

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 ..... 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)

钢铁工业排放颗粒物中碳组成的特征 ..... 张进生,吴建会,马威,冯银厂(3102)

常州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 污染特征及来源解析 ..... 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)

兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 ..... 尉媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 ..... 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 ..... 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)

基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 ..... 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)

基于 wavelet-SVM 的 PM<sub>10</sub> 浓度时序数据预测 ..... 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 ..... 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 ..... 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)

典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 ..... 芦会杰(3178)

杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 ..... 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)

黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 ..... 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)

漓江地表水体有机碳来源 ..... 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 ..... 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 ..... 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)

地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 ..... 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)

人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 ..... 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑悦(3235)

长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 ..... 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 ..... 陈成龙,高明,木志坚,倪九派,祁乐(3254)

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 ..... 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)

新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 ..... 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹,潘咏(3273)

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 ..... 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明(3281)

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 ..... 向蓉,李巧玉,喻毅,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)

石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 ..... 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽,陶益,张丽(3302)

不同湿地模型中根系微生物的多样性 ..... 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征 ..... 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)

基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 ..... 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 ..... 孟婷,杨宏(3339)

基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 ..... 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 ..... 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 ..... 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 ..... 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王晓静(3369)

酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 ..... 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)

模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 ..... 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心(3385)

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 ..... 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 ..... 张婷,吴鹏,沈耀良,闫刚,徐乐中, Samwine Thomas(3399)

硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 ..... 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘沂,姚鹏程,张文静(3406)

不同 TOC/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 ..... 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)

盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 ..... 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 ..... 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)

胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛烷磺酸(PFOS)的影响 ..... 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)

不同施肥方式下紫色土 N<sub>2</sub>O 与 NO<sub>x</sub> 的排放特征 ..... 胡磊,刘韵,朱波(3442)

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 ..... 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)

模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 ..... 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺正(3463)

长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 ..... 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 ..... 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王杨扬,王伯勋(3483)

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 ..... 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 ..... 张彦军(3497)

西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 ..... 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)

小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd<sup>2+</sup> 活性 ..... 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎(3519)

交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 ..... 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 ..... 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)

中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 ..... 刘巍,田金平,陈吕军(3544)

《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

# 石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析

宋云龙<sup>1</sup>, 张金松<sup>1\*</sup>, 郭小雅<sup>2</sup>, 朱佳<sup>3</sup>, 王丽<sup>4</sup>, 陶益<sup>5</sup>, 张丽<sup>6</sup>

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院土木与环境工程学院, 深圳 518055; 2. 山东省胶东调水局, 济南 250100; 3. 深圳职业技术学院建筑与环境工程学院, 深圳 518055; 4. 深圳市水质检测中心, 深圳 518055; 5. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 6. 深圳市国家气候观测台, 深圳 518040)

**摘要:** 2013 年 4 月至 2014 年 6 月对典型调水供水型水库石岩水库蓝藻、绿藻和硅藻叶绿素 a 浓度 [ $\rho(\text{Chla})$ ] 及相环境因子进行监测, 分析了  $\rho(\text{Chla})$  时空分布特征, 探讨了藻类与环境因子的相关关系. 结果表明石岩水库  $\rho(\text{TChla})$  为 9.59 ~ 123.29  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均 52.03  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其中蓝藻  $\rho(\text{Chla})$  为 4.54 ~ 76.30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均为 28.39  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 硅藻  $\rho(\text{Chla})$  为 3.16 ~ 46.09  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均为 15.02  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 绿藻  $\rho(\text{Chla})$  为 0.77 ~ 26.21  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均为 8.62  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2013 年 4 ~ 12 月上旬以及 2014 年 5 ~ 6 月优势藻为蓝藻, 其他时期硅藻占优势, 绿藻全年处于较低水平. 石岩水库  $\rho(\text{Chla})$  空间异质性低, 整体呈现由南向北逐渐降低的空间分布特征, 汛期整个库区和高温无雨期南半库区存在蓝藻水华风险. 径流污染是石岩水库藻类叶绿素 a 空间异质性的主要原因. 相关分析和 CCA 分析显示, 水温是 3 种藻类的首要影响因子, 汛期径流量与蓝藻相关性极大. 氮磷比与 3 种藻类负相关, 磷是石岩水库藻类生长的限制性因子. 蓝藻主要相关因子还包括 TOC、TN、pH、透明度和硝酸盐氮, 硅藻主要相关因子还包括硅酸盐、TOC、硝酸盐氮和 COD, 绿藻主要相关因子还包括 TOC、COD、pH、透明度和硝酸盐氮.

**关键词:** 石岩水库; 叶绿素 a; 时空分布; 环境因子; 方差分析; 典范对应分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3302-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701046

## Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir

SONG Yun-long<sup>1</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1\*</sup>, Guo Xiao-ya<sup>2</sup>, ZHU Jia<sup>3</sup>, WANG Li<sup>4</sup>, TAO Yi<sup>5</sup>, ZHANG Li<sup>6</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Shandong Province Jiaodong Water Transfer Bureau, Ji'nan 250100, China; 3. School of Architectural and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China; 4. Shenzhen Water Quality Testing Center, Shenzhen 518055, China; 5. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 6. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** The spatial-temporal characteristics of chlorophyll a concentration [ $\rho(\text{Chla})$ ] were analyzed in Shiyan Reservoir, based on the monthly monitoring data from April 2013 to June 2014. The correlation between  $\rho(\text{Chla})$  and key environmental factors were also studied using correlation analysis and canonical correspondence analysis. The results showed that  $\rho(\text{TChla})$  was 9.59-123.29  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , with an average of 52.03  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . The  $\rho(\text{Chla})$  of cyanobacteria was 4.54-76.30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , with an average of 28.39  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . The  $\rho(\text{Chla})$  of bacillariophyta was 3.16-46.09  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , with an average of 15.02  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . The  $\rho(\text{Chla})$  of chlorophyta was 0.77-26.2  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , with an average of 8.62  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Cyanobacteria was the primary species from April to December in 2013 and May, June in 2014 while bacillariophyta was the primary species in other months. The spatial heterogeneity of  $\rho(\text{Chla})$  was unobvious and  $\rho(\text{Chla})$  decreased gradually from south to north. There was a risk of algal blooming for the whole reservoir during flood season and south part of reservoir in autumn. The storm runoff pollutant washout was the leading cause of the spatial heterogeneity of  $\rho(\text{Chla})$  in Shiyan Reservoir. Analysis revealed that water temperature was the most important driving factor for seasonal succession of phytoplankton. Significant correlation was found between  $\rho(\text{Chla})$  and surface runoff in flood season. TN:TP was negatively related to phytoplankton biomass and phosphorus was the restrictive factor for phytoplankton. Cyanophyta were affected water temperature, TOC, TN, pH, transparency, turbidity and  $\text{NO}_3^-$ -N. However silicate, TOC,  $\text{NO}_3^-$ -N, and COD were the main environmental factor of bacillariophyta while TOC, COD, pH, transparency and  $\text{NO}_3^-$ -N were the main factor of chlorophyta.

**Key words:** Shiyan Reservoir; chlorophyll a; spatiotemporal variations; environmental factors; analysis of variance; canonical correspondence analysis

深圳人均年水资源拥有量不足 200  $\text{m}^3$ , 约为全国平均水平的 1/12, 属严重缺水城市<sup>[1]</sup>, 全市近 90% 的饮用水需从境外调取. 深圳的供水体系主要由境外引水工程以及本地调蓄水库

收稿日期: 2017-01-06; 修订日期: 2017-03-13

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(2013010470); 深科技创新项目基础研究(JCYJ20140508155916418)

作者简介: 宋云龙(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为饮用水安全保障, E-mail: Songyunlongwater@163.com

\* 通信作者, E-mail: Zhangjinsong@waterchina.com

群组成. 境外来水经市内中小型水库群存储调节后,再转供各水厂. 截至2015年12月,深圳共建有93宗供水型水库,这些中小型供水水库群构成了深圳供水框架的重要组成,其水质对饮用水安全起到关键作用.

