

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

**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

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 ..... 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 ..... 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 ..... 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 ..... 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析 ..... 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 ..... 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 ..... 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 ..... 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 ..... 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO<sub>2</sub> 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 ..... 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 ..... 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 ..... 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$  和  $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$  示踪北京城区河流硝酸盐来源 ..... 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 ..... 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 ..... 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 ..... 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 ..... 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 ..... 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 ..... 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 ..... 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 ..... 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 ..... 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 ..... 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 ..... 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 ..... 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 ..... 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 ..... 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 ..... 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 ..... 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 ..... 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 ..... 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势藻种筛选 ..... 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 ..... 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 ..... 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响 ..... 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 浓度特征 ..... 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 ..... 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 ..... 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 ..... 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 ..... 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 ..... 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对土壤重金属释放及形态变化的影响 ..... 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 ..... 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 ..... 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 ..... 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 ..... 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 ..... 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 ..... 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

# 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素

任杰<sup>1,4,5</sup>, 周涛<sup>2</sup>, 朱广伟<sup>1\*</sup>, 金颖薇<sup>1,5</sup>, 崔扬<sup>1</sup>, 许海<sup>1</sup>, 朱梦圆<sup>1</sup>, 夏明芳<sup>3</sup>, 陈伟民<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. 江苏省溧阳市环境监测站, 溧阳 213333; 3. 江苏省太湖水污染防治办公室, 南京 210013; 4. 中国丹麦科研教育中心, 北京 100190; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了解我国东南湿润区丘陵山地型水库硅藻的群落结构特征和控制因素, 于 2015 年 6 月硅藻水华敏感期对苏南地区 18 座水库的浮游植物群落结构和水质进行调查, 分析了营养盐、水深、库容等因素与硅藻及其它浮游生物的关系。结果表明, 硅藻达到轻度水华水平(硅藻细胞含量介于  $100 \sim 1\,000$  万 cells·L<sup>-1</sup>) 的水库有 10 座, 对供水和景观功能产生明显影响; 苏南地区水库普遍处于中营养和富营养水平, 总氮浓度普遍偏高, 磷及营养状态指数与硅藻生物量的关系密切; 苏南地区水库中的浮游植物在数量上以蓝藻门中的席藻为主, 在生物量上则以硅藻门、绿藻门和蓝藻门为主, 其中硅藻门浮游植物平均占总浮游植物生物量的 46.8%, 是浮游植物异常增殖的主要门类; 硅藻门中, 主要是针杆藻、小环藻、曲壳藻和直链藻这 4 个种属占优, 特别是针杆藻和小环藻, 平均占硅藻总生物量的 51.6% 和 21.4%; 较深的水体, 利于硅藻成为主要优势藻门; 较大的水库流域库容比和较高总磷水平会导致水库营养水平和叶绿素浓度增加, 促进浮游植物从硅藻门向绿藻门、蓝藻门演替, 增加藻类危害的风险。因此, 对于该地区水库, 需要加强流域管理, 并且针对水库自身的特点, 包括水深、流域库容比等, 确定其特定的富营养化控制策略, 从而减少硅藻等藻类水华发生的风险, 提升水源地水质安全保障能力。

**关键词:** 水库; 水源地; 硅藻; 营养盐; 水深

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1742-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.019

## Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors

REN Jie<sup>1,4,5</sup>, ZHOU Tao<sup>2</sup>, ZHU Guang-wei<sup>1\*</sup>, JIN Ying-wei<sup>1,5</sup>, CUI Yang<sup>1</sup>, XU Hai<sup>1</sup>, ZHU Meng-yuan<sup>1</sup>, XIA Ming-fang<sup>3</sup>, CHEN Wei-min<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Liyang Environmental Monitoring Station, Liyang 213333, China; 3. Taihu Water Pollution Control Office of Jiangsu Province, Nanjing 210013, China; 4. Sino-Danish Center for Education and Research, Beijing 100190, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to understand the community structure characteristics of Bacillariophyta and its controlling factors in reservoirs located in the Southeast, China, in the geographic background of hills landscape and humid climate, 18 reservoirs were investigated in June, 2015, during the period with high risk of diatom bloom, covering water quality, and the community structures of phytoplankton. The correlations between Bacillariophyta and other planktons with nutrients, water depth, storage capacity, etc. were analyzed. The results showed that, 10 reservoirs reached the light extent of diatom bloom (density between  $100 \times 10^4 - 1\,000 \times 10^4$  cells·L<sup>-1</sup>); reservoirs in this area were generally in mesotrophic or eutrophic state with considerably high total nitrogen concentrations; total phosphorus and trophic level index were both closely correlated with Bacillariophyta biomass. *Phormidium* in Cyanophyta was the dominating genus among phytoplankton in terms of density; with respect to biomass, Bacillariophyta, Chlorophyta and Cyanophyta were the top three phylum, and Bacillariophyta accounted for 46.8% of the total phytoplankton biomass, becoming the most important one resulting in abnormal propagation of algae; *Synedra* (51.5%) and *Cyclotella* (21.4%) were the main dominating genera in Bacillariophyta, together with *Achnanthes* and *Melosira*. Deep water was favored by Bacillariophyta to dominate among different phyla. Larger ratio between catchment and reservoir storage capacity, on the other hand, caused the increase of trophic level and chlorophyll, and benefited the shift of dominating phytoplankton from Bacillariophyta to Chlorophyta and Cyanophyta, by which, the risk of algae bloom would be increased. It reveals that to alleviate the risk of algae bloom and protect drinking water resources, catchment management is crucial for the studied reservoirs. And the establishment of nutrient reduction strategies needs to consider the features of each individual reservoir, i. e. water depth, ratio between catchment and capacity.

**Key words:** reservoir; drinking water source; Bacillariophyta; nutrients; water depth

收稿日期: 2015-08-24; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 江苏省太湖水环境综合治理科研项目(TH2014304); 国家自然科学基金项目(51279194)

作者简介: 任杰(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖库富营养化控制, E-mail: jren1991@outlook.com

\* 通讯联系人, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

富营养化及其伴随的有害藻类异常增殖问题是当前我国水库水环境的主要威胁之一。由于经济社会发展中对水环境的保护不足,我国的湖库普遍面临富营养化的环境问题。水库在我国城市供水中的作用越来越重要,因此其水质状况也至关重要<sup>[1]</sup>。李子成等<sup>[2]</sup>基于 2005~2007 年 25 个省湖库水质数据分析表明,仅 7.69% 的湖泊总磷(TP)浓度属于贫营养水平,有 16.57% 的湖泊为中营养水平,超过四分之三的湖泊属富营养水平,水库的水质尽管要好于湖泊,有 34% 的水库 TP 浓度能达到贫营养水平,但仍有 35% 的水库 TP 浓度属富营养水平。

与浅水湖泊经常出现的蓝藻水华问题不同,水库等中营养深水体中硅藻是更广泛存在的有害浮游植物<sup>[3]</sup>。硅藻异常增殖进而影响水质是水库中较为常见的生态灾害。如崔扬等<sup>[4]</sup>的研究表明,除 7~9 月以外,硅藻是沙河水库浮游植物的主要浮游植物门类,有时能占藻类总生物量的 71.3%。在美国、德国、日本等国家的湖库中,也常有春季硅藻水华灾害的报道<sup>[5~7]</sup>。硅藻大量增殖甚至暴发水华能导致水库水质变差、相关水厂工艺运行效率低下、出水水质异味等问题<sup>[8]</sup>。除此之外,硅藻大量增殖还会引起一系列生态环境问题,如产生腥臭味、威胁桡足类浮游动物繁殖和孵化等问题<sup>[9~11]</sup>。

