Cai J Z, Fan X P, Huang M, *et al.* Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(7): 1421-1430.
- [28] 陈能汪, 吴殷琪, 张玉珍, 等. 流域氮磷输出、河流输送与库区富营养化关联分析——以福建山仔水库为例[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(9): 1862-1869.
- Chen N W, Wu Y Q, Zhang Y Z, *et al.* Linking watershed nutrient loads and riverine export to reservoir eutrophication: the case of Shanzai Reservoir, Fujian Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(9): 1862-1869.
- [29] 李思阳, 韩志勇, 许振成, 等. 高州水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(5): 16-24.
- Li S Y, Han Z Y, Xu Z C, *et al.* Study on the structure of phytoplankton community and its relationships with environmental factors in Gaozhou Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2013, **34**(5): 16-24.
- [30] 胡芳, 许振成, 姚玲爱, 等. 剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 950-958.
- Hu F, Xu Z C, Yao L A, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationship with aquatic environment factors in Jiantan Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(4): 950-958.
- [31] 胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化——以新丰江水库为例[J]. 生态学报, 2008, **28**(10): 4652-4664.
- Hu R, Lei L M, Han B P. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang reservoir in southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(10): 4652-4664.
- [32] 武丹, 王海英, 张震. 天津于桥水库夏季浮游生物调查及群落结构变化[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 735-742.
- Wu D, Wang H Y, Zhang Z. Investigation of summer plankton community structure in Yuqiao Reservoir, Tianjin [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(5): 735-742.
- [33] Whitton B A, Potts M. The ecology of cyanobacteria [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [34] 王朝晖, 林秋奇, 胡韧, 等. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, **12**(2): 117-123.
- Wang Z H, Lin Q Q, Hu R, *et al.* Pollution by blue-green algae (Cyanophyta) in reservoirs of Guangdong Province and water quality evaluation [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2004, **12**(2): 117-123.
- [35] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1022-1030.
- Zheng B H, Zhang Y, Fu G, *et al.* On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(6): 1022-1030.
- [36] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.
- Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, **5**(2): 87-91.
- [37] Üveges V, Tapolczai K, Krienitz L, *et al.* Photosynthetic characteristics and physiological plasticity of an *Aphanizomenon flos-aquae* (Cyanobacteria, Nostocaceae) winter bloom in a deep oligo-mesotrophic lake (Lake Stechlin, Germany) [J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 263-272.
- [38] Oliver R L, Hamilton D P, Brookes J D, *et al.* Physiology, blooms and prediction of planktonic cyanobacteria [A]. In: Whitton B A, (Ed.). Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time [M]. Netherlands: Springer, 2012.

- 155-194.
- [39] 董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 615-623.
Dong J, Gao Y N, Li G B. A review: responses of phytoplankton communities to eutrophication and climate warming in freshwater lakes[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, **40**(3): 615-623.
- [40] Zhang M, Duan H T, Shi X L, *et al.* Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change [J]. Water Research, 2012, **46**(2): 442-452.
- [41] 董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群1960s以来演变特征[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 735-742.
Dong J, Li G B, Song L R. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(5): 735-742.
- [42] Wu W J, Li G B, Li D H, *et al.* Temperature may be the dominating factor on the alternant succession of *Aphanizomenon flos-aquae* and *Microcystis aeruginosa* in Dianchi Lake [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2010, **19**(5): 846-853.
- [43] 杨敏, 张晟, 胡征宇. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 371-378.
Yang M, Zhang S, Hu Z Y. Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(3): 371-378.
- [44] 姚玲爱, 赵学敏, 周广杰, 等. 广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 534-540.
Yao L A, Zhao X M, Zhou G J, *et al.* Preliminary regulating factors of spring cyanobacteria bloom in Gaozhou Reservoir, Guangdong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(4): 534-540.
- [45] 王丽平, 郑丙辉. 洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 1011-1017.
Wang L P, Zheng B H. Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(3): 1011-1017.
- [46] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报, 2005, **25**(7): 1554-1561.
Zhao M X, Han B P. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(7): 1554-1561.
- [47] 苏玉萍, 陈娜蓉, 林婉珍, 等. 福建省山仔水库浮游植物特征与水体富营养状况分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006, **1**(2): 48-54.
Su Y P, Chen N R, Lin W Z, *et al.* Analysis of phytoplankton characteristic and eutrophication in Shanzi Reservoir, Fujian Province [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2006, **1**(2): 48-54.



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 Qiong-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)