石岩水库位于宝安区石岩街道和光明区公明街道境内,属茅洲河流域范围. 水库集雨面积44 km<sup>2</sup>,总库容9 950万 m<sup>3</sup>,50%可供水量3 400万 m<sup>3</sup>,是深圳市城市供水网络骨干工程之一,供水量居全市各水库第2位,保障了宝安西部地区600多万人口的生产和生活用水. 由于流域人口稠密,虽然实行封闭式管理,但仍有生活、农业和工业废水流入石岩水库,使其成为深圳12座主要供水水库中污染最严重的水库,季节性藻类暴发风险不断加剧<sup>[2,3]</sup>. 目前关于石岩水库的研究较少且多以水质方面研究为主<sup>[4,5]</sup>,反映石岩水库藻类年际演替特征的研究相对缺乏. 国内外学者对藻华的研究多关注春夏时期的各类天然湖泊<sup>[6-8]</sup>,对饮用水水源型水库关注偏少,对氮磷等营养盐关注较多<sup>[9-11]</sup>,对水质和气象因子的综合影响研究较少.

叶绿素 a 是藻类进行光合作用的重要色素,反映了水体的初级生产力<sup>[12,13]</sup>. 通过检测  $\rho(\text{Chla})$  估计水体藻类生物量已经成为国际上常用的技术手段<sup>[14-16]</sup>. 课题组显微镜计数数据显示蓝藻、硅藻和绿藻是石岩水库的主要藻类,3种藻类细胞丰度和占总细胞丰度的95%以上. 因此掌握蓝藻、绿藻和硅藻的演替规律是研究石岩水库藻类群落动态的关键.

对2013年4月至2014年6月石岩水库蓝藻、绿藻和硅藻的  $\rho(\text{Chla})$  及其主要相关环境因子进行了连续监测,研究了藻类时空分布特征和演变规律,分析了水质因子和气象因子对藻类演替的驱动作用,以期有效认识藻类生长和群落演替规律,探索藻华机制,识别和控制藻类风险,保障水生态安全提供科学依据,对深圳乃至珠三角地区同类型的中小型供水水库也具有借鉴意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点的布设

石岩水库由南向北共布设8个采样点,其中1号采样点靠近铁岗水库进水口,2号采样点附近有工农业废水进入,3号采样点靠近河流,4、5、6号采样点均为库心活水区,7、8号采样点靠近水厂取水口. 采样点具体分布情况见图1. 每个采样点由

上到下分3~5层采样,表层是水面下10 cm左右水层,透光层是所测透明度深度对应水层,温跃层是水体1 m内水温(WT)变化超过1℃水层,活性层是溶解氧(DO)为2 mg·L<sup>-1</sup>水层,底层是底泥上方约10 cm水层,其中表层、透光层和底层始终纳入监测范围,活性层和温跃层视WT和DO分布状况而定,出现即监测.

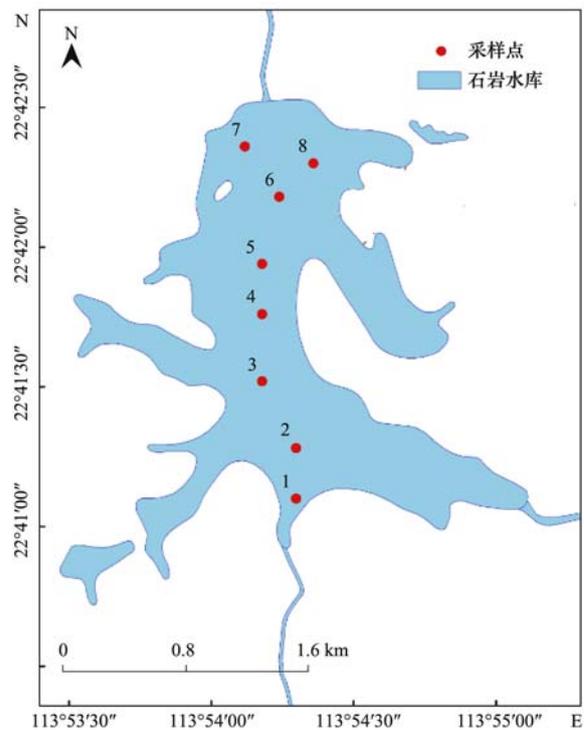


图1 石岩水库采样点布设示意

Fig. 1 Sampling sites of Shiyuan Reservoir

### 1.2 样品的采集与分析

采用ZPY-1型采水器分层采样并分别保存,水样采集后2 h内运回实验室,4℃保存,当天完成  $\rho(\text{Chla})$  的测定,总有机碳(TOC)、高锰酸盐指数(COD)、总氮(TP)、总磷(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铁(Fe)和硅酸盐(Silicate)等2 d内完成检测. Chla采用调制荧光仪(德国WALZ Phyto-PAM)测定,并定期与文献[17]中的丙酮萃取分光光度法校正. 水深、WT、pH、DO、浊度(Turbidity)采用多参数水质测定仪(美国YSI 6600V2型)现场测定;透明度(SD)采用塞氏盘现场测定. COD采用酸性高锰酸钾法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,Silicate采用硅钼蓝分光光度法测定,TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用流动分析仪(法国Alliance-Futura)测定,TOC采用总有机碳分析仪(GE-Siever 5310C)测定. 气温、气压、湿度、降雨量、蒸发量和日照时数等气象数据由深圳国家气候

观测台提供。

### 1.3 时期划分

根据气象特征将全年划分为 5 个时期:前汛期为 2013、2014 年 4~6 月,后汛期为 2013 年 7~9 月,高温无雨期为 2013 年 10~11 月,冬季枯水期为 2013 年 12 月~2014 年 2 月,温度跃升期为 2014 年 3 月。

### 1.4 数据处理

环境因子以及藻类 Chla 的时间或空间差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA)法分析,时间和空间因素对环境因子和藻类 Chla 的交互影响采用两因素方差分析(Two-way ANOVA)法分析,二者均在 SPSS 20 上实现;藻类 Chla 与环境因子间的双变量关系采用 Pearson 相关分析在 SPSS 20 上进行,藻类 Chla 与环境因子间的综合相关关系采用 CCA 在 XLSTAT2010 上进行。藻类叶绿素 a 平面分布图是根据各采样点的  $\rho$ (TChla)在相应气候期内的多月平均值,通过克里金插值法,在 ArcMap10.2 上生成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境因子动态

石岩水库 2013 年 4 月~2014 年 6 月环境因子动态见表 1。单因素方差分析结果显示,时间上 WT、SD、COD、TOC、Silicate、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN 和 Fe 等理化因子季节差异显著( $P < 0.01$ ),其中 WT、TOC、Silicate、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN 和 Fe 表现为前汛期 > 后汛期

> 高温无雨期 > 温度跃升期 > 冬季枯水期的规律,SD 则表现出相反的规律。DO、pH、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP 等理化因子季节性差异不明显。空间上 DO、SD、COD、TOC、TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 Fe 等理化因子随采样点不同而差异显著( $P < 0.01$ ),其中 COD、TOC、TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 Fe 由南向北逐渐降低,DO 和 SD 由北向南逐渐升高,7、8 号采样点是石岩水库水质最好的区域。WT、pH、Silicate、TP 和  $\text{NO}_3^-$ -N 等理化因子空间差异不明显。TN 是石岩水库首要污染物,根据地表水环境评价方法的评价结果,在监测时期内所有采样点,TN 年均  $2.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,属地表水劣 V 类水质,最大值为  $3.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,出现在 2013 年 4 月的 2 号点表层,最小值为  $1.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。DO、COD、TP 等指标达到地表水环境质量 II~III 类标准。