在不同的环境条件下,水库的有害藻类可能不同。如在广东省大沙河水库,蓝藻和绿藻是全年占优的藻门;该省的剑潭水库则在群落结构上以绿藻为主,其次是硅藻<sup>[12,13]</sup>。同时,在不同的生态系统中,引起硅藻水华的因素亦存在较大差异<sup>[14]</sup>。影响湖库中硅藻生长的因素包括气象水文过程、水体总氮(TN)、TP 等营养盐状况、不同浮游植物藻门之间对生长条件(如光照、营养盐等)的竞争以及食物链结构等<sup>[15]</sup>。硅藻水华的优势种类也会随着生境的不同而存在差异,如在河流生态系统中,最为常见的硅藻水华优势属是小环藻和冠盘藻<sup>[14]</sup>。对于不同地区而言,水库中硅藻的优势种类可能存在差异。如浙江的紧水滩水库、横山水库中硅藻优势种均包括直链藻,而湖北金沙河、熊河水库则以针杆藻为主要的硅藻优势属之一<sup>[16~19]</sup>。相应地,同一地区不同水文、营养状态的水库,其硅藻优势种类也会有所不同。因此,对于湖库硅藻的研究需要针对地区性和水体特点,在查明该硅藻水华水体优势种类的基础上,同时考虑蓝藻、绿藻等其他常见藻门的生物量、群落结构等特征,结合食物链上下级状况来估计该湖库中捕食作用能否显著影响到硅藻乃至浮

游植物整体的大规模繁殖,从而更加全面地预防和控制湖库硅藻大规模异常增殖问题。并且,由于水库营养水平受水库流域特征和水文特征等因素的影响,如较高的农业用地与森林用地之比、水库水深较小以及流域面积与水库面积之比较高等均会导致水库处于较高的营养水平,因而硅藻的生长与水库营养水平、流域特征和水文特征等因素之间可能存在着密切联系<sup>[20]</sup>。Jeppesen 等<sup>[21]</sup>研究丹麦湖泊发现,硅藻的物种丰度和多样性与湖泊 TP 浓度、平均深度正相关。Beaver 等<sup>[22]</sup>在研究美国密苏里河中游 6 座水库中浮游生物对枯水期、汛期的响应时发现,水库的水力停留时间越短,硅藻的生物量就越高。另外,对于某特定地区水库而言,营养盐等因素在时间空间尺度上均存在着波动幅度大,需要长时间、高频率监测等特点,因而调查水库营养状况、水库浮游植物群落特征存在时间和经济上的难度;相比之下,水库深度、流域面积与水库库容之比等因素相对稳定且易于获取,因此若能探寻某地区水库的深度、流域库容之比与营养水平、硅藻及其他藻门的关系,则可以为今后的水库管理工作提供巨大的便利<sup>[20]</sup>。目前,国内外相关研究的重点在于对水库浮游植物的群落结构和主要优势种属进行调查,主要考虑湖泊水库总体营养水平及其对浮游植物群落结构特别是蓝藻的影响,并没有对硅藻进行特别的关注,且缺乏从营养盐、食物链、水文及流域特征等方面对水源类型水库中硅藻问题的控制因素进行较为全面的专门研究<sup>[23~25]</sup>。国内对硅藻问题的研究也主要集中在河流、海洋等水体,缺乏对水库这类水体中硅藻问题的关注<sup>[26,27]</sup>。

本研究选取苏南地区水库为调查对象。苏南地区的水库密度大,地处亚热带东南湿润区的丘陵山区,在自然地理区位和人类活动影响强度等方面具有其独特性。该地区城市化进程较快,土地利用比例高,导致土地资源紧张,水库流域的农业开发力度大,且多以茶果园为主<sup>[28]</sup>。研究表明,水库流域茶园的氮污染排放强度高,对水库的水质影响大<sup>[29]</sup>。此外,苏南水库大多承担城市供水的功能,富营养化问题成为水库管理者最关注的生态灾害之一。

前人通过对该地区典型水库沙河水库 6 a 的监测研究表明,每年 5~7 月的春末夏初时期硅藻生物量将达到峰值,是苏南地区水库硅藻灾害发生的敏感期<sup>[4,30]</sup>。为此,本研究于 2015 年 6 月的硅藻异常增殖高发期对苏南 18 座水库开展生态学调查,分析了苏南水库的浮游植物群落结构、硅藻及其关键优

势种属,分析了水质指标、水库水文特征、生物指标等因素与硅藻及其他主要浮游植物藻门(如蓝藻、绿藻)的关系,探讨了苏南地区水库硅藻灾害敏感期的主要控制因素及潜在防控途径,以期为保障湖库水源地水质安全提供科学依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 调查水库概况

本研究所调查的苏南水库分别位于句容市、江宁区、溧水区、溧阳市和宜兴市,如图 1. 其中 17 座为水源地型水库,1 座为非水源地型水库(大坝坊水

库). 从水库规模看,3 座为大型水库(沙河、大溪、横山水库),9 座为中型水库(赵村、方便、中山、老鸭坝、北山、二圣、句容、前宋、塘马、油车水库),5 座为小型水库(吕庄、大坝坊、团结、竹林、鸡笼坝水库). 其中,溧阳地区水库的选择主要参照胡尊乐等对该地区饮用水源地安全评价的名录<sup>[31]</sup>.

不同水库的库容规模、集水面积见表 1. 其中集水面积( $A$ )和总库容( $V$ )是当地水库管理部门官方公布的数据,水库面积是根据 Google Earth Pro 2013 年 12 月 10 日的影像进行矢量化而获取,采样点深度为现场测量结果。

表 1 苏南地区水库基本信息

Table 1 General information of reservoirs in the South of Jiangsu Province

水库名称	地理坐标	所在市	集水面积 /km <sup>2</sup>	总库容 ×10 <sup>4</sup> /m <sup>3</sup>	面积 /km <sup>2</sup>	采样点深度 /m
塘马	31°35'26.11"N; 119°22'17.76"E	溧阳市	39.9	1 182.0	1.13	3.15
吕庄	31°35'50.68"N; 119°18'01.10"E	溧阳市	12.0	665.0	0.57	5.05
大坝坊	31°32'59.72"N; 119°13'22.63"E	溧阳市	3.5	153.4	0.25	4.88
团结	31°33'00.41"N; 119°12'08.84"E	溧阳市	3.7	202.7	0.25	8.82
竹林	31°28'13.67"N; 119°09'47.26"E	溧阳市	3.2	190.0	0.25	6.67
鸡笼坝	31°30'13.95"N; 119°11'13.05"E	溧阳市	2.5	116.1	0.13	4.95
前宋	31°18'26.53"N; 119°19'06.90"E	溧阳市	20.0	1 416.0	1.98	3.66
大溪	31°21'26.28"N; 119°22'34.21"E	溧阳市	90.0	10 170.0	11.10	6.10
沙河	31°18'58.63"N; 119°26'18.64"E	溧阳市	148.5	10 860.0	9.29	11.14
油车	31°13'03.43"N; 119°45'16.29"E	宜兴市	37.4	3 324.0	1.81	18.36
横山	31°14'21.91"N; 119°33'58.69"E	宜兴市	154.8	11 200.0	6.00	5.42
赵村	31°40'13.53"N; 118°48'14.89"E	江宁区	18.3	1 034.3	1.12	10.20
中山	31°37'56.49"N; 119°04'15.02"E	溧水区	32.3	2 868.0	2.86	3.07
方便	31°42'07.00"N; 119°07'21.23"E	溧水区	77.1	5 027.0	4.72	6.40
老鸭坝	31°36'10.72"N; 119°11'20.36"E	溧水区	17.5	1 135.0	1.37	6.84
二圣	31°51'59.72"N; 119°11'46.64"E	句容市	103.5	6 530.0	4.70	4.69
北山	32°05'10.66"N; 119°10'56.19"E	句容市	58.2	4 814.6	2.70	15.17
句容	31°58'35.20"N; 119°11'58.20"E	句容市	45.8	2 859.0	2.49	4.80

### 1.2 样品采集及分析方法

样品的采集与测定方法与文献[32]相同. 采样点尽可能位于所在水库的坝前近湖心. 对于调查点深度大于 5 m 的水库,采集表层(0.5 m)、中层以及底层(泥上 0.5 m 内)水样. 而对于采样点深度不足 5 m 的水库,则仅采集表层 0.5 m 以及底层水样. 分层水样现场过滤后冷藏保存,当天送回实验室进行分析处理. 其中监测溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、悬浮颗粒物(SS)、溶解性有机碳(DOC)和叶绿素 a(CHL)的样品,现场用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜进行过滤后冷藏,用于测定硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、反应性活性磷(SRP)等离子的水样用孔径为 0.2 μm 的津隆公司混合纤维滤头现场过滤后冷藏. 对于浮游植物,将上述不同层位获得

水样等量混合至 1 L 后,添加 5% 鲁格试剂固定. 浮游动物样则每层采集 5 L 水样,用 25 号浮游生物网过滤浓缩至 30 mL 塑料方瓶中,现场加 1 mL 甲醛固定.

