

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                         |                                                                        |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征 .....               | 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)                                                 |
| 南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 .....                            | 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)                                       |
| 常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 .....                 | 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)                                           |
| 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 中的元素特征 .....           | 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)                                            |
| 北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 .....                    | 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997) |
| 山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析 .....              | 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)                             |
| 隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 .....                                | 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)                                       |
| 河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 .....                          | 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)                                |
| 城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 .....                                  | 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)                                 |
| DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 .....                          | 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)                                     |
| 南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 .....                     | 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)                                                    |
| 广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 .....                    | 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)                   |
| 西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 .....                              | 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)                                      |
| 太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 .....                              | 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)                                               |
| 海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 .....                     | 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)                                |
| 天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 .....                              | 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)                                      |
| 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 .....                                | 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)                                |
| 春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 .....                        | 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)                        |
| 不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 .....                       | 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)                            |
| 水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 .....                            | 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)                        |
| 深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 .....                           | 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)                           |
| 太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 .....                              | 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)                        |
| 分层型水源水库沉积物需氧量特性 .....                                   | 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)                              |
| 污水氮浓度和 $NH_4^+ / NO_3^-$ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 .....    | 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)                               |
| 水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 .....                         | 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)                               |
| 化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 .....                             | 菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)                                         |
| 铜铁氧体法处理模拟染料废水 .....                                     | 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)                                  |
| 草酸根对 $\alpha$ -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 .....       | 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)                                          |
| 生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 .....                          | 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)                                 |
| 铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 .....                          | 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)                                          |
| PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 .....                | 刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)                                                   |
| 二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用 .....                                 | 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)                                                    |
| 一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 .....                              | 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)                                               |
| 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 .....                             | 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)                            |
| 硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行 .....                        | 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)                                       |
| 纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 .....                           | 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)                             |
| $DO/NH_4^+ - N$ 实现短程硝化过程中生物膜特性 .....                    | 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)                                  |
| AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 .....                        | 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)                                        |
| 有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 .....                        | 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)                                       |
| 中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 .....                       | 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)                                     |
| 硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 .....                      | 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)                                             |
| 磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 .....                          | 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)                                 |
| 好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 .....                       | 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)                                               |
| 环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 .....                         | 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)                                      |
| CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 .....              | 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)                                      |
| 磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 .....                            | 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)                                              |
| 甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 .....                           | 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)                                                |
| 城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 .....                            | 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)                                         |
| 氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 .....                              | 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)                                            |
| 近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 .....                      | 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)                                           |
| 中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 .....                              | 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)                                               |
| 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 .....                     | 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)                                          |
| 青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 .....                   | 周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)                                                |
| 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析 .....                         | 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)                                  |
| 铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 .....                | 费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)                                                    |
| 我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 .....                     | 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)                                       |
| 《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293) |                                                                        |

# 水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响

孙祥<sup>1,2</sup>, 朱广伟<sup>1\*</sup>, 笄文怡<sup>3</sup>, 余茂蕾<sup>3</sup>, 杨文斌<sup>2</sup>, 朱梦圆<sup>1</sup>, 许海<sup>1</sup>, 国超旋<sup>1</sup>, 余丽<sup>1</sup>

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

**摘要:** 硅藻异常增殖是影响我国许多水库水质安全的生态灾害. 为揭示水库硅藻异常增殖的影响因素, 以我国东南丘陵地区大(Ⅱ)型水库天目湖沙河水库为例, 基于 8 年逐月浮游植物群落结构及相关环境因子的监测, 分析了硅藻(Bacillariophyta)及其优势属生物量与温度、降雨、水位、营养盐等环境因子之间的关系. 结果表明, 春季硅藻及其优势属的生物量主要受温度的影响, 与水文、营养盐关系较弱; 不同硅藻优势属与水温的关系差异较大: 针杆藻(*Synedra*)的最佳生长温度为 27℃, 小环藻(*Cyclotella*)与曲壳藻(*Achnanthes*)的最佳生长温度为 19℃, 直链藻(*Melosira*)适合在低温下生长, 生物量随温度升高而降低; 硅藻生物量与环境因子的多元统计分析表明, 硅藻总生物量、针杆藻和曲壳藻等优势属生物量峰值与降雨量显著性正相关( $P < 0.05$ ), 小环藻生物量峰值与总磷、降雨量和水位显著性正相关, 而与换水率显著性负相关, 直链藻生物量峰值与总磷显著性正相关. 年度硅藻峰值强度可以用降雨量强度和温度、冬春季的积温和溶解性总磷浓度等综合因素拟合预测. 研究表明, 对于我国东南丘陵山区中营养水平的水库而言, 硅藻优势属的异常增殖事件受水文气象因素异常事件的影响较大, 相比较而言对氮磷营养盐响应偏弱; 在防控水库硅藻异常增殖灾害方面, 除了积极开展流域营养盐削减措施之外, 应当密切关注极端天气综合影响, 采取相应的水文调节措施, 开发切实有效的灾害预警技术.

**关键词:** 水库; 硅藻; 异常增殖; 积温; 降雨量; 极端天气事件

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1129-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707267

## Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs

SUN Xiang<sup>1,2</sup>, ZHU Guang-wei<sup>1\*</sup>, DA Wen-yi<sup>3</sup>, YU Mao-lei<sup>3</sup>, YANG Wen-bin<sup>2</sup>, ZHU Meng-yuan<sup>1</sup>, XU Hai<sup>1</sup>, GUO Chao-xuan<sup>1</sup>, YU Li<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The proliferation of diatoms is an ecological disaster that harms the water quality of many reservoirs in China. In order to reveal the driving factors of abnormal algal blooms in reservoirs, phytoplankton community structure and the associated environmental factors from 2009 to 2016 from Shahe Reservoir in Tianmuhu were analyzed. Results showed that diatoms and their dominant genus were predominately driven by temperature, and the relationship between hydrology and nutrition was insignificant. Distinct relationships were recorded between different diatom genera and temperature over the past eight years. The optimum growth temperature of diatoms and *Synedra* were both 27℃, while that for *Cyclotella* and *Achnanthes* were both 19℃. Low temperature was suitable for the growth of *Melosira*, and its growth was compromised with increasing temperature. In a multivariable statistical analysis of the dominant diatom genus and the associated environmental factors, we found that the dominant diatom genus responded differently to the associated environmental factors. The total biomass of the diatom and the biomass of *Synedra* and *Achnanthes* were significantly and positively correlated with rainfall ( $P < 0.05$ ). The biomass of *Cyclotella* was significantly and positively correlated with total phosphorus, rainfall, and water level ( $P < 0.05$ ) and significantly and negatively correlated with water exchange rate ( $P < 0.05$ ). The biomass of *Melosira* was significantly and positively correlated with total phosphorus. The annual peak biomass of diatoms can be predicted by a multiple regression model with independent variables, including rainfall intensity, dissolved total phosphorus, and the accumulated temperature in winter and spring. Our results indicated that the proliferation of diatoms responds significantly to hydrological and meteorological factors while insignificantly to nitrogen and phosphorus loading. External load reduction is needed to maintain a good water quality in the reservoir. In addition, extreme weather conditions should be given attention to provide an early warning for diatom proliferation.

**Key words:** reservoir; diatom; proliferation; accumulated temperature; rainfall; extreme weather event

收稿日期: 2017-07-31; 修订日期: 2017-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405201); 国际科技合作与交流专项(2015DFG91980); 国家自然科学基金项目(41671494, 41501532); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008)

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

\* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

近年来湖库型水源地受到水体富营养化问题困扰的事件越来越多<sup>[1,2]</sup>。李子成等<sup>[3]</sup>的调查表明,我国超过四分之三的湖泊属富营养水平,水库的水质尽管较湖泊好,但仍然有 35% 的水库 TP 浓度属富营养水平。蓝藻的异常增殖往往发生在浅水湖泊型水源地,而硅藻则是水库型水源地的主要威胁<sup>[4]</sup>,特别是在我国东南丘陵山区,硅藻季节性异常增殖对水库的水质影响更为普遍。孙祥等<sup>[5]</sup>对天目湖沙河水库连续 8a 的监测结果发现,硅藻生物量平均占该水库浮游植物总生物量的 46%,而蓝藻与隐藻的生物量则各占 20% 左右。任杰等对苏南 17 座水源地的调查发现,硅藻生物量在春末夏初时占据较大优势,其中超过一半的水库出现轻度硅藻水华<sup>[6]</sup>。

