

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

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

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

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

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

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

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

青奥会期间基于δ¹³C观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

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

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

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

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

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

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

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

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

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

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

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

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

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

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估

杨兵, 何丙辉*, 王德宝

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 三峡工程生态与环境监测系统汉丰湖站, 重庆 400715)

摘要: 三峡汉丰湖是世界范围较罕见的专为减弱消落带影响而修建的前置库, 也是中国最大城市人工湖体, 自汉丰湖试运行后, 山水林田湖生态效益及建设宜居城市的社会效益显著。本文以三峡汉丰湖为研究对象, 对汉丰湖试运行年支流来水及湖体断面进行水文、水质分层监测, 包括水文参数(v 、 H 等)、物理参数(T 、pH、SD、DO、TSS等)、化学参数(高锰酸盐指数、Chl-a、TN、DN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、TP、DP、SRP等)共 17 个指标。监测结果表明: ① 2 月、10 月等开始泄水蓄水时期水质较差, 南河支流来水断面水质最差, 调节坝出水断面最好; ② 汉丰湖水体总体呈轻度富营养化, 主要污染指标为 DN、TN、 NO_3^- -N、TP; ③ 汉丰湖在试运行年对水体富营养化控制效果显著, Chl-a 年平均消减率 57.73%, 高锰酸盐指数年平均消减率 28.12%, SRP、TP、TN、TSS、 NO_2^- -N、DN、DP 等年平均消减率 20.15%~22.81%, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 等年平均消减率 16.92%~18.74%, 水体年平均富营养化指数降低 15.74%。研究表明, 1~3 月、10~12 月高水位湖泊形态试运行期间对各水质指标消减率高于 5~8 月河流形态时期, 汉丰湖试运行良好, 对水体富营养化控制效果显著, 可消减三峡入库水体污染物浓度。

关键词: 前置库; 汉丰湖; 水质现状; 消减污染物浓度; 富营养化控制

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4586-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605233

Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir

YANG Bing, HE Bing-hui*, WANG De-bao

(Hanfeng Lake Stations of Ecological Environment Monitoring System, Three Gorges Project Construction Committee, Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To reduce the impact of Fluctuating Zone, the Three Gorges Reservoir pre-dam is rare in the world which is specially designed and is the largest artificial lake body in China. The ecological benefits of landscape, farmland and lake and the social benefits of livable city have been significantly enhanced since the successful commissioning of the Hanfeng Lake pre-dam system. The paper proposed the application of layered hydrology and water quality monitoring for analysis of Tributary runoff and lake body section in the pre-dam commissioning in the whole year, and a total of 17 measured indicators including hydrological parameters such as v , H , etc, physical parameters such as T , pH, SD, DO, TSS etc. and chemical parameters such as permanganate index, Chl-a, TN, DN, NO_3^- -N, NH_4^+ -N, NO_2^- -N, TP, DP, SRP etc. We found that the water quality was poor during beginning drain and impoundment period and was the worst in tributary inflow section of South River, while the best water quality was located in water section of regulating dam in February and October. The TLI Water Quality Evaluation and factor analyses performed have shown that the water body of Hanfeng Lake was slightly eutrophicated, and the main pollution indicators included DN, TN, NO_3^- -N, TP. By the control of pre-dam in three Gorges to eutrophication in commissioning, we found that the average Chl-a reduction effect reached up to 57.73%, the average reduction rate of permanganate index was 28.12%, SRP, TP, TN, TSS, NO_2^- -N, DN, DP etc. were on average cut down by 20.15%-22.81%, the average reduction rates of NH_4^+ -N and NO_3^- -N were 16.92%-18.74%, and the average eutrophic index of water body was reduced by 15.74%. The highest reduction average rate in lake form period appeared from January to March and October to December, and the lowest in river form period was during May to August. The analysis results showed that the commissioning of pre-dam was good and remarkable for controlling eutrophication, and cutting the concentrations of pollutant water storage in the Three Gorges.