两因素方差分析(表 2)显示,各环境因子的变异能被时期和采样点及两者交互效应较好地解释( $R^2$  为 23.7%~78.1%)。时期是影响环境因子的最主要因素,对 WT、SD、COD、TOC、Silicate、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 Fe 均有显著影响( $P < 0.01$ ),与 TN 也存在一定相关性( $P = 0.087$ ),对 pH、DO 和 TP 影响较小。采样点对 SD 有较为显著的影响( $P = 0.068$ ),对其他环境因子影响很小( $P > 0.3$ )。时期和采样点的交互作用对 Fe 和 SD 有微弱影响,对其他环境因子影响甚微( $P > 0.8$ )。综合来看,石岩水库环境因子的主要影响因素是时期,环境因子的时间异质性明显高于空间异质性。

表 1 环境因子年际变化规律

Table 1 Annual trends of environment factors for Shiyan Reservoir

日期 (年·月)	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	WT / $^{\circ}\text{C}$	SD /m	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	硅酸盐 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+$ -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-$ -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Fe / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
2013-04	8.24±0.85	7.06±0.14	20.36±0.16	0.67±0.07	1.74±0.19	2.89±0.31	8.77±0.51	0.25±0.01	2.19±0.24	2.64±0.24	0.031±0.007	0.06±0.01
2013-05	7.21±0.56	6.99±0.76	25.02±0.47	0.69±0.07	2.65±0.26	3.96±0.16	6.18±0.44	0.34±0.06	1.66±0.05	2.12±0.03	0.026±0.005	0.08±0.01
2013-06	7.89±0.44	8.61±0.59	31.20±0.50	0.66±0.10	2.53±0.20	5.19±0.39	7.06±0.11	0.45±0.13	1.42±0.02	1.92±0.14	0.032±0.010	0.10±0.01
2013-07	7.32±0.58	8.49±0.64	31.98±0.38	0.62±0.11	2.23±0.18	5.31±0.42	7.54±0.58	0.38±0.13	1.29±0.04	1.79±0.14	0.037±0.009	0.13±0.03
2013-08	9.50±0.72	7.95±0.24	31.58±0.38	0.70±0.09	2.37±0.15	4.21±0.54	7.47±0.96	0.21±0.08	1.22±0.06	1.61±0.04	0.027±0.010	0.07±0.02
2013-09	8.56±0.78	8.21±0.16	30.07±0.14	0.66±0.07	2.93±0.22	4.67±0.27	10.38±0.35	0.28±0.01	1.86±0.14	2.15±0.05	0.036±0.010	0.12±0.03
2013-10	7.34±0.58	7.48±0.53	26.51±0.84	0.65±0.14	2.45±0.27	5.02±0.19	9.55±0.12	0.48±0.09	1.63±0.08	2.33±0.13	0.041±0.003	0.08±0.01
2013-11	8.56±0.74	7.80±0.15	23.40±0.22	0.58±0.09	1.71±0.08	3.81±0.26	11.86±0.46	0.14±0.01	1.35±0.13	1.59±0.11	0.035±0.007	0.07±0.01
2013-12	8.58±0.65	7.96±0.47	19.47±0.05	0.56±0.05	2.31±0.20	3.78±0.20	9.48±0.38	0.36±0.04	1.25±0.02	1.84±0.08	0.038±0.012	0.11±0.01
2014-01	8.54±0.65	6.95±0.61	13.15±0.33	0.56±0.06	2.16±0.12	3.10±0.08	6.33±0.91	0.34±0.07	1.57±0.03	2.05±0.09	0.022±0.007	0.12±0.01
2014-02	7.67±0.65	6.99±0.41	14.65±0.72	0.71±0.12	2.18±0.19	2.21±0.07	3.82±0.29	0.22±0.05	1.43±0.04	1.71±0.11	0.061±0.012	0.12±0.01
2014-03	7.52±0.83	7.01±0.35	18.36±1.02	0.83±0.11	1.81±0.25	3.48±0.26	5.71±0.23	0.17±0.03	1.79±0.09	2.09±0.09	0.037±0.007	0.17±0.05
2014-04	6.09±0.56	7.47±0.32	25.32±0.37	0.74±0.25	1.81±0.11	3.24±0.13	6.03±0.27	0.27±0.02	1.87±0.07	2.19±0.10	0.019±0.005	0.07±0.01
2014-05	8.40±0.88	7.19±0.27	26.76±1.26	0.73±0.18	1.97±0.28	4.01±0.26	6.97±0.27	0.26±0.01	1.35±0.16	1.69±0.16	0.031±0.012	0.11±0.02
2014-06	7.29±0.35	7.43±0.39	27.33±0.98	0.64±0.09	1.75±0.15	4.59±0.31	7.34±0.83	0.28±0.03	1.53±0.14	1.92±0.16	0.047±0.010	0.07±0.01

1) SD 是各采样点平均值,其他指标是各采样点表层和透光层的平均值

表 2 时期和采样点对环境因子的交互影响两因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of period and sampling sites to environmental factors

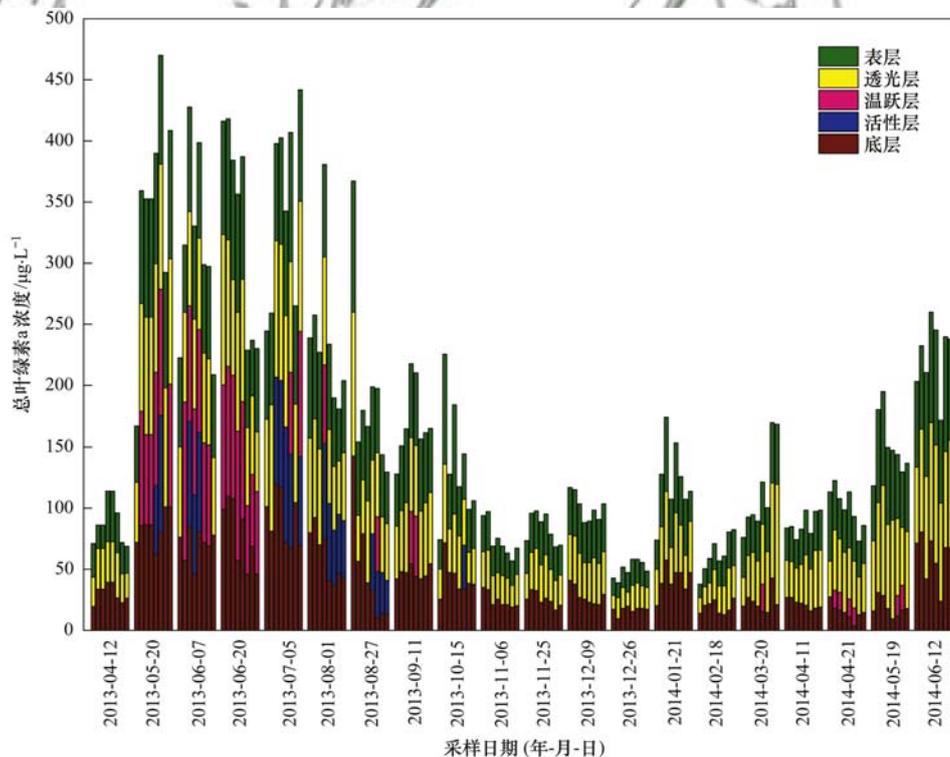
指标	pH	DO	WT	SD	COD	TOC	硅酸盐	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP	Fe
时期 Sig.	0.294	0.196	0.000	0.000	0.005	0.007	0.000	0.001	0.000	0.087	0.152	0.009
采样点 Sig.	0.991	0.993	1.000	0.068	0.559	0.467	0.994	0.690	1.000	0.755	0.801	0.386
交互效应 Sig.	1.000	0.912	1.000	0.798	0.899	0.876	1.000	1.000	1.000	0.961	0.987	0.709
判决系数 R <sup>2</sup>	0.299	0.270	0.781	0.452	0.465	0.460	0.465	0.314	0.314	0.237	0.241	0.660