现场使用美国黄石仪器公司 YSI 6600V2 型多参数水质分析仪分层测定溶解氧(DO)、水温(WT)等参数. 利用直径 30 cm 的塞式盘测量透明度(SD). 所有水样均冷藏保存至转移室内.

室内水质指标的测定方法参考文献[4]. 其中 TN、DTN 的测定为碱性过硫酸钾消解、紫外(波长 210 nm)分光光度法测定; TP、DTP 的测定为碱性过硫酸钾消解、钼锑抗显色分光光度法(波长 700 nm); NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、SRP 则用荷兰 Skalar 流动注射分析仪直接测定; CHL 的测定采用热乙醇提取、分光光度法测定(波长 665 nm、750

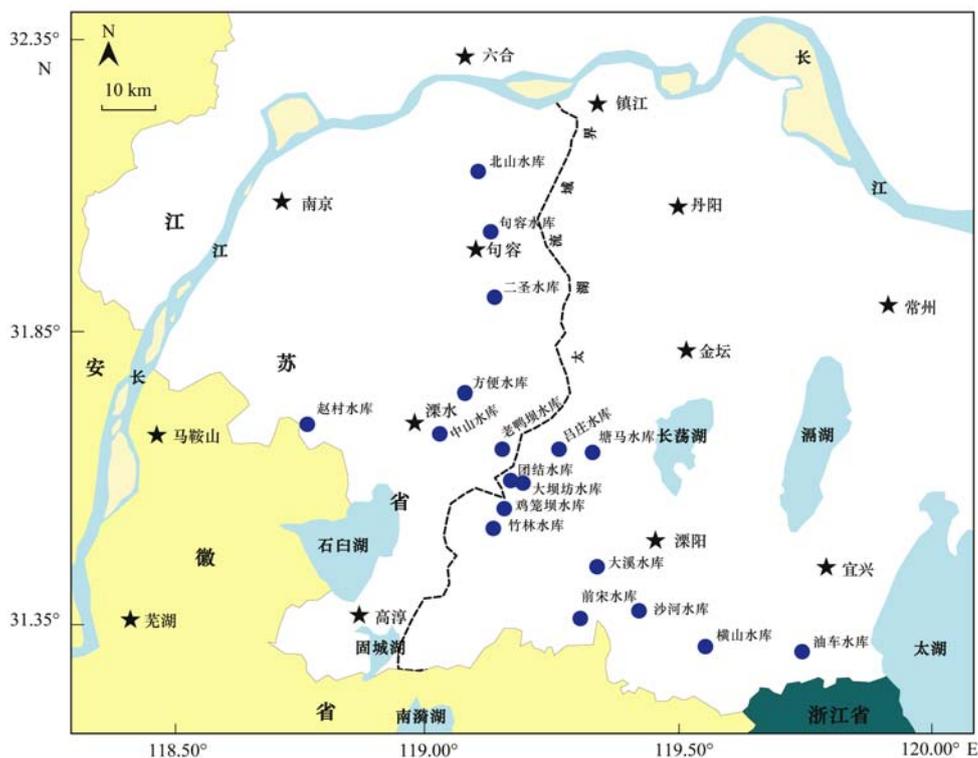


图1 苏南地区水库位置分布示意

Fig. 1 Locations of reservoirs in the South of Jiangsu Province

nm); SS 采用 105℃ 烘干重量法; 高锰酸盐指数的测定采用高锰酸钾水浴氧化后草酸钠、高锰酸钾氧化滴定法; DOC 测定采用岛津 TOC-L CPH 有机碳分析仪测定. 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, 各属细胞数的基础上, 根据体积-重量经验公式换算为生物量(BM,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 浮游动物采用 Zeiss 倒置显微镜镜检并估算生物量. 样品处理和生物量估算方法参照文献[33].

### 1.3 营养状态指数(TLI)

采用中国环境监测总站 2001 年发布的《湖泊(水库)富营养化评价方法和分级技术规定》[总站生字(2001)090 号]计算所调查水库的营养状态指数(TLI). 该方法共包含 5 项指标, 其中以 CHL 为基准参数, 其余参数包括 TP、TN、SD 和高锰酸盐指数等. 针对 5 项指标分别评分后, 根据权重得到加权平均值. 评价结果以 0 ~ 100 的连续数字对水库营养状态进行分级.  $\text{TLI}(\sum) < 30$  为贫营养,  $30 \leq \text{TLI}(\sum) \leq 50$  为中营养,  $50 < \text{TLI}(\sum) \leq 60$  为轻度富营养,  $60 < \text{TLI}(\sum) \leq 70$  为中度富营养,  $\text{TLI}(\sum) > 70$  为重度富营养<sup>[34,35]</sup>.

### 1.4 数据分析方法

数据图表及主要统计参数由 Excel 2013 与 R 3.2.2 分析绘制完成<sup>[36,37]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 水质状况

所调查水库的表层水温介于 24.96 ~ 30.66℃ 之间, 底层水温介于 10.45 ~ 26.16℃ 之间, 属于较适宜硅藻生长的温度. 表层 DO 介于 6.68 ~ 15.30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  间, 未发现缺氧问题, 高锰酸盐指数介于 1.43 ~ 5.30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, DOC 介于 1.67 ~ 4.39  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水体  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  基本未检出. 其余主要水质状况如表 2.

水库的 SD 能够影响水体生物的活动范围、生存条件, 并反映水体的富营养状态<sup>[38,39]</sup>. 对于具有景观用途水库(如前宋、油车水库), SD 还影响水库的美观<sup>[40]</sup>. 对苏南水库的 SD 分析表明, 苏南水库的 SD 还与 DO 和 WT 之间有联系: 苏南水库的相对透明度(SD/Depth 之比)与 DO 显著正相关(图 2,  $P < 0.001$ ). 底层溶解氧高低关系到水体的底泥营养盐释放强度, 进而影响水库水质的优劣. 通过 YSI 现场测试结果表明, 除了深水水库外, 部分浅水水库亦存在着底层缺氧的情况, 这与透明度不高紧密相

