

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性

孙祥¹, 朱广伟², 杨文斌^{1*}, 朱梦圆², 许海², 国超旋², 余丽², 史浩辰³, 杭心语³, 徐涤非³

(1. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003; 2. 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; 3. 南京师范大学附属中学, 南京 210003)

摘要: 为揭示水库浮游植物群落结构的时空异质性, 以江苏省溧阳市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连续监测结果, 分析了水库河流区、过渡区及湖泊区浮游植物群落结构的季节差异及影响因素。结果表明, 空间上营养盐、浊度和悬浮颗粒物等关键水质指标及浮游植物叶绿素 a 含量均呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的现象, 透明度呈现河流区 < 过渡区 < 湖泊区的现象, 其中河流区的各环境因子与过渡区和湖泊区的空间差异显著 (ANOVA, $P < 0.05$), 而过渡区与湖泊区之间仅在透明度、浊度、悬浮颗粒物等物理参数方面差异显著; 同样, 浮游植物生物量上也呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的现象, 其中河流区与过渡区、湖泊区之间差异显著 (ANOVA, $P < 0.05$), 而过渡区与湖泊区之间则无显著性差异; 但在浮游植物的优势属方面, 河流区、过渡区、湖泊区基本一致, 仅隐藻门生物量在河流区、过渡区、湖泊区具有显著性差异 (ANOVA, $P < 0.05$), 呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的特征。不同季节之间浮游植物群落结构差异较大: 生物量在夏季最高, 冬季最低; 优势属在春季以针杆藻 (*Synedra*)、小环藻 (*Cyclotella*)、隐藻 (*Cryptomonas*) 和曲壳藻 (*Achnanthes*) 为主, 夏季以针杆藻、隐藻、尖头藻 (*Raphidiopsis*)、席藻 (*Phormidium*) 为主, 秋季以隐藻、针杆藻、尖头藻、束丝藻 (*Aphanizomenon*) 为主, 冬季以隐藻、针杆藻、曲壳藻和小环藻为主; 其中针杆藻、隐藻为全年优势属。统计分析表明, 水温、总磷、透明度是浮游植物时空差异的主要影响因子。研究表明, 对于沙河水库这种换水周期为 4 个月的大 (II) 型水库, 虽然浮游植物总生物量在空间上有显著性差异, 但群落组成上仅隐藻属的空间差异显著, 多数浮游植物群落结构在空间分布差异较小, 当浮游植物群落结构调查时可以适当减少观测点位, 提高采样频次, 以提高水库环境监测的样品代表性。

关键词: 水库; 浮游植物; 时空差异; 硅藻; 蓝藻; 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4160-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704161

Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China

SUN Xiang¹, ZHU Guang-wei², YANG Wen-bin^{1*}, ZHU Meng-yuan², XU Hai², GUO Chao-xuan², YU Li², SHI Hao-chen³, HANG Xin-yu³, XU Di-fei³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. High School Affiliated to Nanjing Normal University, Nanjing 210003, China)

Abstract: Monthly investigations of the phytoplankton community and the associated environmental drivers during the past eight years in the Shahe Reservoir, Jiangsu Province, China revealed the spatial and temporal variations of phytoplankton and the associated driving factors in the reservoir. The results show that the concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorous (TP), turbidity (Turb), suspended solids (SS), and chlorophyll-a (CHL) were the highest in the upstream tributaries and the lowest in the downstream-linked reservoir. In contrast, the highest Secchi disk depth (SDD) was recorded in the Shahe Reservoir and that the lowest in the upstream tributaries. Significant differences in water quality indices were recorded among the upstream tributaries, the transition region, and the downstream-linked reservoir area (ANOVA, $P < 0.05$). The biomass of phytoplankton was the highest in the upstream tributaries and the lowest in the reservoir. The highest biomass of phytoplankton was recorded in the summer and the lowest in the winter. *Synedra*, *Cyclotella*, *Cryptomonas*, and *Achnanthes* were the dominant genera in the spring; *Synedra*, *Cryptomonas*, *Raphidiopsis*, and *Phormidium* were dominant in the summer; *Cryptomonas*, *Synedra*, *Raphidiopsis*, and *Aphanizomenon* were dominant in the autumn; and *Cryptomonas*, *Synedra*, *Achnanthes*, and *Cyclotella* were dominant in the winter. *Synedra* and *Cryptomonas* were the dominant genera throughout the year. The correlation analysis shows that TP, water temperature, and SDD were the most important driving factors for the spatial and temporal variations of phytoplankton. Notable spatial differences were recorded for *Cryptomonas*, while minimal variations were recorded for the remaining species. A smaller number sampling sites and a higher sampling frequency are

收稿日期: 2017-04-15; 修订日期: 2017-05-13

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFG91980); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405201); 国家自然科学基金项目(41671494); 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: ywb1968@mail.ahnu.edu.cn

needed to characterize the phytoplankton community in the Shahe Reservoir.

Key words: reservoir; phytoplankton; spatial-temporal variation; diatom; cyanobacteria; eutrophication

在水库水体生态系统中浮游植物群落作为整个生产过程的初级生产者和基础环节, 它们的种类和数量变化与周围环境要素密切相关, 能对水库水体生态环境的变化做出最直接的响应^[1, 2]. 浮游植物的生长随温度、光照、营养盐及水文条件等的改变而呈现一定的时空变化^[3~5], 也会因外源性营养盐负荷的季节性差异而存在时空差异性^[6]. 韩博平提出, 在研究水库浮游植物群落组成时, 水平方向上常常划分为河流区、过渡区和湖泊区^[7], 不同区的浮游植物群落结构可能不同. 比如, 白石水库浮游植物密度呈现河流区 > 湖泊区 > 过渡区^[8]; 丹江口水库的丹库和汉库浮游植物群落也截然不同^[9].