## 2.2 叶绿素 a 时空演变规律

图 2 反映了石岩水库各水层总叶绿素 a 浓度年际变化规律。石岩水库藻类  $\rho(\text{TChla})$  均值为  $52.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最高为  $123.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在 2013 年 6 月 1 号点透光层, 最低为  $9.59 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在 2013 年 12 月周采样的 2 号点底层。石岩水库藻类季节性暴发现象明显: 藻类 4 月开始复苏, 5~7 月达到全年最高水平, 其中 7 月  $\rho(\text{TChla})$  均值为  $89.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 到 8~10 月藻类浓度略微降低, 11 月至来年 2 月降至低浓度水平, 2013 年 12 月  $\rho(\text{TChla})$  均值为  $16.72 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 为全年最低峰, 2014 年 3~4 月随着温度升高, 藻类再次复苏, 5~6 月进入高藻期。与去年同期相比, 2014 年 5~6 月藻类浓度降低 25% 左右。这是因为石岩水库截污排海工程减少了流域藻类和污染物入库量, 起到了明显改善水质的作用。藻类垂直方向上分布规律与水深存在明显相

关性,  $\rho(\text{TChla})$  分布规律是透光层 > 表层 > 底层, 水深越深, 规律越明显。当水深为 3~5 m 时, 藻类呈现透光层略大于表层大于底层的分布规律; 当水深为 5~8 m 时, 底层  $\rho(\text{TChla})$  均值迅速降低, 与表层和透光层差距拉大; 当水深为 8~15 m 时, 底层  $\rho(\text{TChla})$  均值仅为透光层的 3/5 左右。石岩水库藻类叶绿素 a 在垂直方向上的空间异质性主要是由光照和水温的分层引起的。表层和透光层光照充足, 水温较高则  $\rho(\text{TChla})$  高。而底层光照微弱, 水温较低则  $\rho(\text{TChla})$  明显偏低。由于风力作用引发的水体垂直方向上的交换, 以及具有伪空胞的藻类会通过浮力调节机制从表层移至深水层, 没有发生底层和表层水体中  $\rho(\text{TChla})$  差距悬殊的现象。

石岩水库  $\rho(\text{TChla})$  均值虽然低于太湖, 巢湖和滇池等污染较重的自然湖泊, 但作为饮用水水源水库, 从  $\rho(\text{Chla})$  均值这一指标来看, 石岩水库已经



各组柱由左至右采样点编号为 1~8

图 2 石岩水库总叶绿素 a 浓度年际变化规律

Fig. 2 Annual trends in total chlorophyll a concentration for Shiyán Reservoir

达到了轻度富营养化状态<sup>[18,19]</sup>.

图3反映了石岩水库蓝藻、绿藻和硅藻的年度演变规律,蓝藻  $\rho(\text{Chla})$  均值为  $28.39 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最高为  $76.30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在2013年7月的3号点透光层, 最低为  $4.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在2014年2月的1号点底层; 月均最高为2013年7月  $56.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最低为2013年12月  $5.76 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 硅藻年  $\rho(\text{Chla})$  为  $15.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最高为  $46.09 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在2013

年6月的1号点透光层, 最低为  $3.16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在2013年8月下旬的6号点底层; 月均最高为2013年5月  $27.35 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最低为2013年11月  $7.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 绿藻  $\rho(\text{Chla})$  为  $8.62 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最高为  $26.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出现在2013年5月的8号点透光层, 最低为  $0.77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 2013年8月多个采样点底层均有出现; 月均最高为2013年5月  $15.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最低为2013年8月  $1.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

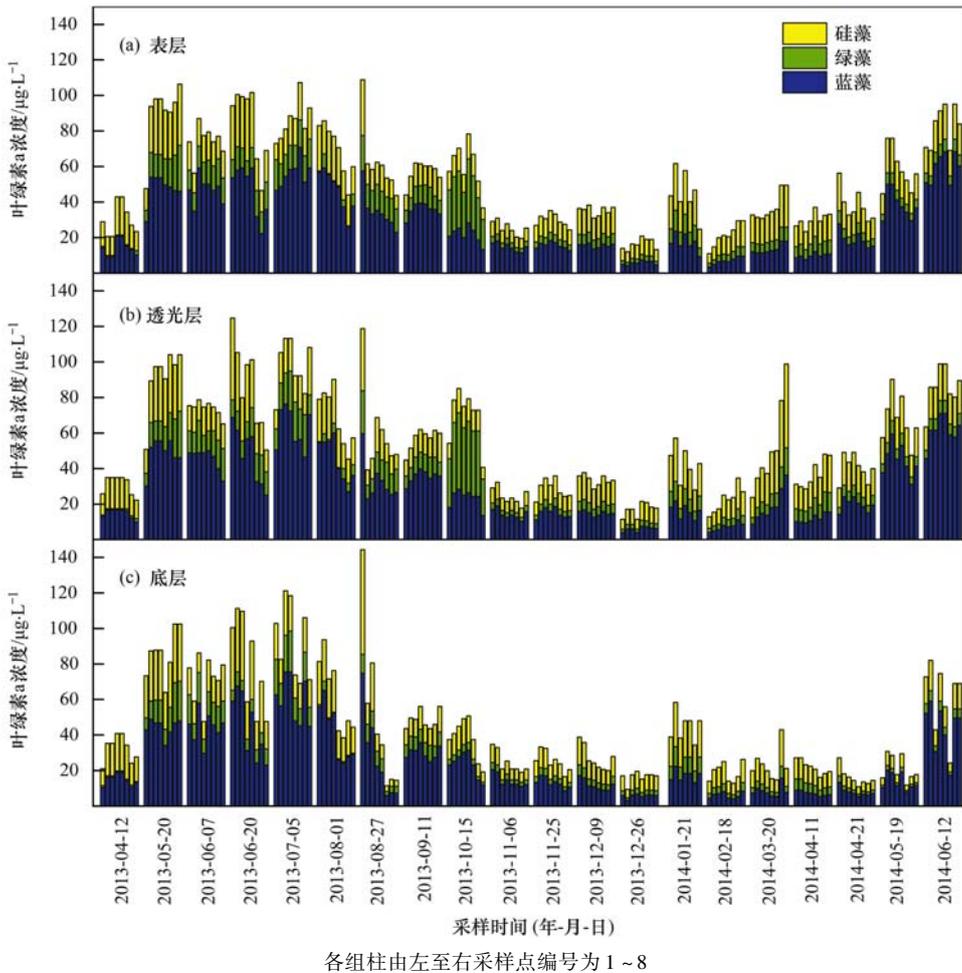


图3 石岩水库蓝藻、绿藻、硅藻叶绿素 a 浓度年际变化规律

Fig. 3 Annual trends in chlorophyll a concentrations of cyanophyta, Bacillariophyta, and Chlorophyta for Shiyan Reservoir