Key words: pre-dam; Hanfeng Lake; eutrophication status; reduction pollutant concentration; eutrophication control

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-07-19

基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室生态与环境系统重点支流水质监测项目(JJ2015-016); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-EW-ST5-008)

作者简介: 杨兵(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水土保持, E-mail: 1934363370@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

前置库(前置坝)是在上游支流来水进入主水库前修建水坝形成的小型湖泊水库^[1],通过降低水体悬浮物和营养盐浓度以提高进入主水库水体水质^[2].前置库在天津于桥水库^[3]和太湖^[4]面污染源控制中成功加以利用,溇湖研究表明前置库可去除入库水体中的 TN、TP 和 Chl-a^[5],德国萨克森州 Forchheim 前置库研究表明前置库能减少悬浮颗粒物^[6],波兰 Kowalskie 水库和 Stare Miasto 水库前置库对主水库水质和泥沙含量影响明显^[7],太湖前置库可降低流域农业面源污染影响^[8].云蒙湖前置库对水体氮磷净化率达 20%~40%^[9],德国东南部 Saldenbach 水库前置库年均可溶性活性磷去除率为 60%,夏季最高可达 80%^[10].

三峡水库正常水位 173.22 m(吴淞高程 175 m),汛限水位 143.22 m(吴淞高程 145 m),产生 348.9 km² 季节性消落带,其中澎溪河(小江)流域消落带面积 55.47 km²,是三峡支流中最大消落带^[11].消落区治理是一个世界性难题,目前消落区研究主要集中在植被恢复与重建^[12,13],控制农业面源污染^[14,15]、河岸带缓冲带对氮磷净化机制^[16]、河岸带管理^[17]、水淹植物物种选择^[18]等方面,未见采用水位调节坝前置库工程治理消落区成果^[19].

三峡前置库(汉丰湖)利用水位调节坝工程拦蓄减少消落区范围,工程位于三峡库区一级支流澎溪河(小江)上游回水末端,调节坝以上消落区面积 24 km²,最大消落深度 18.5 m^[19].汉丰湖前置库试运行后,现有研究主要集中在蓄水期间营养状态与藻类群落结构^[20,21]、汉丰湖及支流浮游植物群落与环境因子^[22,23]、人为营养物质输入及水环境容量等方面^[24,25],较少考虑汉丰湖作为前置库的水质净化

功能.汉丰湖水质监测从 2012 年持续至今,本文为 2015 年为汉丰湖典型试运行年进行研究,监测指标包括水文参数(v :流速、 H :水深等)物理参数(T :水温、pH、SD:透明度、DO:溶解氧、TSS:总固体悬浮物等)和化学参数(高锰酸盐指数、Chl-a:叶绿素、TN:总氮、DN:可溶性总氮、NO₃⁻-N:硝态氮、NH₄⁺-N:氨氮、NO₂⁻-N:亚硝态氮、TP:总磷、DP:可溶性总磷、SRP:正磷酸盐等)共 17 个指标,分析汉丰湖试运行期水质现状,评估前置库沉降泥沙和去除氮磷等水体富营养化控制效果.

1 材料与方法

1.1 调查采样

5 个控制断面及采样点见图 1,主要分为以下两类.

(1)湖体控制断面 出湖控制断面:调节坝(HF1)、湖体控制断面:东南河交汇(HF2).

(2)支流来水控制断面 东河控制断面:东河大桥(HF3)、头道沟控制断面:头道沟大桥(HF4)、南河控制断面:镇东大丘(HF5).

2015 年每月下旬采样.根据 2015 年三峡水库蓄水时间安排^[26]和汉丰湖试运行期蓄水方案^[27],设置断面中垂线分层采样,按各采样点水深(H)分别在水面以下 0.5 m、1/2 H 、 H -0.5 m 等分上、中、下 3 层采样.现场监测采用美国哈希便携式多参数水质仪(型号:MINISONDE5X,HACH,美国)测定 T 、pH、DO、Chl-a 等指标,SD 采用塞氏盘法,流速 v 采用便携式流速仪(LGY,NS,中国)测定;采集的水样低温(4℃)保存,到达实验室后立刻进行样品测试,参照文献[28]对 TSS、高锰酸盐指数、TN、