影响水库浮游植物群落结构空间差异的因素有氮磷营养盐、气象因子、水文状况等. 如青草沙水库浮游植物优势种的密度与水温、溶解氧、总氮、总磷有关^[10]; 水温和总磷也是影响剑潭水库浮游植物群落结构分布的最主要因子^[11]; 江苏横山水库浮游植物密度与总磷、水温、透明度、溶解氧密切相关, 其中与总磷、水温、透明度呈正相关关系, 与溶解氧呈负相关关系^[12]; 丹江口水库浮游植物群落结构季节差异的主要相关因子是电导率^[8]; 吉大水库浮游植物变化受由降雨引起的营养盐效应影响^[13]; 黄廷林等^[14]对山东枣庄市周村水库研究表明, 热分层、降雨量和水温是影响浮游植物功能类群时空演替的主要环境因子; Beaver 等^[15]在研究美国密苏里河中游 6 座水库浮游生物演替规律时, 发现水库水力停留时间越短, 硅藻的生物量就越高; Rangel 等^[16]研究巴西水库时, 发现水文过程和磷浓度控制着浮游植物的生物量.

然而, 目前关于水库浮游植物的群落结构及其生物量的时空变化的研究, 主要考虑全湖浮游植物的群落结构变化及全湖营养盐水平理化因子对其生长的季节演替的影响, 对于水库不同水文分区的浮游植物群落结构之间的差异性关注较少. 这方面的认知不足, 使得人们开展水库调查时对采样布点方案确定存在困惑. 本文选取中国东南丘陵地区大(Ⅱ)型水库天目湖沙河水库为研究对象, 基于 2009~2016 年逐月浮游植物群落结构及相关环境因子的连续监测, 试图分析浮游植物群落结构的时空分布差异特征, 特别是在水库河流区、过渡区及湖泊区之间的浮游植物群落结构差异, 以期水库

浮游植物调查及生态系统评估方案制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 沙河水库简介

沙河水库是江苏省溧阳市天目湖两个大(Ⅱ)型水库之一, 位于江苏省溧阳市南部丘陵地区, 地处东经 119°25', 北纬 31°18'. 湖泊水面面积为 11.6 km², 集水面积 152 km², 平均水深 7 m, 最大水深 14 m, 换水周期约为 4 个月, 最大蓄水量 1.1 亿 m³. 沙河水库流域年均降雨量 1 000~1 600 mm, 年均温度 16~24℃. 沙河水库呈南北向的狭长形, 南端为河流入湖区, 北端为大坝^[17], 南北端相距 6.5 km. 沙河水库是国家 4A 级旅游景区, 也是溧阳市的主要饮用水水源地, 承载着该市 65 万人的饮用水供给, 富营养化是近年来该水库关注的主要环境问题^[18~20].

1.2 采样点布设

样品的采集与测定方法见文献[21, 22]. 采样点布设如图 1, 由南向北共设 10 个采样点, 按照韩博平在水库水平方向上的区域划分原则, 把 TM8、TM9、TM10 这 3 个点定为河流区, TM4、TM5、TM6、TM7 等 4 个点定为过渡区, TM1、TM2、TM3 等 3 个点定为湖泊区. 沙河水库的上游河道分别为中田河、下宋河和平桥河, 其中平桥河是沙河水库的主要来水河道. 为进一步分析河流区水质指标受上游河道来水的影响程度, 于 2017 年 4 月 27 日在 TM10 上游平桥河方向增加 3 个采样点, 分别为 TM11、TM12 和 TM13.

1.3 样品采集及测定

2009~2016 年逐月进行监测, 8 年共 96 次的采样数据, 采样时间在每月中下旬进行. 水样采集使用 5 L 的采水器取表层 0.5 m 水样, 现场进行叶绿素 a(CHL)、悬浮颗粒物(SS)的过滤, 过滤叶绿素的滤后水和原水进行冷藏后带回实验室进行分析. 用采水器采集 0.5 m 深水样, 取 1 L 水样用鲁戈试剂固定, 用于浮游植物群落结构的鉴定. 现场用美国黄石仪器公司 YSI 6600V2 型多参数水质分析仪测定水温(WT)、浊度等指标, 水温的剖面监测一般取 1 m 深度间隔. 用直径 30 cm 赛氏盘测定水体透明度(SDD). 实验室测定水质指标, 总氮

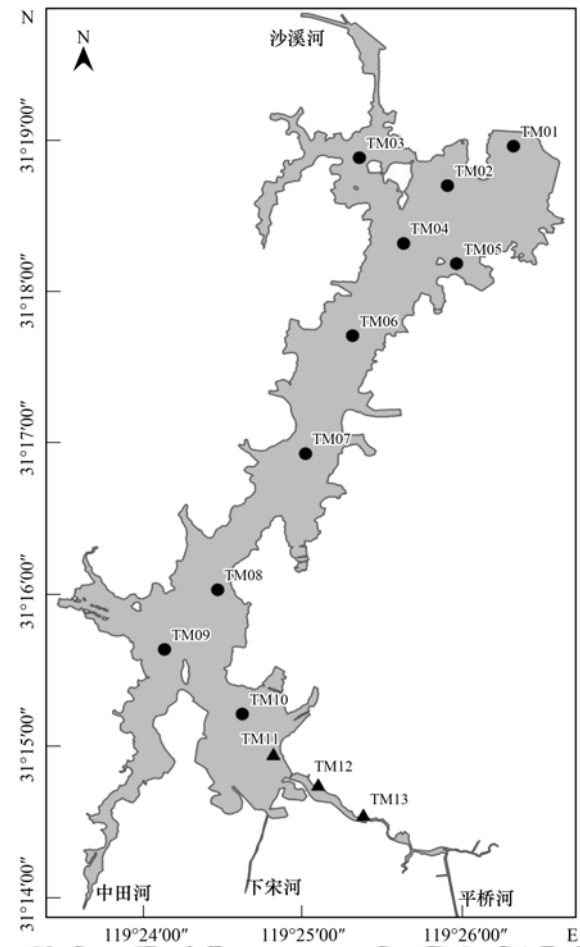


图 1 天目湖沙河水库逐月监测点位示意
Fig. 1 Sampling sites for water quality analysis
in the Shahe Reservoir

