

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 ..... 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 ..... 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析 ..... 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 ..... 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 ..... 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ<sup>13</sup>C观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析 ..... 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 ..... 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 ..... 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 ..... 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 ..... 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 ..... 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 ..... 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 ..... 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 ..... 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 ..... 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 ..... 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 ..... 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 ..... 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 ..... 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 ..... 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 ..... 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 ..... 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 ..... 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 ..... 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 ..... 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 ..... 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 ..... 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 ..... 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 下 SBR 中硝化微生物特性 ..... 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 ..... 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 ..... 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 ..... 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 ..... 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 ..... 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO<sub>2</sub> 排放的综合影响 ..... 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 ..... 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 ..... 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 ..... 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 ..... 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 ..... 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 ..... 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 ..... 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 ..... 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 ..... 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 ..... 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 ..... 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 ..... 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 ..... (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

# 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析

马沛明<sup>1</sup>, 施练东<sup>2</sup>, 张俊芳<sup>1</sup>, 胡菊香<sup>1</sup>, 赵先富<sup>1\*</sup>

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079; 2. 绍兴市汤浦水库有限公司, 上虞 312364)

**摘要:** 为探索我国亚热带饮用水源水库浮游植物时空变化特征及其影响因素, 2011 年对汤浦水库浮游植物和 22 项水文水环境因子进行月度监测. 结果表明, 调查期间共检出浮游植物 7 门 62 属 115 种, 其中绿藻种类最多, 硅藻其次; 春季水华期间(4 月)浮游植物细胞密度达到最高  $20.88 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ , 随后因强降雨影响降至最低  $0.59 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$  (6 月); 浮游植物群落组成的时间异质性比空间异质性更为明显, 其时空方差分解的结果显示, 时间变异占总变异的 72.3%, 大于仅占 2.5% 的空间变异; 优势种和冗余分析(RDA)表明, 硅藻全年优势最为明显, 其次是蓝藻和隐藻, 再次是绿藻, 其中春季由硅藻和蓝藻占优势, 夏季由蓝藻和绿藻占优势, 秋季和冬季则由硅藻和隐藻占优势; HRT 及其驱动的水库离子浓度变化和反硝化过程是主导春季和秋季水体扰动耐受和敏感种类间演变, 以及春季水华形成的关键因子;  $\text{SiO}_2$ 、WT 和 N:P 则是主导冬季和夏季, 硅藻、隐藻和蓝藻、绿藻间演变的关键因子.

**关键词:** 浮游植物; 时空动态; 环境因子; 冗余分析; 方差分解

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4560-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201605095

## Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province

MA Pei-ming<sup>1</sup>, SHI Lian-dong<sup>2</sup>, ZHANG Jun-fang<sup>1</sup>, HU Ju-xiang<sup>1</sup>, ZHAO Xian-fu<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China; 2. Shaoxing Tangpu Reservoir Co., Ltd., Shangyu 312364, China)

**Abstract:** In order to explore the spatial-temporal dynamics of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu Reservoir, phytoplankton and environmental variables were monthly monitored in 2011. The results showed that a total of 115 species of phytoplankton were identified, which belonged to 7 phyla and 62 genera. Phytoplankton abundance varied monthly with the maximum value ( $20.88 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ) in April and minimum ( $0.59 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ) in June. Variation partitioning of species data matrix showed that the variation of phytoplankton communities among months (account for 72.3%) was much larger than that among sampling sites (account for 2.5%), which indicated that phytoplankton communities had a high temporal but low spatial heterogeneity. Dominant species showed a marked seasonal succession pattern: diatom and blue-green algae species in spring, blue-green algae and green algae species in summer, diatom and cryptomonads species in autumn and winter. Result of multivariate analysis (RDA) indicated that HRT was the key factor affecting the shift between hydrological disturbance sensitive and tolerant species, and the formation of spring algal bloom;  $\text{SiO}_2$ , WT and N:P were the key factors affecting the shift from diatom and cryptomonads species to blue-green algae and green algae species.

**Key words:** phytoplankton; spatial-temporal dynamics; environmental factors; redundancy analysis (RDA); variation partitioning

在我国水资源短缺和水环境恶化的严峻情势下, 河湖供水水质退化, 导致对水库水源的依赖; 特别是我国东南沿海省市, 水库型水源地日益成为经济社会可持续发展的重要保障<sup>[1]</sup>. 然而近十几年来我国水库水质呈显著下降趋势, 1/3 重要供水水库已呈富营养化, 藻类水华事件频发, 不同程度破坏水库生态系统, 影响水源水质, 降低生态系统服务能力, 危及饮水安全<sup>[2]</sup>.

汤浦水库位于浙江省绍兴市与上虞市交界处, 属曹娥江支流小舜江流域, 功能以供水为主, 兼顾防洪; 水库控制流域集雨面积 460 km<sup>2</sup>, 水面面积 14

km<sup>2</sup>, 总库容 2.35 亿 m<sup>3</sup>, 多年平均供水 27 820 万 m<sup>3</sup>, 是虞绍平原区域性专用水源地, 解决近 400 万人口的生活和生产用水. 2001 年建成以来, 因受上游污染源的胁迫, 水库呈富营养化趋势, 多次出现浮游植物大量增殖现象, 影响供水水质.

浮游植物的时空分布特征往往具一定规律性和

收稿日期: 2016-05-13; 修订日期: 2016-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51209148, 31000188, 51279113); 绍兴市重点社会发展科研项目 (2011A23005)

作者简介: 马沛明 (1979 ~), 男, 硕士, 主要研究方向淡水生态学和生物监测, E-mail: pablomaming@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: phycology@gmail.com

周期性,温带湖泊的长期研究表明,特定的优势种组合常在固定时段重复出现,这一过程通常又受水物理、化学、水文和生物等因子调控<sup>[3,4]</sup>. 本研究对汤浦水库浮游植物和水文水环境因子进行周年的月度监测,利用偏冗余分析(partial redundancy analysis, Partial RDA)分解浮游植物群落时间和空间维度的方差,定量描述其时空相对重要性,进一步利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)探索浮游植物季节演替规律及其与水文和水环境因子的关系,以期为水库生态系统的维护和水质管理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置

本研究在汤浦水库设置 6 个采样点(图 1),从上游库湾到下游坝前分别是 S1(双江溪)、S2(王化溪)、S3(托潭)、S4(库中)、S5(宅阳)和 S6(取水口). 2011 年每月中旬进行 1 次月度采样.