图4反映了藻类种群结构变化规律,蓝藻优势明显,全年占比为53.22%;硅藻次之,全年占比为30.09%,在冬春季节占优势;绿藻全年占比为13.72%,始终处于较低水平.蓝藻2013年4月~12月上旬一直是优势藻;2013年4月蓝藻比例为48.77%,之后快速上升,7月达到最高峰(69.79%),至11月一直维持高浓度水平,之后比例迅速下降,至12月下旬失去优势地位,2014年4月上旬比例维持在31.33%~36.86%,4月下旬迅速蹿升,超越硅藻成为优势藻,6月比例达到

73.13%.硅藻的生长趋势与蓝藻相反:2013年4月硅藻比例为45.67%,与蓝藻相当,随后迅速下降,直至9月比例再次上升,12月下旬超越蓝藻成为优势藻,至2014年4月上旬,比例维持在42.25%~50.05%.绿藻比例为5.57%~23.33%,全年处于较低水平,季节性变化不明显.与去年同期相比,2014年5~6月石岩水库藻类群落结构变化明显;蓝藻优势度明显上升,硅藻优势度下降,藻类多样性降低.藻类种群结构是水体生态多样性和稳定性的反映<sup>[20~22]</sup>,总体来看,石岩

水库藻类结构较为单一,多样性较差,藻类生态系统稳定性差,存在一定蓝藻水华风险.汛期蓝藻产生的藻毒素对饮用水安全造成一定威胁;冬春季硅藻的大量繁殖易堵塞给水厂滤池,增加反冲洗次数,相伴产生的土臭素和二甲基异茨醇等臭味物质增加了给水厂的处理成本.

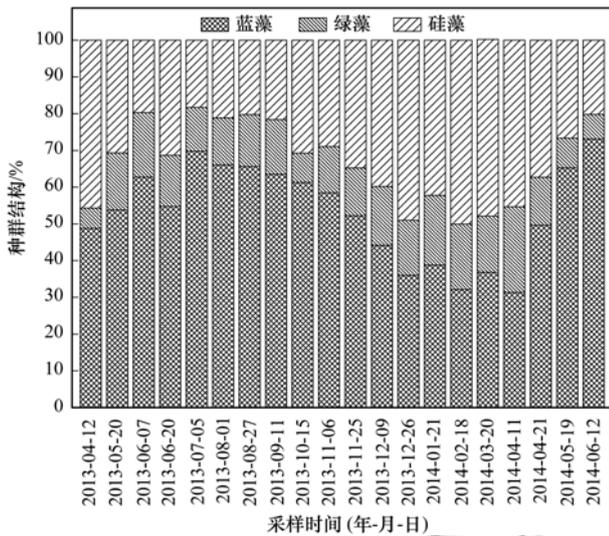


图 4 石岩水库藻类种群结构变化

Fig. 4 Community structure of phytoplankton in Shiyuan Reservoir

### 2.3 藻类高风险区域识别

石岩水库  $\rho(\text{Chla})$  由南到北逐渐降低,整体呈现中南库区高北部库区低的特点.汛期和高温无雨期多数采样点  $\rho(\text{Chla})$  偏高,存在较高藻华风险. 1、2、3 号采样点所处的南半库区  $\rho(\text{TChla})$  为  $60.35 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,是石岩水库  $\rho(\text{Chla})$  最高的区域. 其中 1 号采样点是铁岗水库来水进入石岩水库的位置,  $\rho(\text{Chla})$  为  $14.06 \sim 123.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均值  $45.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 铁岗水库来水中含有高浓度的藻类和营养盐,使得该区域  $\rho(\text{Chla})$  基数大,藻类生长速率高. 2、3 号采样点受径流污染较重,水体营养状态较高,Chla 浓度分别为  $16.61 \sim 109.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $15.34 \sim 119.62 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 南半库区在汛期和高温无雨期均存在较高的藻华风险. 4、5、6 号采样点位于库心活水区,该区域水体交换频繁,水体流速达  $15 \sim 30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,一定程度上抑制了藻类的快速繁殖,  $\rho(\text{Chla})$  顺次降低,汛期存在一定藻华风险. 7、8 号采样点近水厂取水口,远离径流污染,是石岩水库水质最优处,藻类总  $\rho(\text{Chla})$  分别为  $8.96 \sim 89.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $5.11 \sim 77.89 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在汛期存在较高藻华风险. 总体看来,石岩水库面积较小,形状较为规

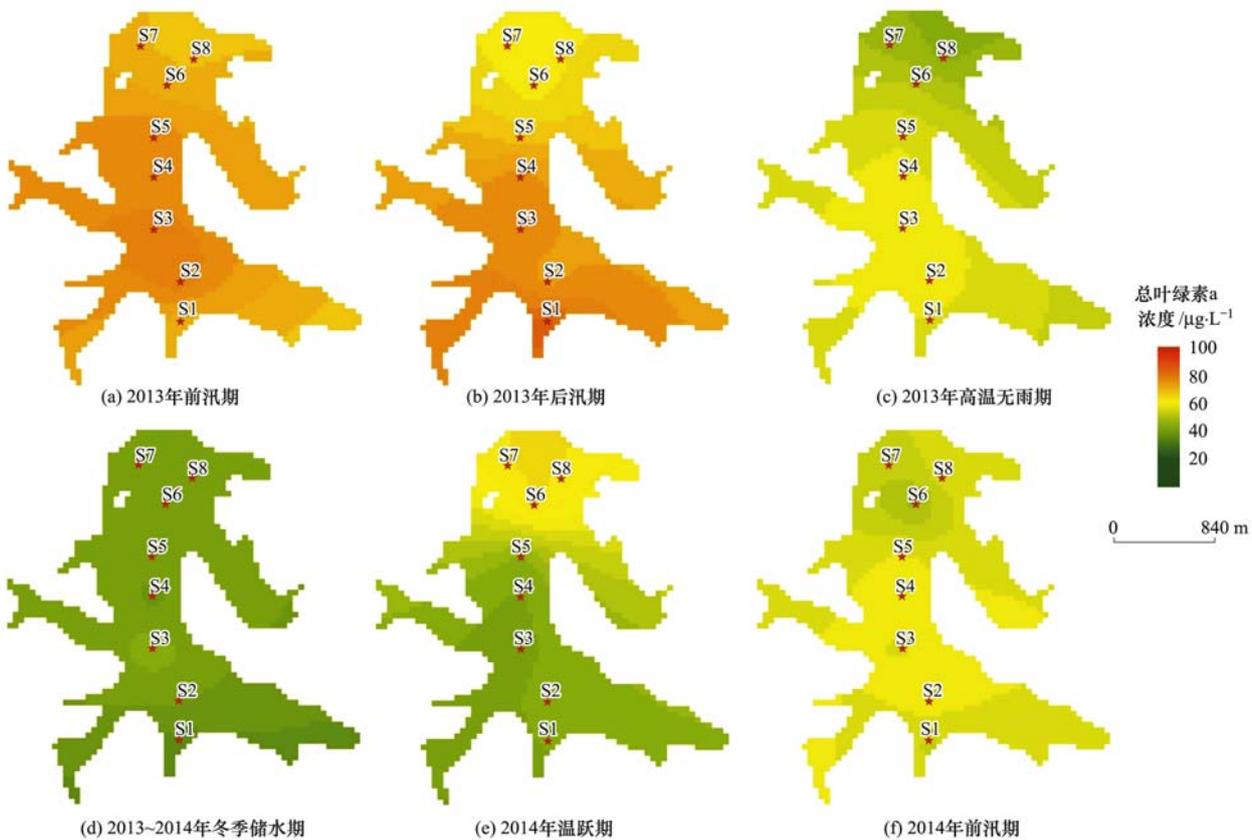


图 5 不同气候期内石岩水库 Chla 浓度平面分布

Fig. 5 Chlorophyll a charts for different climatic periods in Shiyuan Reservoir

则,库内水体交换充分,各采样点空间异质性较低.径流污染和工农业污染源的汇入是石岩水库藻类叶绿素 a 空间异质性的主要原因,因此加强水源保护,从源头上减少外源污染物的进入是降低藻华风险的根本途径.