(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后紫外分光光度法测定; 滤后水体中的硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)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; 叶绿素 a 测定时, 先将浓缩了浮游植物的滤膜在 -20°C 下冷冻 24 h 以上, 然后经加热的乙醇研磨提取、分光光度法测定^[23]. SS 采用 Whatman GF/F 滤膜过滤, 105°C 烘干重量法, 然后采用 550°C 马弗炉灼烧, 剩余灰分为无机颗粒物(ISS)重量. 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, 首先获得细胞密度($\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$), 在各属细胞密度的基础上, 根据体积-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[24].

1.4 数据处理方法

数据图表绘制及主要统计参数计算由 Excel 2010 和 SPSS 16.0 软件完成. 浮游植物与环境因子

的相关关系用 Pearson 相关系数表达(P), 各区域的差异性用单因素方差进行分析. 浮游植物优势种根据每个种的优势度值(Y)来确定:

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

式中, n_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为出现频率. Y 值大于 0.02 种类为优势种.

2 结果与分析

2.1 水质时空差异

营养盐、浊度、悬浮颗粒物和叶绿素均呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的现象, 透明度呈现河流区 < 过渡区 < 湖泊区的现象, 其中各环境因子在河流区与过渡区、湖泊区均有显著性的差异 (ANOVA, $P < 0.05$), 而过渡区与湖泊区仅透明度、浊度、悬浮颗粒物具有显著性差异 (ANOVA, $P < 0.05$); 根据 GB 3838-2002, 沙河水库的各区域的 TN 浓度均超过 III 类水限定值 ($1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 其中河流区区域 TN 浓度均值为 $1.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 甚至超过 IV 类水限定值 ($1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 各区域 TP 浓度均超过 II 类水限定值 ($0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 其中河流区区域 TP 浓度为 $0.046 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 接近 III 类水限定值 ($0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 透明度是反映水体水质的直观表现, 其对水体生物的生存条件、活动范围均有较大的影响^[25, 26]. 河流区水体透明度较低, 平均值低于 1 m, 湖泊区透明度相对较高. 由于水体受外源影响较大, 加之水浅, 风浪扰动能引起底泥悬浮, 因而在河流区 SS 含量较高, 湖泊区最低. SS 与 SDD 整体上表现出相反的变化趋势, 说明 SS 是影响 SDD 的主要因素之一. ISS、Turb 与 SS 在空间上分布趋于一致. CHL 浓度呈现河流区、过渡区、湖泊区递减趋势(表 1).

表 1 沙河水库主要水质指标平均值 ($n=96$)

Table 1 Water quality parameters in the Shahe Reservoir			
指标	河流区	过渡区	湖泊区
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.54 ± 0.79	1.23 ± 0.50	1.18 ± 0.47
DTN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.26 ± 0.81	1.03 ± 0.50	1.00 ± 0.45
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.046 ± 0.020	0.031 ± 0.010	0.029 ± 0.010
DTP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.018 ± 0.010	0.014 ± 0.010	0.015 ± 0.010
$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.879 ± 0.790	0.698 ± 0.520	0.664 ± 0.470
SS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	13.60 ± 8.90	7.27 ± 3.07	6.14 ± 2.53
ISS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	8.52 ± 8.12	3.74 ± 2.84	2.96 ± 2.22
CHL/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	20.90 ± 15.21	13.80 ± 11.19	12.40 ± 10.35
SDD/m	0.81 ± 0.30	1.16 ± 0.39	1.30 ± 0.43
Turb/NTU	11.32 ± 11.03	4.97 ± 3.64	3.59 ± 3.09

2.2 河道来水影响

2017 年 4 月 27 日对沙河水库的加密加点采样

结果显示, 从上游河道区 TM13 样点到下游水库河流区 TM8 样点的氮磷营养盐和叶绿素含量逐渐降低. 水库上游河道区 TM13 样点的 TN 含量为 $2.099 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 含量为 $0.098 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CHL 含量达到 $71.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 平桥河作为水库上游来水的河流之一, 其流速较为缓慢, 水质氮磷营养盐和叶绿素含量较高. 而作为沙河水库河流区的 TM10 样点, 亦即平桥河下游河口区为水库历年来

水质最差的区域, 氮磷营养盐和叶绿素含量均为水库最高值, 但其相对 TM13 样点而言, 氮磷营养盐和叶绿素含量均较低, TN 含量为 TM13 的 79%, TP 含量为 TM13 的 64%, CHL 含量为 TM13 的 40%, 说明水库河流区氮磷营养盐和叶绿素含量主要受上游河道来水的影响, 因此水库中河流区的氮磷营养盐和叶绿素含量相对过渡区和湖泊区较高(图 2).