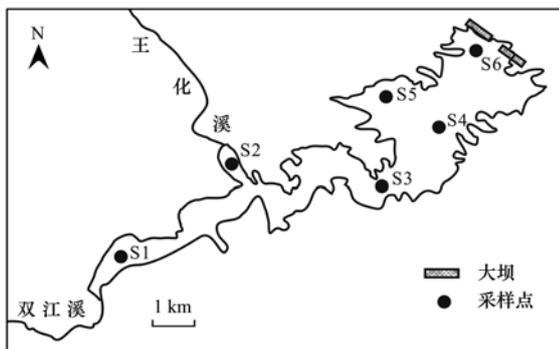


图 1 汤浦水库采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Tangpu Reservoir

### 1.2 样品采集与检测方法

浮游植物样品:定性样品用 25 号浮游生物网在水体表层呈“∞”字形来回拖动约 3~5 min 捞取,4% 福尔马林固定,实验室用 10×40 倍显微镜观察,进行种属鉴定;定量样品在水体表层 0.5 m 处采集 2 L,用鲁哥试剂(Lugol's)固定,带回实验室沉淀浓缩至 30 mL,在显微镜下利用浮游生物计数框行格法进行分类计数,对于密度高不适合行格法计数的样品采用视野计数法,对 30~50 个视野计数,使细胞数不少于 300 个.

水质理化样品与浮游植物样品同步采集,水温(WT)、pH、溶解氧(DO)和电导率(EC)用便携式水质分析仪现场测定,透明度(SD)用塞式透明度盘现场测定,高锰酸盐指数、总有机碳(TOC)、叶绿

素 a(Chla)、总氮(TN)、总磷(TP)、铁(Fe)、锰(Mn)、氯化物(Cl<sup>-</sup>)、硫酸盐(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)和磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)的测定均参考文献[5],水体全硅(SiO<sub>2</sub>)按照《GB/T 12149-2007 工业循环冷却水和锅炉用水中硅的测定》中适用于天然水的氢氟酸转化分光光度法测定. 水体氮磷比(N:P)为摩尔比,月均水力滞留时间(HRT)等于水库库容量与出流量的比值<sup>[6]</sup>,月降雨量(Precip)及以上水文和水环境因子数据由绍兴市汤浦水库有限公司提供.

### 1.3 数据处理与统计分析

环境因子的 Pearson 相关系数用 SPSS 21.0 进行计算. 浮游植物群落与环境因子间的关系用 CANOCO 4.5 分析;物种数据采用浮游植物密度数据,并经平方根转换<sup>[7]</sup>,环境因子除 pH 外进行 lg(x+1) 转换<sup>[8]</sup>;对浮游植物物种数据进行 DCA(detrended correspondence analysis)分析,排序轴最大梯度长度为 3.265,可选用基于线性模型的 RDA 分析<sup>[7]</sup>.

通过 RDA 和 Partial RDA 分析可将物种数据矩阵的总方差分解成不同组分<sup>[9]</sup>:基于采样月份建立表征时间变化的虚拟变量 T,基于采样点建立表征空间变化的虚拟变量 S;通过时间和空间共同约束下的 RDA 分析(S 和 T 同为解释变量),剔除空间影响后时间约束下的 Partial RDA 分析(T 为解释变量以及 S 为协变量),以及剔除时间影响后空间约束下的 Partial RDA 分析(S 为解释变量以及 T 为协变量),可以将浮游植物物种数据的方差分解为时间变量独立作用部分,空间变量独立作用部分,时间和空间变量交互作用部分,以及未能解释的部分.

进行浮游植物和环境因子的 RDA 分析时,为避免环境因子间多元共线性的影响,需对环境因子进行筛选. 首先试探性将所有环境因子作为解释变量纳入 RDA 分析,查看其方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)大小,一般认为 VIF > 10 时,因子间共线性明显<sup>[10]</sup>,需对环境因子缩减;本研究环境因子缩减原则为 Pearson 相关系数大于 0.75(P < 0.01)的一对环境因子只保留其中 1 个,优先保留过去研究表明对浮游植物群落有影响或直接影响的因素;缩减后的环境因子集重新纳入 RDA 分析,用 Forward selection 程序中的人工选择(Manual selection)筛选通过 Monte Carlo 检验(P < 0.01, n = 999)的参数进行分析和作图. 本研究最后入选 RDA 分的环境因子为 HRT、EC、SiO<sub>2</sub>、WT、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、

DO、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、Precip、N:P 和 Mn,除 WT 的 VIF 为 10.60 外其余皆小于 10. 为了简化排序图,只有超过 15% 方差能被排序轴解释的物种入选作图. 为了便于排序图解译和分析,之前因存在共线性去除的(TN、TP、Chla、pH、TOC、高锰酸盐指数和 Cl<sup>-</sup>)以及未通过 Monte Carlo 检验的(SD、Fe、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)共计 12 个环境因子作为被动变量(passive variables)放入排序图中.

2 结果与分析

2.1 水文与水环境特征

汤浦水库水文和水环境变量 2011 年均值和变化范围见表 1. 各变量 Pearson 相关系数矩阵见表 2 (其中仅列举至少有 1 个与其他变量的相关系数 ≥ 0.750 的变量). 其中,WT 与除 Fe 外的其他因子显著相关,与高锰酸盐指数相关性最高,二者峰值出现在 8 月(最高)和 2 月(最低); pH 与高锰酸盐指数、TOC 和 Chla 显著正相关,三者最高值集中出现在 5 月、7 月和 8 月, pH 还与 SiO<sub>2</sub> 显著负相关;除了 WT 和 pH 外,高锰酸盐指数还与 TOC 和 Chla 呈显著正相关; Cl<sup>-</sup> 与电导率和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 显著正相关,三者在上半年明显高于下半年; TN 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 显著强相

关; TP 与 Fe 显著正相关,与 N:P 显著负相关.

表 1 汤浦水库水文和水环境变量特征

参数	均值 ± 标准差	范围
WT/°C	19.9 ± 8.5	6.8 ~ 33.0
pH	7.6 ± 1.1	6.7 ~ 9.6
DO/mg·L <sup>-1</sup>	9.9 ± 1.8	7 ~ 14.3
EC/μS·cm <sup>-1</sup>	105.4 ± 5.9	96.3 ~ 120.2
SD/mg·L <sup>-1</sup>	1.92 ± 0.81	0.3 ~ 4.1
高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	2.1 ± 0.7	1.3 ~ 3.7
TOC/mg·L <sup>-1</sup>	2.8 ± 1.2	1.2 ~ 6.1
Chla/μg·L <sup>-1</sup>	9.32 ± 9.51	1.42 ~ 47.4
TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.92 ± 0.41	1.43 ~ 3.7
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.02 ± 0.01	0.007 ~ 0.058
Fe/mg·L <sup>-1</sup>	0.059 ± 0.06	0.011 ~ 0.358
Mn/mg·L <sup>-1</sup>	0.033 ± 0.048	0.003 ~ 0.230
Cl <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	4.3 ± 0.5	3.8 ~ 5.5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	14.3 ± 0.5	13.5 ~ 15.7
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.07 ± 0.05	0.03 ~ 0.29
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	1.5 ± 0.4	1.0 ~ 3.1
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.023 ± 0.011	0.011 ~ 0.076
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/mg·L <sup>-1</sup>	0.008 ± 0.006	0.005 ~ 0.04
SiO <sub>2</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	5.67 ± 2.04	1.93 ~ 11.08
n(N):n(P)	254 ± 113	76 ~ 569
Precip/mm	128.2 ± 142.8	41.4 ~ 536.3
HRT/d	195 ± 31	123 ~ 226

