

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

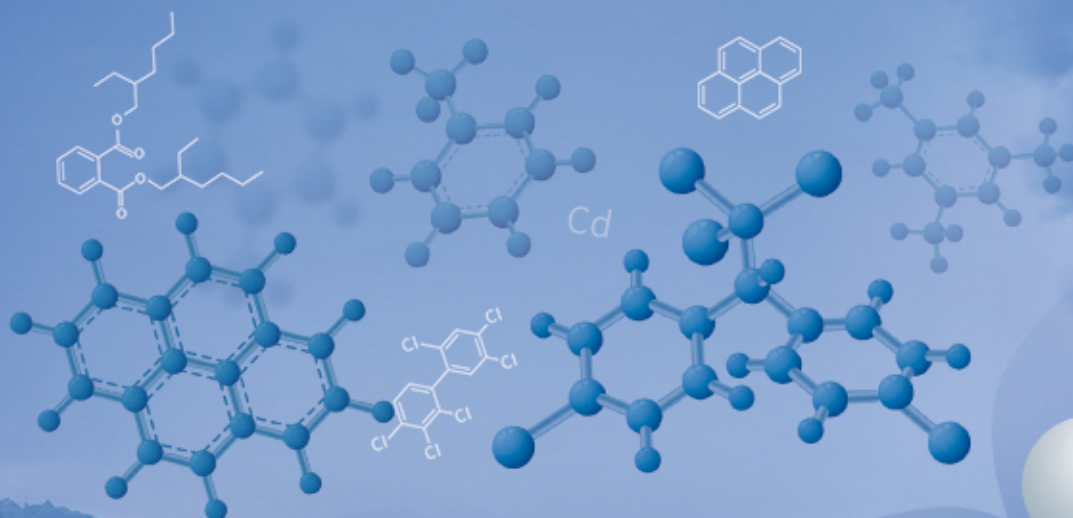
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素

杨文斌¹, 段文秀^{1,2}, 崔扬³, 朱广伟^{2*}, 吴天浩², 许海², 朱梦圆²

(1. 安徽师范大学生态与环境学院, 芜湖 241002; 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. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 长春 130021)

摘要: 为构建更为合理的个性化水库水生态安全评价指标体系, 以我国东南低山丘陵地区水源型水库天目湖沙河水库为例, 基于 2010~2020 年逐月水生态监测数据, 分析了水库水生态安全状况长期变化特征及影响因素, 提出了以满足沙河水库水生态服务功能为目标的生态安全评价方法。结果表明, 季节上, 夏秋季 SD 相对较低, 而总磷 (TP)、浮游植物叶绿素 a (Chl-a)、高锰酸盐指数和蓝藻生物量 (BM_c) 相对较高; 空间上, 不同区域的水体透明度 (SD) 存在显著差异 ($P < 0.05$), 多年均值呈现河流区 < 过渡区 < 湖泊区的现象, 其他指标均呈现出河流区较过渡区和湖泊区高的现象; 垂向上, 5~9 月随热分层出现, 许多指标出现分层, 其中异味物质 2-甲基异莰醇 (MIB) 和 Chl-a 在水深 4 m 处出现最大值, 硅藻生物量 (BM_b) 和 BM_c 最大值分别在水深 2 m 和 0.5 m 处出现。基于水生态指标的变化特征认识, 应充分考虑水库水生态安全的时空差异性, 将水生态安全风险较高的春夏季作为评价期, 以 Chl-a 为核心指标, 结合 SD 和 MIB 等指标, 通过建立关键指标与其他指标的相关关系, 构建了沙河水库水生态安全评价体系; 评价结果表明, 沙河水库 10 年来水生态安全状况整体优良, 但年际波动较大, 不同区域的得分差异大, 对于存在热分层的区域应采取季节性分 3 层采样调查数据进行评估。本研究表明在湖库水生态安全管理中选取个性化方案监测评估的必要性; 总磷偏高和藻类疯长引发的水体透明度下降和异味物质含量升高是影响亚热带地区水库生态服务功能的主要因素, 年际间较大尺度的水文气象条件变化给水库水生态安全带来较大不确定性。

关键词: 水库; 水源地; 水生态; 安全评价; 指标体系; 叶绿素 a (Chl-a)

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4739-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101125

Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China

YANG Wen-bin¹, DUAN Wen-xiu^{1,2}, CUI Yang³, ZHU Guang-wei^{2*}, WU Tian-hao², XU Hai², ZHU Meng-yuan²

(1. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting Group, Changchun 130021, China)

Abstract: Monthly datasets of ecological indicators from 2010 to 2020 in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China, were examined to reveal the long-term variations in water ecological security and its driving factors. The results of Secchi disk depth (SD) measurements revealed significantly spatial variation ($P < 0.05$) within the reservoir. The highest SD was recorded in the downstream-linked reservoir, and the lowest SD was recorded in the upstream tributaries. In contrast, the values of other water ecological indicators were higher in the upstream tributaries than in the transition region and the downstream-linked reservoir area. In summer and autumn, the SD was low, while the concentrations of total phosphorus (TP), chlorophyll a (Chl-a), the permanganate index, and cyanobacterial biomass (BM_c) were high. During the thermal stratification period from May to September, the concentrations of 2-methylisoborneol (MIB) and Chl-a were highest at a depth of 4 m, while diatom biomass (BM_b) and BM_c reached their maximum at depths of 2 m and 0.5 m, respectively. Therefore, spatial and temporal variations should be fully considered when evaluating aquatic ecological security. Focusing on spring and summer, when the risk of water ecological security was high, Chl-a combined with SD and MIB along with their correlation with other water quality indexes, was used to evaluate and optimize the ecological security of Shahe Reservoir. The evaluation results showed that the aquatic ecological security of the reservoir was excellent over the last 10 years; however, annual fluctuations have been large and the evaluation scores were spatially variable. While seasonal sampling strategies focusing on three layers depths are economical and reliable for lake regions with thermal stratification, our results indicate that tailored monitoring may be required to determine the aquatic ecological security of lakes and reservoirs. In Shahe Reservoir, the decrease in the SD and the increase in MIB caused by high TP and algal blooms were the most important drivers of ecological service function in the reservoir. Furthermore, hydrometeorological factors may also play important roles in the aquatic ecological security of reservoirs.

Key words: reservoir; drinking water source; aquatic ecology; safety evaluation; indicators; chlorophyll a (Chl-a)

在全球水资源形势日益严峻的背景下, 水库逐渐成为我国主要大城市的饮用水水源地。然而, 我国近年来的一些重要水库出现了透明度下降和藻类季节性异常增殖等生态学问题, 威胁着水库的供水安全^[1-4]。科学评价水库的水生态安全状况, 分析引发水库生态质量下降的影响因素, 对于水源地型水库的安全保障意义重大。

我国是个水库大国, 气候和地形多样, 不同地区的水库水生态背景差异大^[5], 同一水库不同库区和

不同季节的水生态状况也不相同。如新安江水库上游水质明显劣于下游水质, 春夏季水质劣于秋冬^[6]; 金泽水库的入库口水质较出库口差, 冬季水质最差^[7]。因此, 在诊断水库生态安全及其成因时,

收稿日期: 2021-01-15; 修订日期: 2021-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41830757, 42077161); 中国科学院野外站联盟项目 (KFJ-SW-YW036); 溧阳市饮用水水源地保护治理工作领导小组办公室委托项目

作者简介: 杨文斌 (1968~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为湖泊水环境修复, E-mail: ywb1968@mail.ahnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

应充分考虑水库的地理背景及水库生态环境质量的时空差异性。

天目湖沙河水库地处我国东南低山丘陵地区,降雨丰沛,四季分明,流域人类活动强烈,具有典型的区域代表性。2000 年以来随着天目湖旅游业和农业的快速发展,沙河水库水质呈现恶化趋势,水体透明度下降和 2-甲基异莰醇超标,影响到供水安全^[8]。因此,为保障沙河水库水环境安全,学者们从天目湖沙河水库水质演变及富营养化状况^[9,10]、水库流域保护^[11,12]、水质及浮游植物群落结构的时空异质性^[13,14]和水库热分层变化对水质的影响^[15]等方面开展了深入系统地研究。然而关于沙河水库水生态安全的长期变化特征及定量评估研究仍然十分有限。

湖库生态安全评价常用方法包括综合指数法、层次分析法、模糊综合评价法等,而评价体系主要是在联合国经济合作开发署(OECD)提出的压力-状态-响应(P-S-R)框架模型的基础上确立的^[16~20]。但是基于该框架的评估体系在指标选取时过于追求综合性和广覆盖面,因而忽视了指标间客观上易于存在的相关关系,且将这些相关度较高的指标进行加权求和,缺乏科学依据^[21]。对于水库水环境质量的评估主要的参考是地表水环境质量标准(GB 3838-2002)^[22],由于生态安全评价是针对某类或某个具体生态系统开展,因此,在评价方法、评价体系、评价标准和评价时段的确定等方面必须充分了解该类生态系统的特征,因地制宜地制定科学合理的生态安全评价体系和监测方案,进而针对具体水库的个性,实行“一库一策”的水库治理和管理^[23,24]。

为此,在前期研究中^[25],作者根据江苏省水源地形水库的水质调查数据及水源地形水库面临的主要水生态安全问题,选取了 MIB、Chl-a 和 BM_c 等 11 项指标,运用层次分析法建立起一个由目标层(A 层)、亚目标层(B 层)、因素层(C 层)和指标层(D 层)这 4 个层次构成的水源地形水库水生态安全评价体系。由于其评价体系中各因子的权重主要是根据专家经验法赋予的,依据数据来源为夏季一次的采样数据,具有一定的主观性。本文在该方法的基础上,利用天目湖沙河水库 2010~2020 年的水生态指标长期监测资料,分析水库水生态指标的多年时空变化特征,探讨影响水库生态服务功能的关键因素,尝试构建了该水库的水生态安全评价指标体系,提出了针对该区域、该类型水源地形水库生态安全状况监测布点的建议,以期科学保护该类型水源地形水库的水生态安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 沙河水库概况