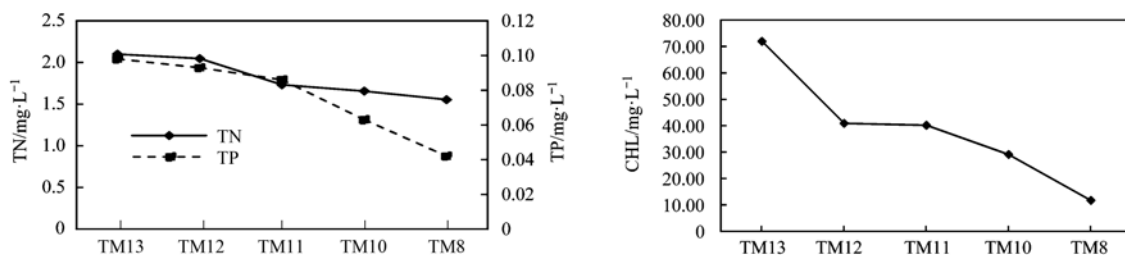


图 2 河流区与河道水质指标变化

Fig. 2 Water quality variations across the transect of the Pingqiao river mouth

2.3 浮游植物群落结构

2009 ~ 2016 年 96 次的调查中浮游植物共鉴定出 7 门 68 属. 其中绿藻门 28 属, 占总属类数的 41%, 硅藻门 15 属, 占总属类数的 22%, 蓝藻门 13 属, 占总属类数的 19%, 裸藻门、甲藻门、隐藻门和金藻门属类数分别为 4、4、2、2 属, 分别占总属类数的 6%、6%、3%、3%. 调查期间, 沙河水库浮游植物种类组成为绿藻-硅藻-蓝藻型.

从生物量上看, 8 年来 96 次测定的全湖浮游植物总生物量平均值为 $8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中硅藻门生物量最多, 为 $3.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占总生物量的 46%; 隐藻门次之, 生物量为 $1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占总生物量的 20%; 蓝藻门的生物量为 $1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占总生物量的 20%, 其它门生物量总和为 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占总生物量的 14%. 河流区、过渡区和湖泊区浮游植物生物量组成与全湖基本趋于一致, 硅藻门、蓝藻门和隐藻门在生物量上占优势地位(图 3).

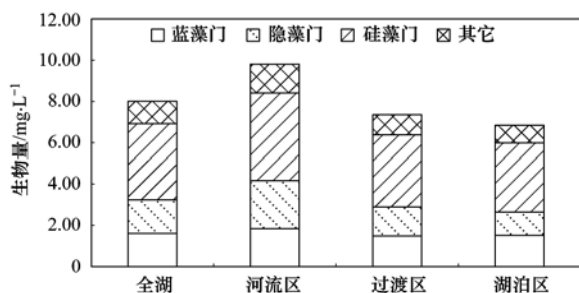


图 3 沙河水库 2009 ~ 2016 年各区域浮游植物组成

Fig. 3 Composition of phytoplankton in each area from 2009 to 2016 in the Shahe Reservoir

2.4 浮游植物优势属分布

对全湖浮游植物 7 门 68 属进行优势度的计算, 得出优势属分别为硅藻门的针杆藻属 (*Synedra*)、小环藻属 (*Cyclotella*)、直链藻属 (*Melosira*) 和曲壳藻属 (*Achnanthes*), 隐藻门的隐藻属 (*Cryptomonas*), 蓝藻门的束丝藻属 (*Aphanizomenon*)、席藻属 (*Phormidium*)、尖头藻属 (*Raphidiopsis*) 等 8 个属, 其中针杆藻为全年最优势属.

季节分布显示, 春季主要优势属为针杆藻、隐藻、小环藻和曲壳藻; 夏季主要优势属有针杆藻、隐藻、尖头藻和席藻; 秋季主要优势属有针杆藻、隐藻、尖头藻和束丝藻; 冬季主要优势属有隐藻、针杆藻、曲壳藻和小环藻. 空间分布上, 河流区、过渡区和湖泊区的优势属种类基本一致, 但随着季节的变化, 各优势属在空间上也有一定的变化. 其中蓝藻门的束丝藻在冬春季节各区域优势度均小于 0.02, 夏秋季节才成为优势属; 而蓝藻门的尖头藻春季时在河流区已经成为优势属, 夏季为过渡区和湖泊区优势属, 冬季是湖泊区优势属; 席藻冬季为过渡区优势属; 直链藻在夏季各区域均不是优势属 ($Y < 0.02$), 而在秋季是湖泊区的优势属(表 2).

2.5 浮游植物生物量的时空变化

沙河水库 2009 ~ 2016 年浮游植物生物量呈明显的季节性变化, 浮游植物总生物量在夏季达到最高值, 为 $14.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 春季和秋季次之, 分别为 $7.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 冬季最低为 2.93

表 2 沙河水库浮游植物优势属及其优势度

Table 2 Dominant genera and the abundance of phytoplankton in the Sheha Reservoir

季节	区域	束丝藻	席藻	尖头藻	隐藻	小环藻	直链藻	针杆藻	曲壳藻
春季	河流区	0.008	0.047	0.020	0.217	0.124	0.023	0.285	0.097
春季	过渡区	0.011	0.064	0.018	0.115	0.161	0.025	0.348	0.106
春季	湖泊区	0.012	0.067	0.015	0.101	0.179	0.022	0.364	0.107
夏季	河流区	0.062	0.073	0.080	0.168	0.054	0.002	0.391	0.036
夏季	过渡区	0.078	0.092	0.101	0.143	0.074	0.002	0.336	0.052
夏季	湖泊区	0.079	0.098	0.114	0.129	0.072	0.002	0.321	0.064
秋季	河流区	0.082	0.065	0.113	0.301	0.059	0.010	0.149	0.034
秋季	过渡区	0.080	0.056	0.088	0.316	0.075	0.017	0.107	0.030
秋季	湖泊区	0.090	0.067	0.103	0.262	0.086	0.021	0.111	0.033
冬季	河流区	0.007	0.017	0.015	0.333	0.083	0.034	0.126	0.039
冬季	过渡区	0.015	0.026	0.018	0.228	0.096	0.068	0.187	0.097
冬季	湖泊区	0.016	0.016	0.021	0.192	0.098	0.066	0.200	0.131