2.4 叶绿素 a 与环境因子关联性分析

2.4.1 叶绿素 a 与环境因子 Pearson 相关分析

表 3 反映了汛期和早期藻类叶绿素 a 与水质因子的相关关系,不同时期不同藻类的主要相关因子差异较大.蓝藻汛期的主要相关因子有 WT、TOC、TN:TP、TN、pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SD 等,其中 TN:TP、TN、SD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为负相关;早期主要相关因子有 TOC、WT、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、DO、TP 等,其中 TP 为负相关.硅藻汛期主要相关因子有 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、Silicate、TOC、COD、WT、TN:TP,其中 TN:TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为负相关;早期主要相关因子有 Silicate、DO、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 等,其中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 为负相关.绿藻汛期主要相关因子有 WT、TOC、COD、pH、SD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN:TP 等,其中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN:TP 为负相关;早期主要相关因子有 Silicate、WT、DO、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 等,其中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 为负相关.

汛期水温是蓝藻的首要影响因子,相关系数高达 0.714,对硅藻则是第 6 位的影响因子,相关系数为 0.268.早期水温是蓝藻次要相关影响因子,相关

系数高达 0.593,对硅藻影响更加微弱,相关系数为 -0.095.水温是影响亚热带湖库藻类生长的首要因素,这一点与文献[23~25]的研究结论一致.深圳地处亚热带地区,监测期内水温在 14.08~32.33℃ 范围波动.汛期 5~9 月水温达 29℃ 以上,与蓝藻的最适生长温度重合<sup>[26~28]</sup>,随着温度的升高,蓝藻在种间竞争中获得优势,抑制了硅藻的生长.早期水温为 14.08~23.57℃,适宜硅藻的生长,硅藻取代蓝藻成为优势藻.2013 年 1 月~2014 年 2 月随着温度的降低,蓝藻急速衰减,硅藻数量反而迅速增加.TOC 和 COD 代表水体有机物含量,二者与藻类存在较高的相关性.这是因水体绝大部分有机物都会以 TOC 的形式被检测出来,而藻类本身就是有机物,是 TOC 的重要组成部分.汛期透明度、浊度与藻类尤其是蓝藻呈显著负相关,这说明汛期藻类的增加,增加了水体的浑浊度,降低了太阳辐射在水体的透射性,限制藻类光合作用.硝酸盐氮、TN:TP、TN 等与 3 种藻类成负相关关系,石岩水库 TN 平均浓度为 2.03 mg·L<sup>-1</sup>,超过地表水 V 类标准,TP 平均浓度 0.03 mg·L<sup>-1</sup>,达到地表水 II~III 类标准,总氮超标明显,氮磷比为 67 左右.汛期随着 TP 增加藻类 ρ(Chla) 升高,TN 的增加反而引起藻类 ρ(Chla) 降低,这说明石岩水库高浓度的氮含量能够满足藻类生长需求,而 TP 浓度偏低,是藻类生长的限制性因子.

表 3 藻类叶绿素 a 与水质因子 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Pearson's correlation coefficients between chlorophyll a and meteorological factors

时期	藻类	DO	pH	WT	SD	浊度	COD	TOC	硅酸盐	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP	TN:TP	Fe
汛期	蓝藻	0.265 *	0.528 **	0.714 **	-0.463 **	0.458 **	0.297 *	0.698 **	-0.143	-0.479 **	0.213 *	-0.568 **	0.381 **	-0.595 **	0.216
	硅藻	0.056	0.213	0.268 *	-0.223	0.281 *	0.313 **	0.366 **	-0.379 **	-0.583 **	0.338 *	-0.173	0.105	-0.256 *	0.046
	绿藻	-0.106	0.449 **	0.462 **	-0.333 **	0.225	0.456 **	0.466 **	-0.243 *	-0.309 *	0.267 *	-0.129	0.029	-0.296 *	0.240 *
	总藻	0.176	0.516 **	0.663 **	-0.450 **	0.441 **	0.387 **	0.680 **	-0.256 *	-0.559 **	0.310 *	-0.467 **	0.298 *	-0.543 **	0.211
早期	蓝藻	0.371 **	0.282 *	0.593 **	0.191	-0.038	0.010	0.757 **	0.148	0.384 **	-0.046	-0.014	-0.344 **	0.179	-0.299 *
	硅藻	0.383 **	-0.153	-0.095	0.499 **	-0.229	-0.154	0.060	-0.453 **	-0.296 *	-0.142	-0.019	-0.285 *	0.254 *	0.291 *
	绿藻	0.020	0.572 **	0.725 **	0.079	0.065	0.387 **	0.754 **	0.133	0.632 **	0.329 *	0.323 *	-0.032	0.056	-0.348 **
	总藻	0.272 *	0.354 **	0.564 **	0.283 *	-0.058	0.161	0.690 **	-0.037	0.372 **	0.169	0.165	-0.234	0.181	-0.189
全年	蓝藻	0.158	0.301 **	0.793 **	-0.058	0.053	0.255 **	0.689 **	-0.095	-0.030	-0.031	-0.264 *	-0.058	-0.167	-0.318 **
	硅藻	0.162	0.036	0.311 **	0.173 *	-0.031	0.173 *	0.320 **	-0.421 **	-0.287 **	0.137	-0.087	-0.161	-0.023	-0.013
	绿藻	-0.017	0.479 **	0.353 **	-0.084	0.140	0.327 **	0.536 **	0.063	0.024	0.365 *	0.166	0.027	-0.144	-0.140
	总藻	0.147	0.367 **	0.739 **	-0.017	0.072	0.326 **	0.729 **	-0.164	-0.094	0.166	-0.152	-0.077	-0.166	-0.265 **

1) 汛期为 2013 年 4 月~2013 年 9 月,早期为 2013 年 10 月~2014 年 3 月; \* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关,下同

2.4.2 叶绿素 a 与气象因子 Pearson 相关分析

同一天各采样点的气象因子数值相同,数据特征与水质因子不同,因此单独分析其与藻类 Chla 的相关性.由表 4 可知.不同藻类在同一时期以及同一藻类在不同时期的主要相关因子均存在明显

差异.

蓝藻与气象因子相关性较高,在汛期的主要相关因子为气压 > 气温 > 径流量,在早期的主要相关因子为气温 > 蒸发量 > HRT.硅藻与气象因子相关性一般,在汛期的主要相关因子为 HTR > 湿度 > 气压,在

早期的主要相关因子为径流量 > 降雨量 > 蒸发量。绿藻在汛期与气象因子相关性低, 主要相关因子为 HTR > 蒸发量 > 日照时数, 在早期与气象因子显著相关, 主要相关因子为气温 > 气压 > 日照时数。

气压与藻类 Chla 成显著负相关, 尤其是汛期与蓝藻相关系数达到 -0.777, 是蓝藻的首要相关因子。气压与藻类间没有因果关系, 但这种高度相关性说明持续的低压天气容易暴发蓝藻水华。气温与藻类 Chla 的相关规律与水温基本一致, 汛期与蓝藻显著相关, 早期与绿藻显著相关, 与硅藻无显著相关性。降雨和径流量是影响藻类 Chla 的重要因子, 汛