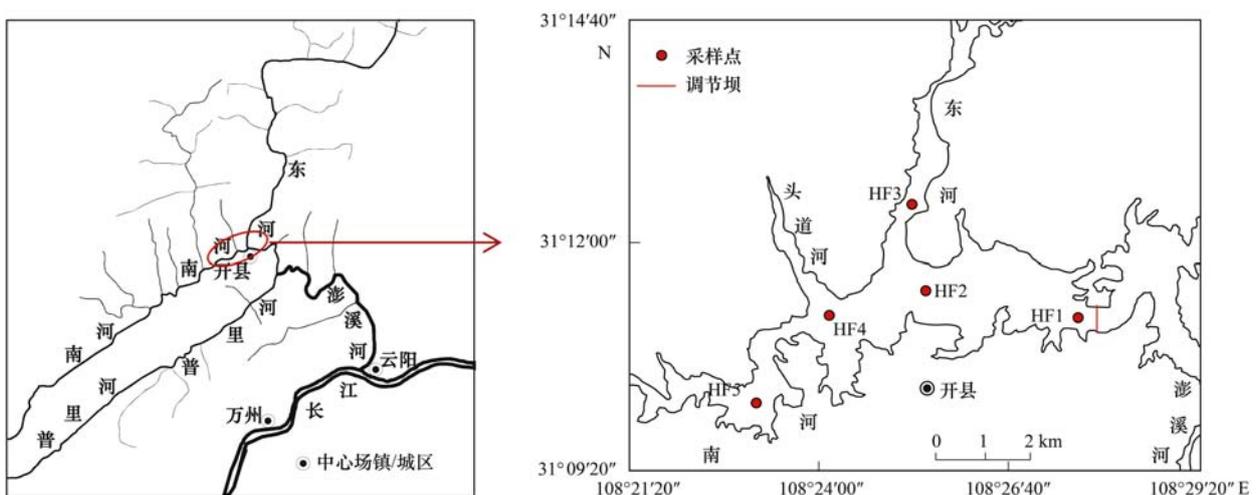


图 1 汉丰湖采样断面示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in Hanfeng Lake

DN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、TP、DP、SRP 等指标进行测定。

1.2 数据处理及分析方法

(1) 综合营养状态指数法

综合营养状态指数法计算公式为：

$$\text{TLI}(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \text{TLI}(j) \quad (1)$$

式中， $\text{TLI}(\sum)$ 为综合营养状态指数； W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重； $\text{TLI}(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数； m 为评价因子个数。

湖泊营养状态分级用 1 ~ 100 连续数字对水库富营养程度进行分级， $\text{TLI}(\sum) < 30$ 为贫营养； $30 < \text{TLI}(\sum) \leq 50$ 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。在同一营养状态下，指数值越高，其营养程度越重^[29]。

(2) 因子分析法

因子分析法(FA)是一种降低变量维数，按照特征值 > 1 的原则从多个原变量中提取出较少、抽象且能够代表所有原始数据的因子；每个提出原始指标的因子得分可用回归方程表示，参见公式(2)；再利用各因子得分分别乘以各自对应的方差贡献率，并将所得结果相加，从而进一步求出主成分的综合得分。在进行因子分析之前，需将原始的标准化数据进行 KMO 和 Bartlett 球型检验，只有当 KMO 值 $>$

0.5, Bartlett 球型检验结果 $P < 0.05$, 表明应用因子分析方法可行, 且分析结果较好^[30]。

$$\begin{aligned} Z_1 &= a_{11}z_{x1} + a_{12}z_{x2} + \dots + a_{1n}z_{xn} \\ Z_2 &= a_{21}z_{x1} + a_{22}z_{x2} + \dots + a_{2n}z_{xn} \\ Z_3 &= a_{31}z_{x1} + a_{32}z_{x2} + \dots + a_{3n}z_{xn} \end{aligned} \quad (2)$$

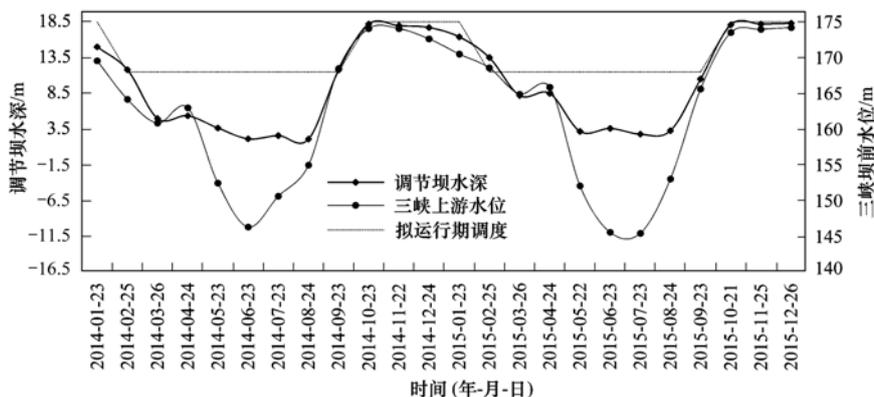
式中， Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别代表主因子的得分， $a_{i1} \sim a_{in}$ 中每列值除以 SQRT (特征根 ω 的平方根)； $z_{x1} \sim z_{xn}$ 为各采样点标准化后的值。