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 针杆藻、隐藻、束丝藻、席藻及尖头藻生物量均在夏季达到其最高水平, 生物量分别为 5.28、2.22、1.08、1.29 及 1.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 生物量均在冬季处于最低水平, 分别为 0.50、0.75、0.04、0.07 及 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而曲壳藻、小环藻、直链藻生物量在春季均达到最高, 分别为 0.74、1.10、0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中曲壳藻在秋季处于最低水平生物量为 0.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 小环藻在冬季处于最低水平为 0.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 直链藻在夏季处于最低水平为

0.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从优势属相对比例来看, 针杆藻在春夏季占比较高, 隐藻在秋冬季占比较高. 春季到夏季的转变, 春季占比较高的曲壳藻、小环藻在夏季占比明显降低, 而束丝藻、席藻、尖头藻等蓝藻门的优势属占比明显提升; 夏季到秋季, 针杆藻占比由 40% 降低到 16%, 隐藻占比由 17% 增加到 37%, 其余各藻属占比变化不大; 秋季到冬季, 束丝藻、席藻、尖头藻等蓝藻门各属占比明显降低, 而硅藻门的曲壳藻、小环藻、针杆藻占比均有所增加(图 4).

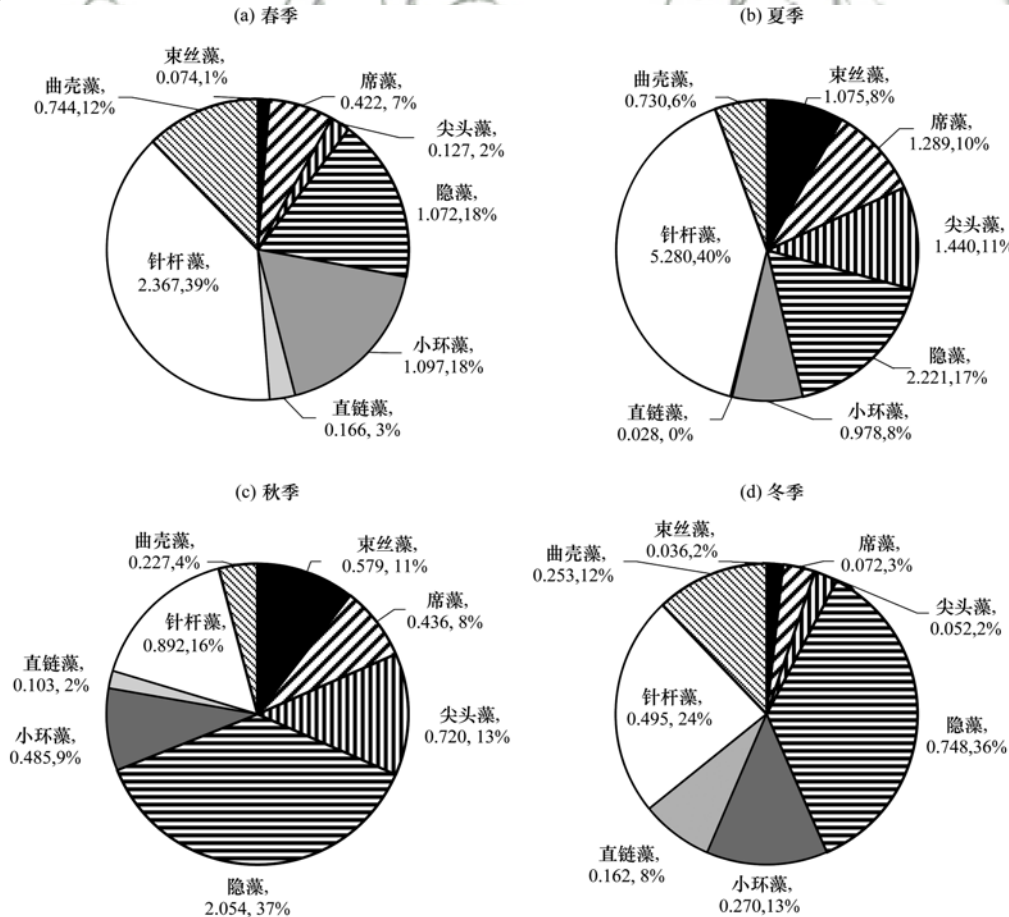


图 4 不同季节各优势属生物量及其占比

Fig. 4 Biomass of each dominant genus and its proportion in different seasons

在水库的河流区、过渡区和湖泊区之间，河流区浮游植物总生物量明显高于过渡区及湖泊区，平均值为 $9.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，湖泊区浮游植物总生物量最低，平均值为 $6.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，且各区域差异性显著 (ANOVA, $P < 0.05$)。对各个季节的主要优势属的空间分布进行分析，春季仅隐藻生物量在空间分布上呈现河流区 $>$ 过渡区 $>$ 湖泊区的现象，且各区域分布有显著性的差异，其余各藻生物量在空间分布上基本趋于一致；夏季隐藻与针杆藻在空间分布上呈现河流区 $>$ 过渡区 $>$ 湖泊区的现象，且隐藻在各区域分布有显著性的差异，其余各藻生物量在空间分布上基本趋于一致；秋季仅隐藻生物量在空间分布上呈现河流区 $>$ 过渡区 $>$ 湖泊区的现象，且各区域分布有显著性的差异，其余各藻生物量在空间分布上基本趋于一致；冬季隐藻与针杆藻在空间分布上呈现河流区 $>$ 过渡区 $>$ 湖泊区的现象，且隐藻在各区域分布有显著性的差异，其余各藻生物量在空间分布上基本趋于一致。