天目湖沙河水库位于江苏省溧阳市南部(31°18'N, 119°25'E),集水面积 152 km²,水域面积 12 km²,平均水深 7 m,最大水深 14 m^[26],最大蓄水量 1.1 亿 m³,是苏南丘陵山区最大的水库之一。水库呈南北向的狭长形,南端为河流入湖区,北端为大坝^[27]。沙河水库地处北亚热带季风气候区^[28],多年平均气温 16.7℃,最低气温零下 6.5℃。沙河水库也是国家 5A 级风景区,溧阳市 75 万人口的饮用水水源地。近 20 年来,沙河水库受水体透明度下降和藻类季节性异常增值等富营养化问题困扰^[29]。溧阳市人民政府高度重视水库的水环境保护,设立专门的水源地保护治理工作领导小组办公室精心组织,从流域到库体,全方位实施生态环境保护工程,力图打造东南丘陵山区水库水源地保护的典型案例。

1.2 采样点布设

采样点的布设如图 1。在水库的主流方向上,自上游至下游共设置 8 个采样点,即上游 3 个点(TM08、TM09 和 TM10),中游 3 个点(TM04、TM06 和 TM07),下游 2 个点(TM01 和 TM02),其中 TM01 点靠近水库大坝。

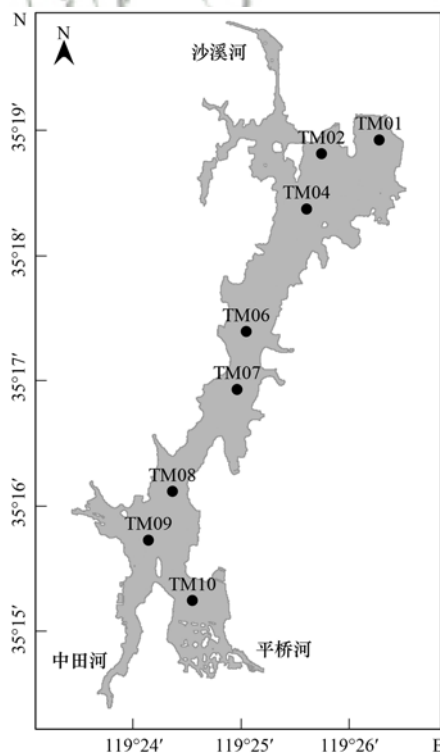


图 1 天目湖沙河水库逐月监测点位示意

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

1.3 样品采集及测定

样品的采集与测定方法见文献[30]。2010~2019 年,每月采集各样点表层 0.5 m 水样进行水质

和水生态指标的测定分析。10 a 共 120 套数据,采样时间为每月中下旬。为了解水库水质的垂向变化特征,于 2019 年 9 月至 2020 年 8 月对年平均水深为 11 m 左右的 TM01 样点进行分层取样:表层水样在水下 0.5 m 处采集,然后从水下 2 m 开始,隔 2 m 分层取样;在 2020 年 5~8 月对 TM06 样点也分层取样,采样深度分别为水下 0.5、2、4、6 和 8 m。水样采集后,现场用 Whatan GF/F 滤膜进行过滤,滤膜上物质冷藏后用于浮游植物叶绿素 a (Chl-a) 测定,滤后水和原水立刻冷藏后当天送回实验室进行分析。另取 1 L 水样,用鲁戈试剂固定,用于浮游植物群落结构鉴定。在对 TM01 和 TM06 样点进行分层采样的同时,量取 25 mL 分层水样,置于装有 2.65 g 氯化钠的棕色玻璃顶空瓶中,旋紧瓶盖密封后摇匀,冷藏,带回实验室用于异味物质 2-甲基异莰醇 (MIB) 的测定。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) 和溶解氧 (DO) 等指标,并测定水体的水温剖面。用直径 20 cm 赛氏黑白盘测定水体透明度 (SD)。

水体总氮 (TN, 原水) 采用过硫酸钾消解,紫外分光光度法 (波长 210 nm) 测定;总磷 (TP) 采用过硫酸钾消解,钼锑抗显色分光光度法 (波长 700 nm) 测定^[31];叶绿素 a 测定时,先将浓缩了浮游植物的滤膜在 -20℃ 下冷冻 24 h 以上,然后采用热乙醇提取,分光光度法 (波长 665 nm、750 nm) 测定;高锰酸盐指数采用氧化还原滴定法测定^[32]。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,并结合经验公式估算浮游植物生物量 (BM , $mg \cdot L^{-1}$),特别是其中的蓝藻生物量 (BM_c , $mg \cdot L^{-1}$) 和硅藻生物量 (BM_b , $mg \cdot L^{-1}$)^[33]。异味物质 2-甲基异莰醇 (MIB) 采取固相微萃取气相色谱-质谱联用 (SPME-GCMS) 法分析^[34],仪器型号为 Agilent 7890-5975C。萃取条件:65℃ 顶空萃取 30 min;起始温度 60℃,15℃·min⁻¹ 升至 220℃ 维持 2 min;进样口温度为 260℃ 不分流进样。

1.4 水位与植被覆盖数据

通过 2010~2019 年由溧阳市水利局沙河水库管理处提供的逐日水位数据,计算出逐月水位平均值及水位变幅比 (RV),用于衡量水库水量的运行情况,具体方法见文献[25]。水库 2010~2019 年的植被覆盖状况来自中国科学数据中心地理空间数据云查询的春季 (4 月) Landsat 遥感影像数据,经过转换、裁剪和大气校正等操作后,计算得到的研究区归一化植被指数 (NDVI) 表征^[35]。

1.5 数据处理方法

数据图表绘制及统计分析主要由 Excel 2019、

Origin 2018、SPSS 24.0 和 ArcGIS 10.8 等统计和绘图软件完成;各区域的差异性用单因素方差进行分析,Chl-a、MIB 和 SD 与各水生态指标的相关性用 Pearson 相关系数表达 (P)。

2 结果与分析

2.1 水生态指标的时空差异

通过沙河水库 8 个点位 10a 的水生态指标的调查数据,分析水库不同区域的水生态安全状况以及季节差异 (图 2),其中各区域水生态指标呈现出一定的空间差异及明显的季节差异。

空间上,不同区域的 SD 均存在显著差异 ($P < 0.05$),SD 多年均值呈现上游 (0.84 m) < 中游 (1.14 m) < 下游 (1.34 m) 的现象。DO 和 BM_b 仅上游和下游有显著的差异 ($P < 0.05$),TP、TN、Chl-a 和高锰酸盐指数在上游与中游和下游均有显著差异 ($P < 0.05$),各指标多年均值均呈现出上游 (TM08、TM09 和 TM10) > 中游 (TM04、TM06 和 TM07) > 下游 (TM01、TM02) 的现象,2010~2019 年沙河水库上游、中游和下游 DO 多年均值分别为 10.15、9.85 和 9.65 $mg \cdot L^{-1}$, BM_b 多年均值分别为 4.77、3.53 和 3.42 $mg \cdot L^{-1}$,TP 多年均值分别为 0.048、0.035 和 0.030 $mg \cdot L^{-1}$,TN 多年平均值分别为 1.34、1.19 和 1.12 $mg \cdot L^{-1}$,Chl-a 多年均值分别为 20.62、14.30 和 12.38 $\mu g \cdot L^{-1}$,高锰酸盐指数多年均值分别为 3.19、2.78 和 2.71 $mg \cdot L^{-1}$ 。各区域 BM_c 差异不显著,但多年均值也呈现出上游 (1.85 $mg \cdot L^{-1}$) 较中游和下游 (1.49 $mg \cdot L^{-1}$ 和 1.51 $mg \cdot L^{-1}$) 高的现象。位于水库同一区域的各点位各水生态指标基本无显著差异 ($P > 0.05$),如中游 (TM04、TM06 和 TM07) 和下游 (TM01 和 TM02);位于上游的 3 个点中,仅 TM08 和 TM10 夏季的高锰酸盐指数和 TP 两个指标上存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

季节分布显示,各水生态安全指标在水库的 3 个区域均呈现出随季节变化而变化的规律。冬春季 SD 和 DO 显著高于夏秋季 ($P < 0.05$);冬季 TP 浓度显著低于其他 3 个季节 ($P < 0.05$);冬春季 TN 浓度高于夏秋季,但不显著 ($P > 0.1$);Chl-a、高锰酸盐指数和 BM_c 均呈现出夏秋季显著高于冬春季的现象 ($P < 0.05$);春夏季节 BM_b 显著高于秋冬季 ($P < 0.05$)。根据上述沙河水库 8 个点位为期 10 a 的水生态指标的调查和差异性分析结果,以及韩博平在水库水平方向上的区域划分原则^[5],可将位于上游的 TM08、TM09 和 TM10 这 3 个点定为河流区,位于中游的 TM04、TM06 和 TM07 这 3 个点定为过渡区,位于下游的 TM01 和 TM02 定为湖泊区,