硅藻是水生态系统重要的初级生产者,也是水体鱼类等牧食者的主要饵料资源,在湖库的物质循环过程中占重要地位<sup>[7,8]</sup>,而硅藻种类和数量的变化主要受周围环境要素影响<sup>[9,10]</sup>。温度、光照、营养盐及水文条件是硅藻群落结构组成变化的重要影响因子<sup>[11]</sup>,不同的生态系统结构也影响硅藻水华群落结构<sup>[12]</sup>。胡芳等对剑潭水库的调查发现,浮游植物群落结构以绿藻为主,其次是硅藻<sup>[13]</sup>;而在渭河水系河流中,流量是丰水期硅藻群落的主控环境因子,悬浮物浓度及氨氮含量是枯水期硅藻群落的主控因子<sup>[14]</sup>;南四湖硅藻种群变化受水体氮磷营养盐水平、pH 和表层水温的控制<sup>[15]</sup>。而在中营养盐水库,硅藻生物量可能同时受水文过程与水质条件的共同控制<sup>[6]</sup>。Beaver 等<sup>[16]</sup>在研究美国密苏里河中游 6 座水库浮游生物演替规律发现水库水力停留时间越短,硅藻的生物量就越高。

目前,我国在水库藻类群落结构演替规律方面的认识还不能满足水质管理的需求,多数研究集中在浮游植物的群落结构及优势属的变化过程调查方面,对蓝藻的关注较多,而对硅藻的关注度较小<sup>[17~19]</sup>。就硅藻生态学研究方面,对河流、海洋等水域的硅藻研究较为充分,对水库的研究相对缺乏<sup>[20,21]</sup>。东南丘陵山区是我国水库分布最为集中的区域之一,这些水库在保障区域供水安全方面起到了极其重要的作用,因此要重点关注及保护<sup>[22]</sup>。本文依托课题组在中国东南丘陵地区一个大(II)型水库——天目湖沙河水库近 10 年的逐月水质和生态监测成果,通过多元统计分析等方法,试图探索亚热带中营养水库中硅藻及其优势属异常增殖事件的控制因素,并结合天目湖沙河水库水源地生态环境

保护经验,探讨水库型水源地硅藻水华的防控对策。

## 1 材料与方法

### 1.1 沙河水库简介

江苏省溧阳市天目湖沙河水库地处我国东南丘陵山区,地理坐标为东经 119°25',北纬 31°18',水库集水面积 152 km<sup>2</sup>,水域面积 12 km<sup>2</sup>,最大蓄水量 1.1 亿 m<sup>3</sup>,湖底高程由南向北递减,北部大坝处地面高程 22 m<sup>[23]</sup>,平均水深 7 m,最大水深为 14 m<sup>[24]</sup>。沙河水库属北亚热带季风气候区,多年平均气温为 15.8℃,气候温暖多变,冷暖空气交锋频繁;受梅雨和台风雨共同影响,年降雨量 1 155.8 mm,其中 3~9 月降雨量占全年降雨量的 76%。沙河水库及其周边保护区是国家 5A 级景区,旅游及特色农业开发强度大,其中山区茶叶、果树等特色农业的面源污染强度较大。沙河水库也是当地特色品牌“砂锅鱼头”的发源地,水库保持一定量的鲢鳙鱼养殖。此外,沙河水库是溧阳市主要饮用水源地,供给人口约 70 万人。水库的主要水质威胁是藻类的季节性异常增殖,对水色、水质及水源供给产生较大威胁<sup>[25]</sup>。

### 1.2 采样点布设

样品的采集与测定方法见文献[26, 27]。采样点布设如图 1,自上游至下游,由南向北共设 10 个采样点。其中, TM8、TM9、TM10 这 3 个样点主要代表上游河口区域, TM1 接近水库大坝出水口; TM2、TM3 分别靠近下游两个旅游活动区域; TM6、TM7 分别位于天目湖抽水蓄能电站抽放水口的下游和上游<sup>[22]</sup>。由于 TM9 点位水位较浅,有些月份未能获得水样。

### 1.3 样品采集及测定

2008 年 5 月至 2016 年 12 月,对沙河水库进行逐月监测。用于浮游植物鉴定和水质指标分析的水样采自表层 0.5 m,现场进行叶绿素 a(CHL)、悬浮颗粒物(SS)过滤(使用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜),滤膜及滤后水样、原水水样分装后冷藏,带回实验室分析。分取 1L 水样,用鲁戈试剂固定,带回实验室静置 48 h 后,浓缩,用于浮游植物群落结构的鉴定。此外,现场用 YSI 6600V2 多参数水质分析仪(Yellow Stone 公司)测定水温(WT)、电导率(Cond)、溶解氧(DO)、浊度(Turb)等指标,并测定水温剖面。用直径 30 cm 赛氏盘测定水体透明度(SD)。

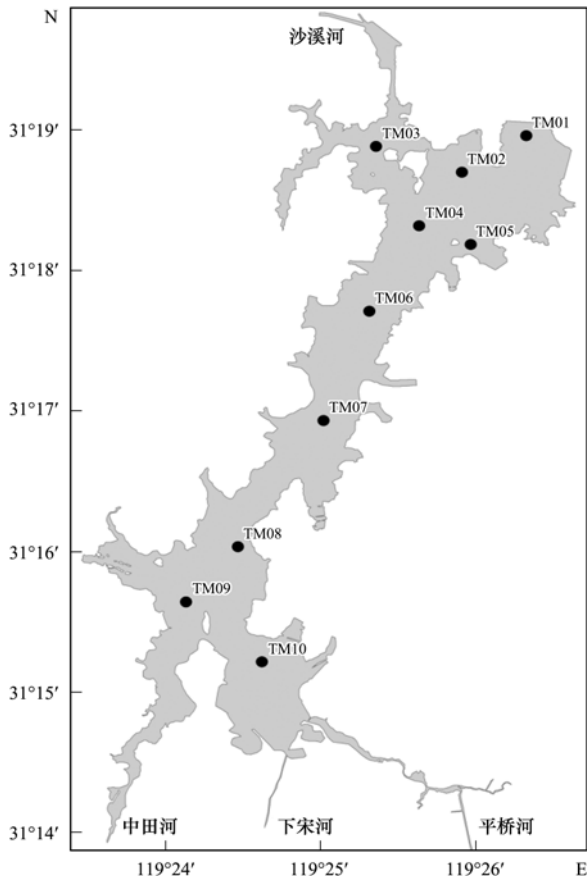


图1 天目湖沙河水库逐月监测点位示意

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

水体总氮(TN, 原水)、溶解性总氮(DTN, 滤后水)的测定方法为碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(测定波长为210 nm); 滤后水体中的硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)含量用Skalar流动注射分析仪光度法测定; 总磷(TP, 原水)、溶解性总磷(DTP, 滤后水)测定方法为碱性过硫酸钾消解-钼锑抗显色分光光度法测定(测定波长为700 nm); CHL测定采用热乙醇提取-分光光度法<sup>[28]</sup>. SS采用Whatman GF/F滤膜过滤, 105℃烘干重量法. 浮游植物群落结构的鉴定使用Olympus CH生物光学显微镜镜检, 鉴定到属. 生物量的计算根据细胞密度( $\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$ )及体积-重量经验公式换算为生物量( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 具体方法见文献<sup>[29]</sup>.

#### 1.4 水文气象数据

2008~2016年逐日平均气温等气象数据通过中国气象网查询而来, 2016年下半年的水文气象数据则由天目湖流域生态观测站设置的自动气象站提供. 日平均水位、库容曲线、降雨量等水文数据由溧阳市水利局沙河水库管理处提供.

由于浮游植物对环境的响应时间约为2周<sup>[30]</sup>,

大致估算了每次采样前15日的水库平均换水率( $\text{WR}_{15}$ ), 依据15日的平均库容、流域降雨量、流域面积等参数估算 $\text{WR}_{15}$ :

$$\text{WR}_{15} = \frac{\sum_{i=1}^{15} P_i \times S}{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} V_i}$$

式中,  $P_i$ : 第*i*日降雨量, mm;  $S$ : 集水面积,  $\text{m}^2$ ;  $V_i$ : 第*i*日库容,  $\text{m}^3$ .