表 2 苏南水库主要水质指标平均值

水库名称	TN /mg·L <sup>-1</sup>	TP /μg·L <sup>-1</sup>	TDN /mg·L <sup>-1</sup>	TDP /μg·L <sup>-1</sup>	CHL /μg·L <sup>-1</sup>	SRP /μg·L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	pH	SS /mg·L <sup>-1</sup>	SD /m	底层 DO /mg·L <sup>-1</sup>
塘马	2.13	40	1.55	12	25.7	0.9	0.05	0.31	8.63	11.95	1.10	0.35
吕庄	1.20	27	1.10	24	13.0	2.1	0.07	0.67	8.29	10.23	1.80	0.51
大坝坊	1.19	65	0.60	27	58.2	2.6	0.15	0.05	8.26	17.96	0.75	0.34
团结	1.35	25	1.31	17	8.4	1.4	0.10	0.96	6.47	5.81	1.90	0.88
竹林	1.03	30	0.54	20	31.4	1.1	0.07	0.15	7.45	15.81	0.70	0.46
鸡笼坝	1.08	37	0.64	16	28.9	1.0	0.06	0.22	7.00	16.90	0.80	0.52
前宋	0.71	29	0.52	21	13.1	0.6	0.04	0.04	8.55	7.42	1.20	5.89
大溪	0.96	45	0.85	42	4.7	3.3	0.08	0.54	8.50	1.81	1.90	1.64
沙河	1.88	39	1.80	33	5.7	3.8	0.11	1.47	8.14	4.62	1.60	0.20
油车	2.52	55	2.37	41	4.9	4.4	0.05	2.33	8.60	1.12	2.30	-
横山	2.34	37	2.15	16	3.7	2.3	0.09	1.75	8.34	4.59	1.05	7.92
赵村	1.24	25	0.93	14	19.0	2.7	0.07	0.54	7.20	3.76	1.30	0.59
中山	0.44	20	0.41	16	3.3	0.9	0.04	0.05	8.40	2.05	2.90	8.96
方便	0.74	21	0.70	21	3.5	0.3	0.04	0.32	8.03	1.17	3.40	1.41
老鸭坝	0.72	32	0.51	21	13.8	0.9	0.06	0.04	6.94	9.54	1.10	0.34
二圣	1.80	49	1.76	37	3.3	1.9	0.39	0.82	7.31	8.40	1.10	1.93
北山	1.06	48	0.71	20	37.1	0.6	0.13	0.19	7.78	14.40	0.90	0.46
句容	1.41	53	1.02	23	45.4	0.8	0.06	0.48	8.35	14.61	0.90	1.70

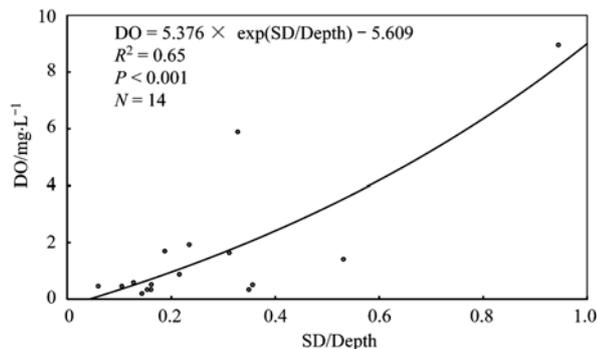


图 2 苏南水库 SD/Depth 之比与水库底层 DO 的关系

Fig. 2 Relationship between SD/Depth ratio and DO in bottom layer of reservoirs in the South of Jiangsu Province

关(平均值为 150 cm)。而对于中山水库等透明度很好的水库,现场能够观察到大量沉水植物的存在,保证了底层 DO 处于较高水平。另外水库本身的深度影响水温分层,对水体上下层的混合产生影响,也能够影响底层 DO 浓度。苏南水库底层 DO 与 SD 和水深的综合关系说明底层营养盐的释放风险受水深和水质的双重控制。

对于 CHL、TN、TP、高锰酸盐指数等常规指标而言,在所有调查的水库中,其平均浓度分别为 17.9 μg·L<sup>-1</sup>、1.32 mg·L<sup>-1</sup>、38.0 μg·L<sup>-1</sup> 和 3.27 mg·L<sup>-1</sup>。所有水库的 TN 浓度均超过 I 类水限定值(0.2 mg·L<sup>-1</sup>),只有中山水库低于 II 类水限定值(0.5 mg·L<sup>-1</sup>),而前宋、大溪、方便、老鸭坝等 4 个水库的 TN 浓度低于 III 类水限定值(1.0 mg·L<sup>-1</sup>),

沙河、二圣等水库低于了 V 类水限定值(2 mg·L<sup>-1</sup>),而塘马、横山、油车等水库 TN 甚至超过了 V 类水限定值,其他水库 TN 低于 IV 类水限定值。

调查的 18 个水库水体 TP 含量均超过 I 类水限定值(0.010 mg·L<sup>-1</sup>),并低于 IV 类限定值(0.100 mg·L<sup>-1</sup>)。其中团结、方便、中山等水库的 TP 浓度低于 II 类限定值(0.025 mg·L<sup>-1</sup>),大坝坊、油车、句容等水库 TP 高于 III 类水限定值(0.050 mg·L<sup>-1</sup>)。

油车水库高锰酸盐指数低于 I 类水限定值(2.0 mg·L<sup>-1</sup>),大坝坊、方便、句容水库等高锰酸盐指数超过了 II 类水限定值(4.0 mg·L<sup>-1</sup>),其余水库均低于 II 类水限定值<sup>[41]</sup>。

总体而言,苏南水库的富营养化相关指标中, TN 的达标情况最不乐观。这可能与水库周围的农业活动密集以及春末降雨强度较大有关<sup>[42-44]</sup>。

## 2.2 水库营养状态

苏南 18 个水库中 TLI 达到贫营养水平(TLI < 30)的水库数量为 0。中山水库 TLI 指数最低,为 33.8,这反映了亚热带湿润丘陵地区水库高营养盐的本底特征(表 2)。达到富营养水平(TLI > 50)的水库数量为 6 个,占所调查水库的 1/3,分别为大坝坊水库(56.9)、句容水库(54.3)、北山水库(52.1)、塘马水库(51.4)、鸡笼坝水库(50.9)和竹林水库(50.8)。其余水库均为中营养水平。尽管水

库调查仅选择水库坝前的一个采样点,但仍说明苏南水库的营养水平总体较高.同时也说明南京与宜兴地区的水源地型水库营养水平较溧阳、镇江地区而言相对较低,这与溧阳地区水库周围农业活动强烈和镇江地区人为活动干扰频繁的现实情况相吻合.

### 2.3 浮游植物组成和硅藻群落结构

在 17 个具有浮游生物数据的水库中,共鉴定出蓝藻 (Cyanophyta)、硅藻 (Bacillariophyta)、绿藻 (Chlorophyta)、隐藻 (Cryptophyta)、甲藻

(Pyrrophyta)、裸藻 (Euglenophyta) 和金藻 (Chrysophyta) 等 7 个藻门的 52 个藻属. 其中硅藻和绿藻在浮游植物的丰度上占优势地位(图 3). 硅藻共有 10 个藻属,而绿藻包含 25 个藻属. 从细胞数量上看,蓝藻数量占优,在所有浮游植物属中,仅蓝藻中席藻 (*Phormidium*) 的总体优势度 ( $Y$ ) 达到优势水平 ( $Y > 0.02$ ),这与席藻细胞小、数量多的生态学特征有关. 对于硅藻数量而言,在其中 10 个水库的细胞数量达到  $100 \sim 1\,000$  万  $\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,处于轻度硅藻水华状态<sup>[45]</sup>.

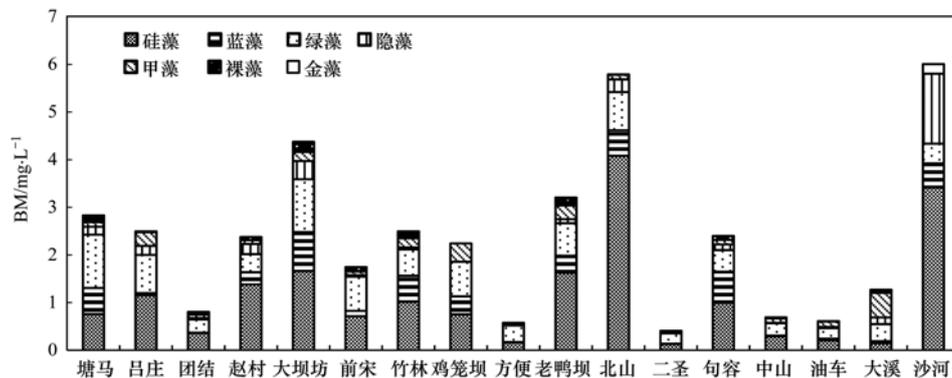


图 3 苏南水库浮游植物组成及生物量

Fig. 3 Composition and biomass of phytoplankton in reservoirs in the South of Jiangsu Province

从生物量上看,硅藻、蓝藻、绿藻、隐藻、甲藻、裸藻和金藻所占总生物量 ( $\text{BM}_{\text{phyto}}$ ) 的百分比分别为 46.8%、12.1%、23.4%、8.0%、6.4%、2.4% 和 1.0%. 其中,苏南水库中硅藻以小环藻 (*Cyclotella*)、针杆藻 (*Synedra*) 和曲壳藻 (*Achnanthes*) 为主,多样性较低. 绿藻多样性较高,其中衣藻 (*Chlamydomonas*) (46.56%)、鼓藻 (*Cosmarium*) (10.30%)、栅藻 (*Scenedesmus*) (10.27%)、空星藻 (*Coelastrum*) (8.46%) 和角星鼓藻 (*Staurastrum*) (5.79%) 等,它们的生物量占绿藻总平均  $\text{BM}$  的 80%. 蓝藻门中,席藻 (*Phormidium*) (50.08%)、束丝藻 (*Aphanizomenon*) (20.52%)、尖头藻 (*Raphidiopsis*) (15.03%) 和微囊藻 (*Microcystis*) (9.35%) 在 10 个藻属中优势明显.