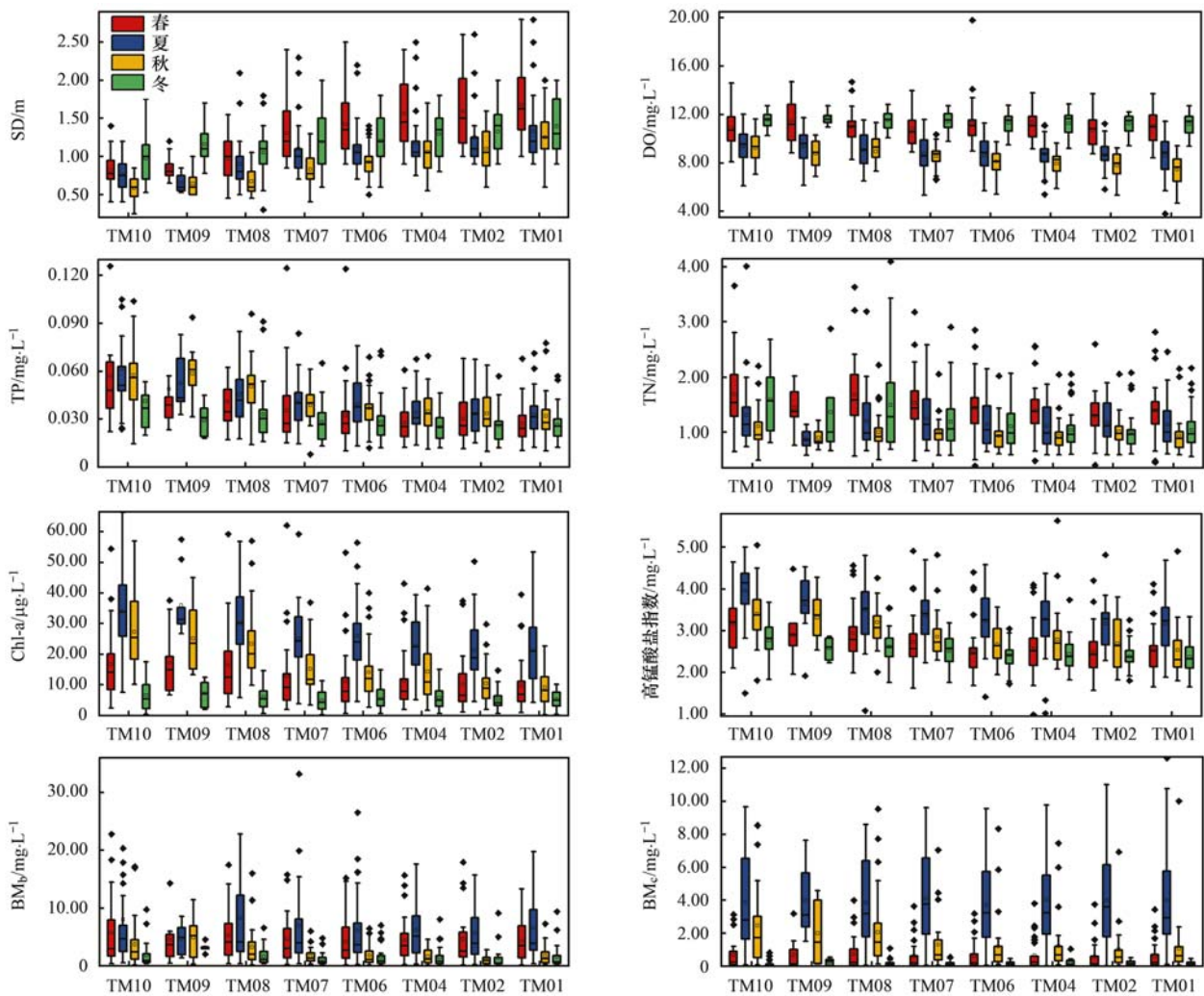


图2 沙河水库水生态指标时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal variations in aquatic ecological indicators in Shahe Reservoir

这一结果与孙祥等^[14]的划分结果一致。

2.2 水生态指标的垂向变化

2019年9月至2020年8月大坝区域(TM01)垂向水质变化如图3。结果表明,沙河水库各水生态指标均呈现出一定的季节性分层现象。MIB浓度从3月(6层均值为 $1.26 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)开始上升,至5月达到峰值(6层均值为 $22.29 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) [图3(a)]。5月不同水深的MIB浓度均超过 $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,并在水下4 m处MIB浓度达到全年最高值为 $31.29 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。5月MIB表、底层浓度差为 $7.98 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,呈现出分层现象。

DO在5~9月呈现出明显的分层现象,并在5月水下2 m处取得最大值 $12.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图3(b)],与水体热分层呈现出相似的季节性变化规律 [图3(c)],说明水体热分层是DO在垂向上发生变化的主要诱因^[12]。每年10月至次年4月,水温表底差变幅为 $0.2 \sim 1.2^\circ\text{C}$,热分层消失,整个水柱处于混合状态,因此整个垂向DO都维持在 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。5月之后,随着气温的升高,水体逐渐出现分

层现象,垂向溶解氧传递受阻,底层出现缺氧现象且长期维持,直至10月表层水温降低到一定程度,热分层消失,底层缺氧才消失。

从图3(d)和3(e)可以看出,TN和TP随水深的变化不显著,但都呈现出一定的季节变化,在热分层稳定的9月,均在水下6 m处出现最大值,分别为 $1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.071 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这可能是由于垂直水温分层的存在,一定程度上会“阻断”营养盐向上的输送,加上外来的营养盐受“异重流”等作用的影响,在水面下一定深度会形成一个营养盐质量浓度的高值^[36]。不同的是,2019年9月至2020年6月,TN除11月和4月出现小幅上升(6层均值分别为 $0.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)外,整体呈下降趋势,6月降至最低值(6层均值为 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);2020年夏季流域性大暴雨,7月和8月TN才呈上升趋势,8月达到全年最高值(6层均值为 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。这可能是夏季暴雨冲刷大量含氮物质进入水库所致。而总磷在2019年9月至2020年8月呈波动下降趋势,但在11月和5月出现了两次峰值

(6 层均值为 $0.055 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。李恒鹏等^[11]对沙河水库流域不同用地类型磷的排放强度研究表明,总磷的输出强度与地表覆盖度有关,即地表覆盖度越低总磷的输出强度越大。因此总磷的两次峰值均出现与春秋季节农耕活动频繁,植被覆盖度较低有关。

如图 3(f) 所示,总体上高锰酸盐指数的变化不大,6 层均值在 7 月最高,为 $3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2 月最低为 $1.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最大值在 7 月水下 2 m 处取得为 $3.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相关研究表明有机颗粒物是水体中高锰酸盐指数的主要贡献者^[12]。

夏季(5~8 月)沙河水库在 6 m 左右深度形成温跃层,表底层温差在 $6.1 \sim 11.1^\circ\text{C}$ 之间[图 3(c)]。Chl-a 也在 5~8 月表现出明显的分层现象,表底层差值为 $15.65 \sim 26.64 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,并在 5 月水下 4 m 处取得最大值 $36.86 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 3(g)],且温跃层上下 Chl-a 的差值可达 $20.70 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,说明温度

分层对藻类的垂向分布产生较大的影响。

对于不同的浮游植物,由于其对生存资源(如光照和营养盐等)的喜好不同,其适宜生长的季节,水体深度也有所不同。 BM_b 呈现出明显的季节变化特征,其峰值出现在 5 月水深 2 m 处,为 $12.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 3(h)]。如图 3(i) 所示, BM_c 也呈现出一定的季节变化规律,在 8 月表层(0.5 m 左右)取得最大值 $5.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。硅藻和蓝藻生物量在峰值期均呈现出分层现象,而稳定的热分层更有利于蓝藻门的生长繁殖^[15]。

2.3 Chl-a 与其他水质指标的关系

自然水体中常见的氮和磷浓度对水生生物和人体没有直接的毒性效应^[37]。但是,营养盐富集过程中伴随的藻类异常增殖往往造成湖泊生态系统退化,增加水库水生态安全风险以及对人体健康产生潜在威胁,这对于具有水源地功能的水体来说,风险防控十分必要。因此,控制浮游植物异常增殖是保障