#### 1.5 数据处理方法

数据图表绘制及主要统计参数计算由Excel 2010、Origin 8.5、SPSS 16.0及R 3.2.2软件完成<sup>[31,32]</sup>. 浮游植物与环境因子的相关关系用Pearson相关系数表达( $P$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 营养盐因子变化特征

2009~2016年沙河水库TN浓度整体上呈下降的趋势, 其中2009~2014年下降较为明显, 2014~2016年又略有回升. 在每年的春季, 水体的TN浓度较高, 这主要是因为春耕时期土地化肥的施用, 在春雨的径流作用下大量流入水库所致. 其中水体TN浓度多年平均为 $1.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 根据GB 3838-2002, 该浓度接近Ⅳ类水限定值( $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 此外, 2009~2016年沙河水库中N主要是由DTN组成, DTN平均占TN的83%, 而DTN中又以 $\text{NO}_3^-$ -N为主,  $\text{NO}_3^-$ -N平均占DTN的69%. 这一比例较2009~2013年的调查统计结果略有升高<sup>[26]</sup>, 反映出流域面源氮贡献中地下水形式的来源比例在增加(图2).

多年来沙河水库TP浓度呈现较大的年内波动性, 而年际间的变化趋势不明显, 总体而言, 在2009~2014年成一定的下降趋势, 特别是峰值下降明显, 由2009年峰值 $0.088 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 到2014年降至 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 但2014~2016年又有升高趋势. 多年平均而言, TP浓度多年平均为 $0.035 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 属于Ⅲ类水(Ⅲ类水限定值 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , GB 3838-2002). 而DTP浓度多年平均为 $0.016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占TP的47%, 其变化趋势与TP基本一致(图2).

氮磷比方面, DTN/DTP的多年变化波动性较强, 由2009年的峰值108降至2011年的谷值45, 但2011~2016年DTN/DTP又有升高趋势, 其中2014年达到89. 季节上, DTN/DTP的比值呈现冬

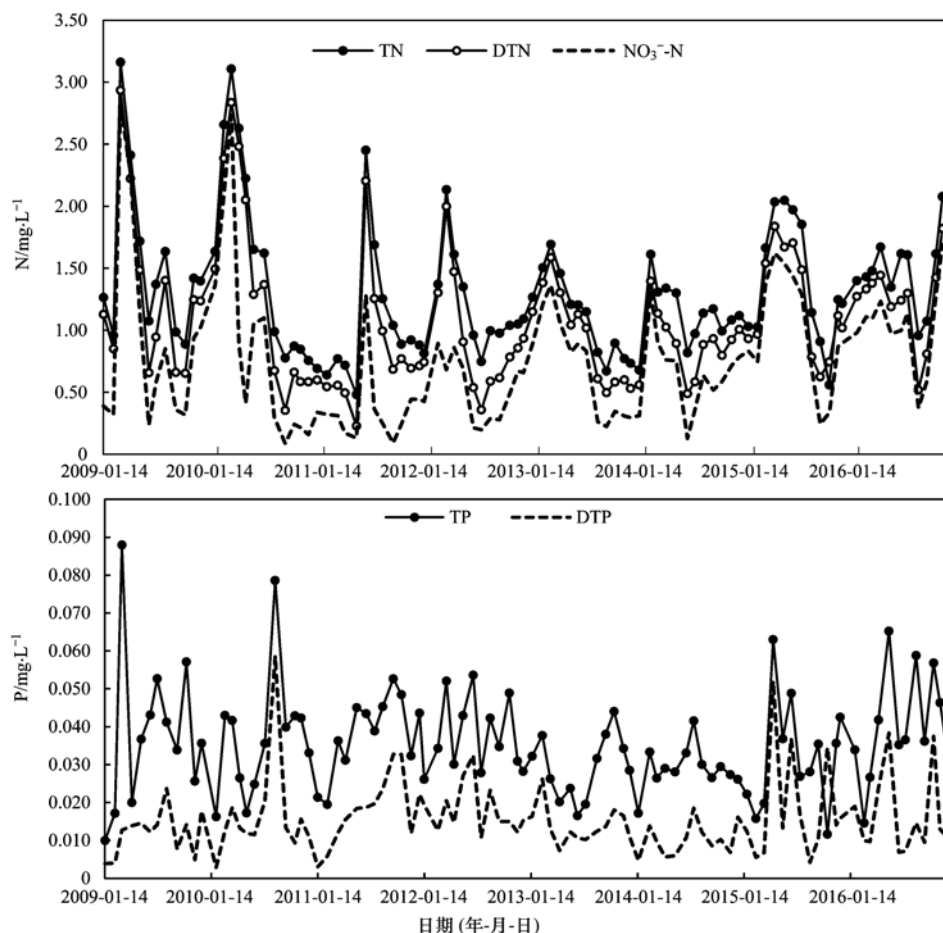


图2 沙河水库 2009~2016 年水质逐月变化情况

Fig. 2 Monthly variations of water quality indicators in Shahe Reservoir during 2009-2016

春季较高,夏秋季较低的特点,春季达 93,秋季降至 51. 总体而言,DTN/DTP 比值变化主要受 DTN 变化的影响较大. 由于 DTN/DTP 总体较高,说明水库藻类生长可能更多受磷元素供给的影响(图 3).

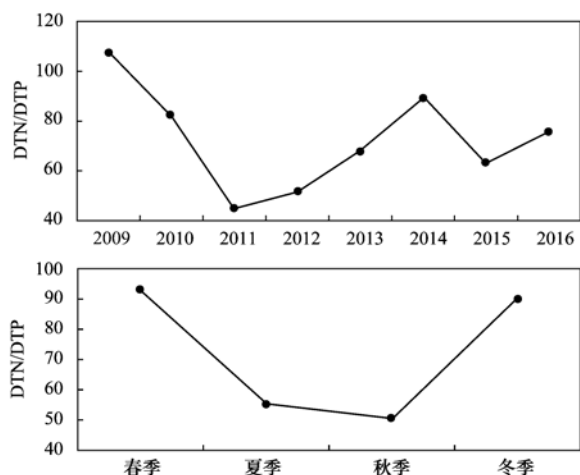


图3 沙河水库 2009~2016 年氮磷比变化情况

Fig. 3 Variations of DTN/DTP in Shahe Reservoir during 2009-2016

## 2.2 水文气象因子变化特征

### 2.2.1 降雨特征

图 4 为沙河水库 2009~2016 年逐月累积降雨量及年累积降雨量的变化情况. 就季节而言,每年的夏季雨水较多,冬春季相对较少. 年际而言,2010 年下半年至 2011 年上半年降雨量特别少,较为干旱;2012 年下半年至 2013 年上半年降雨量也特别低,也属于干旱事件. 2013 年总体累积降雨量最低,仅 990 mm. 2016 年累积降雨量明显较大,达到 1 885.2 mm,为近年来最高,此外,2009、2012、2015 的降雨量总体偏丰.

### 2.2.2 水位特征

图 5 为沙河水库 2009~2016 年逐日水位变化情况,水位变化主要受降雨量影响,同时也受库容调节管理的一定影响. 每年从 5 月开始水位快速升高,8 月后又开始降低. 其中 2009 年至 2010 年 7 月水位逐渐升高,从 2010 年 7 月至 2011 年 5 月持续降低,降至近 8 年最低,仅为 16.76 m,与当时开展的大坝加工工程施工有关. 2012 年下半年至

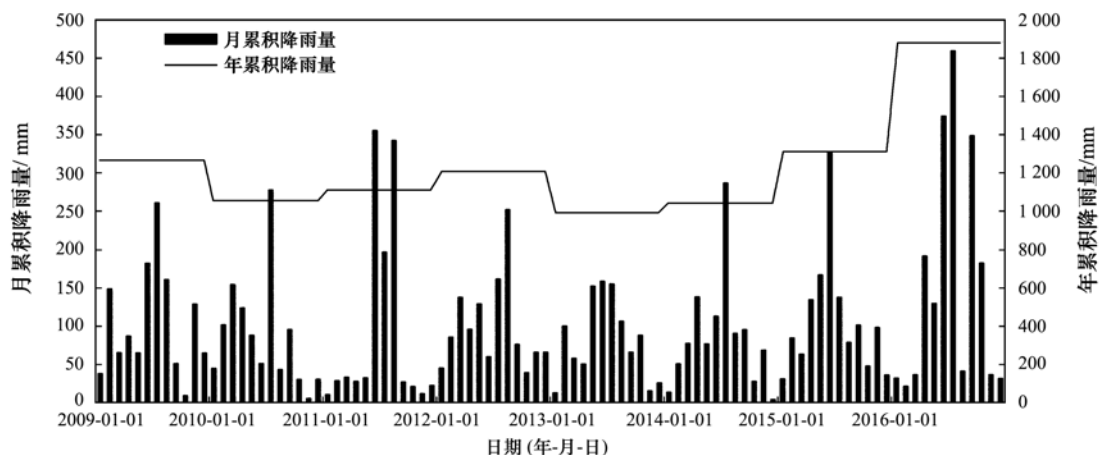


图4 沙河水库2009~2016年逐月累积降雨量及年累积降雨量变化情况

Fig. 4 Monthly and yearly variations of rainfall in Shahe Reservoir during 2009-2016