表 2 汤浦水库水文与水环境变量 Pearson 相关系数矩阵<sup>1)</sup> (n = 72)

Table 2 Pearson correlation coefficients matrix of hydrology and water quality variables in Tangpu Reservoir

	WT	pH	EC	高锰酸盐指数	TOC	Chla	TN	TP	Fe	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SiO <sub>2</sub>	n(N):n(P)
WT	1													
pH	0.630 **	1												
EC	-0.331 **	0.076	1											
高锰酸盐指数	<b>0.796 **</b>	<b>0.798 **</b>	-0.177	1										
TOC	0.678 **	<b>0.814 **</b>	0.099	<b>0.853 **</b>	1									
Chla	0.498 **	<b>0.778 **</b>	0.030	<b>0.768 **</b>	0.630 **	1								
TN	-0.416 **	-0.152	0.417 **	-0.244 *	-0.110	-0.058	1							
TP	0.386 **	0.301 *	0.120	0.521 **	0.355 **	0.586 **	0.361 **	1						
Fe	0.121	0.234 *	0.425 **	0.337 **	0.270 *	0.348 **	0.475 **	<b>0.796 **</b>	1					
Cl <sup>-</sup>	-0.388 **	0.047	<b>0.866 **</b>	-0.223	0.123	-0.112	0.586 **	0.019	0.303 **	1				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.265 *	0.087	0.474 **	-0.152	0.134	-0.160	0.707 **	0.043	0.249 *	<b>0.763 **</b>	1			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.466 **	-0.379 **	0.379 **	-0.473 **	-0.311 **	-0.327 **	<b>0.908 **</b>	0.199	0.352 **	0.546 **	0.675 **	1		
SiO <sub>2</sub>	-0.535 **	<b>-0.834 **</b>	0.015	-0.697 **	<b>-0.750 **</b>	-0.537 **	0.381 **	0.010	-0.015	0.036	0.088	0.544 **	1	
n(N):n(P)	-0.653 **	-0.429 **	0.088	-0.671 **	-0.458 **	-0.693 **	0.088	<b>-0.851 **</b>	-0.496 **	0.258 *	0.320 **	0.227	0.201	1

1) \* 表示 P < 0.05 (双尾检验); \*\* 表示 P < 水平 0.01 (双尾检验); 相关系数 ≥ 0.750 的数值用黑体字显示

2.2 浮游植物群落特征

2.2.1 种类组成

2011 年 12 次调查,在汤浦水库共检出浮游植物 7 门 62 属 115 种,其中,绿藻门的种类最多,48 种,占总种数的 41.7%; 其次是硅藻门 34 种,占 29.6%; 蓝藻门 17 种,占 14.8%; 甲藻门和裸藻门各 5 种,各

占 4.3%; 隐藻门和金藻门各 3 种,各占 2.6%.

2.2.2 优势种

设定月平均相对丰度大于 10% 的浮游植物为优势种,调查期间,汤浦水库共有优势种 13 种,其中硅藻门优势种有 5 种,颗粒直链藻最窄变种 (*Melosira granulata* var. *angustissima*) 在 1 月和 2 月

形成优势,模糊直链藻(*Melosira ambigua*)在10~12月和1月形成优势,小环藻(*Cyclotella* sp.)在4月和6月形成优势,尖针杆藻(*Synedra acus*)在6月和7月形成优势,链状弯壳藻(*Achnanthisidium catenatum*)则在1~6月形成优势;蓝藻门优势种为小席藻(*Phormidium tenue*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)、细小隐球藻(*Aphanocapsa elachista*)和鞘丝藻(*Lyngbya* sp.),在4~8月和10月形成优势;绿藻门优势种为单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*),湖生

卵囊藻(*Oocystis lacustris*)和弯曲栅藻(*Scenedesmus arcuatus*),在8月和9月形成优势;隐藻门优势种为尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*),在9~12月、1和2月形成优势.从表3可见,13种优势种百分比丰度合计占有所有种类的56%以上,最高达94%,浮游植物群落类型按时间顺序依次为硅-隐藻型(1和2月),硅藻型(3月),硅-蓝藻型(4~6月),蓝-硅藻型(7月),蓝-绿藻型(8月),绿-隐藻型(9月),蓝-隐-硅藻型(10月)和硅-隐藻型(11和12月).

表3 浮游植物优势种月度平均百分比丰度<sup>1)</sup>/%

Table 3 Monthly average percentage abundances of dominant phytoplankton species/%

优势种	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
颗粒直链藻最窄变种	<b>24.3</b>	<b>13.1</b>	8.2	0.5	0	0.6	0	0	0	0	0.4	2.7
模糊直链藻	<b>14.9</b>	8.5	4.4	2.9	0.1	2.3	0	0.1	2.6	<b>13.1</b>	<b>46.7</b>	<b>61.5</b>
小环藻	2.5	2.0	1.9	<b>18.0</b>	2.0	<b>17.1</b>	0.4	0.7	4.8	4.7	6.3	0
尖针杆藻	6.5	3.1	3.9	2.2	1.2	<b>12.4</b>	<b>27.5</b>	2.7	1.2	1.3	1.1	3.3
链状弯壳藻	<b>14.1</b>	<b>27.2</b>	<b>45.3</b>	<b>34.7</b>	<b>66.2</b>	<b>30.7</b>	0.2	0.2	5.6	1.8	4.6	1.4
尖尾蓝隐藻	<b>11.5</b>	<b>15.6</b>	5.5	1.1	0	2.9	1.8	1.6	<b>14.8</b>	<b>18.6</b>	<b>20.9</b>	<b>15.7</b>
小席藻	0	0	0	<b>28.2</b>	<b>20.9</b>	<b>10.4</b>	0	0	0	0	0	0
小颤藻	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>30.9</b>	0	0
细小隐球藻	0	0	0	2.6	4.0	1.4	<b>17.8</b>	<b>23.2</b>	0	0	0	0
鞘丝藻	0	0	0	0	0	0	<b>24.5</b>	<b>13.0</b>	0	0	0	0
单生卵囊藻	0	0	0	0	0	0	0	<b>31.9</b>	0	0	0	0
湖生卵囊藻	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>10.9</b>	0.8	0.1	0
弯曲栅藻	0.7	0.4	0	0	0	0	0	0	<b>16.3</b>	0.7	0	0
合计	74.5	69.9	69.2	90.2	94.4	77.8	72.2	73.4	56.2	71.9	80.1	84.6
群落类型	硅-隐藻	硅-隐藻	硅藻	硅-蓝藻	硅-蓝藻	硅-蓝藻	蓝-硅藻	蓝-绿藻	绿-隐藻	蓝-隐-硅藻	硅-隐藻	硅-隐藻