因子分析、相关性分析等利用 SPSS 16.0 处理， $P < 0.05$ 为显著性相关， $P < 0.01$ 时为极显著相关。

2 结果与分析

2.1 汉丰湖主要水文、水质物理参数时空变化特征

汉丰湖采样点主要水文、水质物理参数见表 1，试运行年，汉丰湖水深年内变化显著($P < 0.01$)，落差达 14.4 ~ 16.0 m，汉丰湖调节坝水深及水位高程与三峡坝前水位对应见图 2，试运行期，12 月 ~ 次年 2 月调节坝调节水位下降滞后于三峡同期水位，5 ~ 8 月调节坝坝底高程高于三峡同期水位，不受三峡水位影响，呈河流形态，水深小，流速大；蓄水期汉丰湖水位受三峡主水库影响明显呈湖泊形态，水深大，流速小。汉丰湖平均水深由上游至下游逐渐变大； v 和 H 呈显著负相关($r = -0.845$)，支流来水断面流速较大，湖体断面受调节坝拦挡，流速减缓，调节坝流速负值表示汉丰湖受三峡蓄水回水倒灌异重流影响^[31]。



三峡水位数据来源为文献[32]

图 2 2014 ~ 2015 年汉丰湖调节坝水位与三峡大坝上游水位变化

Fig. 2 Map of water depth distribution near Hanfeng Lake dam and monthly upstream water level of TGR (2014-2015)

SD 年内变化显著($P < 0.01$)，蓄水期高，泄水期低，空间上呈现出镇东大丘 $<$ 头道沟大桥 $<$ 东河大桥 $<$ 调节坝；水温 T 呈现为南河较高，东河较低，水体分层现象较弱，气温和水深是水体稳定性的重

要因素^[33]，汉丰湖水深季节性变化不利于形成稳定的分层水体；DO 点位间年平均差异不显著，年内变化显著($P < 0.05$)，最大值出现在 10 月，最小值出现在 11 月，10 月监测显示，汉丰湖最高 Chl-a 浓

度 $74.19 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 藻类种群密度 $29.19 \times 10^6 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 以 $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 作为评判水华是否发生的标准^[34], 可认为汉丰湖出现水华暴发现象. 水华期间浮游植物光合作用造成溶解氧过饱和, 水华过后自净消耗大量氧; pH 年内差异不显著, 总体呈弱碱性至碱性, 最大值出现在 10 月, 空间

呈现出东河大桥、镇东大丘、头道沟大桥、东南河交汇差异不大, 调节坝明显低于上游点位. Chl-a 和 pH 显著正相关, 表明水华敏感期浮游植物的快速增长导致其光合作用加强, 从而使水体的 pH 值升高, 与郑丙辉等^[35]在大宁河的研究结果一致.

表 1 汉丰湖试运行年(2015 年)各断面主要水文及表层水质物理参数

Table 1 Physical parameter table of the main hydrological and surface water quality in Hanfeng Lak in 2015

采样点位	项目	H/m	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	SD/m	T/°C	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
镇东大丘 (HF5)	范围	0.60 ~ 15.20	0.01 ~ 0.50	0.10 ~ 2.20	11.38 ~ 28.91	4.37 ~ 19.78	7.5 ~ 9.25
	均值	5.10	0.15	0.85	20.99	9.55	8.05
头道沟大桥 (HF4)	范围	1.00 ~ 16.00	0.01 ~ 0.40	0.10 ~ 2.80	11.45 ~ 27.83	4.46 ~ 18.06	7.55 ~ 9.04
	均值	5.03	0.10	1.23	20.61	9.93	8.03
东河大桥 (HF3)	范围	1.20 ~ 16.20	0.01 ~ 0.40	0.15 ~ 3.70	11.48 ~ 26.04	4.61 ~ 16.54	7.62 ~ 8.97
	均值	6.10	0.10	1.55	19.92	9.50	8.02
东南河交汇 (HF2)	范围	1.80 ~ 17.80	-0.01 ~ 0.30	0.05 ~ 3.80	11.86 ~ 26.61	4.56 ~ 21.52	7.47 ~ 9.25
	均值	6.58	0.05	1.49	20.20	10.46	8.04
调节坝 (HF1)	范围	2.5 ~ 18.50	-0.02 ~ 0.25	0.15 ~ 4.00	11.82 ~ 26.94	4.89 ~ 17.83	7.18 ~ 8.35
	均值	6.68	0.05	1.74	20.10	9.72	7.76