2013年上半年由于降雨较少,水位基本比较稳定。自2014年7月至2016年年底,受水库管理调控的影响,水位波动较小。

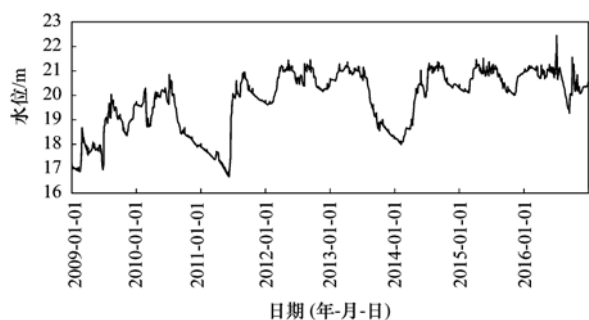


图5 沙河水库2009~2016年水位逐日变化情况

Fig. 5 Daily variations of water level in Shahe Reservoir during 2009-2016

### 2.2.3 温度特征

图6为沙河水库2009~2016年逐日气温及月均温度变化。每年气温波动情况较为稳定,在每年7、8月温度较高,1月份较低。其中近8年来最高温度出现在2013年8月6日,为34.5℃,最低温度出现在2016年1月24日,为零下6.5℃。

## 2.3 浮游植物变化特征

### 2.3.1 优势门生物量变化

藻类生物量多年的变化显示,就生物量而言,沙河水库浮游植物主要由硅藻构成。根据前期分析表明,从生物量组成上看,沙河水库浮游植物组成结构为硅藻-蓝藻-隐藻型,其中硅藻门(Bacillariophyta)为主要藻门,占总生物量的46%,蓝藻门(Cyanophyta)与隐藻门(Cryptophyta)各占约20%<sup>[5]</sup>。硅藻的生物量峰值主要出现在5、6月,而蓝藻门生物量峰值期较硅藻晚,基本在7、8月出现(图7)。浮游植物总生物量在夏末秋初较高,

在2013年较低,在2015年又异常较高。硅藻的生物量变化规律与浮游植物总生物量基本一致。2009年浮游植物总生物量相对较高,而硅藻、蓝藻生物量相对低,主要是隐藻生物量相对较高(图7)。

### 2.3.2 硅藻优势属生物量变化

图8可以看出2009~2016年沙河水库硅藻生物量组成的结构变化。根据浮游植物的优势度分析表明,沙河水库硅藻的主要优势属为针杆藻属(*Synedra*)、小环藻属(*Cyclotella*)、曲壳藻属(*Achnanthes*)和直链藻属(*Melosira*),其中针杆藻总体上的优势度最大<sup>[5,25]</sup>。图8表明8年来针杆藻属大多占据绝对优势,尤其是2015年针杆藻生物量峰值达到30.94 mg·L<sup>-1</sup>的异常值。但在2013年与2016年该绝对优势均被小环藻属取代。

不同优势属的生物量峰值出现时间不同。针杆藻生物量峰值出现在每年的5、6月;曲壳藻生物量峰值出现时间大多在4月,较针杆藻早;而小环藻属生物量峰值大多出现在6月;而直链藻生物量峰值出现在冬末春初,且其生物量总体上明显低于其他3个属。

## 3 讨论

### 3.1 硅藻及其优势属生物量与环境因子的关系

由于硅藻的异常增殖问题主要发生在春季,对沙河水库硅藻及其优势属春季生物量(3~5月平均)与同期的环境因子之间的相关性进行分析,如表1。从中可知,春季硅藻及其优势属生物量与氮磷营养盐之间相关性并不显著。小环藻和直链藻生物量与水位呈极显著相关关系(ANOVA,  $P < 0.01$ ),其中小环藻生物量与水位呈极显著正相关

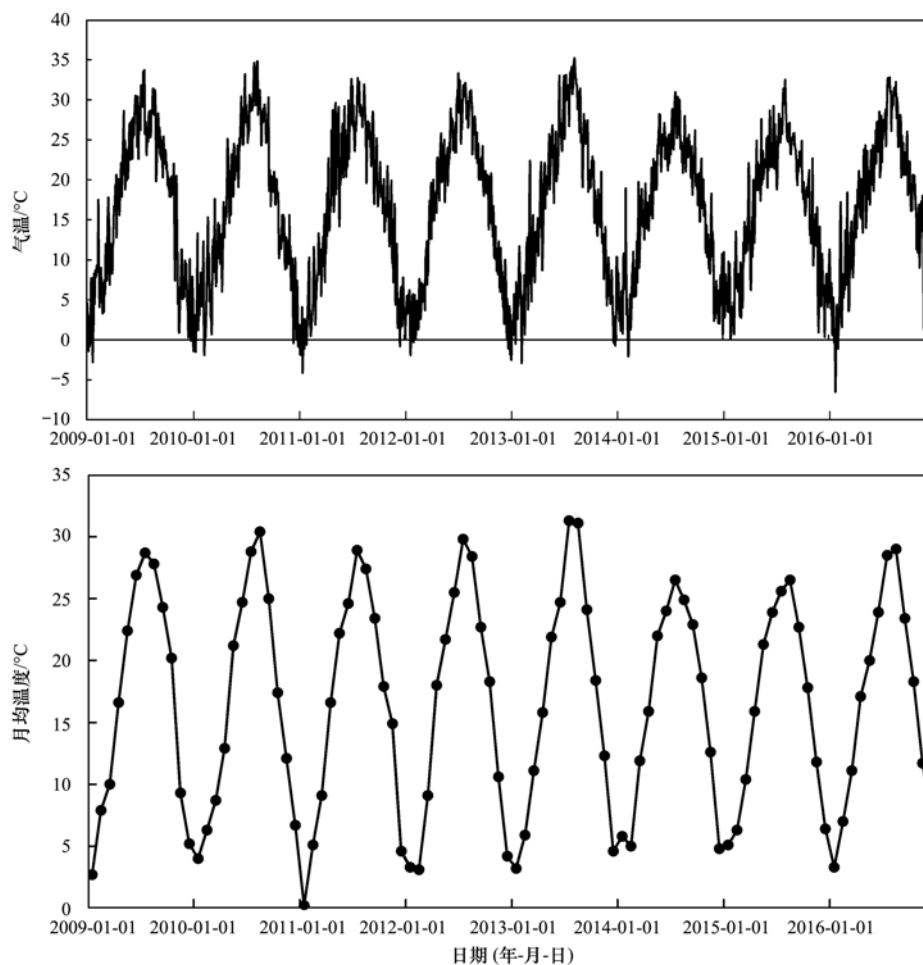


图6 沙河水库 2009~2016 年逐日与逐月气温变化情况

Fig. 6 Daily and monthly variations of air temperature at Shahe Reservoir during 2009-2016

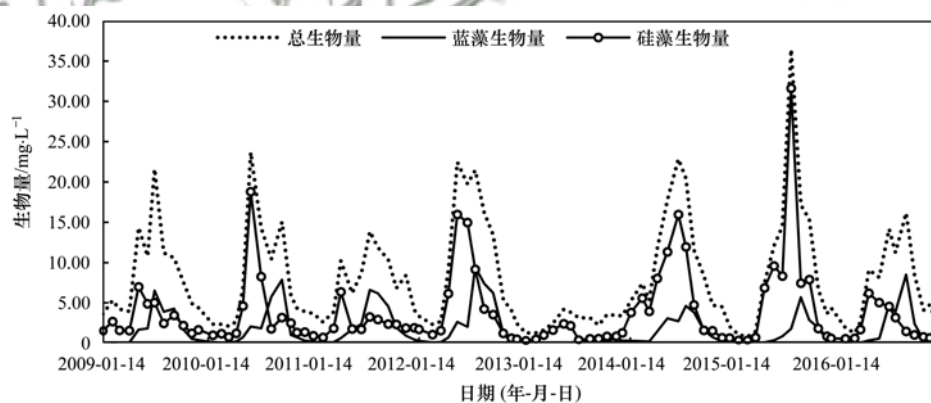


图7 沙河水库 2009~2016 年藻类生物量的变化

Fig. 7 Biomass of phytoplankton, cyanobacteria, and diatom near the dam of Shahe Reservoir during 2009-2016

关系,而直链藻生物量与水位呈极显著负相关关系.硅藻总生物量、曲壳藻生物量与采样前 15 d 的平均温度( $T_{15}$ )呈极显著正相关关系(ANOVA,  $P < 0.01$ ),小环藻生物量与  $T_{15}$  呈显著正相关关系(ANOVA,  $P < 0.05$ ),直链藻生物量与  $T_{15}$  呈显著负相关关系(ANOVA,  $P < 0.05$ ).此外,换水

率和降雨量对硅藻及其优势属生物量的相关性不显著.结果表明,在春季的短期效应内,氮磷营养盐及水文条件对硅藻及其优势属的影响较小,气象因素对硅藻及其优势属的生长的影响可能超过了水文和营养盐因素,呈现多因素共同控制的复杂关系.