1) 月度平均百分比丰度大于10%的值以黑体字显示

### 2.2.3 细胞密度和相对丰度

汤浦水库浮游植物月均密度为  $0.59 \times 10^6 \sim 20.88 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,各采样点表现出相似的时间变化(图2):4月最高并显著高于其他月份(皆超过  $10 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ),6月最低,在9~11月间略有回升.

从浮游植物相对丰度(图2)来看,汤浦水库占主导地位的是硅藻门、蓝藻门、绿藻门和隐藻门,其他3门(裸藻门、金藻门和甲藻门)合计所占比例均 $<5\%$ .与浮游植物密度类似,各采样点的浮游植物门类组成具有较相似的时间变化:硅藻门在1~6月、11和12月占较高比例,相对丰度为44.4%~87.4%,仅处于水库上游的双江溪5月和王化溪11月低于50%;蓝藻门在4~10月占较高比例,平均相对丰度为13.6%~58.9%;绿藻门在8月和9月占较高比例,平均相对丰度分别为51.8%和50.7%;隐藻门在1~2月和9~12月平均相对丰度为11.4%~25.3%.

### 2.3 浮游植物时空方差分解

时间变量和空间变量对浮游植物群落数据总方

差解释的贡献有明显的差别(图3):时间和空间变量共同作用的贡献达74.8%,约为总方差的3/4,其中时间变量独立作用的贡献T占绝大部分达72.3%,空间变量独立作用的贡献S仅为2.5%,时间和空间变量交互作用部分的贡献T∩S为0;时间和空间变量未能解释的方差U占25.2%,约为总方差的1/4.

### 2.4 浮游植物月度RDA分析

以采样月份作为虚拟变量对浮游植物进行RDA分析,结果表明,第一典范轴和所有典范的Monte Carlo检验均呈极显著水平( $P < 0.01$ ),其中,第1和第2排序轴分别解释了浮游植物方差的22.1%和20.4%,所有典范轴累计贡献达72.3%.采样月份在排序图中以点表示,其坐标为相同月份所有样点得分在排序空间的质心(Centroid),月份间的距离指示其群落结构的相似程度,距离越近的月份其浮游植物群落越相似;图4可见时间变量在排序空间得到很好的分化,12个月较均匀地分散在4个象限,其中4、5和6月在第一象限,7、8和9月

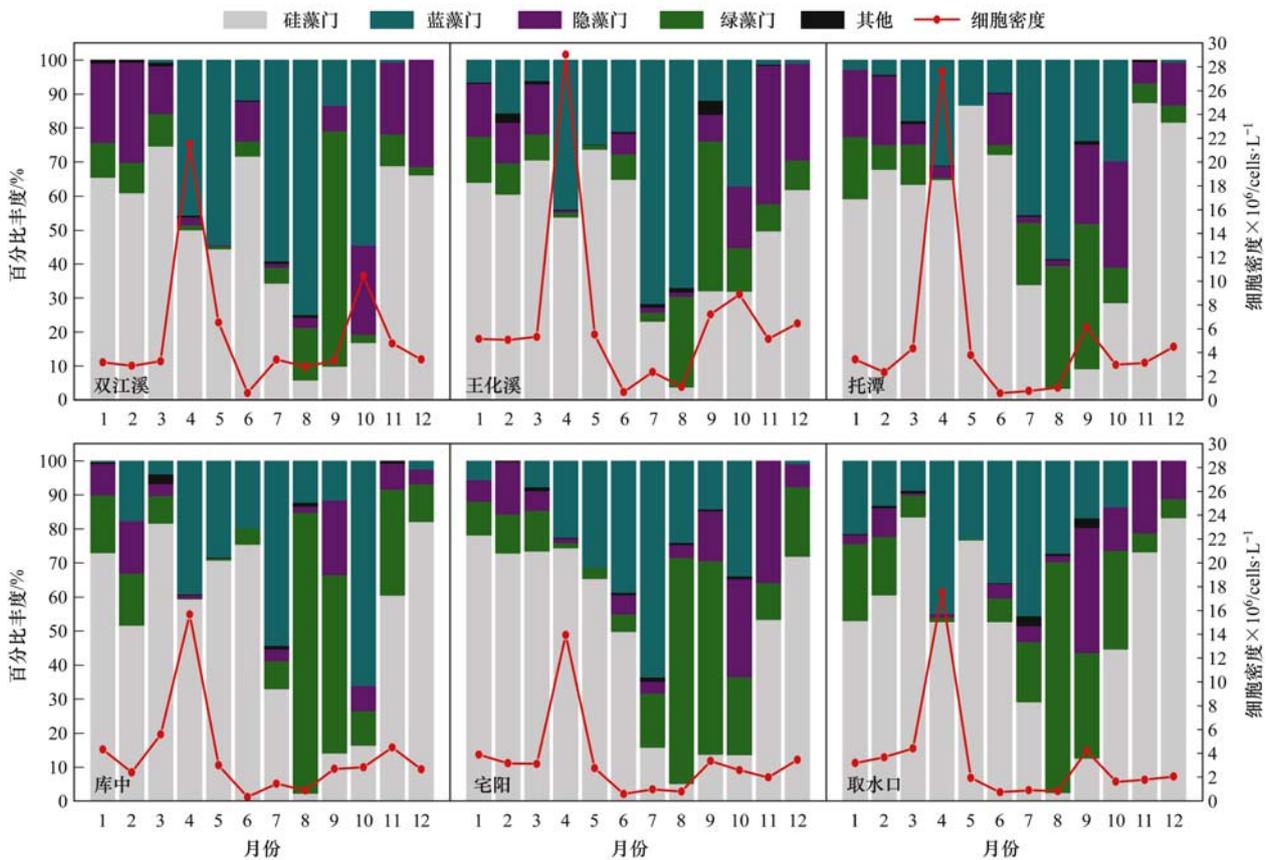


图 2 浮游植物细胞密度和相对丰度的时空变化

Fig. 2 Spatial and temporal variations of phytoplankton cell densities and relative abundances