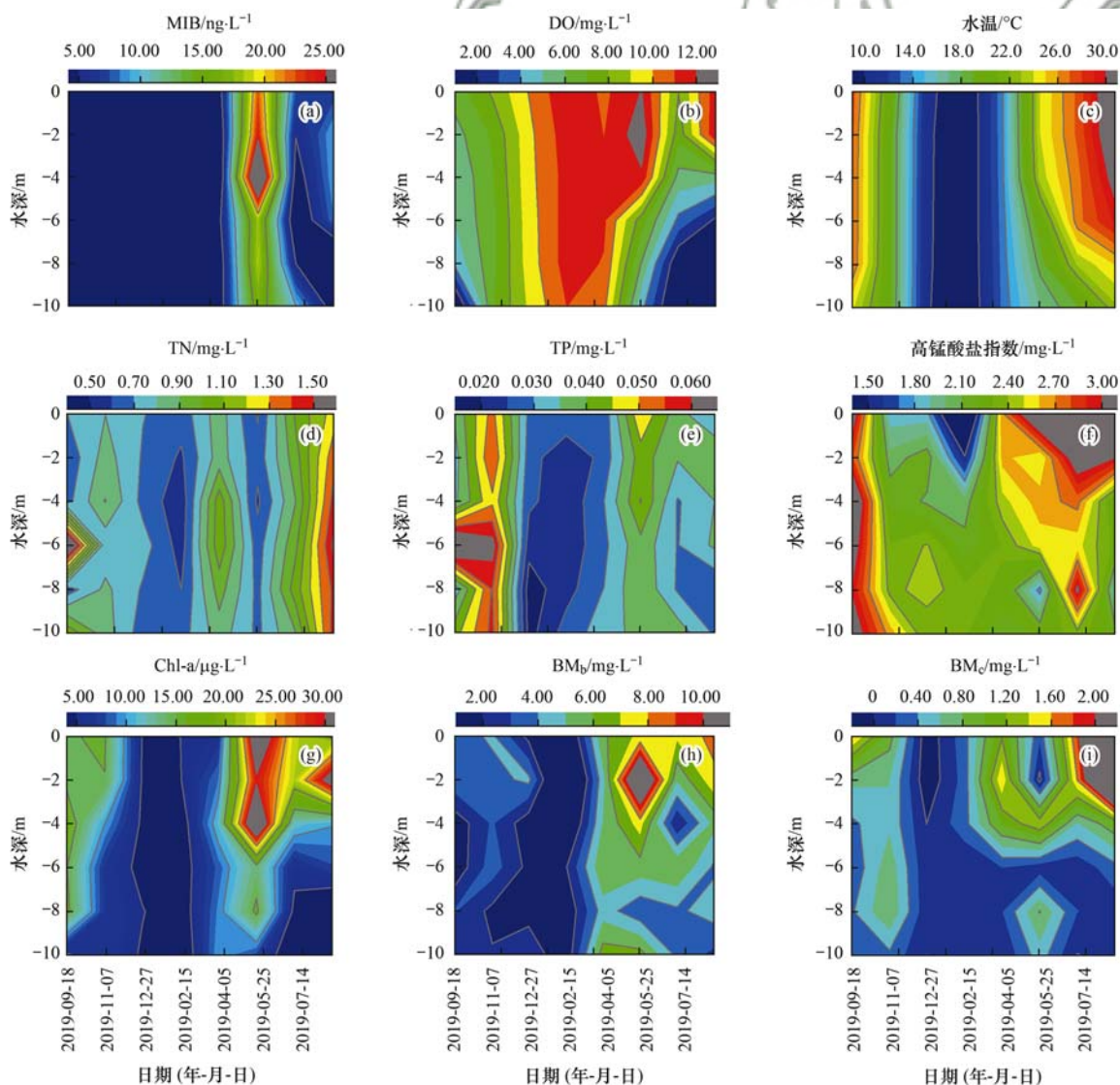


图 3 沙河水库水生态指标垂向变化

Fig. 3 Vertical distribution of aquatic ecological parameters in Shahe Reservoir

水库水生态安全的核心问题. 水体 Chl-a 浓度降低是湖泊富营养化问题得到控制的重要标志^[38]. 我国湖泊(水库)评价中常用的综合营养状态指数(TLI)^[39]和我国水利部提出的营养状态指数(EI)^[40]都是以 Chl-a 为核心指标. Chl-a 作为浮游植物生物量的直接体现,其含量既受到各种理化因子和生物因子的控制,又反过来影响其他水质因子^[41]. 同时,不同季节因气温和降雨量等环境差异,Chl-a 与其他水生态指标的关系会发生变化. 基于沙河水库 2010~2019 年数据构建的不同季节 Chl-a 与其他理化参数的关系,构建水库水生态安全评估方程(表 1). DO、TN、TP、BM_c 和 BM_b 与 Chl-a 统计关系构建时进行了对数转换(以 10 为底数),其余指标,如 SD、高锰酸盐指数和 MIB 等则与 Chl-a 直接进行相关分析.

结果表明,除 MIB 外,其余指标与 Chl-a 的关系式均具有统计学意义上的显著性($P < 0.01$),但决定系数 R^2 较低. SD、DO 和 TP 与 Chl-a 各季节的相关关系差异较大,但夏季的相关关系最强, R^2 分别为 0.39、0.10 和 0.20;不同季节 TN 和 Chl-a 的 R^2 均小于 0.10,整体上冬春季的相关性较夏秋季高;春季高锰酸盐指数、BM_c、BM_b 和 Chl-a 相关关系最好, R^2 分别为 0.59、0.54 和 0.33;MIB 仅春季和 Chl-a 的相关关系具有统计学意义上的显著性,且决定系数较高为 0.91(表 1). 可见 Chl-a 和各水生态指标主要是在春夏季的相关关系好.

因此,为了水库水生态安全管理的便利性和统一性,选取春夏季沙河水库 2010~2019 年 Chl-a 和各水生态指标的评估方程(图 4)作为构建沙河水库水生态安全评价体系的依据.

其中 Chl-a 和 SD 呈负相关($R^2 = 0.47$),说明藻类浊度是水下光衰减的主要原因,藻类生物量越高,水体透明度越低. Chl-a 与 MIB($R^2 = 0.36$)和高锰酸盐指数($R^2 = 0.40$)呈正相关,说明藻类也是水中有机的主要组分,藻类生物量过高,可能使水体产生异味,威胁供水安全.

DO 与 Chl-a 呈弱的负相关($R^2 = 0.03$),这可能是由于春夏季水温升高,藻类以及其他浮游生物迅速繁殖导致水体溶解氧下降,但总体春夏季表层水的溶解氧值都很高.

TN 与 Chl-a 呈弱的负相关($R^2 = 0.07$),表明在春夏季浮游植物生长并未受到氮的限制. 对于颗粒物较少和透明度较高的深水水体,当氮磷比低于 30 时,氮对蓝藻生长的限制作用可能就会出现^[42]. 沙河水库坝前(TM01)春夏季的年平均氮磷比为 52.78,显著高于 30,说明营养盐方面藻类生物量主

要受磷影响. 春夏季,藻类迅速繁殖消耗大量的氮磷,从而使水体中的氮被动下降. TP 与 Chl-a 呈正相关,其相关系数($R^2 = 0.14$).

Chl-a 和蓝藻、硅藻生物量均呈正相关,但 Chl-a 和 BM_c 的相关系数($R^2 = 0.65$)高于和 BM_b ($R^2 = 0.27$). 对于沙河水库这种中营养化水体,生态系统不稳定,在水温较低的春季,硅藻因更加适应而快速生长成为优势种. 在富营养化风险最高的夏季,蓝藻又成为高浓度 Chl-a 的主要贡献者,应注意防范蓝藻水华的发生.

2.4 沙河水库水生态安全评价方案构建

在前期构建的江苏省水源地型水库水生态安全评价方法^[25](原标准)基础上,结合图 4 中 Chl-a 与各水生态指标的关系,进一步优化建立沙河水库的水生态安全评价体系(表 2). 指标权重的确定方面,生态健康层(B₁)下的指标层(D 层)各指标权重依据该指标与 Chl-a 的相关系数重新赋值,即某指标与 Chl-a 相关性越高,该指标对应的权重越大. 由于某一因素层下的各指标与 Chl-a 的相关系数(R^2)相加并不等于 1(如水质因素层下的 MIB、SD 和 DO 的相关系数和为 0.86),为了便于计算本文根据指标相关系数的大小对权重做了适当调整. 功能健康层(B₂)下的各指标权重仍参照原标准中的权重予以赋值,具体见表 2. 如果评价时某指标数据缺失,将缺失指标的权重平均分给该指标所在因素层的其他指标. 水生态安全得分和分级的具体计算方法见文献[25].

评价指标标准限值的确定方面,将 MIB 10 ng·L⁻¹作为该指标水生态安全状况良好的对应阈值,因为 10 ng·L⁻¹既是 MIB 的嗅觉阈值^[43],又是我国生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)^[44]中规定的 MIB 浓度限值. 将我国地表水水质评价技术规范(SL 395-2007)^[40]中 Chl-a 和 SD 对应的富营养水平的阈值分别为 26 μg·L⁻¹和 0.5 m 作为水生态安全状况一般时对应的 Chl-a 阈值和水生态安全状况较差时对应的 SD 阈值. 根据 SD 和 MIB 确定的安全状况阈值及两者与 Chl-a 建立的评估方程,计算出水生态安全状况为良好和较差时的 Chl-a 阈值分别为 17.04 μg·L⁻¹和 34.32 μg·L⁻¹. 本文标准限值中水生态安全状况为优秀时的 Chl-a 阈值仍参照原标准中提出的 5 μg·L⁻¹. 这样,以 Chl-a 为核心,根据 MIB、SD、TP、高锰酸盐指数、BM_c、BM_b 和 Chl-a 的评估方程,计算出各指标对应的水生态安全状况等级阈值,但计算出的水生态安全状况为优秀时的 MIB 浓度为 -14.51 ng·L⁻¹,与实际不符,故保留原标准中对应等级中 MIB 浓度 5 ng·L⁻¹为优秀时的 MIB 浓度阈值. 由于 DO、TN 和 Chl-a 的相关性

较差($R^2 < 0.1$),因此 DO 和 TN 仍参照原标准下的
各水生态安全状况等级阈值. 水位变幅比(RV)和归一化植被指数(NDVI)的标准限值仍沿用原标准值,最终建立沙河水库水生态安全评价标准(表3).