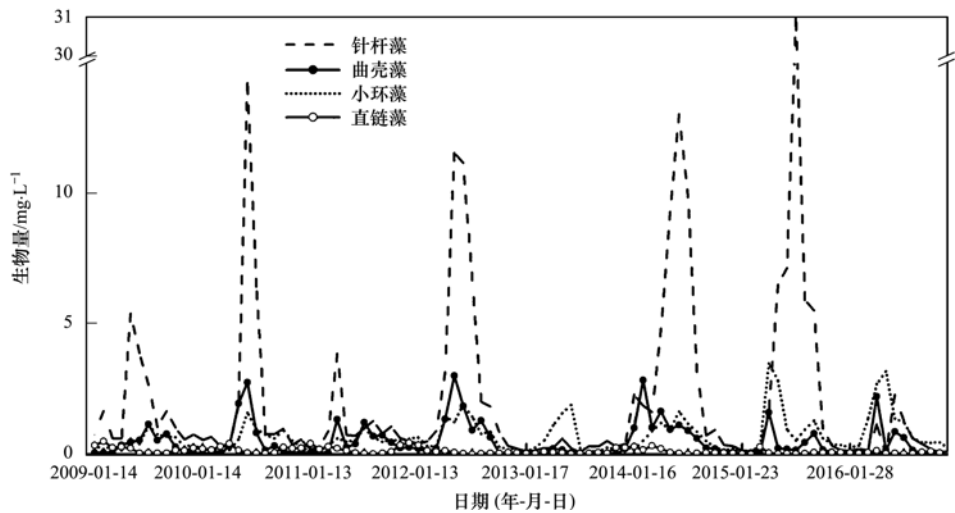


图 8 沙河水库 2009 ~ 2016 年硅藻 4 个优势属生物量的季节变化

Fig. 8 Seasonal variation of biomass of the four dominant genera of diatoms in Shahe Reservoir during 2009-2016

表 1 沙河水库春季藻类生物量与环境因子之间的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

| Table 1 Pearson correlation coefficients between phytoplankton biomass and environmental conditions in spring |        |        |        |        |           |                  |                 |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|------------------|-----------------|------------------|
| 生物量                                                                                                           | TN     | DTN    | TP     | DTP    | WL        | RF <sub>15</sub> | T <sub>15</sub> | WR <sub>15</sub> |
| 硅藻门                                                                                                           | -0.206 | -0.250 | 0.157  | 0.205  | 0.153     | 0.014            | 0.630 **        | -0.059           |
| 针杆藻                                                                                                           | -0.077 | -0.155 | -0.160 | -0.223 | -0.187    | 0.083            | 0.269           | 0.169            |
| 小环藻                                                                                                           | -0.256 | -0.219 | 0.159  | 0.277  | 0.516 **  | -0.033           | 0.485 *         | -0.291           |
| 曲壳藻                                                                                                           | -0.114 | -0.154 | -0.075 | 0.203  | 0.101     | -0.085           | 0.534 **        | -0.133           |
| 直链藻                                                                                                           | 0.051  | 0.049  | -0.184 | -0.291 | -0.616 ** | -0.113           | -0.495 *        | 0.179            |

1) \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$ ; WL 为水位; RF<sub>15</sub> 即前 15 日累积降雨量; T<sub>15</sub> 即前 15 d 平均气温

### 3.2 硅藻及其优势属生物量变化与水温的关系分析

温度是浮游植物季节性变化的主要控制因素<sup>[12]</sup>。根据浮游植物与水温的相关分析,发现浮游植物总生物量及各优势属生物量均与水温呈极显著相关关系<sup>[5]</sup>。沙河水库水体硅藻及优势属生物量与同步水温的分析如图 9(其中线条表示浮游植物生物量随水温变化的趋势,线条区域为预测浮游植物生物量的 95% 置信区间)。

从图 9 可以看出,沙河水库 4 个优势属对温度的响应差异很大。针杆藻在水温达 14℃ 时开始快速增殖,在 27℃ 时达到峰值,之后开始下降。小环藻在水温为 13℃ 时开始快速增殖,在 19℃ 时达到最佳生长温度,之后基本稳定,但在 31℃ 后又有增殖趋势,这可能与小环藻属喜高温有关<sup>[33]</sup>。曲壳藻在 13℃ 时开始快速增殖,在 19℃ 时达到峰值,之后逐渐降低,但在 28℃ 后降低较为迅速。直链藻适合在低温下生长,随温度的升高,其生物量逐渐降低,在 16℃ 以后生物量下降明显,26℃ 以后生物量处于较低水平<sup>[25]</sup>。

就总硅藻生物量而言,水库硅藻生物量从 14℃

时进入增殖期,在水温 19℃ 时达到第一个峰值,这主要与小环藻和曲壳藻在 19℃ 均达到峰值有关,在水温达 27℃ 时硅藻达到最大峰值,这主要与决定性的优势属针杆藻在 27℃ 时达到生物量峰值有关,之后随温度升高,硅藻总生物量逐渐降低。这与张运林等<sup>[24]</sup>观测时发现的 5、7 月的藻类生物量峰值情况相一致。然而较乌江水库在 4 月暴发以华丽星杆藻为主的轻度硅藻水华的结果<sup>[34]</sup>,天目湖沙河水库硅藻生物量达到峰值的时间相对滞后。两水库硅藻生物量达到峰值的时间不同可能由如下原因引起:龙胜兴等<sup>[34]</sup>调查时间段(2007 年 7 月到 2008 年 4 月)的局限性,并未完全调查出全年中硅藻生物量峰值形成的时间,而沙河水库近 10 年的监测均是逐月连续的;乌江水库发生以华丽星杆藻为主的轻度硅藻水华所处的区域在乌江渡偏岩河到野济河段,这段区域由于网箱养鱼导致水体总氮、总磷达到了富营养水平,而沙河水库属于中营养水平;水位的高低及换水周期的长短对不同属种的响应也可能不同,乌江水库蓄水面积 124 km<sup>2</sup>,最大蓄水量 21.4 亿 m<sup>3</sup>,平均水深 45 m,最大水深 150 m,换水周期 3 个月<sup>[35]</sup>,而沙河