对于单个水库而言,沙河、北山和大坝坊水库的  $\text{BM}_{\text{phyto}}$  最高,分别为 6.0、5.8 和 4.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 而团结、方便、二圣、中山和油车水库的  $\text{BM}_{\text{phyto}}$  则小于 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

各水库硅藻中的优势属状况如表 3. 总体而言,针杆藻、小环藻、曲壳藻的平均优势度均大于 0.02, 3 个属平均生物量分别占硅藻总生

物量的 51.6%、21.4%、8.8%, 针杆藻与小环藻是优势度最为普遍与显著的. 针杆藻在团结、鸡笼坝、油车水库中生物量不占优势,其余水库中均占优. 小环藻则是除了老鸭坝水库,在所有其他水库中均占优势地位(表 3). 直链藻 (*Melosira*) 与曲壳藻的平均优势度相近,且大于 0.02,但在 8 个水库的浮游植物样本中未检出直链藻,因此无法将其认定为苏南水库中硅藻的优势属.

### 2.4 浮游动物

浮游动物主要考察枝角类、桡足类和轮虫类等. 在 17 座水库中(除横山水库)共发现枝角类 7 个种/属,桡足类 9 个种/属,以及轮虫类 14 个种/属. 平均优势度大于 0.02 的浮游动物有:透明溞 (0.213)、卜氏晶囊轮虫 (0.052)、无节幼体 (0.034)、短尾秀体溞 (0.033)、广布中剑水溞 (0.032) 和螺型龟甲轮虫 (0.028). 就单个水库而言,大坝坊和北山两个富营养化问题较为严重水库中,轮虫在 3 类浮游动物中占优,分别占其总生物量的 90.6% 和 57.7%. 其他水库多为枝角类或桡足类等体积较大、摄食能力较强的浮游动物为优势种属(图 4).

表 3 苏南水库硅藻各属优势度水平 (Y)<sup>1)</sup>

Table 3 Degree of dominance (Y) of different genera in Bacillariophyta in reservoirs in the South of Jiangsu Province

水库	小环藻	针杆藻	曲壳藻	直链藻	桥穹藻	舟形藻	异壳藻	冠盘藻	双眉藻
塘马	+++	+	-	-	-	-	-	-	-
吕庄	+	++	+	-	-	-	-	-	-
团结	+	-	-	+++	-	-	-	-	-
赵村	+++	+	+	-	-	-	-	-	-
大坝坊	+	+++	-	-	-	-	-	-	-
前宋	++	+	+	+	-	-	-	-	-
竹林	++	+++	-	-	-	-	-	-	-
鸡笼坝	++	-	+++	-	-	-	-	-	-
方便	+++	+	-	-	-	+	-	-	-
老鸭坝	-	+++	-	+	-	-	-	-	-
北山	+	+++	-	-	-	-	-	-	-
二圣	++	++	-	-	-	-	+	-	-
句容	+++	+	-	+	-	-	-	-	-
中山	++	++	-	-	-	-	-	-	-
油车	+++	-	-	-	-	-	-	-	-
大溪	++	++	-	-	-	-	-	-	-

1) “-”:  $Y < 0.02$ ; “+”:  $0.02 \leq Y < 0.1$ ; “++”:  $0.1 \leq Y < 0.2$ ; “+++”:  $Y \geq 0.2$

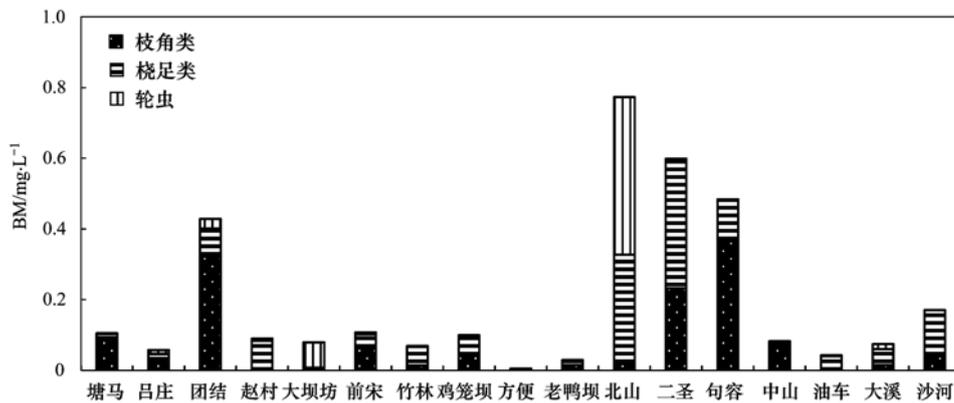


图 4 苏南水库浮游动物组成及生物量

Fig. 4 Composition and biomass of zooplankton in reservoirs in the South of Jiangsu Province

### 3 讨论

#### 3.1 水库营养水平对硅藻及其他浮游植物的影响

由前人研究结果可知,营养盐,尤其是磷元素对淡水水体中藻类生长繁殖以及群落结构演替有着至关重要的作用<sup>[46~48]</sup>. 因此,磷通常为淡水生态系统初级生产力的限制因子<sup>[14]</sup>.

除北山、二圣和大溪水水库外,苏南水库中,硅藻生物量与 DTP 呈指数正相关 ( $P < 0.01$ ),说明该地区影响硅藻生长的主要磷形态为溶解态(图 5). 北山水库硅藻生物量虽高于拟合线,但与该结论不矛盾;二圣水库不但硅藻生物量低,浮游植物总生物量也低,结合浮游动物生物量可知,该水库可能浮游动物食性鱼类的数量控制得较低,因此其对浮游动物的捕食强度不大,进而增强了浮游动物对浮游植

物生物量的控制.

TP 与硅藻的生物量呈负相关,与归一化后的 CHL 显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 与  $BM_{\text{phyto}}$  的相关度尽管不是很强,但二者的变化趋势也很接近:即随着 TP 浓度的升高,  $BM_{\text{phyto}}$  将相应增加,相关度的  $P$  值为 0.8,处于弱显著水平,这表明苏南水库中磷是总藻生物量的关键控制元素. 此外,TP 浓度与绿藻密度显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与蓝藻 BM 显著正相关 ( $P < 0.01$ ). 这都反映出磷对于苏南水库中某些类浮游植物种属的生物量有明显影响. 结合 DTP 与硅藻生物量的关系,说明 TP 的增加并未引起硅藻生物量的相应上升,而主要是其他藻门的繁殖,说明绿藻、蓝藻与硅藻对营养盐(尤其是磷)为竞争关系. 由于体积小等原因,在温度、营养水平较高时,蓝绿藻的生物量通常会超过硅藻. 因此,与春末夏初时

期不同,在夏季高温期,绿藻、蓝藻可能替代硅藻成为优势浮游植物门类,并且 TP 越高的水库将越早出现蓝绿藻替代硅藻的趋势. 因此,对于该地区营养水平较高的水库而言,在春末夏初时期,气温可变性大,绿藻、蓝藻的生物量是需要关注的另一问题.