象，且隐藻在各区域分布有显著性的差异，其余各藻生物量在空间分布上差异不显著；秋季除直链藻外，其余各藻在空间分布上均呈现河流区 $>$ 过渡区 $>$ 湖泊区的现象，且河流区明显高于过渡区与湖泊区，其中隐藻在各区域分布上有显著性的差异；冬季隐藻生物量呈现河流区 $>$ 过渡区 $>$ 湖泊区的现象，在各区域分布上有显著性的差异，小环藻生物量在各区域基本一致，其余各藻均呈现河流区 $<$ 过渡区 $<$ 湖泊区的现象，且河流区明显低于过渡区与湖泊区 (图 5)。

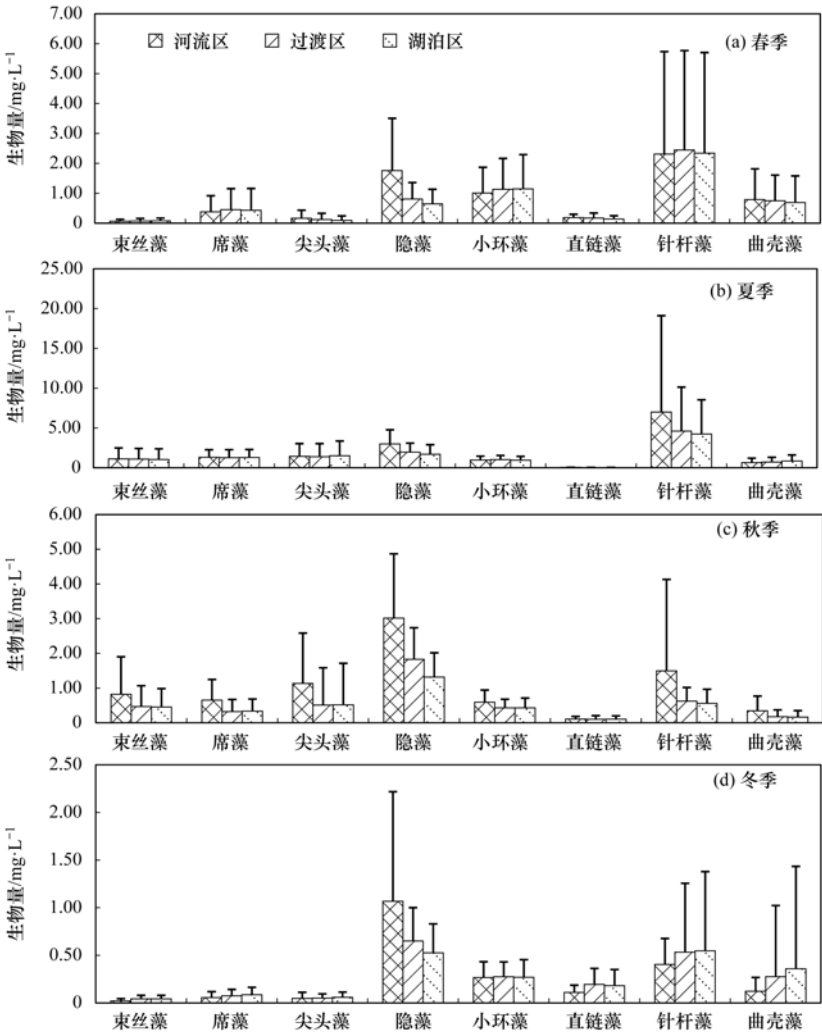


图 5 不同季节优势属生物量的空间变化

Fig. 5 Spatial variations in dominant genera in different seasons

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构季节变化的控制因素

温度是浮游植物季节性变化的主要控制因素^[27]。根据浮游植物与水温的相关分析(表 3)，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 (ANOVA, $P < 0.01$)，因此水温的

波动对藻类生物量的影响很大。沙河水库水温四季变化明显，冬春季节水温较低，夏秋季节温度较高。藻类生物量普遍在冬春季节较低，在夏秋季节相对较高。其中蓝藻门的尖头藻、束丝藻、席藻在夏季较高温度期间，快速增殖，生物量增加明显，主要是因为蓝藻的最适温度在 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ ^[28]；硅藻门的针杆藻、曲壳藻、小环藻生物量在春夏季均较

高,其中针杆藻生物量在夏季达到最高,但其峰值明显早于蓝藻的生物量峰值,主要是因为针杆藻的生长也对温度很敏感^[29].而直链藻与水温呈极显著负相关关系,在温度较低的冬春季节生物量相对

较高.隐藻与水温呈极显著正相关关系,并且隐藻的生态位较宽,对水体的适应性较强,因此随着温度的变化而正向地变化.故浮游植物的季节变化主要控制因素是温度的季节性变化.