期径流量、降雨量与蓝藻相关系数分别为 0.534 和 0.133, 早期径流量、降雨量与硅藻相关系数分别为 0.642 和 0.490。地表和植被着生的藻类被降雨冲刷下来后随地表径流进入水库。绿藻与径流量的相关性很小, 这可能是因为流域内地表中生长的藻类主要是蓝藻和硅藻。HRT 与 3 种藻类均存在一定负相关性, 说明水力停留时间短, 水体流速加大, 更新速度加快, 可以抑制藻类的生长。因此优化水利调度, 加快水体流动性, 降低 HRT, 是抑制藻类水华的有效途径。藻类 Chla 与蒸发量和日照时数呈一定相关性, 与湿度无明显相关。

表 4 藻类叶绿素 a 与气象因子 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson's correlation coefficients between chlorophyll a and environmental factors

时期	藻类	气温	气压	湿度	日照时数	蒸发量	径流量	降雨量	HRT
汛期	蓝藻	0.755 **	-0.777 **	0.027	0.464 **	0.368 *	0.534 **	0.133	-0.363 *
	硅藻	0.211	-0.302 **	0.395 **	0.152	0.178	0.023	0.128	-0.534 **
	绿藻	0.356 **	-0.243 *	0.003	0.408 **	0.460 **	-0.161	-0.165	-0.501 **
	总藻	0.653 **	-0.671 **	0.131	0.584 **	0.399 **	0.341 **	0.094	-0.504 **
早期	蓝藻	0.627 **	-0.455 **	-0.019	0.193	0.549 **	0.227	0.000	-0.476 **
	硅藻	-0.061	0.020	0.357 **	-0.306 *	0.420 **	0.642 **	0.490 **	-0.169
	绿藻	0.756 **	-0.692 **	-0.157	0.478 **	0.360 *	-0.070	-0.299 *	-0.301 *
	总藻	0.605 **	-0.526 **	0.033	0.219	0.566 **	0.264 *	0.009	-0.385 **
全年	蓝藻	0.804 **	-0.852 **	0.551 **	0.234 **	0.070	0.691 **	0.497 **	-0.342 **
	硅藻	0.321 **	-0.403 **	0.483 **	-0.127	0.272 **	0.315 **	0.302 **	-0.286 **
	绿藻	0.302 **	-0.097	-0.175 *	0.440 **	0.388 **	-0.137	-0.217 *	-0.283 **
	总藻	0.734 **	-0.724 **	0.455 **	0.263 **	0.247 *	0.515 **	0.385 **	-0.403 **

#### 2.4.3 叶绿素 a 与环境因子典范对应分析

将汛期和早期的水质和气象因子与藻类  $\rho(\text{Chla})$  进行典范对应分析, 研究了二者综合作用对藻类生长的影响, 结果如图 6 所示。汛期蓝藻、绿藻和硅藻分别位于第一、二、三象限, 旱汛期蓝藻、绿藻和硅藻分别位于第一、三、四象限, 说明影响 3 种藻类的环境因子差异较大。汛期 F1 和 F2 的特征值分别为 0.015 和 0.012, 解释率分别为 55.71% 和 44.29%; 早期 F1 和 F2 的特征值分别为 0.067 和 0.011, 解释率分别为 86.87% 和 13.13%。

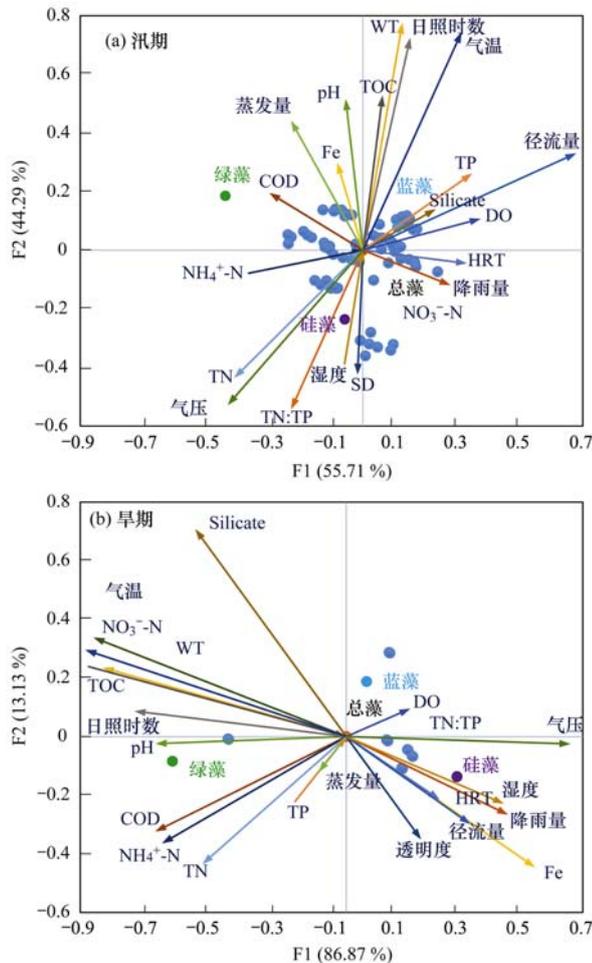
汛期影响藻类生长和分布的首要因子为径流量, 尤其是蓝藻与径流量高度正相关。石岩水库周边人口稠密, 入库支流包括石岩河、王家庄河、麻布水、后桥河、上屋河、运牛坑水、白坑窝水等, 将流域内的生活废水和工农业废水带入水库, 增加了营养盐水平。同时地表和植物表面附着的藻类经降雨冲洗后随地表径流进入水库, 藻类生物量相应增加。因此加强水库污水截排和内源污染的清除, 限制库区农业和养殖业污染源是解决石岩水库水体富营养化的首要途径。气温、水温、气压、日照时数是影响藻类生长的第二类影响因素, 因此要加强对汛期高温天气藻类监测, 预防暴发局部藻类水华。

TOC、COD、TN、氨氮、TP 等有机物和营养盐是藻类第三大类影响因子。DO、透明度、HRT 和蒸发量与藻类的相关性相对较小, 硅酸盐、降雨量和 Fe 等与藻类没有明显相关性。

早期影响藻类生长和分布的首要因子为硅酸盐, 水温和气温的影响效应位居第二位。朱广伟等<sup>[29]</sup>发现太湖硅藻在气温为 16~26℃ 快速生长, 当气温超过 26℃ 时, 硅藻的生物量开始下降。石岩水库冬季表层水温 13~24℃, 水温更适宜硅藻的生长, 硅藻取代蓝藻成为优势藻。早期降水稀少, 随地表径流进入水库的硅酸盐显著减少, 而硅酸盐正是硅藻生长所需的必要营养盐, 因此硅酸盐与藻类的相关关系越发显著。

TOC 和 COD 代表水中的有机物含量, 与藻类相关性较高, 是第三类影响因素。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 代表营养盐水平, 是藻类生长的必须因子, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 与藻类显著相关, TP 与藻类相关性较低。Fe 与藻类相关性显著, 因为 Fe 是藻类光合作用和新陈代谢的必要元素, 对藻类生物量和生长速率均有重要影响<sup>[30,31]</sup>。气压、日照时数、降雨量、径流量、湿度等气象因子与藻类呈一定相关性, 但显著性较汛期有所降低。DO、HRT、蒸发

量和 TN:TP 等与藻类没有明显相关性。



汛期 2013 年 4 月~2013 年 9 月, 样本数为 80; 早期 2013 年 10 月~2014 年 3 月, 样本数为 71; 蓝色、绿色、紫色和黑色圆点代表蓝藻、绿藻、硅藻和总藻, 深蓝色点表示采样点, 箭头线表示环境因子

图 6 石岩水库绿素 a 浓度随时间变化

Fig. 6 Canonical correspondence analysis of environmental factors and phytoplankton of Shiyen Reservoir

### 3 结论

(1) 石岩水库藻类  $\rho$  (TChla) 均值为  $52.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 处于轻度富营养化状态, 蓝藻、硅藻和绿藻  $\rho$  (Chla) 均值分别为  $28.39$ 、 $15.02$ 、 $8.62 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2013 年 12 月下旬至 2014 年 4 月上旬硅藻为优势藻 (42% ~ 49%), 其他时间蓝藻优势明显 (44% ~ 78%), 绿藻全年处于低浓度水平 (6% ~ 23%).