表 1 沙河水库不同季节 Chl-a 和各水生态指标的回归分析

Table 1 Relationships between chlorophyll a and water ecological indexes in different seasons in Shahe Reservoir				
季节	回归方程	R^2	P	n
春季	$\text{Chl-a} = 14.79 \times \text{SD}^{-0.88}$	0.21	<0.01	202
夏季	$\text{Chl-a} = 25.71 \times \text{SD}^{-0.82}$	0.39	<0.01	207
秋季	$\text{Chl-a} = 14.84 \times \text{SD}^{-0.57}$	0.10	<0.01	203
冬季	$\text{Chl-a} = 6.23 \times \text{SD}^{-0.47}$	0.07	<0.01	194
春季	$\text{Chl-a} = 5.81e^{0.07 \times \text{MIB}}$	0.91	<0.01	17
夏季	$\text{Chl-a} = 0.28 \times \text{MIB} + 25.14$	0.02	>0.1	22
秋季	$\text{Chl-a} = -1.08 \times \text{MIB} + 14.74$	0.95	>0.1	3
冬季	$\text{Chl-a} = 7.39e^{0.18 \times \text{MIB}}$	0.44	>0.1	13
春季	$\text{Chl-a} = 12.38 \times \text{高锰酸盐指数} - 20.68$	0.59	<0.01	201
夏季	$\text{Chl-a} = 6.74 \times \text{高锰酸盐指数} + 3.72$	0.15	<0.01	207
秋季	$\text{Chl-a} = 8.69 \times \text{高锰酸盐指数} - 8.43$	0.27	<0.01	204
冬季	$\text{Chl-a} = 2.25 \times \text{高锰酸盐指数} + 0.13$	0.06	<0.01	201
春季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.38 \times \lg(\text{DO}) + 0.57$	0.00	<0.01	199
夏季	$\lg(\text{Chl-a}) = 1.02 \times \lg(\text{DO}) + 0.39$	0.10	<0.01	206
秋季	$\lg(\text{Chl-a}) = 1.17 \times \lg(\text{DO}) + 0.03$	0.05	<0.01	202
冬季	$\lg(\text{Chl-a}) = -2.02 \times \lg(\text{DO}) + 2.78$	0.03	<0.01	185
春季	$\lg(\text{Chl-a}) = -0.42 \times \lg(\text{TN}) + 1.03$	0.04	<0.01	202
夏季	$\lg(\text{Chl-a}) = -0.01 \times \lg(\text{TN}) + 1.36$	0.00	<0.01	208
秋季	$\lg(\text{Chl-a}) = -0.30 \times \lg(\text{TN}) + 1.10$	0.01	<0.01	204
冬季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.48 \times \lg(\text{TN}) + 0.62$	0.06	<0.01	200
春季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.38 \times \lg(\text{TP}) + 1.55$	0.06	<0.01	202
夏季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.60 \times \lg(\text{TP}) + 2.21$	0.20	<0.01	208
秋季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.67 \times \lg(\text{TP}) + 2.07$	0.13	<0.01	204
冬季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.54 \times \lg(\text{TP}) + 1.50$	0.07	<0.01	200
春季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.36 \times \lg(\text{BM}_c) + 1.21$	0.54	<0.01	195
夏季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.32 \times \lg(\text{BM}_c) + 1.23$	0.46	<0.01	206
秋季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.41 \times \lg(\text{BM}_c) + 1.16$	0.38	<0.01	202
冬季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.16 \times \lg(\text{BM}_c) + 0.84$	0.06	<0.01	184
春季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.43 \times \lg(\text{BM}_b) + 0.77$	0.33	<0.01	195
夏季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.27 \times \lg(\text{BM}_b) + 1.19$	0.22	<0.01	206
秋季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.41 \times \lg(\text{BM}_b) + 1.05$	0.27	<0.01	202
冬季	$\lg(\text{Chl-a}) = 0.35 \times \lg(\text{BM}_b) + 0.68$	0.16	<0.01	184

表 2 沙河水库水生态评价指标与权重

Table 2 Indexes and weights of aquatic ecological assessment in Shahe Reservoir				
目标层 (A 层)	亚目标层(B 层) B-A 权重	因素层(C 层) C-B 权重	指标层(D 层) D-C 权重	
沙河水库水生态安全	生态健康 (B ₁ -A)	水质(C ₁ -B ₁)	2-甲基异莰醇(D ₁ -C ₁)	0.38
			透明度(D ₂ -C ₁)	0.47
			溶解氧(D ₃ -C ₁)	0.15
			浮游植物叶绿素 a(D ₄ -C ₂)	0.40
		富营养化(C ₂ -B ₁)	总氮(D ₅ -C ₂)	0.14
			总磷(D ₆ -C ₂)	0.18
			高锰酸盐指数(D ₇ -C ₂)	0.28
			蓝藻生物量(D ₈ -C ₃)	0.65
	功能健康 (B ₂ -A)	水生生物(C ₃ -B ₁)	硅藻生物量(D ₉ -C ₃)	0.35
			水量(C ₄ -B ₂)	0.60
		植被覆盖度(C ₅ -B ₂)	水位变幅比(D ₁₀ -C ₄)	1.00
			归一化植被指数(D ₁₁ -C ₅)	1.00

2.5 沙河水库水生态安全状况时空差异
2010 ~ 2019 年沙河水库各点位春夏季水生态
指标均值及水生态安全状况综合得分如表 4. 总体来看, 10 年来各采样点位的水生态安全状况均处

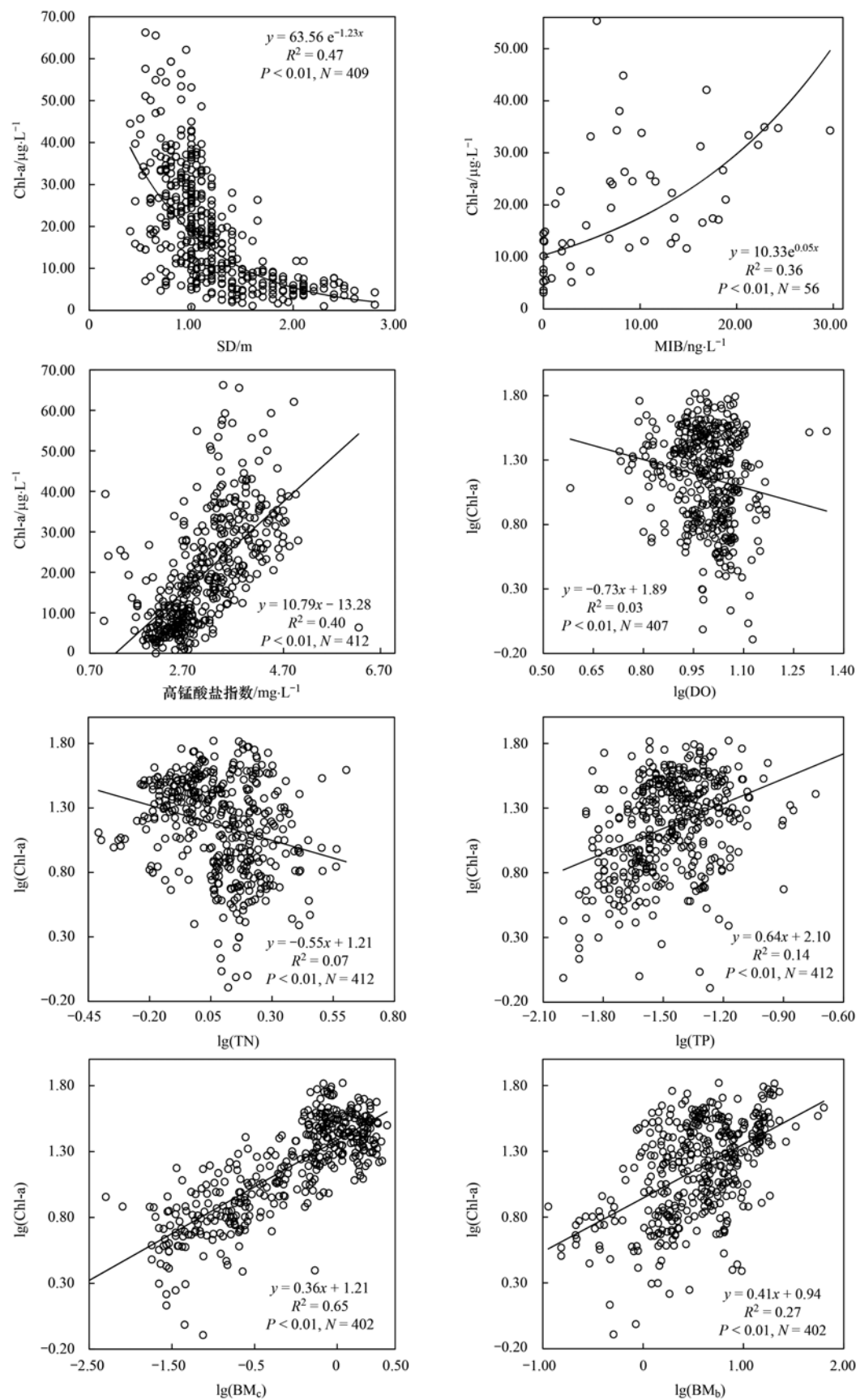


图 4 沙河水库春夏季 Chl-a 与各水生态指标的关系

Fig. 4 Relationships between chlorophyll a and water parameters during spring and summer in Shahe Reservoir

于良好等级,具体得分上呈河流区(TM08、TM09 和 TM10) < 过渡区(TM04、TM06 和 TM07) < 湖泊区

(TM01 和 TM02),且河流区的SD、Chl-a 和 TP 均处于一般或较差等级,与实际调查中的情况相符.