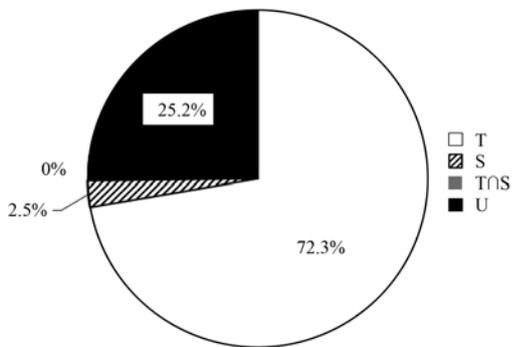


图 3 时间变量和空间变量对浮游植物方差分解的贡献

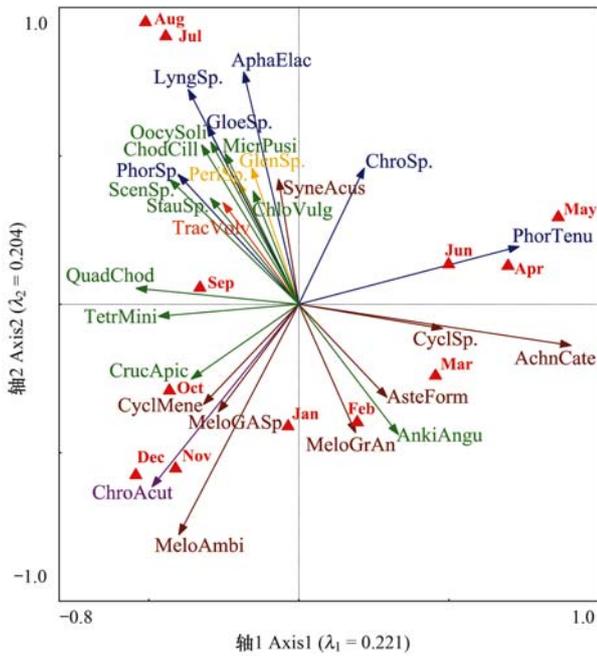
Fig. 3 Variation partitioning of the species data into temporal and spatial fractions

在第二象限,10、11、12 和 1 月在第三象限,2 和 3 月则在第四象限. 物种在排序图中以箭头表示,箭头指向该物种丰度变异最大的方向,箭头越长的物种对群落数据的变异贡献越大;为避免过多物种箭头的堆积影响排序解译,只有前两轴解释超过 15% 方差的 28 种浮游植物(包括绿藻 10 种、硅藻 8 种、蓝藻 6 种、甲藻 2 种,裸藻和隐藻各 1 种)入选作图;物种箭头最长的 10 种藻依次是链状弯壳藻、模糊直链藻、鞘丝藻、细小隐球藻、尖尾蓝隐藻、小

席藻、黏球藻 (*Gloeocapsa* sp.)、极毛顶棘藻 (*Chodatella cilliata*)、单生卵囊藻和栅藻 (*Scenedesmus* sp.);所有蓝藻(6 种)和大部分绿藻(7 种)分布于轴 1 的上半区域,尤其在第 2 象限形成比其他区域密集的聚群指向 7 月和 8 月,此外该区域还包含甲藻 2 种以及硅藻和裸藻各 1 种;硅藻除尖针杆藻外皆分布于轴 1 下半区域,此外该区域还包含绿藻 3 种以及隐藻 1 种,与轴 1 上半区相比,物种箭头分布更为均匀.

### 2.5 浮游植物与环境因子的 RDA 分析

浮游植物与环境因子 RDA 分析结果表明(图 5),所筛选的 10 个环境因子共解释 59.4% 的物种变化,第 1 和第 2 排序轴分别贡献了 22.1% 和 18.8%. 红色箭头表示经 Monte Carlo 置换检验对浮游植物群落结构变化影响显著的环境因子,箭头长度从大到小依次为 HRT、SiO<sub>2</sub>、EC、WT、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、DO、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、Precip、N:P 和 Mn,也相应代表了对浮游植物群落影响的重要程度;与轴 1 明显正相关的有 EC、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 DO,明显负相关的为 HRT 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,其中 HRT 和 EC 箭头明显长于其他环境因



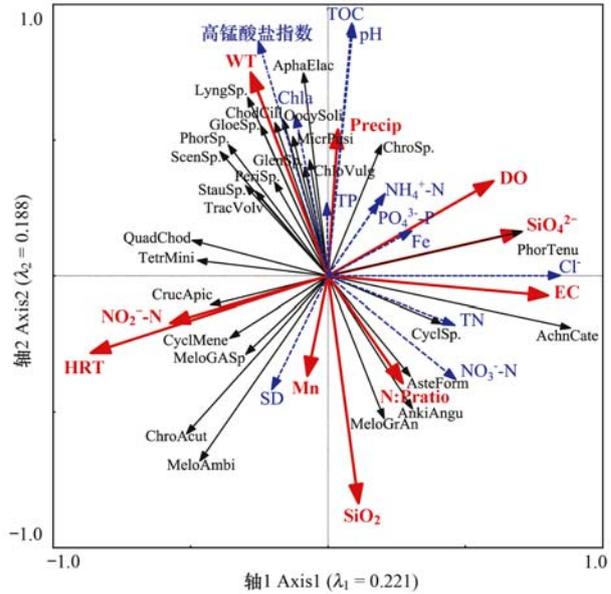
箭头代表物种,其中绿色箭头为绿藻,蓝色箭头为蓝藻,褐色箭头为硅藻,黄色箭头为甲藻,紫色箭头为隐藻,橙色箭头为裸藻;红色实心三角形代表月份变量;物种按箭头长度依次如下: AchnCate: 链状弯壳藻; MeloAmbi: 模糊直链藻; LyngSp.: 鞘丝藻; AphaElac: 细小隐球藻; ChroAcut: 尖尾蓝隐藻; PhorTenu: 小席藻; GloeSp.: 黏球藻; ChodCill: 极毛顶棘藻; OocySoli: 单生卵囊藻; ScenSp.: 栅藻; PhorSp.: 席藻; MicrPusi: 微芒藻; AnkiAngu: 狭形纤维藻; QuadChod: 并联藻; ChroSp.: 色球藻; GlenSp.: 薄甲藻; CyclSp.: 小环藻; MeloGrAn: 颗粒直链藻最窄变种; TetrMini: 微小四角藻; StauSp.: 角星鼓藻; CyclMene: 梅尼小环藻; PeriSp.: 拟多甲藻; MeloGASp: 颗粒直链藻最窄变种螺旋变形; CrucApic: 十字藻; AsteForm: 美丽星杆藻; SyneAcus: 尖杆杆藻; TracVolv: 旋转囊裸藻; ChloVulg: 小球藻; Jan: 1月; Feb: 2月; Mar: 3月; Apr: 4月; May: 5月; Jun: 6月; Jul: 7月; Aug: 8月; Sep: 9月; Oct: 10月; Nov: 11月; Dec: 12月