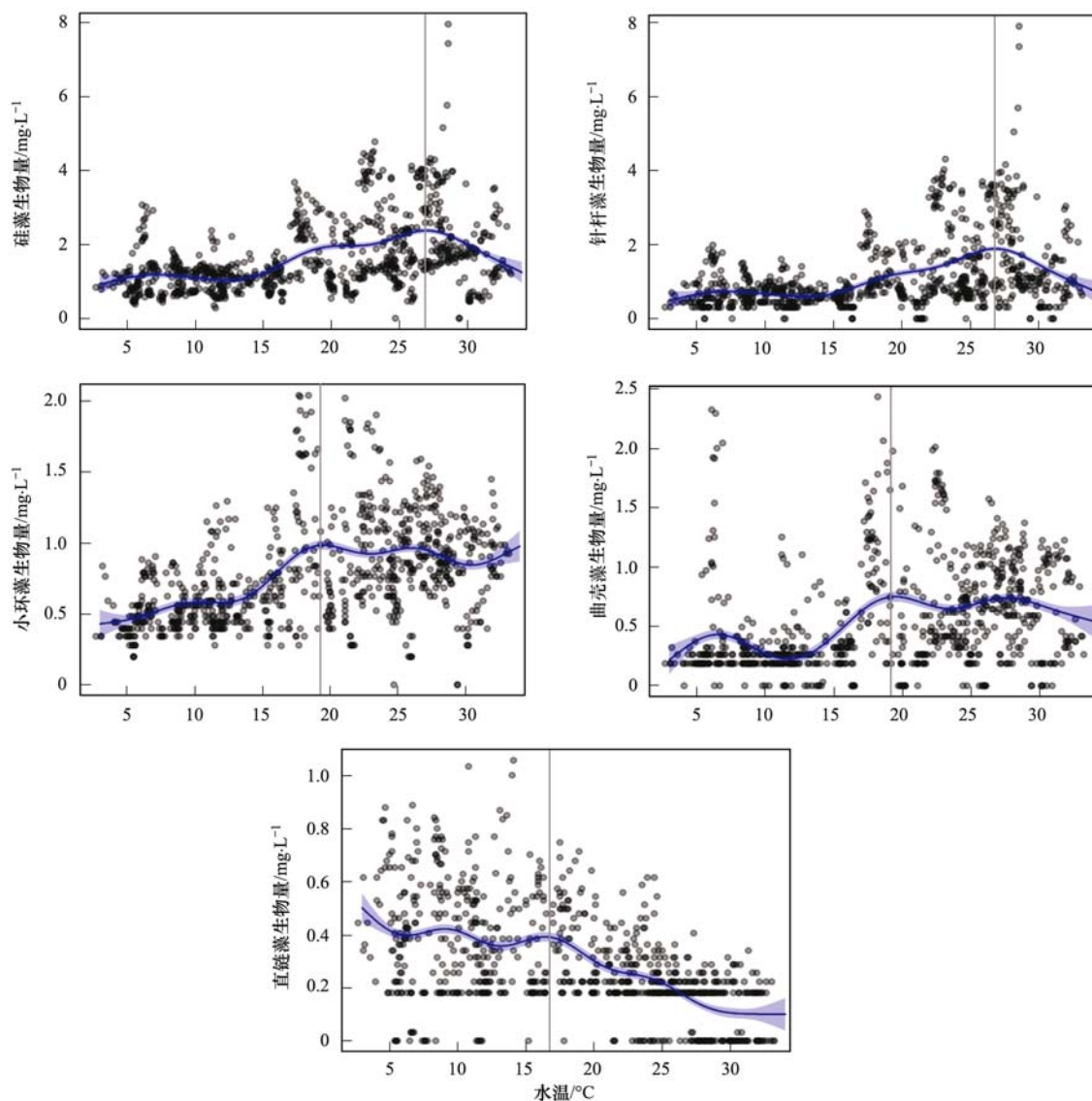


图9 沙河水库硅藻及其优势属与水温的关系

Fig. 9 Relationship between water temperature and diatom with its dominant genus

水库平均水深 7 m, 最大水深 14 m, 换水周期 4 个月<sup>[5]</sup>, 相较而言, 沙河水库的水深较浅, 换水周期较长; 两水库硅藻优势属不同, 而不同属种对温度等的响应也有所不同。

### 3.3 硅藻及其优势属异常增殖的综合影响因素分析

采用线性回归等多因素统计分析, 进一步分析了沙河水库硅藻及主要优势属生物量与多种环境因子的相关性, 如图 10。由于多年来硅藻的生物量峰值主要出现在 5、6 月, 把 5~6 月硅藻生物量平均值 ( $BM_{bac5\sim6}$ ) 与水文气象因子及营养盐逐一进行相关分析, 发现  $BM_{bac5\sim6}$  与 3~4 月累积降雨量 ( $RF_{3\sim4}$ ) 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 说明春耕季节的降雨对水库水量、水质的综合影响是硅藻门总体异常增殖的重要控制因素。针杆藻是硅藻的绝对优

势属, 其异常增殖的主控因素与硅藻门总生物量的因素一致。

小环藻生物量峰值 ( $BM_{cyc}$ ) 与水文气象因子及营养盐作相关分析表明,  $BM_{cyc}$  与 4 月 TP 浓度 ( $TP_4$ )、4~5 月累计降雨量 ( $RF_{4\sim5}$ )、同期水位均呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 而与  $WR_{15}$  呈极显著负相关关系。小环藻与 TP 较好的相关关系, 与 Saros 等<sup>[36]</sup>的研究表明小环藻对 TP 浓度较为敏感的结果相一致, 控制 TP 浓度仍然是限制硅藻异常增殖的手段之一<sup>[4]</sup>。流域降雨的影响是综合的, 首先降雨通过地表径流携带大量的氮磷营养盐进入水体, 从而使水库 TP 含量升高, 另外也会使水体水位升高, 而小环藻又相对喜欢在水位高、水量大库区增殖。小环藻与换水率之间的负相关关系, 说明

较高的换水率不利于小环藻生物量的积累,前人研究表明,在不同季节,对水库进行适当的排水,可以抑制藻类异常增殖的强度<sup>[37]</sup>。

5~6月曲壳藻生物量平均值( $BM_{ach5\sim6}$ )与3月降雨量( $RF_3$ )呈极显著正相关关系( $P<0.001$ ),说明3月的降雨对曲壳藻峰值的形成具有显著的控制

作用。直链藻峰值往往发生在冬季,在低温下直链藻能较好地生长,然而对其峰值形成的研究,发现其异常增殖与10~11月平均TP含量( $TP_{10\sim11}$ )具有极显著的正相关关系(图10),说明尽管直链藻属于冷水属,但其生物量高低、增殖强度也受水库营养水平的影响。

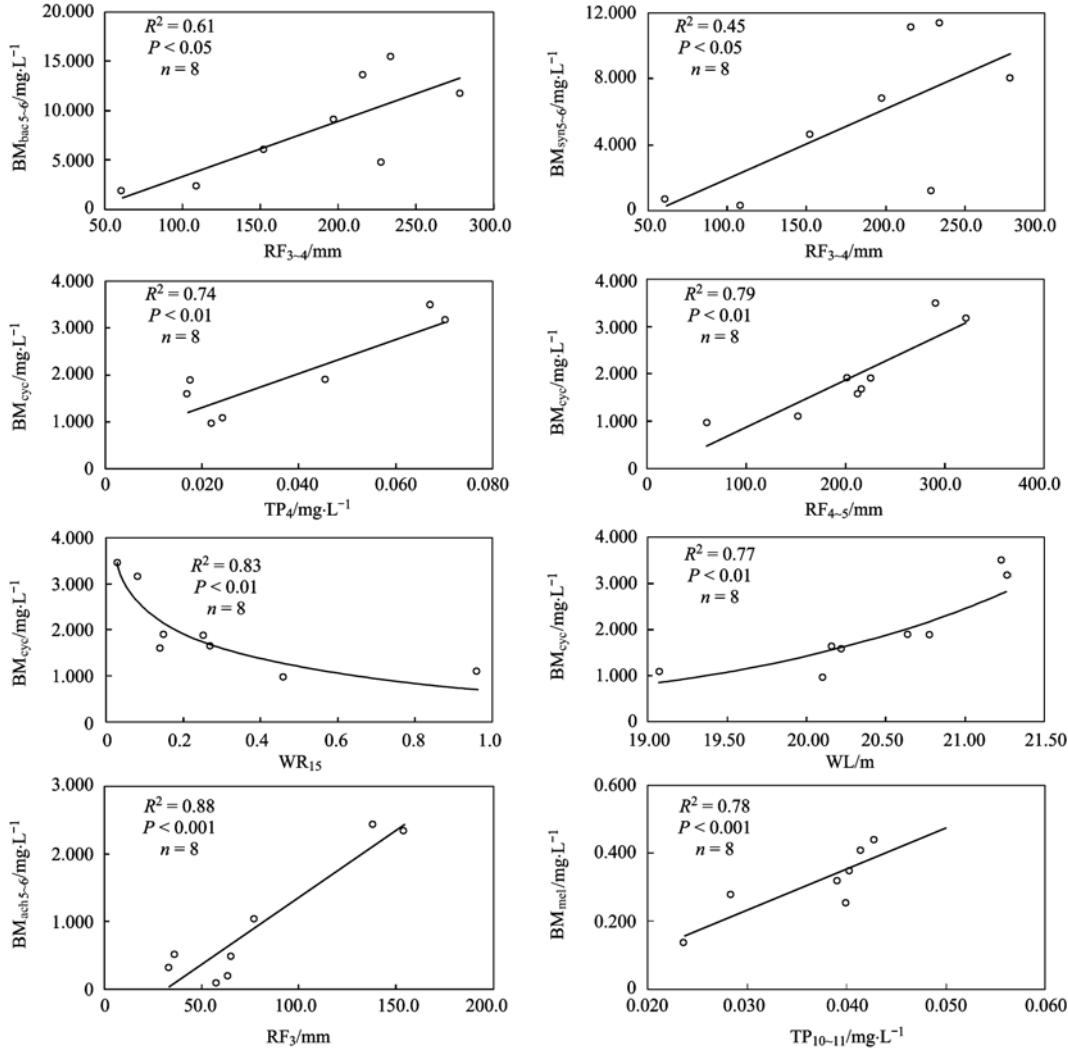


图10 硅藻及其优势属与环境因子的关系

Fig. 10 Relationship between environmental factors and diatoms with its dominant genus