表 3 沙河水库 D 层指标标准限值

Table 3 Standard limitation of the D layer index for Shahe Reservoir

安全状况	MIB /ng·L ⁻¹	SD /m	Chl-a /μg·L ⁻¹	ρ/mg·L ⁻¹						RV	NDVI
				DO	TN	TP	高锰酸盐指数	BM _c	BM _b		
优秀	≤5.00	≥2.07	≤5.00	≥7.50	≤0.50	≤0.006	≤1.69	≤0.04	≤0.26	≤0.20	≥0.50
良好	≤10.00	≥1.07	≤17.04	≥6.00	≤1.00	≤0.044	≤2.81	≤1.15	≤5.14	≤0.60	≥0.40
一般	≤18.46	≥0.73	≤26.00	≥5.00	≤1.50	≤0.085	≤3.64	≤3.71	≤14.40	≤1.00	≥0.30
较差	≤24.01	≥0.50	≤34.32	≥3.00	≤2.00	≤0.131	≤4.41	≤8.02	≤28.35	≤1.20	≥0.20
差	>24.01	<0.50	>34.32	≥2.00	>2.00	>0.131	≤4.41	>8.02	>28.35	>1.20	<0.20

表 4 沙河水库各采样点位水生态安全状况

Table 4 Water ecological security status of each sampling site in Shahe Reservoir

采样点位	SD /m	Chl-a /μg·L ⁻¹	ρ/mg·L ⁻¹						综合得分	安全状况
			DO	TN	TP	高锰酸盐指数	BM _c	BM _b		
TM10	0.79	26.28	10.04	1.48	0.059	3.59	2.47	6.98	61.6	良好
TM09	0.75	26.56	10.40	1.15	0.051	3.26	2.43	4.61	63.3	良好
TM08	0.94	23.46	10.05	1.44	0.043	3.22	2.29	6.78	66.2	良好
TM07	1.21	18.74	9.82	1.39	0.038	3.03	2.33	5.76	70.8	良好
TM06	1.26	18.52	9.94	1.29	0.036	2.88	2.16	5.17	70.8	良好
TM04	1.37	17.09	10.05	1.25	0.031	2.92	2.34	5.27	70.8	良好
TM02	1.42	16.10	9.66	1.23	0.032	2.84	2.40	5.22	74.0	良好
TM01	1.50	15.62	9.83	1.26	0.030	2.86	2.31	5.44	74.0	良好

坝前 TM01 样点 2010 ~ 2019 年逐年水华高风险期(春夏季)的水生态安全状况如表 5 所示. 10 年来沙河水库坝前(TM01)水生态安全状况总体优良,但波动范围较大,最高得分 87.7 分出现在 2013 年,最低分为 2012 年的 69.4 分. 主要原因是 2012 年 TP 和 BM_c 均达到 10 年间的最高值(分别为 0.037 mg·L⁻¹和 4.22 mg·L⁻¹),分别处于较差和一般等级.

表 5 沙河水库 TM01 样点 2010 ~ 2019 年逐年水生态安全状况¹⁾

Table 5 Annual water ecological security status of TM01 in Shahe Reservoir from 2010 to 2019

年份	SD /m	Chl-a /μg·L ⁻¹	ρ/mg·L ⁻¹						RV	NDVI	综合得分	安全状况
			DO	TN	TP	高锰酸盐指数	BM _c	BM _b				
2010	1.33	17.87	10.17	2.00	0.030	3.01	2.05	7.64	0.33	0.52	77.9	良好
2011	1.33	15.15	9.21	1.03	0.035	2.57	2.80	3.24	0.53	0.42	81.0	优秀
2012	1.29	17.91	9.27	1.14	0.037	3.11	4.22	7.70	0.22	—	69.4	良好
2013	2.35	4.50	8.81	1.23	0.018	2.32	0.11	1.11	0.40	—	87.7	优秀
2014	1.33	18.12	9.07	0.98	0.025	3.25	2.41	9.63	0.44	0.67	74.3	良好
2015	1.88	9.04	9.67	1.72	0.027	2.45	1.30	6.83	0.16	0.48	80.4	优秀
2016	1.34	18.51	9.99	1.36	0.035	3.16	3.24	3.56	0.21	0.62	74.9	良好
2017	1.45	16.74	9.91	1.20	0.028	2.61	3.07	2.44	0.07	0.60	84.0	优秀
2018	1.17	22.32	11.11	0.91	0.032	3.34	3.19	4.69	0.64	0.66	74.0	良好
2019	1.44	17.86	11.07	1.06	0.035	2.67	1.27	8.19	0.21	0.55	75.3	良好

1) “—”表示未获得相关数据

TM01 样点和 TM06 样点分别位于水库湖泊区和过渡区,本次观测的 2019 年 9 月至 2020 年 8 月期间,两点水深均值分别为 11 m 和 10 m 左右. 根据水环境监测规范(SL 219-2013)^[45]中规定,对于水深大于 10 m 的采样点,需分 3 层(水面下 0.5 m、水底上 0.5 m 和 中层 1/2 水深处)进行采样,衣志国^[46]则采用水深每隔 1 m 设置 1 个测量点的方式对石河水库的水质进行监测. 根据沙河水库 TM01 的垂向分层数据,比较了 3 种分层方案的评价结果. 方案 A: 只取 0.5 m 处 1 层水样; 方案 B: 取 0.5、4 和 10 m 深处 3 层水样; 方案 C: 取 6 层水样,如表

6. 结果表明,热分层不明显的水体垂向混合期,不同分层方案下, TM01 样点水生态安全均为优秀,得分均为 87.0 分. 分层期(5 ~ 8 月)各分层方案的水生态安全得分均较混合期低,为良好等级. 但从水生态安全状况综合得分来看,分层期方案 B 的综合得分最高,为 73.9 分; 方案 A 得分最低,为 68.0 分, 主要原因是方案 A 的 Chl-a、高锰酸盐指数、BM_c 和 BM_b 均较高,处于一般等级.

根据 TM06 样点水体分层期(5 ~ 8 月)分 5 层(水下 0.5、2、4、6 和 8 m 深)的垂向监测结果,也 比较了 3 种分层方案的评价结果. 方案 A: 只取

-0.5 m处1层水样;方案B:取水下0.5、4和8 m处3层水样;方案C:取5层水样,结果如表6.结果表明,水生态安全评价得分方案A(72.3分) > 方案

C(66.4分) > 方案B(64.1分). 主要原因是方案B的MIB、TN和高锰酸盐指数均处于一般等级,3种分层方案下的水生态安全状况均良好.

表6 不同分层方案下TM01和TM06样点水生态安全状况

Table 6 Water ecological security status of TM01 and TM06 under different stratification schemes

样点	时期	分层方案	MIB /ng·L ⁻¹	Chl-a /μg·L ⁻¹	ρ /mg·L ⁻¹					综合得分	安全状况	
					DO	TN	TP	高锰酸盐指数	BM _c			BM _b
TM01	混合期	A	2.51	8.67	10.00	0.75	0.033	1.95	0.47	3.75	87.0	优秀
		B	2.04	8.05	9.56	0.78	0.033	2.19	0.43	3.17	87.0	优秀
		C	2.02	7.82	9.52	0.78	0.033	2.22	0.45	3.08	87.0	优秀
	分层期	A	11.02	24.73	10.08	0.91	0.039	3.09	2.26	7.75	68.0	良好
		B	11.3	15.91	6.37	0.95	0.037	2.65	1.11	5.66	73.9	良好
		C	10.39	15.09	5.98	0.97	0.036	2.59	0.9	5.71	71.3	良好
TM06	分层期	A	9.58	23.9	8.80	0.93	0.037	3.08	1.65	7.44	72.3	良好
		B	11.46	18.58	6.55	1.02	0.039	2.85	1.36	8.25	64.1	良好
		C	10.86	19.33	6.63	1.01	0.039	2.8	1.64	8.03	66.4	良好

2.6 水库生态服务功能的核心问题

沙河水库既是溧阳市的饮用水水源地,又是5A级景区,供水和旅游是其主要的生态服务功能,而水体异味物质问题和透明度问题是影响水库生态服务功能质量的核心问题.2020年春季MIB和SD与其他水生态指标的相关性如表7.从中可知,MIB与Chl-a、高锰酸盐指数、SD和DO呈极显著的相关关系,与TP呈显著相关关系,且与Chl-a的相关性最好($r=0.91$).SD与Chl-a、TP和MIB具有极显著相关性,与高锰酸盐指数和DO具有显著相关性.这

表明营养盐特别是磷进入水库水体后,导致藻类异常增殖,引发水体透明度下降等富营养化问题,并最终造成水体异味物质MIB浓度升高,这与史鹏程等^[47]对江苏水源地型水库异味物质影响因素的分析结果基本一致.基于此,为保障沙河水库的生态服务功能,应加强春季营养盐尤其是磷的削减力度,防止藻类异常增殖导致的水库的异味物质浓度升高,水体透明度降低等问题,使各水生态指标均处于良好等级($TP \leq 0.044 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Chl-a} \leq 17.04 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MIB} \leq 10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{SD} \geq 1.07 \text{ m}$).

表7 异味物质、透明度和其他水生态指标的Pearson相关性¹⁾

Table 7 Pearson correlations between MIB, SD, and other water-quality indexes

季节	因子	DO	Chl-a	TN	TP	高锰酸盐指数	BM _c	BM _b	MIB	SD
春季	MIB	0.62 *	0.91 **	0.13	0.59 *	0.66 **	0.07	0.00	1.00	-0.76 **
	SD	-0.16	-0.64 **	-0.32	-0.84 **	-0.55 *	-0.01	-0.32	-0.76 **	1.00
夏季	MIB	0.69 **	0.21	0.15	-0.25	0.29	0.66	-0.39	1.00	-0.31
	SD	-0.47 *	-0.59 **	-0.43	-0.46 *	-0.56 *	-0.31	0.73	-0.31	1.00

1) *表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 水库生态安全管理中“一库一策”必要性

水文形态要素(如换水周期)^[48,49]、物理化学要素(如气温和海拔)^[50]以及气候变化^[51]等均能对浮游植物和营养盐的定量关系产生极大影响.我国水库巨大的自然地理与生态背景差异,如深水水库和浅水水库、热带水库和温带水库,必然对应着复杂多变的Chl-a与水质理化参数的定量关系.因此,全国统一的标准并不合适.针对具体的水库,管理中应该找各自的敏感指标,通过长时间的数据观测来确定合适的生态风险阈值.