图4 浮游植物与月份作为虚拟变量的 RDA 排序

Fig. 4 RDA ordination of phytoplankton species with month as dummy variables

子,主导着轴 1 方向物种的变化;与轴 2 明显正相关的有 WT 和 Precip,明显负相关的有 SiO<sub>2</sub>、N:P 和 Mn,其中 SiO<sub>2</sub> 和 WT 箭头明显长于其他环境因子,主导着轴 2 方向物种的变化. 蓝色箭头代表了被筛选掉的被动变量,它们不影响排序结果仅在排序完成后重新放到排序空间中,这些变量要不箭头很短,要不方向和有显著影响的变量很一致;排序图中除了 TOC、pH、高锰酸盐指数、Cl<sup>-</sup>、Chla 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的箭头较长外,其余被动变量箭头皆较短;其中高锰酸盐指数和 Chla 与 WT 的方向相近,TOC、pH 和 TP 与 Precip 的方向相近, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 方向一致

位于 DO 与 Precip 之间,Fe 和 DO 方向一致,Cl<sup>-</sup> 与 EC 的方向相近,SD 和 Mn 的方向相近.



红色箭头代表通 Monte Carlo 置换检验有显著影响的环境因子,蓝色箭头代表被筛选掉的被动变量,黑色箭头代表物种,物种缩写与图 4 相同

图5 浮游植物与环境因子的 RDA 排序

Fig. 5 RDA ordination of phytoplankton species with environmental variables

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落特征与季节演替

汤浦水库于 2010 年 5 月和 2011 年 4 月均暴发以链状弯壳藻和丝状蓝藻为主的藻类水华<sup>[11]</sup>,其中 2010 年的丝状蓝藻为湖泊假鱼腥藻 (*Pseudanabaena limnetica*),2011 年为小席藻;浮游植物细胞密度在 4 月达到极大值后迅速下降,6 月达到全年的极小值,这与该月较高的降雨量有关,3 次强降雨合计 536mm,占全年的 35%,尽管降雨带来较高浓度的 TN、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 SiO<sub>2</sub>,但同时也带入过多悬浮物导致水体 SD 降低,进而影响浮游植物生长和增殖<sup>[12]</sup>.

从细胞密度和门类的相对丰度来看,浮游植物有明显的时间差异,而空间上 6 个采样点间的差异却相对不明显. 浮游植物时空变量的 Partial RDA 进一步指出汤浦水库浮游植物群落的样点间变异仅占总变异 2.5%,远小于月份间的变异(占 72.3%). 这些结果一致表明浮游植物时间异质性大,空间异质性小,浮游植物在水库表层的分布较为均质,沿水流方向纵向梯度变化并不明显,对水质参数进行聚类分析发现 S1 和 S2 为一类,S3、S4、S5

和 S6 为一类,两类间距离也不大<sup>[13]</sup>,这些现象往往与水库吞吐流特征和水动力过程有关,汤浦水库作为支流蓄水水库(tributary reservoir)月均水力滞留时间超过 120d,河流区和过渡区较小或不明显,水库各方面属性与湖泊更为相似<sup>[14]</sup>.对于这类型水库,时间尺度上增加采样频率比空间尺度上增加采样点数更有利于探索浮游植物的演替规律;对汤浦水库而言,后续研究则可减少部分水库纵向采样点,或根据实际情况合并某些采样点.

浮游植物优势种划分和月度 RDA 结果一致地提取了主导周年演替的重要物种:13 个优势种在月度 RDA 排序图中出现了 10 个,而排序图中对群落变异贡献最大的 10 种浮游植物有 7 种是优势种,造成二者差异的仅仅是出现频率和百分比丰度较低的优势种(小颤藻、湖生卵囊藻和弯曲栅藻),以及 RDA 中重要性靠后的种类(黏球藻、极毛顶棘藻和栅藻).比较而言,月度 RDA 能更直观呈现浮游植物物种与月度变量的关系,优势种月均丰度分析则有助于排序图的解译.二者结果表明,链状弯壳藻、模糊直链藻和尖针杆藻等硅藻分别在全年除 8、9 月的其他 10 个月内占较高比例,鞘丝藻、细小隐球藻和小席藻等蓝藻分别在 4~8 月和 10 月的 6 个月内占较高比例,尖尾蓝隐藻在 1、2 月和 9~12 月的 6 个月内占较高比例,卵囊藻(*Oocystis* sp.)和栅藻仅在 8、9 月占较高比例.在排序空间中,时间上相邻的月份往往距离更相近,如果将水温最低的 1、2 和 3 月视为冬季,水温最高的 7、8 和 9 月视为夏季,排序图从第一到第四象限沿逆时针方向呈现出春-夏-秋-冬明显的季节演替,其中春季由硅藻和蓝藻占优势,夏季由蓝藻和绿藻占优势,秋季和冬季则由硅藻和隐藻占优势.

### 3.2 浮游植物演替的影响因子分析

不作任何筛选而利用所有环境因子进行 RDA 排序,前两轴能解释 42.0% 的物种变异,这仅仅比本研究采用的排序高 1.1%,这进一步说明本研究采用的筛选合理有效,所筛选的环境因子集在 RDA 中既有效地去除因子间的共线性又能较大程度提取物种变异信息.

浮游植物和环境因子的 RDA 结果表明 HRT 是对汤浦水库浮游植物影响最大的环境因子,HRT 平均为 195 d,从春季的 5 月(123 d)到秋季的 10 月(226 d)有一个逐渐上升的过程.在排序图中,HRT 和  $\text{NO}_2^-$ -N 几乎重叠与轴 1 呈正相关,并与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、DO、EC、 $\text{Cl}^-$ 、TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、Fe、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P