3.4 沙河水库硅藻总生物量预测的因子拟合

为探索硅藻异常增殖生物量峰值强度的预测因素,在综合考虑了影响硅藻及其优势属生物量的水文、气象和营养盐因素之后,选取对硅藻生物量影响最为密切的3~4月累积降雨量( $RF_{3\sim4}$ )、前期4~5月累积气温( $AT_{4\sim5}$ )及同期(5月)的磷水平( $DTP_5$ ),通过多元线性回归分析,获得了沙河水库多年硅藻生物量峰值的关键因子预测方程如下:

$$BM_{bac5\sim6} = 0.09 \times RF_{3\sim4} + 0.07 \times AT_{4\sim5} - 246.55 \times DTP_5 - 81.37$$

式中, $BM_{bac5\sim6}$ :每年5~6月硅藻生物量的平均值; $RF_{3\sim4}$ :每年3~4月累积降雨量; $AT_{4\sim5}$ :每年4~5月积温; $DTP_5$ :每年5月溶解性总磷含量。

方程通过检验处于显著水平( $P<0.05$ ),且方程中的每一个自变量均处于显著水平( $P<0.05$ ),这说明硅藻的异常增殖不是受单因素的控制,而主要是受 $RF_{3\sim4}$ 、 $AT_{4\sim5}$ 和 $DTP_5$ 共同影响的结果。此结果与任杰等<sup>[4]</sup>在横山水库调查发现硅藻主要受TP与 $WR_{15}$ 影响的结果近似,但增加了气温的因素。

利用该拟合公式获得的实测硅藻生物量与预测硅藻生物量拟合如图 11, 结果表明拟合度较高 ( $R^2 = 0.91$ ), 能够较好描述沙河水库  $BM_{bac5-6}$  随  $RF_{3-4}$ 、 $AT_{4-5}$  和  $DTP_5$  的变化情况。

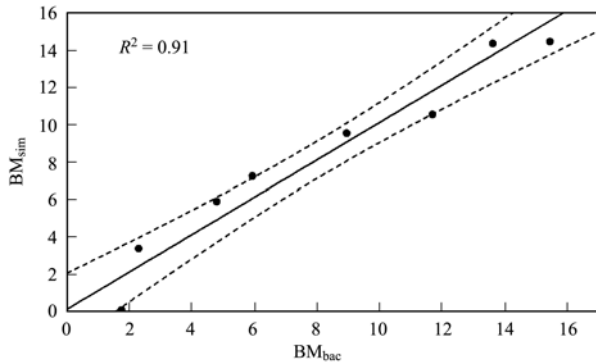


图 11 实测  $BM_{bac}$  与方程拟合生物量 ( $BM_{sim}$ ) 的拟合关系

Fig. 11 Relationship between measured  $BM_{bac}$  and simulated diatom biomass ( $BM_{sim}$ )

#### 4 结论

(1) 硅藻在中营养水平下易出峰值, 其峰值的影响因素不是单一的, 而是多种因素共同控制的。降雨量、积温和溶解性总磷的综合作用决定了硅藻的异常增殖。

(2) 硅藻不同优势属对水文气象和营养盐的响应不同, 针杆藻、曲壳藻峰值主要受降雨量影响, 小环藻峰值则受总磷、降雨量、水位和换水率的共同影响, 直链藻峰值的形成与降雨量关系不大, 主要受总磷的影响。且它们对降雨量、积温和营养盐的响应时间不同。

(3) 本研究表明, 我国东南丘陵山区中营养水平下硅藻的异常增殖灾害具有不确定性, 主要是其不同优势属对环境因子的响应差异较大。在防控硅藻异常增殖方面, 除了积极开展流域营养盐削减措施之外, 应当密切关注极端天气综合影响, 采取相应的水文调节措施, 开发切实有效的灾害预警技术。

致谢: 溧阳市天目湖水源地生态环境保护领导小组办公室在样品采集等方面提供了大力帮助, 溧阳市水利局沙河水库管理处提供的水位和降雨数据, 中国科学院南京地理与湖泊研究所陈伟民研究员在调查方案设计方面给予大力支持, 周永强助理研究员在绘图与写作方面给予指导, 邓建明助理研究员和王鹏硕士生在绘图方面提供帮助, 查慧铭、胡耀躲硕士生在野外采样给予帮助, 张成英、郑泽霖、夏忠实验员协助了样品处理及水质分析, 在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 苏玉萍, 赖寿辉, 林佳, 等. 富营养化饮用水源地山仔水库限制性营养元素研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3107-3113.  
Su Y P, Lai S H, Lin J, *et al.* Research on the limiting nutrient in Shanzi Reservoir, an eutrophied drinking water source[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(10): 3107-3113.
- [2] 李崇巍, 胡捷, 王飒, 等. 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2430-2438.  
Li C W, Hu J, Wang S, *et al.* The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(8): 2430-2438.
- [3] 李子成, 邓义祥, 郑丙辉. 中国湖库营养状态现状调查分析[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(61): 209-213.  
Li Z C, Deng Y X, Zheng B H. Investigation of the eutrophication status of the lakes and reservoirs in China[J]. Environmental Science and Technology, 2012, **35**(61): 209-213.
- [4] 任杰, 朱广伟, 金颖薇, 等. 换水率和营养水平对太湖流域横山水库硅藻水华的影响[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 604-616.  
Ren J, Zhu G W, Jin Y W, *et al.* Combined effects of water exchange rate and nutrient on diatom proliferation in Hengshan Reservoir, Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(3): 604-616.
- [5] 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4160-4168.  
Sun X, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatial-temporal variations of phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [6] 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.
- [7] Round F E. Diatoms in river water-monitoring studies[J]. Journal of Applied Phycology, 1991, **3**(2): 129-145.
- [8] Tao T, Cai Q H, Liu J K. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi river system[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, **112**(1-3): 347-361.
- [9] Liu C Q, Liu L S, Shen H T. Seasonal variations of phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Lake Baiyangdian, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, **2**: 1622-1631.
- [10] 陈凡, 胡芳, 聂小保, 等. 东江惠州段水质污染特征分析及其防治建议[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(12): 112-115.  
Chen F, Hu F, Nie X B, *et al.* Analysis on the status and countermeasures of water pollution of Dongjiang River in Huizhou[J]. Environmental Science and Technology, 2014, **37**(12): 112-115.
- [11] Willén E. Planktonic diatoms-an ecological review[J]. Algalogical Studies, 1991, **62**: 69-106.
- [12] 杨强, 谢平, 徐军, 等. 河流型硅藻水华研究进展[J]. 长江