本文通过对沙河水库为期10a的逐月监测数据的统计分析,参考前期提出的水源地型水库水生态

安全评价标准以及地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中的指标标准限值,构建沙河水库水生态安全评价体系,对比各个标准限值如表8.与原标准相比,沙河水库的水生态安全评价中的SD、Chl-a和BM_c标准限值均有所放宽,而MIB和BM_b则执行更为严格的标准限值.TN和TP较地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中对应的标准限值也更为宽松,高锰酸盐指数则更为严格.沙河水库水生态安全评价体系的建立,可以为沙河水库精准实施水库生态安全管理提供科学依据.

3.2 沙河水库水生态安全的影响因素

虽然10年来沙河水库水生态安全状况整体优良,但是水生态安全风险依然存在,多年来沙河水库Chl-a浓度主要在春夏季(5~7月)达到峰值,进而

导致水体透明度下降和异味物质浓度升高等问题,但春夏季 Chl-a 与 TN、TP 的关系并不好 ($R^2 < 0.2$),说明营养盐可能不是藻类初级生产力变化的决定性因素,或者说,只是影响初级生产力变化的因素之一^[52]. 孙祥等^[26]在分析水文气象因素对沙河水库硅藻异常增殖的影响时,发现硅藻异常增殖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的响应偏弱. 盛海燕等^[53]通过新安江水库 2003 ~ 2012 年水文气象因子与水质指标之间的相关

分析,发现气温、水温和出库流量与 Chl-a 浓度均呈显著正相关关系. 笪文怡等^[54]通过对新安江水库水质及藻类群落结构的高频监测发现,蓝藻在夏季形成的生物量峰值与高温和暴雨径流有关. 朱广伟等^[55]对 2005 ~ 2017 年北部太湖水体叶绿素 a 浓度的影响因素时,发现叶绿素 a 浓度与上半年水温积温、总降雨量和年平均水位均呈显著正相关关系. 以上研究意味着水文气象条件对湖库中藻类生物量和 Chl-a 浓度的影响可能会超过营养盐对其的影响.

表 8 不同评价方法下指标标准限值的比较¹⁾

安全 状况	MIB		SD/m		DO		Chl-a		TN		TP		高锰酸盐指数		BM _c		BM _b	
	/ng·L ⁻¹				/mg·L ⁻¹		/μg·L ⁻¹		/mg·L ⁻¹		/mg·L ⁻¹		/mg·L ⁻¹		/mg·L ⁻¹		/mg·L ⁻¹	
	XB	YB	XB	YB	XB	GB	XB	YB	XB	GB	XB	GB	XB	GB	XB	YB	XB	YB
优秀	≤5.00	≤5.00	≥2.07	≥2.00	≥7.50	≥7.50	≤5.00	≤5.00	≤0.50	≤0.20	≤0.006	≤0.010	≤1.69	≤2.00	≤0.04	≤0.1	≤0.26	≤5.0
良好	≤10.00	≤10.00	≥1.07	≥1.50	≥6.00	≥6.00	≤17.04	≤10.00	≤1.00	≤0.50	≤0.044	≤0.025	≤2.81	≤4.00	≤1.15	≤0.5	≤5.14	≤10.0
一般	≤18.46	≤20.00	≥0.73	≥1.00	≥5.00	≥5.00	≤26.00	≤20.00	≤1.50	≤1.00	≤0.085	≤0.050	≤3.64	≤6.00	≤3.71	≤1.5	≤14.40	≤15.0
较差	≤24.01	≤50.00	≥0.50	≥0.50	≥3.00	≥3.00	≤34.32	≤50.00	≤2.00	≤1.50	≤0.131	≤0.100	≤4.41	≤10.00	≤8.02	≤2.5	≤28.35	≤20.0
差	>24.01	>50.00	<0.50	<0.50	≥2.00	≥2.00	>34.32	>50.00	>2.00	≤2.00	>0.131	≤0.200	>4.41	≤15.00	>8.02	>2.5	>28.35	>20.0

1)XB 为沙河水库水生态安全评价方案建议值,YB 为文献[25]采用值,GB 为地表水环境质量标准(GB 3838-2002)对应值

通过对沙河水库坝前(TM01)点位 5 ~ 7 月 Chl-a 浓度(Chl-a₅₋₇)与不同时段水温、降雨量和水位分析,发现 Chl-a₅₋₇与上半年(1 ~ 6 月)的逐月水温积温(WT₁₋₆)具有较高的相关性($R^2 = 0.43$),其相关性明显高于氮、磷与 Chl-a 浓度的相关性,说明上半年的积温情况对春末夏初藻类水华具有较强的决定作用,如图 5. Chl-a₅₋₇与 4 ~ 5 月的累计降雨量(RF₄₋₅)也存在较好的正相关关系($R^2 = 0.31$),说明春季降雨通过地表径流带来的氮磷营养盐对春末夏初浮游植物异常增殖有重要影响. Chl-a₅₋₇与年均水位(WL₁₂)也存在一定的相关关系,但 R^2 较低为 0.13. 由于 2015 年和 2013 年的 5 ~ 7 月的 Chl-a 浓度均值分别为 6.70 μg·L⁻¹和 5.97 μg·L⁻¹,与其他年份差异较大,故在对 Chl-a₅₋₇与 WT₁₋₆、RF₄₋₅和

WL₁₂进行相关分析时将其剔除.

3.3 关于沙河水库生态质量监测布点的建议

水库监测布点主要需要考虑两方面因素,一是测点位置是否具有代表性,能否准确反映水环境整体状况及污染特征;二是测点数量能否以最经济的方式获得全面信息^[56]. 根据地表水和污水监测技术规范(HJ/T 91-2002)^[57]中提出的尽可能以最少的断面获取足够的有代表性的环境信息,同时还须考虑实际采样时的可行性和方便性的监测断面布设原则,鉴于沙河水库河流区、过渡区和湖泊区各水生态指标及水生态安全状况存在较大差异,但位于同一区域的监测点位水生态安全状况差异较小,因此建议在每个区域布设一个采样点即可:河流区保留位于沙河水库最大来水河道平桥河入库口附近的 TM10 样点;过渡区保留位于沙河水库抽水蓄能电

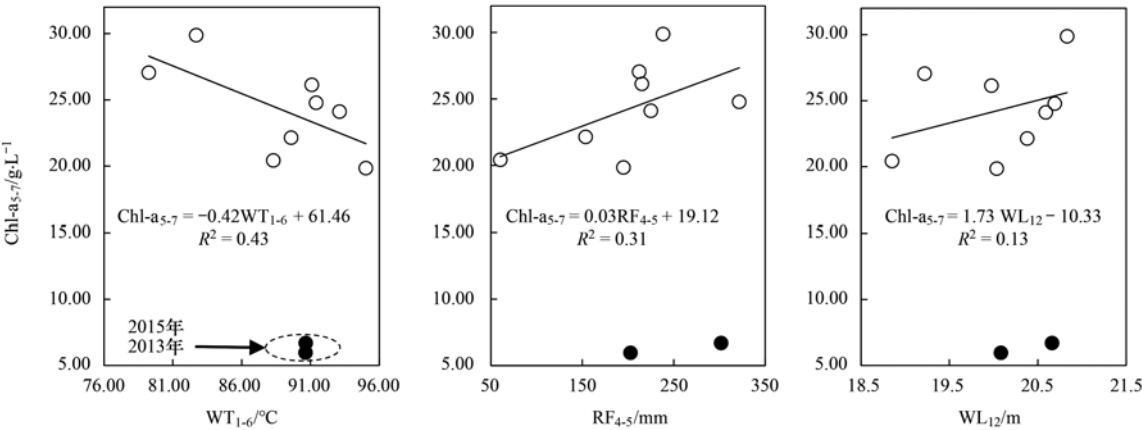


图 5 沙河水库 5 ~ 7 月水体 Chl-a 均值与水文气象因子的关系

Fig. 5 Relationships between the average Chl-a in May to July and hydro-meteorological factors

站抽放水口上游的 TM06 样点;湖泊区保留位于水库大坝出水口附近的 TM01 样点. TM01 和 TM06 样点的水深均在 10 m 左右,均存在水体热分层现象,且分层期不同分层方案的水源地型水库的水生态安全状况综合得分存在一定差异,但均处于良好等级,方案 B 相较于方案 A 更能反映水库水生态安全状况的垂向变化,相较于方案 C 更加经济实用,因此对于 TM01 和 TM06 样点可以在水体分层期(5~8 月)选取方案 B,即采用分 3 层进行采样监测,而混合期(9 月至次年 4 月)选用方案 A,即只取表层水(水下 0.5 m),即能完成各水生态指标的测定.位于河流区年平均水深为 2 m 左右的 TM10 样点,并无明显分层现象产生^[14],因此只采表层水样即可.

4 结论

(1)10 a 的逐月水生态监测数据分析发现,沙河水库各水生态指标均具有一定的时空差异:SD 夏秋季显著低于冬春季,且河流区<过渡区<湖泊区;河流区 DO、TP、TN、Chl-a、高锰酸盐指数、BM_b 和 BM_c 均较过渡区和湖泊区的高.夏秋季 DO 和 TN 浓度较低,而 TP、Chl-a、高锰酸盐指数和 BM_c 浓度较高.

(2)沙河水库各水生态指标垂向分布特征显示,季节性水温分层对水库异味物质浓度、藻类生物量及其群落结构产生明显影响,因此在水库管理过程中应关注热分层带来的不利影响.