负相关,这与环境因子间相关分析的结果一致,在数值上 EC、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  从春季到秋季则表现出明显的下降过程.电导率 EC 常用于间接推测水体离子成分的总浓度<sup>[5]</sup>,从量浓度和因子间相关性可知,本研究中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  对其贡献大, $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  和  $\text{NO}_2^-$  的贡献较小;几乎所有离子(仅  $\text{NO}_2^-$  除外)连同 EC 随 HRT 减少而增大,也即加大水体交换率可提高水体离子浓度.HRT 的增加往往有利于强化水库的反硝化作用,尤其在水体搅动减少导致 DO 下降的情况下,可增加氮的去除,使水体  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TN 浓度下降<sup>[15, 16]</sup>, $\text{NO}_2^-$ -N 作为反硝化过程中间产物在一定条件下可能导致积累而与 HRT 呈正相关<sup>[17, 18]</sup>.从排序中可见(图 5),与 HRT 正相关的重要种类为尖尾蓝隐藻和模糊直链藻,二者适应静止或流动缓慢的水体<sup>[19]</sup>;而与 HRT 负相关的重要种类为链状弯壳藻和小席藻,二者共同在春季占优势,并在 4 月形成密度较高的水华,不同地区链状弯壳藻水华案例研究表明该种适应较高强度的水体扰动,水体动力学过程是水华发生和持续的重要影响因素<sup>[11, 20]</sup>.已有众多研究表明水力滞留时间是水库最关键的水文水动力学参数之一,其长短与水库的水动力学、化学与生物过程直接关联<sup>[21]</sup>,对浮游植物生物量、生产力和群落组成有重大影响<sup>[22, 23]</sup>.尤其与温带地区浮游植物演替多受温度和光照影响相比,低纬度的热带及亚热带地区更易受径流的季节或年际变化及其带来的营养盐供应变化以及季节性短期的水体稳定性的影响<sup>[24]</sup>.总而言之,汤浦水库浮游植物群落沿轴 1 方向上的变化由 HRT 及其驱动的水库离子浓度变化和反硝化过程共同主导,并主要体现了浮游植物春季和秋季的变化.

重要性紧随 HRT 之后的环境因子是水体总硅  $\text{SiO}_2$  和 WT. 其中  $\text{SiO}_2$  连同 N:P、Mn 与轴 2 呈负相关,代表水体营养元素与微量元素对浮游植物的影响;WT 则连同降雨 Precip 与轴 2 呈正相关,代表气象条件对浮游植物的影响.和浙江省很多水库相似<sup>[25, 26]</sup>,汤浦水库氮含量较高磷含量较低,TN(平均为  $1.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )指标接近劣 V 类水,TP(平均为  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )指标为 I 类水,N:P 均值为 254,最低为 76,为显著的磷限制水体,磷的输入或添加往往能促进该类水体浮游植物生物量的增长<sup>[27, 28]</sup>,相关分析也表明汤浦水库浮游植物生物量 Chla 与  $\text{PO}_4^{3-}$ -P( $r=0.595, P<0.01$ )和 TP( $r=0.586, P<0.01$ )呈显著正相关.RDA 结果则表明单独的某种氮或磷

营养成分对浮游植物群落演替贡献不大,  $\text{SiO}_2$  和 N:P 才是重要的控制因子; 排序图中硅藻与蓝藻、绿藻有明显区别, 硅藻基本对应高  $\text{SiO}_2$ 、高 N:P 和低 WT, 而大部分蓝藻和绿藻则恰恰相反. 长期的种类特异性分析表明硅藻和蓝藻对环境因子的生长响应有巨大差别<sup>[29]</sup>; 蓝藻成为优势通常与氮的耗竭尤其形成低 N:P 紧密相关<sup>[30, 31]</sup>; 硅藻生长则因需要摄取大量硅用于细胞壁合成, 导致硅在特定时空的耗竭和补充成为硅藻水华生消和种类演替的重要因素<sup>[32]</sup>, 而且大多数硅藻的最适生长温度往往低于蓝藻<sup>[33, 34]</sup>; 从冬季到夏季, 汤浦水库水体 N:P 和  $\text{SiO}_2$  有明显的下降过程, WT 则显著上升, 浮游植物群落类型依次经历了硅藻-隐藻型、硅藻-蓝藻型和蓝藻-绿藻型的转变. 总而言之, 汤浦水库浮游植物群落沿轴 2 方向上硅藻、隐藻和蓝藻、绿藻间的演替主要由  $\text{SiO}_2$ 、WT 和 N:P 驱动, 并主要体现了浮游植物冬季和夏季的变化.

浮游植物的演替是多种环境因子在时空上综合作用的结果, 总体来说, HRT、 $\text{SiO}_2$ 、WT 和 N:P 是汤浦水库浮游植物演替关键影响因子. 宁波横山水库浮游植物优势种及其季节变化和汤浦水库有很高的一致性, 杨亮杰等<sup>[26]</sup>的研究表明, WT 是该水库硅藻和蓝藻间演替的主因. 朱广伟等<sup>[35]</sup>对太湖流域以硅藻生物量占优的中营养饮用水源水库长达 5 年的研究表明, 硅藻优势属为针杆藻、曲壳藻、小环藻和直链藻, 与本研究基本一致, 其中针杆藻常能形成水华造成危害, 而本研究的水华硅藻则为弯壳藻; 该研究进一步指出硅藻生物量受气温、降雨、水位和营养盐供给的影响. 降雨带来的地表径流通常含大量营养物质, 汤浦水库 6 月的大量降雨明显导致表层水体  $\text{SiO}_2$  陡然上升, 但全年来看二者却呈显著负相关, 尤其在低降雨量月份  $\text{SiO}_2$  仍保持较高浓度, 因此可推测外源硅元素的输入可对水体  $\text{SiO}_2$  产生影响, 但内源硅元素释放起更重要作用. 汤浦水库在春末夏初到秋末冬初期间存在明显季节分层, 其余时段水体混合较为均匀, 与本研究中  $\text{SiO}_2$  较高浓度月份重合, 这进一步说明水体混合有助于底层硅元素带到水体表层. 全湖实验表明, 选择性底层取水可影响水体分层, 使硅藻超过蓝藻成为优势的时间得到延长<sup>[36]</sup>. 因此水库季节性分层对浮游植物演替有重要的影响, 汤浦水库后续研究工作已设置分层采样来进一步探讨这个问题.

#### 4 结论

(1) 调查期间共检出浮游植物 7 门 62 属 115

种, 种类组成以绿藻为主, 硅藻其次; 浮游植物细胞密度 4 月最高, 为  $20.88 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ , 并形成以链状弯壳藻和小席藻为优势的水华, 6 月最低, 为  $0.59 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ , 强降雨则是该月浮游植物密度显著下降的原因.

(2) Partial RDA 表明浮游植物群落月份间变异占总变异 72.3%, 远大于仅占 2.5% 的样点间变异; 结合浮游植物细胞密度和相对丰度的时空变化可知, 汤浦水库浮游植物的时间异质性大, 空间异质性小, 符合支流蓄水水库特征.

(3) 优势种分析和浮游植物月度 RDA 表明, 硅藻全年优势最明显, 其次是蓝藻和隐藻, 再次是绿藻, 其中春季由硅藻和蓝藻占优势, 夏季由蓝藻和绿藻占优势, 秋季和冬季则由硅藻和隐藻占优势.