上述关系表明,在现有的 TP 浓度水平下,苏南水库在春末夏初阶段会出现其它藻门(如蓝藻、绿藻)与硅藻竞争营养盐的情况. 并且,高 TP 浓度会增加水库在该阶段出现蓝藻绿藻大量增殖的风险,由硅藻问题上升为更为严重的蓝藻问题. DTP 是 TP 在水体中的一种存在形式,与颗粒态磷(主要为生物体磷)可以通过生物利用、藻类降解等过程互相转化. 而 DTP 浓度对硅藻生物量又有着显著的促进作用,可知当进一步降低磷特别是溶解态磷在水库中的浓度时,将进一步突出该时期水库硅藻在营养盐竞争上的劣势,从而达到控制硅藻生物量的目的.

在本次水库调查中, TN 与硅藻及其它浮游植物门类的生物量均无明显相关趋势. 由常规水质指标可知, TN 浓度较高,因此 TN 可能不是该地区限制藻类生长的主要元素. 然而,这并不表明苏南水库的富营养化灾害防控中不需要对氮进行控制,反而说明相比磷而言,这些水库的氮污染或者氮本底更高. 从目前的水质状况和治理经验看,尽管磷与硅藻生物量之间的关系更为密切,然而一系列的控制措施也既没有有效控制磷水平,也没有有效控制硅藻生物量,单一磷控制策略的难度很大,如果能够对

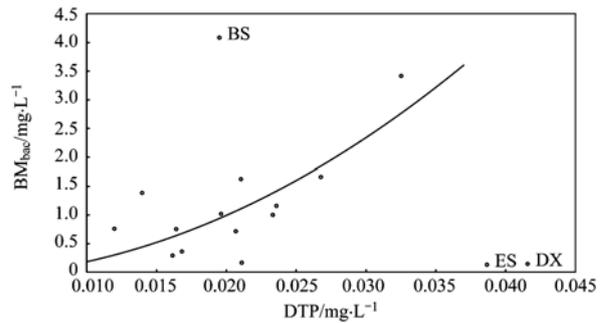


图5 苏南水库 DTP 与  $BM_{bac}$  的关系

Fig. 5 Relation between DTP and  $BM_{bac}$  in reservoirs in the South of Jiangsu Province

氮也进行有效控制,水库硅藻异常增殖的风险势必大大下降. 因此,需要进一步加强该地区密集的农业活动的科学管理,如布置缓冲区、增加植被覆盖率等来吸收和截留多余养分以及减少由雨水冲刷造成的养分流失,降低氮的面源污染.

反映水库综合营养水平的参数 TLI 与  $BM_{phyto}$ 、群落结构紧密相关,并与硅藻生物量间接相关. TLI 与  $BM_{phyto}$ 、蓝藻硅藻生物量之比 ( $BM_{cyano}/BM_{bac}$ ) 均呈显著的指数正相关(图 6,  $P < 0.01$ ). 这表明苏南地区水库中  $BM_{phyto}$  和  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  将随着 TLI 的升高而呈指数上升趋势,并且当 TLI 达到 55.5 时,  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  将达到 50%; 当 TLI 达到 62 时,  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  接近 100%. 该关系进一步佐证了 TP 浓度的增加会提高水库蓝藻替代硅藻的趋势,并且说明苏南水库藻类的控制需要从多种角度,既要控

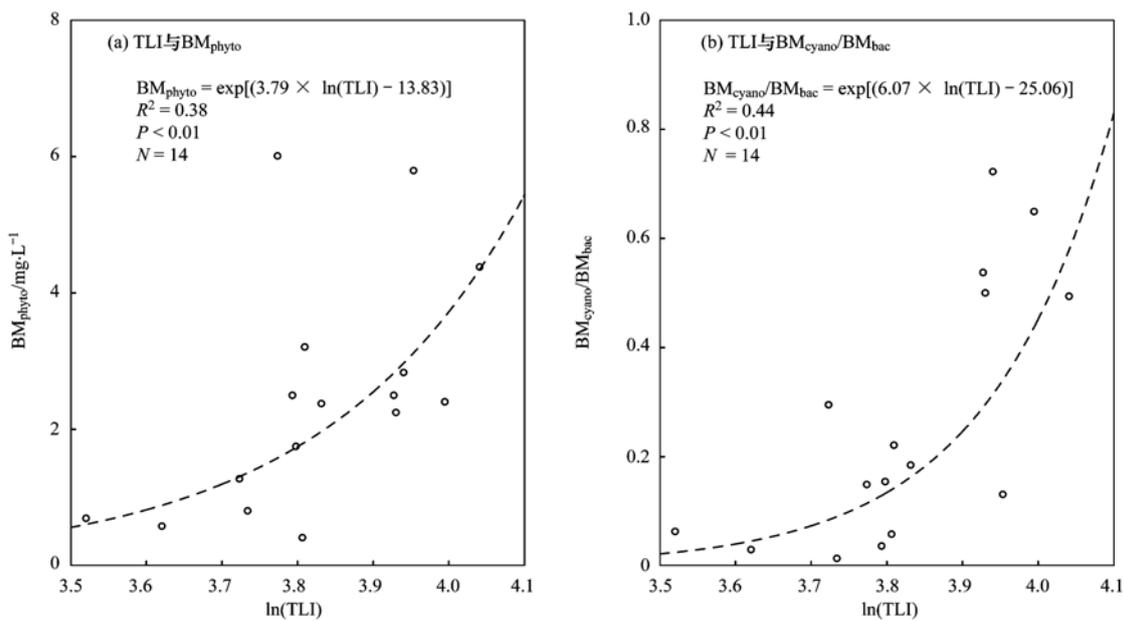


图6 苏南水库 TLI 与  $BM_{phyto}$  及  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  的关系

Fig. 6 Correlation of TLI with  $BM_{phyto}$  and  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  in reservoirs in the South of Jiangsu Province

制 TP,又要降低 TN、高锰酸盐指数等指标浓度. 硅藻占优是该地区水质中营养阶段的典型特征,水库进一步向富营养化发展的话,危害更大的蓝藻将逐步占据优势地位.

### 3.2 水深对硅藻生物量占浮游植物生物量比重 ( $BM_{bac}/BM_{phyto}$ ) 的影响

由图 7 (a)、7 (b) 可知, 苏南水库中  $BM_{phyto}$ 、 $BM_{bac}/BM_{phyto}$  与水体深度均呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 说明硅藻适宜的环境为较深的水库. 考虑到采样时深水水库已出现分层情况, 因此深度越大的水库, 硅藻相对生物量 ( $BM_{bac}/BM_{phyto}$ ) 越大. 同时, 当其他环境因子相近时, 水库深度的增加, 会导致  $BM_{phyto}$  增大, 进而导致硅藻生物量增加. 当水体深度达到约 9m 时,  $BM_{bac}/BM_{phyto}$  将达到 50%. 另外, 由于 TP 浓度的增加会引起浮游植物包括蓝藻生物量的上升, 因此浅水水库的 TP 控制阈值可能无法

达到深水水库相应的保护目标. 不同硅藻属占硅藻生物量的比值与水库深度之间并无显著相关关系 ( $P > 0.05$ ), 说明硅藻并不会随着水体深度的变化而发生优势属和结构的演替, 可能说明在苏南地区水库的深度范围内, 由深度引起的温度差别不足以影响到硅藻整体群落结构的改变.

对于苏南水库另一优势浮游植物门类绿藻而言 [图 7 (c)], 其占浮游植物总 BM 的比值 ( $BM_{chl}/BM_{phyto}$ ) 与水体深度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 表明随着水体深度的增加, 绿藻将被硅藻逐渐取代, 说明绿藻的生长更需要较高的温度和光照条件. 换言之, 若发生硅藻水华, 水库水深越大, 风险越大. 这说明水位控制对硅藻的生物量、水华风险可能都有影响. 另外, 由于在磷利用上绿藻与硅藻呈竞争关系, 深度的作用则为深水水库硅藻在该竞争关系中提供了有利条件.