(2) 石岩水库  $\rho$  (Chla) 时间上变化规律为前汛期 > 后汛期 > 高温无雨期 > 温度跃升期 > 秋冬储水期, 空间上自南向北逐渐降低. 汛期整个库区和高温无雨期中南库区存在蓝藻水华风险, 冬春季节暴发的硅藻虽未达到藻华程度, 但易堵塞给水厂滤池, 妨害供水安全.

(3) 相关分析和 CCA 分析显示: 蓝藻、硅藻、绿藻的关键环境影响因子差异较大, 水温是 3 种藻类的首要影响因子, 前汛期径流带来的有机物和营养盐是蓝藻暴发的重要诱因. 氮磷比与 3 种藻类负相关, 磷可能是石岩水库藻类生长的限制性因子. 蓝藻主要相关因子还包括 TOC、TN、pH、透明度、浊度和硝酸盐氮等, 硅藻主要相关因子还包括硅酸盐、TOC、硝酸盐氮和 COD 等, 绿藻主要相关因子还包括 TOC、COD、pH、透明度和硝酸盐氮等.

#### 参考文献:

- [1] 邱国玉, 张清涛. 快速城市化过程中深圳的水资源与水环境问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 629-633.
- [2] 温美丽, 方国祥, 陈朝辉, 等. 深圳石岩水库污染状况及综合防治对策[J]. 热带地理, 2009, 29(1): 5-10.
- [3] 彭溢, 谢林伸. 深圳市石岩水库富营养化主控因素分析及潜在风险预测[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 141-146.
- [4] 张琳. 深圳石岩水库清淤过程水质变化研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [5] 林高松, 黄晓英, 李娟. 基于投影寻踪法的水库富营养化评价—以深圳市铁岗水库与石岩水库为例[J]. 热带地理, 2010, 30(2): 130-134.
- [6] Lin G S, Huang X Y, Li J. Eutrophication assessment of reservoirs based on project pursuit method: a case study of Tiegang Reservoir and SHIYAN Reservoir in Shenzhen [J]. Tropical Geography, 2010, 30(2): 130-134.
- [7] Tran D V, Gabric A, Cropp R. Interannual variability in chlorophyll-a on the southern Queensland continental shelf and its relationship to ENSO[J]. Journal of Sea Research, 2015, 106: 27-38.
- [8] Lira G A S T, Moura A N, Vilar M C P, et al. Vertical and temporal variation in phytoplankton assemblages correlated with environmental conditions in the Mundaú reservoir, semi-arid northeastern[J]. Brazilian Journal of Biology, 2014, 74(S3): S93-S102.
- [9] Ma J R, Brookes J D, Qin B Q, et al. Environmental factors controlling colony formation in blooms of the cyanobacteria *Microcystis* spp. in Lake Taihu, China[J]. Harmful Algae, 2014, 31: 136-142.
- [10] Daggett C T, Saros J E, Lafrancois B M, et al. Effects of increased concentrations of inorganic nitrogen and dissolved organic matter on phytoplankton in boreal lakes with differing nutrient limitation patterns [J]. Aquatic Sciences, 2015, 77(3): 511-521.
- [11] Zhang X F, Mei X Y, Gulati R D, et al. Effects of N and P

- enrichment on competition between phytoplankton and benthic algae in shallow lakes: a mesocosm study [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(6): 4418-4424.
- [11] Zhang W Y, Lou I, Ung W K, *et al.* Spatio-temporal variations of phytoplankton structure and water quality in the eutrophic freshwater reservoir of Macau [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, **55**(8): 2237-2252.
- [12] 孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 等. 基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3302-3309.
- Sun D Y, Zhou X Y, Li Y M, *et al.* Hyperspectral remote sensing of chlorophyll a concentrations in the Lake Taihu, based on water optical classification [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3302-3309.
- [13] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾叶绿素 a 和初级生产力时空变化及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1333-1340.
- Yang B, Zhong Q P, Zhang C X, *et al.* Spatio-temporal variations of chlorophyll a and primary productivity and its influence factors in Qinzhou Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1333-1340.
- [14] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- Zhang L, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi river backwater area, three gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- [15] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2465-2471.
- Wang B, Ma J, Wang Y Y, *et al.* Distribution of chlorophyll-a and eutrophication state in Tianchi Lake of Tianshan mountains in summer [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2465-2471.
- [16] Nazeer M, Nichol J E. Development and application of a remote sensing-based Chlorophyll-a concentration prediction model for complex coastal waters of Hong Kong [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **532**: 80-89.
- [17] 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. 722-723.
- [18] 陈黎黎, 金腊华. 湖库富营养化的改进型模糊综合评价方法研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3223-3229.
- Chen L L, Jin L H. An improved fuzzy comprehensive evaluation method of eutrophication for lakes and reservoirs [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3223-3229.
- [19] 陈林, 许其功, 李铁松, 等. 模糊物元识别模型在巢湖水体富营养化评价中的应用研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(4): 729-736.
- Chen L, Xu Q G, Li T S, *et al.* Fuzzy pattern recognition model to water trophic grade in Chaohu Lake [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(4): 729-736.
- [20] 马沛明, 施练东, 张俊芳, 等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- Ma P M, Shi L D, Zhang J F, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu reservoir, Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- [21] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏, 等. 温带季节性分层水库浮游植物功能类群的时空演替[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1157-1166.
- Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P, *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in a temperate seasonally stratified reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1157-1166.
- [22] 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 922-927.
- Wang Y F, Zhao X L, He B H, *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 922-927.
- [23] Lv H, Yang J, Liu L M, *et al.* Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(9): 5917-5928.
- [24] Li R N, Chen Q W, Zhang X Q, *et al.* Effects of temperature and macronutrients on phytoplankton communities across three largely different lakes identified by a time-space trade-off approach [J]. *Ecological Informatics*, 2015, **29**: 174-181.
- [25] Jiang Y J, He W, Liu W X, *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67.
- [26] 谭啸, 孔繁翔, 曹焕生等. 利用流式细胞仪研究温度对两种藻竞争的影响[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 419-424.
- Tan X, Kong F X, Cao H S, *et al.* Influences of temperatures on the competition between two species of algae assayed by flow cytometry [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(4): 419-424.
- [27] Deng J M, Qin B Q, Paerl H W, *et al.* Effects of nutrients, temperature and their interactions on spring phytoplankton community succession in Lake Taihu, China [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(12): e113960.
- [28] Davis T W, Berry D L, Boyer G L, *et al.* The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms [J]. *Harmful Algae*, 2009, **8**(5): 715-725.
- [29] 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.
- [30] Sugie K, Kuma K, Fujita S, *et al.* Importance of intracellular Fe pools on growth of marine diatoms by using unialgal cultures and on the Oyashio region phytoplankton community during spring [J]. *Journal of Oceanography*, 2011, **67**(2): 183-196.
- [31] 姚波, 席北斗, 胡春明, 等. 铁限制对浮游植物生长和群落组成的影响研究综述[J]. *生态环境学*, 2010, **19**(2): 459-465.
- Yao B, Xi B D, Hu C M, *et al.* A review of iron limitation on the growth and competition of phytoplankton [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(2): 459-465.

## CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated $MgCl_2$ Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-bao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
$PM_{10}$ Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to $NH_4^+$ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of $N_2O$ and $NO_x$ Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of $CaCO_3$ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)