(4) 浮游植物和环境因子的 RDA 表明, HRT 及其驱动的水库离子浓度变化和反硝化过程是主导春季和秋季水体扰动耐受和敏感种类间演变, 以及春季水华形成的关键因子;  $\text{SiO}_2$ 、WT 和 N:P 则是主导冬季和夏季, 硅藻、隐藻和蓝藻、绿藻间演变的关键因子.

致谢: 对绍兴市汤浦水库有限公司及相关工作人员在现场采样给予的帮助表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 朱党生, 张建永, 史晓新, 等. 城市饮用水水源地安全评价(II): 全国评价[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 914-920.  
Zhu D S, Zhang J Y, Shi X X, et al. Security assessment of urban drinking water sources II. Security assessment for cities in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 914-920.
- [2] 韩博平. 中国水库生态研究的回顾与展望[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.
- [3] Reynolds C S. Ecology of phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [4] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江(澎溪河)藻类功能分组及其季节演替特点[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 392-400.  
Li Z, Fang F, Guo J S, et al. Seasonal succession of phytoplankton function groups in the Xiaojiang (Pengxi) River backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2011, 32(2): 392-400.
- [5] 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.  
State Environmental Protection Administration. Monitoring and analysis methods of water and wastewater (4th ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [6] 林秋奇, 韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报, 2001, 21(6): 1034-1040.  
Lin Q Q, Han B P. Reservoir limnology and its application in

- water quality management: an overview [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 1034-1040.
- [7] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [8] 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 等. 太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1353-1361.
- Feng J, Guo Y N, Wang F, *et al.* Relationship between the phytoplankton distribution and environmental factors in Fenhe scenic spot of Taiyuan[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1353-1361.
- [9] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **50**(5): 673-687.
- [10] Chatterjee S, Hadi A S. Regression analysis by example (4th ed.)[M]. Hoboken: Wiley, 2006.
- [11] 马沛明, 施练东, 赵先富, 等. 一种淡水水华硅藻——链状弯壳藻(*Achnanthyidium catenatum*) [J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(1): 156-162.
- Ma P M, Shi L D, Zhao X F, *et al.* A bloom-forming freshwater diatom: *Achnanthyidium catenatum* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(1): 156-162.
- [12] 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.
- [13] 施练东, 竺维佳, 胡菊香, 等. 汤浦水库及入库支流水质时空变化特征与影响因素分析[J]. *水生态学杂志*, 2013, **34**(5): 9-15.
- Shi L D, Zhu W J, Hu J X, *et al.* Characteristics and influencing factors analysis of spatio-temporal variations of water quality in Tangpu Reservoir and its tributaries [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(5): 9-15.
- [14] 赵孟绪, 雷腊梅, 韩博平. 亚热带水库浮游植物群落季节变化及其影响因素分析——以汤溪水库为例[J]. *热带亚热带植物学报*, 2005, **13**(5): 386-392.
- Zhao M X, Lei L M, Han B P. Seasonal change in phytoplankton communities in Tangxi reservoir and the effecting factors [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, **13**(5): 386-392.
- [15] Garnier J, Billen G, Sanchez N, *et al.* Ecological functioning of the Marne reservoir (upper Seine basin, France)[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, **16**(1): 51-71.
- [16] David M B, Wall L G, Royer T V, *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape [J]. *Ecological Applications*, 2006, **16**(6): 2177-2190.
- [17] Philips S, Laanbroek H J, Verstraete W. Origin, causes and effects of increased nitrite concentrations in aquatic environments [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2002, **1**(2): 115-141.
- [18] Kaplan D, Wilhelm R, Abeliovich A. Interdependent environmental factors controlling nitrification in waters[J]. *Water Science and Technology*, 2000, **42**: 167-172.
- [19] Tian C, Pei H Y, Hu W R, *et al.* Variation of phytoplankton functional groups modulated by hydraulic controls in Hongze Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(22): 18163-18175.
- [20] 张云, 马徐发, 郭鹏飞, 等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 902-910.
- Zhang Y, Ma X F, Guo F F, *et al.* Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 902-910.
- [21] 孔范龙, 郝敏, 徐丽华, 等. 富营养化水体的营养盐限制性研究综述[J]. *地球环境学报*, 2016, **7**(2): 121-129.
- Kong F L, Xi M, Xu L H, *et al.* Review of studies on the limitation of nutrients in the eutrophic water [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, **7**(2): 121-129.
- [22] Søballe D M, Kimmel B L. A large-scale comparison of factors influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes, and impoundments [J]. *Ecology*, 1987, **68**(6): 1943-1954.
- [23] 冉祥滨, 于志刚, 姚庆祯, 等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 614-622.
- Ran X B, Yu Z G, Yao Q Z, *et al.* Advances in nutrient retention of dams on river [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 614-622.
- [24] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(1): 107-117.
- Zhang Y, Hu R, Xiao L J, *et al.* Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(1): 107-117.
- [25] 盛海燕, 姚佳玫, 刘明亮, 等. 杭州地区 17 座水库浮游植物群落组成及其与环境因子的关系[J]. *水生态学杂志*, 2015, **36**(1): 25-33.
- Sheng H Y, Yao J M, Liu M L, *et al.* Phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in 17 medium and large reservoirs in Hangzhou [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(1): 25-33.
- [26] 杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 569-576.
- Yang L J, Yu P F, Zhu J Q, *et al.* Community structure characteristics of phytoplankton and related affecting factors in Hengshan Reservoir, Zhejiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(2): 569-576.
- [27] Perkins R G, Underwood G J C. Gradients of chlorophyll a and water chemistry along an eutrophic reservoir with determination of the limiting nutrient by *in situ* nutrient addition [J]. *Water Research*, 2000, **34**(3): 713-724.
- [28] 任杰, 周涛, 朱广伟, 等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1742-1753.
- Ren J, Zhou T, Zhu G W, *et al.* Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1742-1753.
- [29] Lehman J T, Abella S E B, Litt A H, *et al.* Fingerprints of biocomplexity: taxon-specific growth of phytoplankton in relation

- to environmental factors [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(4part2): 1446-1456.
- [30] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [31] 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.
- [32] Lehman E M, McDonald K E, Lehman J T. Whole lake selective withdrawal experiment to control harmful cyanobacteria in an urban impoundment[J]. *Water Research*, 2009, **43**(5): 1187-1198.
- [33] 张华, 胡鸿钧, 晁爱敏, 等. 浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征[J]. *生态学报*, 2013, **33**(3): 944-956.  
Zhang H, Hu H J, Chao A M, *et al.* Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinshuitan Reservoir, Zhejiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 944-956.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Ferris J A, Lehman J T. Interannual variation in diatom bloom dynamics: roles of hydrology, nutrient limitation, sinking, and whole lake manipulation[J]. *Water Research*, 2007, **41**(12): 2551-2562.



# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行