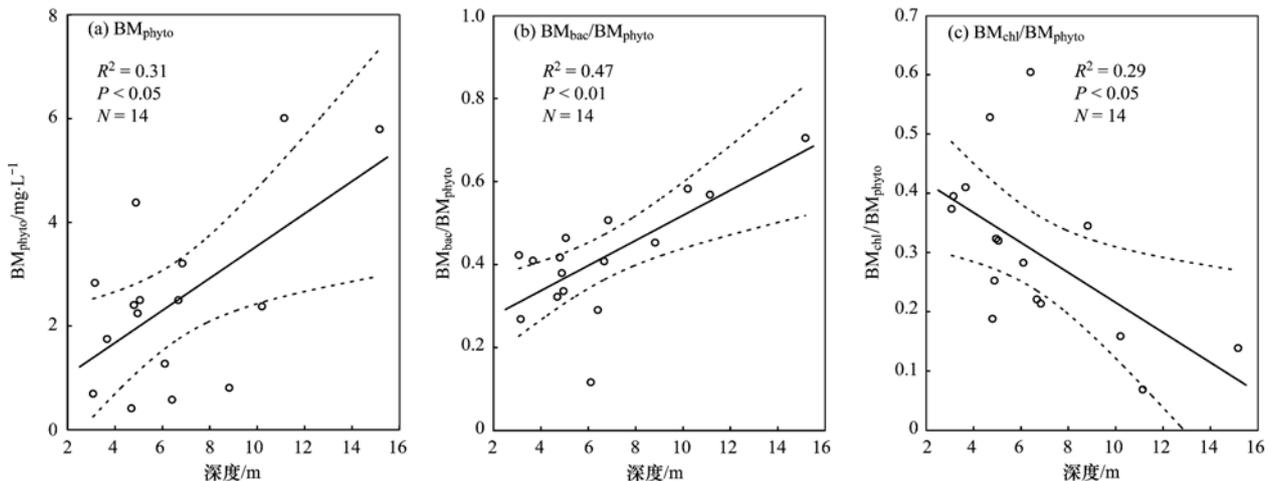


图 7 苏南水库  $BM_{phyto}$ 、 $BM_{bac}/BM_{phyto}$ 、 $BM_{chl}/BM_{phyto}$  与水深的关系及其 95% 置信区间

Fig. 7 Relationship of  $BM_{phyto}$ ,  $BM_{bac}/BM_{phyto}$ ,  $BM_{chl}/BM_{phyto}$  with water depth in reservoirs in the South of Jiangsu Province and its 95% confidence interval

由于相对透明度与底层 DO 呈显著相关关系, 为了预防和控制硅藻水华, 对于深度较大的水库, 需要将 TP 浓度控制到更低水平. 否则, 由于  $BM_{phyto}$  的增加, 会引起水体透明度的显著下降, 从而导致底层缺氧情况的加剧, 进而引起底泥中磷元素的释放, 产生恶性循环.

### 3.3 流域库容比对水库的影响

流域面积与库容之比 ( $A/V$ ) 关系到水库的换水周期, 也与水库接受外来水体的范围大小有关. 流域范围越大, 通常代表更多的营养物质, 特别是在苏南丘陵山区, 以茶果园为主要农业生产,  $A/V$  与 TLI 呈显著正相关 (图 8,  $P < 0.05$ ), 由图 6 可知, 浮游植物总 BM 和  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  将上升; 而  $A/V$  越大, 说明

水的截留时间越短. 水库更多具有河流的特征, 对硅藻而言, 可能生物量并不低. 从调查结果看,  $A/V$  也与 CHL 呈显著正相关. 事实上, 随着流域土地利用方式的合理化安排,  $A/V$  与 TLI 的关系将同样发生变化. 减少因流域面积大而导致的营养盐输入量高的问题, 可以缓解 TLI 与  $A/V$  之间的正相关趋势, 进而减少浮游植物总生物量的增量、延缓  $BM_{cyano}/BM_{bac}$  上升的趋势. 相应地, 春季硅藻也将随着营养盐输入的降低, 缓解其异常增殖的规模, 从而避免出现威胁饮用水安全的事件.

### 3.4 食物链对硅藻的抑制作用

浮游动物在食物链中是浮游植物的摄食者, 因此能够在一定程度上控制浮游植物 BM, 提高水体

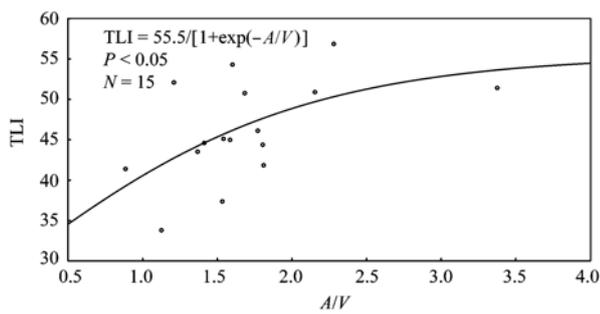


图 8 苏南水库 TLI 与 A/V 的关系

Fig. 8 Relationship between TLI and A/V ratio in reservoirs in the South of Jiangsu Province

透明度,改善水质. 本次水库调查结果显示,当枝角类、桡足类生物量较高时,浮游植物/浮游动物之比较小( $P < 0.05$ ),浮游动物对浮游植物生物量的控制能力就更大. 硅藻与枝角类、桡足类浮游动物之间有着相同的趋势. 总量上看,除二圣水库浮游动物生物量较高,能够有效控制硅藻生物量外,其他水库中浮游动物与硅藻生物量( $BM_{zoo}/BM_{bac}$ )以及浮

游植物生物量之比( $BM_{zoo}/BM_{phyto}$ )较低,摄食作用较为微弱,对硅藻的控制作用还十分有限(图 9). 另外,枝角类的相对生物量与 TP 呈显著负相关( $P < 0.05$ ),而轮虫类占浮游动物总 BM 比重与 TP 呈显著正相关( $P < 0.05$ ),说明水库的污染程度与浮游动物的群落结构、生态功能之间具有较强的相互作用. 当 TP 浓度升高时,可能会改变浮游动物群落结构,轮虫类可能会占据优势,而从体型上而言,轮虫类体积较小,对浮游植物尤其是体积较大的硅藻无有效捕食作用. 因此,轮虫类占总浮游动物比重的上升会直接引起浮游动物对硅藻生物量控制能力的下降,进一步加剧富营养化程度. 张丽彬等<sup>[49]</sup>通过实验表明当  $TN = 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $TP = 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右时,浮游动物的控藻作用最为明显. 因此,对于苏南水库而言,总体上需要进一步削减 TP 的排放,调整渔业管理模式,减少浮游动物食性和草食性鱼类,以提高大型浮游动物生物量,提高浮游动物摄食作用对硅藻异常增殖等生态灾害的控制能力.

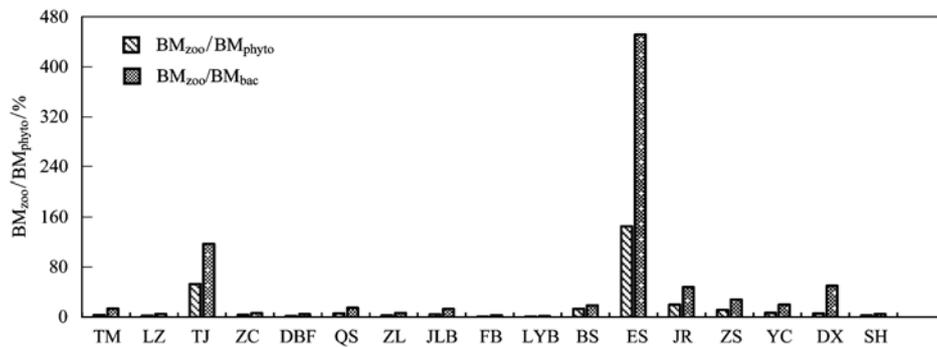


图 9 苏南水库  $BM_{zoo}/BM_{phyto}$  和  $BM_{zoo}/BM_{bac}$  水平

Fig. 9  $BM_{zoo}/BM_{phyto}$  and  $BM_{zoo}/BM_{bac}$  in reservoirs in the South of Jiangsu Province

#### 4 结论

(1) 通过在硅藻灾害高发期的调查发现,苏南地区水库总体处于中营养和中富营养水平,处于硅藻异常增殖适宜的营养范围,因此,普遍存在硅藻异常增殖风险. 结果表明,研究的水库中有 10 座达到轻度硅藻水华水平. 就营养指标上,氮的污染普遍比磷严重,溶解态磷与硅藻生物量的关系更为密切.