(3)本研究提出了符合沙河水库特点的以叶绿素 a 为核心的水库水生态安全评价优化方案,并对水库的水生态安全状况进行综合评价,结果显示,10 年来水库水生态安全状况整体优良,但年际波动较大且不同区域的水生态安全得分差异较大,对于存在热分层的区域采取季节性分 3 层采样的方案更经济可靠.

(4)营养盐特别是磷随地表径流进入水体后,导致藻类季节性异常增殖,引发水体透明度下降,并最终造成水体异味物质 MIB 浓度升高的问题是影响水库生态服务功能的核心问题,因此在水库水生态管理上既要防范藻类水华问题也要加强对水文气象条件的观测.

致谢:赵峰、郭宇龙、王子聪和唐伟等硕士研究生在野外采样给予帮助,胡春华副研究员、叶小锐和刘莉实验员协助完成样品分析与处理,在此一并感谢!

参考文献:

[1] Cui Y, Zhu G W, Li H Y, *et al.* Modeling the response of phytoplankton to reduced external nutrient load in a subtropical Chinese reservoir using DYRESM-CAEDYM [J]. *Lake and*

Reservoir Management, 2016, **32**(2): 146-157.

- [2] 李衍庆,黄廷林,张海涵,等.水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J].*环境科学*, 2020, **41**(5): 2158-2165.
Li Y Q, Huang T L, Zhang H H, *et al.* Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2158-2165.
- [3] Wu T H, Zhu G W, Zhu M Y, *et al.* Effects of algae proliferation and density current on the vertical distribution of odor compounds in drinking water reservoirs in summer [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117683.
- [4] Palma P, Ledo L, Soares S, *et al.* Spatial and temporal variability of the water and sediments quality in the Alqueva reservoir (Guadiana Basin; southern Portugal) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 780-790.
- [5] 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.
- [6] 韩晓霞,朱广伟,吴志旭,等.新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略[J].*湖泊科学*, 2013, **25**(6): 836-845.
Han X X, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Spatial-temporal variations of water quality parameters in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) and the water protection strategy [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 836-845.
- [7] 刘明坤,童俊,胡波,等.金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征[J].*环境科学*, 2019, **40**(10): 4461-4468.
Liu M K, Tong J, Hu B, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of the water quality in the Jinze Reservoir and its inflow [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4461-4468.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 曾春芬,黄文钰,王伟霞,等.天目湖溶解氧分布特征及环境影响因子[J].*长江流域资源与环境*, 2010, **19**(4): 445-451.
Zeng C F, Huang W Y, Wang W X, *et al.* Distribution and its influence factors of dissolved oxygen in Tianmuhu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(4): 445-451.
- [11] 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.
- [12] 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.
Zhu G W, Chen W M, Li H P, *et al.* Response of water quality to the catchment development and protection in Tianmuhu Reservoir, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 809-817.
- [13] 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.
- [14] 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.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [15] 孙祥, 朱广伟, 笱文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2632-2640.
Sun X, Zhu G W, Da W Y, *et al.* Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2632-2640.
- [16] 王丽婧, 郑丙辉. 水库生态安全评估方法(I): IROW 框架[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 169-175.
Wang L J, Zheng B H. Method for ecological security assessment of reservoirs (I): IROW framework [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(2): 169-175.
- [17] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 的西辽河流域生态安全空间分异特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 28-33.
Wang G, Wu W. Assessment on ecological security spatial differences of west areas of Liaohe River based on GIS [J]. Environmental Science, 2005, **26**(5): 28-33.
- [18] 赵思琪, 代嫣然, 王飞华, 等. 湖泊生态系统健康综合评价研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(12): 98-104.
Zhao S Q, Dai Y R, Wang F H, *et al.* Progress on comprehensive assessment methods of lake ecosystem health [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(12): 98-104.
- [19] 郭树宏, 王菲凤, 张江山, 等. 基于 PSR 模型的福建山仔水库生态安全评价[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 814-818.
Guo S H, Wang F F, Zhang J S, *et al.* Ecological security evaluation based on PSR Model for Shanzi Reservoir, Fujian Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(6): 814-818.
- [20] 吴易雯, 李莹杰, 张列宇, 等. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1091-1102.
Wu Y W, Li Y J, Zhang L Y, *et al.* Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(5): 1091-1102.
- [21] 冯宁, 毛锋, 李晓阳, 等. 滇池生态安全综合评估研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 282-286.
Feng N, Mao F, Li X Y, *et al.* Research on ecological security assessment of Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2010, **31**(2): 282-286.
- [22] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water [S].
- [23] 王博文. 碧流河水库“一库一策”创新点研究与探讨[J]. 水资源开发与管理, 2019, (12): 54-58.
Wang B W. Research and discussion on the innovation of “one policy to one reservoir” for Biliuhe Reservoir [J]. Global Seabuckthorn Research and Development, 2019, **16**(12): 54-58.
- [24] 顾雯, 陈宏伟, 汪振宁. 安徽省饮用水水源地“一湖一策”探索[J]. 水资源开发与管理, 2019, (3): 49-54.
Gu W, Chen H W, Wang Z N. Exploration on ‘one policy for one lake’ in drinking water sources area of Anhui Province [J]. Global Seabuckthorn Research and Development, 2019, **16**(3): 49-54.
- [25] 段文秀, 朱广伟, 刘俊杰, 等. 水源型水库水生态安全评价方法探索[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 4135-4145.
Duan W X, Zhu G W, Liu J J, *et al.* An evaluation method for ecological security of water resource reservoirs [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 4135-4145.
- [26] 孙祥, 朱广伟, 笱文怡, 等. 水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1129-1140.
Sun X, Zhu G W, Da W Y, *et al.* Effects of hydrological and meteorological conditions on diatom proliferation in reservoirs [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1129-1140.
- [27] 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.
- [28] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖热力学状况的监测与分析[J]. 水科学进展, 2004, **15**(1): 61-67.
Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, *et al.* Monitoring and analysis of thermodynamics in Tianmuhu Lake [J]. Advances in Water Science, 2004, **15**(1): 61-67.
- [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] 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.
- [31] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [32] 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.
- [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. 333-356.
- [34] 李勇, 张晓健, 陈超. 水中嗅味评价与致嗅物质检测技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(16): 1-6.
Li Y, Zhang X J, Chen C. Research progress in evaluation of tastes and odors compounds in water and their detection technology [J]. China Water & Wastewater, 2008, **24**(16): 1-

- 6.
- [35] 王霜. 大伙房水库流域植被覆盖变化分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
Wang S. Analysis of vegetation coverage change in Dahuofang reservoir basin [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [36] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库—福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂直分布[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 244-250.
Lin J, Su Y P, Zhong H Z, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir(Fujian) during summer stratification [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(2): 244-250.
- [37] EPA-820-S-10-001, Using stressor-response relationships to derive numeric nutrient criteria[S].
- [38] Ibisch R, Austnes K, Borchardt D, *et al.* European assessment of eutrophication abatement measures across land-based sources, inland, coastal and marine waters [EB/OL]. <https://www.researchgate.net/publication/314408868>, 2017-04-09.
- [39] 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.
Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, **18**(5): 47-49.
- [40] SL 395-2007, 地表水资源质量评价技术规程[S].
SL 395- 2007, Technological regulations for surface water resources quality assessment[S].
- [41] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000. 27-62.
- [42] Havens K E, James R T, East T L, *et al.* N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution [J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(3): 379-390.
- [43] Deng X W, Liang G D, Chen J, *et al.* Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2011, **1218**(24): 3791-3798.
- [44] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749-2006, Standards for drinking water quality[S].
- [45] SL 219-2013, 水环境监测规范[S].
SL 219- 2013, Regulation for water environmental monitoring [S].
- [46] 衣志国. 石河水库分层水质监测初探[J]. 海河水利, 2018, **37**(4): 16-19.
- [47] 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 等. 江苏水源型水库异味物质发生风险及影响因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4000-4008.
Shi P C, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Occurrence and influencing factors of odorous compounds in reservoirs used as drinking water resources in Jiangsu province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4000-4008.
- [48] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [49] Salmaso N, Zignin A. At the extreme of physical gradients: phytoplankton in highly flushed, large rivers[J]. Hydrobiologia, 2010, **639**(1): 21-36.
- [50] Philips E J, Cichra M, Havens K, *et al.* Relationships between phytoplankton dynamics and the availability of light and nutrients in a shallow sub-tropical lake[J]. Journal of Plankton Research, 1997, **19**(3): 319-342.
- [51] Deng J M, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Climatically-modulated decline in wind speed may strongly affect eutrophication in shallow lakes[J]. Science of the Total Environment, 2018, **645**: 1361-1370.
- [52] 朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.
Zhu G W, Xu H, Zhu M Y, *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(6): 1510-1524.
- [53] 盛海燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 新安江水库近 10 年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 118-127.
Sheng H Y, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(1): 118-127.
- [54] 宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 713-727.
Da W Y, Zhu G W, Li Y X, *et al.* High-frequency dynamics of water quality and phytoplankton community in inflowing river mouth of Xin'anjiang Reservoir, China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 713-727.
- [55] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.
Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 279-295.
- [56] 梁素敏, 周劲风, 肖绮虹. 广州市流溪河水库监测布点优化研究[J]. 环境监测管理和技术, 2014, **26**(4): 58-62.
Liang S M, Zhou J F, Xiao Q H. The monitoring points optimization study of Liuxihe Reservoir in Guangzhou [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014, **26**(4): 58-62.
- [57] HJ/T 91-2002, 地表水和污水监测技术规范[S].
HJ/T 91- 2002, Technical specifications requirements for monitoring of surface water and waste water[S].

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)