表 3 沙河水库藻类生物量与环境因子之间的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between phytoplankton biomass and environmental conditions

项目	TN /mg·L ⁻¹	DTN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	DTP /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹	ISS /mg·L ⁻¹	WT /℃	SDD /m
总量	-0.033	-0.229 **	0.346 **	0.182 **	-0.264 **	0.252 **	-0.169 **	0.654 **	0.066
针杆藻	-0.008	-0.158 **	0.082	0.001	-0.209 **	0.174 **	-0.141 *	0.403 **	0.037
隐藻	-0.095	-0.195 **	0.239 **	-0.045	0.058	0.401 **	0.119 *	0.344 **	-0.130 *
尖头藻	-0.215 **	-0.401 **	0.400 **	0.235 **	-0.425 **	0.228 **	-0.128 *	0.555 **	-0.031
小环藻	0.093	-0.018	0.27 **	0.266 **	-0.159 **	-0.009	-0.251 **	0.539 **	0.141 *
束丝藻	-0.289 **	-0.418 **	0.211 **	0.055	-0.342 **	0.168 **	-0.186 **	0.557 **	0.037
席藻	-0.156 **	-0.335 **	0.327 **	0.169 **	-0.285 **	0.173 **	-0.238 **	0.667 **	0.054
曲壳藻	0.050	-0.069	0.118 **	0.120 *	-0.202 **	0.021	-0.282 **	0.377 **	0.059
直链藻	-0.030	0.030	-0.037	-0.155 **	0.055	0.299 **	0.409 **	-0.408 **	0.170 **

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

3.2 浮游植物群落结构空间异质性的控制因素

沙河水库河流区、过渡区、湖泊区水质的差异是比较显著的.沙河水库水质受河流区河道来水及周围农耕土地施肥的影响,水质氮磷含量较高^[30].入库河流从流域带来大量的底泥沙,泥沙同时携带大量的营养盐,特别是颗粒态的磷,导致河流区水体氮磷营养盐含量较高;过渡区相对河流区既宽且深,流速减缓,这时少量的淤泥、黏土和细颗粒有机物不断沉积,透明度提高,水体好转.到了湖泊区,是全湖最宽最深的区域,流速最慢,水力停留时间加长,小粒径的颗粒物也不断沉积^[7].从而形成沙河水库从河流区到湖泊区氮磷含量逐渐降低的趋势,其中氮磷含量多年平均在河流区与过渡区、湖泊区分布具有显著性差异(ANOVA, $P < 0.05$);对于过渡区与湖泊区而言,氮磷营养盐在过渡区含量略高于湖泊区,但过渡区与湖泊区氮磷营养盐分布无显著性差异.

沙河水库浮游植物生物量在空间上也有一定的差异,呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的现象.其原因既与水体氮磷营养盐的空间分布有关,也与水体流速、透明度等水库的水文和物理特征有关.洪松等^[31]对中国的二十多条主要河流水生生物群落结构特征的研究发现,植物指示种河流区、过渡区、湖泊区的演替与该流域水质河流区、过渡区、湖泊区的变化情况相吻合.本研究结果为沙河水库水质河流区、过渡区到湖泊区逐渐变好,浮游植物的生物量从河流区、过渡区到湖泊区逐渐减少,这与洪松等研究结果一致.

营养盐是影响浮游植物总生物量在空间分布差

异的主要因素之一.从表 3 可以看出,反映水体营养盐水平的溶解性总磷含量与硅藻门的小环藻、曲壳藻及蓝藻门的尖头藻、席藻都呈显著正相关关系.物理因素可能对隐藻生物量变化的影响更大:多年平均及各个季节的隐藻生物量在河流区、过渡区、湖泊区分布均有显著性差异,主要与隐藻的生长特征密切相关.隐藻的细胞膜和光合色素较为特殊,在各种营养盐状态下均能占优势^[32],隐藻对弱光有很好的忍受能力,鞭毛使隐藻能够在水层中向营养盐浓度较高的区域迁移以满足自身的生长需求^[33].另外,隐藻既能进行自养生长,也能进行异养生长,因此水体中的高有机质有利于隐藻的生长^[34].在河流区、过渡区、湖泊区水体中,外源性的有机质从河流区、过渡区到湖泊区逐渐降低,对隐藻空间分布产生显著影响.对于沙河水库的最主要优势属针杆藻,生物量在夏秋季节有河流区 > 过渡区 > 湖泊区的现象,但统计检验不显著,这可能是由于夏秋季针杆藻主要受水温的作用,营养盐在河流区、过渡区、湖泊区的差异还不足以引起生物量的明显变化;而针杆藻属生物量在冬季呈现湖泊区 > 过渡区 > 河流区的现象,可能与冬季深水区水温 and 透明度较高有关,更有利于针杆藻生长的缘故,同样,曲壳藻、直链藻等硅藻优势属生物量在冬季也表现为湖泊区 > 过渡区 > 河流区的现象.直链藻与温度呈极显著负相关关系,故在冬季直链藻生物量达到最高,且由于其与水体透明度呈极显著正相关关系,因而在空间分布上呈现河流区 < 过渡区 < 湖泊区的现象.

水体透明度即太阳光辐射穿入水体的深度,透

明度越大说明水体受到光照条件影响越大。然而, 透明度也是对水体水质的反映, 对水体中浮游植物及悬浮颗粒物的直观表现。相关分析表明, 针杆藻、隐藻、束丝藻、席藻、尖头藻及直链藻均与悬浮颗粒物呈极显著正相关关系, 说明其导致水体中悬浮颗粒物的有机颗粒物的增加; 除隐藻和直链藻外, 针杆藻、束丝藻、席藻、尖头藻、曲壳藻及小环藻均与无机悬浮物呈显著负相关关系, 与透明度正相关, 说明这些属的藻类在水体浑浊情况下已经受到了无机颗粒物遮光效应的明显影响。但隐藻与透明度呈极显著负相关关系, 与悬浮物呈极显著正相关关系, 这说明河流来水中丰富的有机质对隐藻生长的促进作用效果大于悬浮物的遮光效果。这与刘霞等^[34]研究的高悬浮质浓度和丰富有机质的生境特点更有利于隐藻的生长相一致。