(2) 从浮游植物的生物量看,硅藻和绿藻是调查时期苏南水库的主要浮游植物门类,特别是硅藻门中的小环藻、针杆藻、曲壳藻和直链藻属. 这些藻属的生物量大小决定了苏南水库春末夏初浮游植物的生物量大小,是潜在的致灾种属,应当对其生物量变化进行严密监测.

(3) 总体而言,苏南水库春末夏初水库中硅藻

及其他主要藻门生物量的影响因素包括 TLI、DTP 和 TP 浓度等营养盐水平和形态,控制营养盐浓度依然是水库硅藻控制的首要手段. 除此之外,其他影响因素也包括水深、流域面积、库容比等水文特征,可以在今后的工作中继续探索水库硅藻及其他有害藻类与水文特征等因素的关系,从而可以根据水库深度、流域土地利用类型等对水库进行分类,实施针对性的管理和藻华灾害控制手段. 此外,浮游动物中枝角类生物量的高低对硅藻及其它浮游藻类生物量的影响也很大. 另外,硅藻还存在与绿藻、蓝藻的竞争问题. 总之,降低苏南水库硅藻异常增殖等藻类灾害事件的风险,从控制手段上看,可以采取降低入库营养盐负荷、保护流域植被、在春末夏初适当降低水深、降低鱼类对浮游动物的捕食强度等手段.

致谢:浮游植物鉴定由周万平研究员完成,浮游动物鉴定由沈睿杰助理研究员完成,样品采集由王树标工程师协助完成,水样分析由张成英、夏忠工程师、周莉硕士生协助完成,部分采样设备由于洋副研究员提供,水库部分基本数据由溧阳市水文局朱振宇副局长提供,在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Yang J, Yu X Q, Liu L M, *et al.* Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(5): 1432-1442.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 崔扬, 朱广伟, 李慧赟, 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.
- [ 5 ] Jiang M S, Borkman D G, Libby P S, *et al.* Nutrient input and the competition between *Phaeocystis pouchetii* and diatoms in Massachusetts Bay spring bloom [J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, **134**: 29-44.
- [ 6 ] Shiimoto A, Asakuma K, Hoon H D, *et al.* An early spring bloom of large diatoms in the ice-covered Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2012, **92**(1): 29-37.
- [ 7 ] Horn H, Paul L, Horn W, *et al.* Long-term trends in the diatom composition of the spring bloom of a German reservoir: is *Aulacoseira subarctica* favoured by warm winters? [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(12): 2483-2499.
- [ 8 ] 李爽, 韩伟, 于建伟, 等. 水库水中硅藻的预氧化特征及强化混凝控制效果研究 [J]. *城镇供水*, 2011, (5): 69-71, 57.
- [ 9 ] 董君卿. 浅析横山水库硅藻“水华”发生、预防、治理 [J]. *经济师*, 2011, (10): 289-290.
- [ 10 ] 宁修仁, 阮积惠, 史君贤, 等. 西湖硅藻对桡足类浮游动物繁殖的影响 [J]. *东海海洋*, 1998, **16**(1): 25-30.
- [ 11 ] 李捷, 李超伦, 张展, 等. 桡足类与硅藻相互作用的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(9): 1085-1089.
- [ 12 ] 孙莹蓓, 罗激葱, 韦桂峰, 等. 大沙水库浮游植物种类组成及季节性变化 [J]. *资源科学*, 2014, **36**(8): 1732-1738.
- [ 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Willén E. Planktonic diatoms-an ecological review [J]. *Algalogical Studies*, 1991, **62**: 69-106.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 张云, 马徐发, 郭飞飞, 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.
- [ 19 ] 张婷, 李林, 宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 2971-2979.
- [ 20 ] Knoll L B, Hagenbuch E J, Stevens M H, *et al.* Predicting eutrophication status in reservoirs at large spatial scales using landscape and morphometric variables [J]. *Inland Waters*, 2015, **5**(3): 203-214.
- [ 21 ] Jeppesen E, Jensen J P, Søndergaard M, *et al.* Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient [J]. *Freshwater Biology*, 2000, **45**(2): 201-218.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] 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.
- [ 29 ] 李恒鹏, 陈伟民, 杨桂山, 等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例 [J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 785-798.
- [ 30 ] 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.
- [ 31 ] 胡尊乐, 潘杰. 溧阳市饮用水源地安全评价研究 [J]. *江苏水利*, 2011, (3): 44-45.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] 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.
- [ 34 ] 杜霞, 霍元子, 邵留, 等. 上海市农村典型河道水体富营养化调查与评价 [J]. *水生态学杂志*, 2011, **32**(3): 9-15.

- [35] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.
- [36] The R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing [EB/OL]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>, 2015-08-14.
- [37] Wilkinson G N, Rogers C E. Symbolic description of factorial models for analysis of variance[J]. Applied Statistics, 1973, **22**(3): 392-399.
- [38] Fleming-Lehtinen V, Laamanen M. Long-term changes in Secchi depth and the role of phytoplankton in explaining light attenuation in the Baltic Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, **102-103**: 1-10.
- [39] Armengol J, Caputo L, Comerma M, *et al.* Sau reservoir's light climate: relationships between Secchi depth and light extinction coefficient[J]. Limnetica, 2003, **22**(1-2): 195-210.
- [40] 陈晓梅, 姜营. 水体类旅游资源可亲性评价因子分析[J]. 桂林航天工业高等专科学校学报, 2011, **16**(2): 192-194.
- [41] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [42] 庞燕, 项頌, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质关系研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4005-4012.
- [43] 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 等. 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3697-3705.
- [44] 朱广伟, 陈伟民, 李恒鹏, 等. 天目湖沙河水库水质对流域开发与保护的响应[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 809-817.
- [45] 郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义[J]. 水资源保护, 2006, **22**(5): 45-47, 80.
- [46] Maileht K, Nöges T, Nöges P, *et al.* Water colour, phosphorus and alkalinity are the major determinants of the dominant phytoplankton species in European lakes [J]. Hydrobiologia, 2013, **704**(1): 115-126.
- [47] Rangel L M, Silva L H S, Rosa P, *et al.* Phytoplankton biomass is mainly controlled by hydrology and phosphorus concentrations in tropical hydroelectric reservoirs [J]. Hydrobiologia, 2012, **693**(1): 13-28.
- [48] 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 等. 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3238-3247.
- [49] 张丽彬, 王启山, 丁丽丽, 等. 富营养化水体中浮游动物对藻类的控制作用[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(1): 64-67.

## CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC .....	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry .....	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou City .....	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM <sub>2.5</sub> in Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region .....	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources .....	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing .....	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing .....	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO <sub>2</sub> Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis .....	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication .....	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region .....	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers .....	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin .....	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region .....	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China .....	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network .....	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake .....	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors .....	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province .....	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China .....	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou .....	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River .....	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing .....	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province .....	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example .....	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co <sup>2+</sup> Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process .....	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile .....	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process .....	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System .....	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters .....	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment .....	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge .....	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor .....	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain .....	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring .....	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N <sub>2</sub> O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism .....	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China .....	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates .....	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang .....	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil .....	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic .....	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil .....	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i> .....	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source .....	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting .....	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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  
欧阳自远 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5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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@reces. 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@reces. 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	中国国际图书贸易总公司 (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