- 流域资源与环境, 2011, **20**(S1): 159-165.
- Yang Q, Xie P, Xu J, *et al.* Research advances of diatom blooms in rivers[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(S1): 159-165.
- [13] 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.
- [14] 刘麟菲, 宋佳, 王博涵, 等. 渭河流域硅藻群落特征及水生态健康评价[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(10): 1560-1569.
- Liu L F, Song J, Wang B H, *et al.* Diatom community structure and aquatic system assessment of Wei River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(10): 1560-1569.
- [15] 韦洁琳, 曹鹏飞, 胡文容, 等. 南四湖浮游硅藻季节性演替及其与环境因子的相关性[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(8): 1209-1218.
- Wei J L, Cao P F, Hu W R, *et al.* Seasonal succession of planktonic diatom community and its relationship with environmental factors in Nansi Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(8): 1209-1218.
- [16] Beaver J R, Jensen D E, Casamatta D A, *et al.* Response of phytoplankton and zooplankton communities in six reservoirs of the middle Missouri River (USA) to drought conditions and a major flood event[J]. Hydrobiologia, 2013, **705**(1): 173-189.
- [17] 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.
- [18] Lee K, Yoon S K. Ecological studies on Togyo reservoir in Chulwon, Korea VI. The list of phytoplankton and periphyton [J]. Algae, 2003, **18**(4): 263-272.
- [19] 孟睿, 何连生, 过龙根, 等. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2588-2596.
- Meng R, He L S, Guo L G, *et al.* Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in Macroptical Lakes of the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2588-2596.
- [20] 梁开学, 王晓燕, 张德兵, 等. 汉江中下游硅藻水华形成条件及其防治对策[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(12J): 113-116.
- Liang K X, Wang X Y, Zhang D B, *et al.* Ecological conditions of diatom water bloom formulation in the middle and lower reach of the Hanjiang River and strategy for water bloom control[J]. Environmental Science and Technology, 2012, **35**(12J): 113-116.
- [21] 殷大聪, 郑凌凌, 宋立荣. 汉江中下游早春冠盘藻 (*Stephanodiscus hantzschii*) 水华暴发过程及其成因初探[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(4): 451-458.
- Yin D C, Zheng L L, Song L R. *Stephanodiscus hantzschii* bloom in the Hanjiang River: spatio-temporal distribution and possible driving forces [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(4): 451-458.
- [22] 李恒鹏, 朱广伟, 陈伟民, 等. 中国东南丘陵山区水质良好水库现状与天目湖保护实践[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 775-784.
- Li H P, Zhu G W, Chen W M, *et al.* Current situation of good water quality reservoirs in hilly region of south-east China: protection practices of Tianmuhu Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 775-784.
- [23] 贺冉冉, 罗淑葱, 朱广伟, 等. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(4): 344-349.
- He R R, Luo L C, Zhu G W, *et al.* Variation of dissolved oxygen and its influence on release of endogenous nitrogen in Tianmuhu reservoir in Liyang, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, **26**(4): 344-349.
- [24] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖 2001~2002 年环境调查及富营养化评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(1): 99-103.
- Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, *et al.* Main physical and chemical factors in Tianmuhu Lake, with evaluation of eutrophication from 2001 to 2002 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, **14**(1): 99-103.
- [25] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 等. 太湖流域水库型水源地质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.
- [26] Zhu G W, Cui Y, Han X X, *et al.* Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2015, **30**(1): 41-58.
- [27] 崔扬, 朱广伟, 李慧赞, 等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系[J]. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 10-18.
- Cui Y, Zhu G W, Li H Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe reservoir within Tianmuhu reservoir and its relationship with phytoplankton community[J]. Journal of Hydroecology, 2014, **35**(3): 10-18.
- [28] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [29] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [30] 胡韧, 熊江霞, 韩博平. 具有短水力滞留的小型富营养化水库浮游植物群落结构与动态[J]. 生态环境, 2008, **17**(4): 1319-1326.
- Hu R, Xiong J X, Han B P. Structure and dynamics of phytoplankton assemblage in a small eutrophic reservoir with a short residence time[J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(4): 1319-1326.

- [31] Rteam R, Team R D C, Team R, *et al.* R: a language and environment for statistical computing[J]. Computing, 2014, **14**: 12-21.
- [32] Wilkinson G N, Rogers C E. Symbolic description of factorial models for analysis of variance[J]. Applied Statistics, 1973, **22** (3): 392-399.
- [33] 曾艳艺, 黄翔鸽. 温度、光照对小环藻生长和叶绿素 a 含量的影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2007, **27**(6): 36-40.  
Zeng Y Y, Huang X H. Effects of temperature and illumination on growth and chlorophyll-a of *cyclotella* sp. [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2007, **27**(6): 36-40.
- [34] 龙胜兴, 陈椽. 乌江上游筑坝蓄水后各水库浮游硅藻及浮游动物群落生态特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2009, **27**(3): 21-26.  
Long S X, Chen C. Ecological characteristics of planktonic diatoms and zooplankton community after the building of dam on the Wujiang River[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2009, **27**(3): 21-26.
- [35] 江川. 乌江水库水质评价及原因分析[J]. 环保科技, 2011, **17**(3): 26-29.  
Jiang C. Cause analysis and water environmental quality evaluation in Wujiang Reservoir[J]. Environmental Protection and Technology, 2011, **17**(3): 26-29.
- [36] Saros J E, Anderson N J. The ecology of the planktonic diatom *Cyclotella* and its implications for global environmental change studies[J]. Biological Reviews, 2015, **90**(2): 522-541.
- [37] Verspagen J M H, Passarge J, Jöhnk K D, *et al.* Water management strategies against toxic *Microcystis* blooms in the Dutch delta[J]. Ecological Applications, 2006, **16**(1): 313-327.

环境科学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                          |                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China .....                                                    | KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> ( 961 )               |
| Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing .....                                                                                                 | YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> ( 972 )           |
| Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM <sub>2.5</sub> During Summer-Winter in Changzhou City .....                                                                                 | LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> ( 980 )           |
| Characteristics of Elements in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Road Dust Fall During Spring in Tianjin .....                                                                                                   | WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> ( 990 )             |
| Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer .....                                                                       | ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> ( 997 )         |
| Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province .....                                                                                      | GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> ( 1004 )       |
| Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment .....                                                                                                              | LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> ( 1014 )        |
| A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province .....                                                                                               | WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> ( 1023 )            |
| Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool .....                                                                                                                             | LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> ( 1031 )         |
| Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF .....                                                                                                                                  | LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> ( 1040 )            |
| Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project .....                                                                                                                               | HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang ( 1046 )                        |
| Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River .....                                                                                                               | FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> ( 1053 )        |
| Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet .....                                                                                                                                       | ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> ( 1065 )        |
| Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin .....                                                                                               | LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> ( 1076 )            |
| Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China .....                                       | ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> ( 1085 ) |
| Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin .....                                                                                                               | XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> ( 1095 )     |
| Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China .....                                                                                                                   | ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> ( 1102 )    |
| Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring .....                                                 | LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 1113 )               |
| Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins .....                                                                              | ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> ( 1122 )          |
| Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs .....                                                                                                                        | SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> ( 1129 )           |
| Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification .....                                                                                           | SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 1141 )  |
| Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu .....                                                                                                               | XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> ( 1151 )               |
| Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir .....                                                                                                                                            | SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> ( 1159 )                 |
| Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde ..... | MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> ( 1167 )     |
| Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics .....                                                    | ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> ( 1180 )      |
| Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation .....                                                                                                            | JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> ( 1188 )     |
| Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process .....                                                                                                                                      | HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> ( 1195 )           |
| Experiment to Enhance Catalytic Activity of $\alpha$ -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate .....                                                                                               | MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> ( 1202 )   |
| Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal .....                                                                                                                | QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> ( 1212 )          |
| Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites .....                                                                                                            | ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> ( 1220 )    |
| Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution .....                                                                                   | LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen ( 1233 )                         |
| Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO <sub>2</sub> and the Regeneration of TiO <sub>2</sub> .....                                                                                                           | MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng ( 1241 )                         |
| Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process .....                                                                                                           | LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> ( 1248 )            |
| Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China .....                                                                                     | YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> ( 1256 )               |
| Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen .....                                                                                        | LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> ( 1264 )               |
| Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier .....                                                                                                                                                              | GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> ( 1272 )         |
| Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification .....                                                                                                       | ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> ( 1278 )                   |
| Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor .....                                                                                                                   | CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> ( 1286 )                |
| Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process .....                                                                                                                     | LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> ( 1294 )              |
| Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor .....                                                                                                                               | ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> ( 1301 )                |
| Effect of NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process .....                                                                            | LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> ( 1309 )                  |
| Effects of Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community .....                                                          | SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> ( 1316 )        |
| Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System .....                                                                                                                    | YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> ( 1325 )          |
| Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor .....                                                                                                    | DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> ( 1333 )                |
| Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System .....                                                                                        | XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> ( 1342 )    |
| Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge .....                                                                                                                | WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> ( 1350 )       |
| Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation .....                                                                                      | XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> ( 1357 )              |
| Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea .....                                                                                                    | XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> ( 1365 )       |
| Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities .....                                                                                                             | YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> ( 1379 )           |
| Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years .....                                                                                             | JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> ( 1386 )             |
| Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County .....                                                                                                                  | WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> ( 1396 )         |
| Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China .....                                                              | XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> ( 1404 )           |
| Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau .....                                          | ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> ( 1413 )                 |
| Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model .....                                                                                                                     | LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> ( 1421 )                |
| Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions .....                                                                                         | FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua ( 1430 )                           |
| Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities .....                                                                                                       | WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> ( 1438 )         |