4 结论

(1) 综合 8 a 的逐月监测数据表明, 沙河水库浮游植物生物量及优势属具有一定时空差异: 浮游植物生物量夏季最高, 冬季最低, 且河流区 > 过渡区 > 湖泊区; 针杆藻、隐藻为沙河水库常年优势属, 冬春季节优势属为硅藻-隐藻型, 夏秋季节为硅藻-隐藻-蓝藻型; 浮游植物组成上仅隐藻门生物量呈现河流区 > 过渡区 > 湖泊区的现象, 且各区域差异性显著相关分析表明, 水温是影响浮游植物季节变化的主要因素, 而营养盐和悬浮物等则对浮游植物的空间变化产生重要影响。

(2) 本研究表明, 对于沙河水库这种换水周期约为 4 个月的大 (II) 型水库而言, 虽然浮游植物总生物量在空间上有显著性差异, 但群落组成上仅隐藻属生物量具有明显的空间分异, 多数浮游植物群落结构在空间上差异较小, 因此建议在开展浮游植物群落结构调查时, 可以适当减少点位, 提高采样频次, 以获得更好的数据代表性。

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, 中国科学院南京地理与湖泊研究所周永强博士生在写作方面给予指导, 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] 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.
- [2] 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): 112-117. 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): 112-117.
- [3] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [4] Figueredo C C, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **445**(1-3): 165-174.
- [5] Nogueira M G. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Paranapanema River), São Paulo, Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **431**(2-3): 115-128.
- [6] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. *生态学报*, 2003, **23**(6): 1101-1108. Lin Q Q, Hu R, Duan S S, *et al.* Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(6): 1101-1108.
- [7] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(2): 151-160. Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(2): 151-160.
- [8] 李沂軒, 鞠哲, 赵文, 等. 白石水库浮游植物的群落结构研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2016, **31**(4): 404-409. Li Y X, Ju Z, Zhao W, *et al.* Community structure of phytoplankton in Baishi Reservoir [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2016, **31**(4): 404-409.
- [9] 谭香, 夏小玲, 程晓莉, 等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2875-2882. Tan X, Xia X L, Cheng X L, *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2875-2882.
- [10] 严文逸, 王绍祥, 顾静, 等. 青草沙水库浮游藻类群落组成及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, **26**(1): 75-84. Yan W Y, Wang S X, Gu J, *et al.* Composition of planktonic algae community and its relationship with environmental factors in Qingcaosha Reservoir [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, **26**(1): 75-84.
- [11] 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.
- [12] 张正德, 吴世萍, 许亚群, 等. 江苏横山水库浮游植物群落结构的动态变化[J]. *水生态学杂志*, 2016, **37**(1): 53-61. Zhang Z D, Wu S P, Xu Y Q, *et al.* Phytoplankton community structure and dynamics in Hengshan Reservoir, Jiangsu Province [J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(1): 53-61.
- [13] 刘蕾, 肖利娟, 韩博平, 等. 一座南亚热带小型贫营养水库

- 浮游植物群落结构及季节变化[J]. 生态科学, 2008, **27**(4): 217-221.
- Liu L, Xiao L J, Han B P, *et al.* Dynamics and structure of the phytoplankton community of a small oligotrophic reservoir in southern China[J]. Ecological Science, 2008, **27**(4): 217-221.
- [14] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏, 等. 温带季节性分层水库浮游植物功能类群的时空演替[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1157-1166.
- Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P, *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in a temperate seasonally stratified reservoir [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1157-1166.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 朱广伟, 赵林林, 陈伟民, 等. 低水位运行对天目湖水库水质与生态的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(4): 87-94.
- Zhu G W, Zhao L L, Chen W M, *et al.* Effects of low water level on water quality and ecology of Tianmuhu Reservoir, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, **27**(4): 87-94.
- [18] 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.
- [19] 贺冉冉, 高永霞, 王芳, 等. 天目湖水体与沉积物中营养盐时空分布及成因[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(2): 353-360.
- He R R, Gao Y X, Wang F, *et al.* Spatial-temporal distribution of nutrients and its causation in Tianmu Lake, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(2): 353-360.
- [20] 贺冉冉, 罗澈葱, 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 & Rural Environment, 2010, **26**(4): 344-349.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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): 195-210.
- [27] 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**(Z1): 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**(Z1): 159-165.
- [28] 陈开宁, 周万平, 鲍传和, 等. 浮游植物对湖泊水体生态重建的响应——以太湖五里湖大型围隔示范工程为例[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 359-366.
- Chen K N, Zhou W P, Bao C H, *et al.* Response of phytoplankton to ecological restoration in eutrophic lakes: an experimental large enclosure in Wuli Lake, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(4): 359-366.
- [29] 朱广伟, 金颖薇, 任杰, 等. 太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 9-21.
- Zhu G W, Jin Y W, Ren J, *et al.* Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(1): 9-21.
- [30] 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.
- Li H P, Chen W M, Yang G S, *et al.* Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: A case study of Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir area [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 785-798.
- [31] 洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨[J]. 水生生物学报, 2002, **26**(3): 295-305.
- Hong S, Chen J S. Structure characteristics of aquatic community from the main rivers in China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, **26**(3): 295-305.
- [32] Negro A I, De Hoyos C, Vega J C. Phytoplankton structure and dynamics in Lake Sanabria and Valparaíso reservoir (NW Spain) [J]. Hydrobiologia, 2000, **424**(1): 25-37.
- [33] Albay M, Akcaalan R. Factors influencing the phytoplankton steady state assemblages in a drinking-water reservoir (Ömerli reservoir, Istanbul)[J]. Hydrobiologia, 2003, **502**(1-3): 85-95.
- [34] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖北部隐藻生物量时空动态[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 142-148.
- Liu X, Lu X H, Chen Y W. Temporal and spatial dynamics of Cryptophytes biomass in the north of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(1): 142-148.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)