2.2 总固体悬浮物(TSS)时空变化特征

图 3 为汉丰湖试运行年 TSS 时空变化. 全年 TSS 平均质量浓度 $1.33 \sim 78.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值 $24.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从时间变化来看, 1~4 月、9~12 月 TSS 明显低于 5~8 月, 10 月水华期间 TSS 有一定升

高; 从空间变化来看, 东河大桥、东南河交汇 > 镇东大丘、头道沟大桥 > 调节坝. 总体表现为上游支流来水断面高, 调节坝出湖断面低, 表明汉丰湖发挥前置库沉降悬浮物的功能, 降低进入三峡水库小江支流的悬浮物浓度.

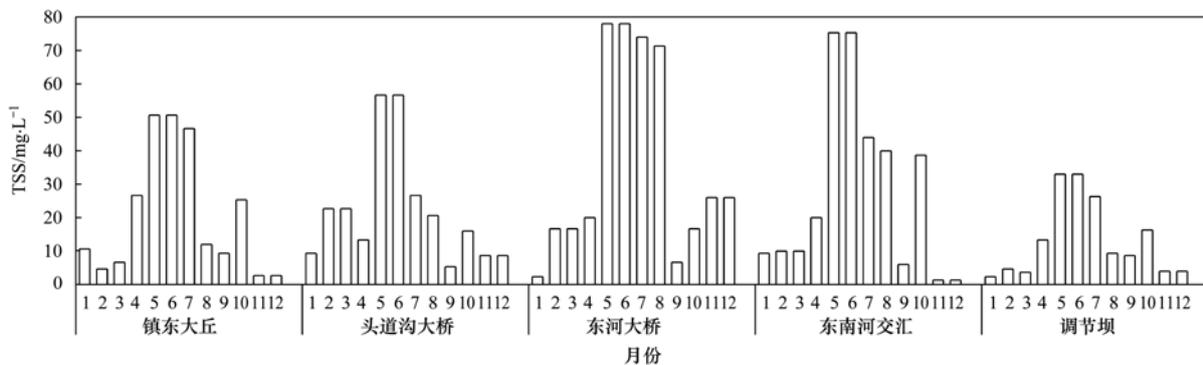


图 3 汉丰湖试运行年(2015 年)各点位总固体悬浮物变化

Fig. 3 TSS distribution at different points of Hanfeng Lake in 2015

2.3 叶绿素 a(Chl-a)时空变化特征

图 4 为汉丰湖试运行年(2015 年) Chl-a 变化, Chl-a 平均质量浓度 $2.30 \sim 74.19 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 年平均值 $11.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Chl-a 与高锰酸盐指数、DO、 NH_4^+-N 、TP、TN、 T 、 v 的变化呈极显著相关关系 ($P < 0.01$), 表明汉丰湖浮游植物主要受氮磷营养盐、有机污染程度及水温流速影响, 同时浮游植物光合作用对水体 DO 等产生明显影响, 但对 TSS、SD 影响不显著, 李飞鹏等^[36]对崇明岛环境因子与 Chl-a 的

分析也得出了相似的结论, 并认为水温和营养盐是影响浮游植物季节动态的主要因素, 透明度的季节变化是浮游植物生长的结果表征.

2015 年 Chl-a 有 3 个峰值, 月份间差异明显 ($P < 0.01$), 2 月东河大桥、南河大桥、头道沟大桥等支流断面 Chl-a 较高; 4 月全湖 Chl-a 浓度升高; 9~10 月全湖 Chl-a 浓度达到最高, 其中 10 月镇东大丘、东南河交汇 Chl-a 浓度出现最大值. 从空间看, 镇东大丘、东南河交汇 > 东河大桥、头道沟大桥 > 调节

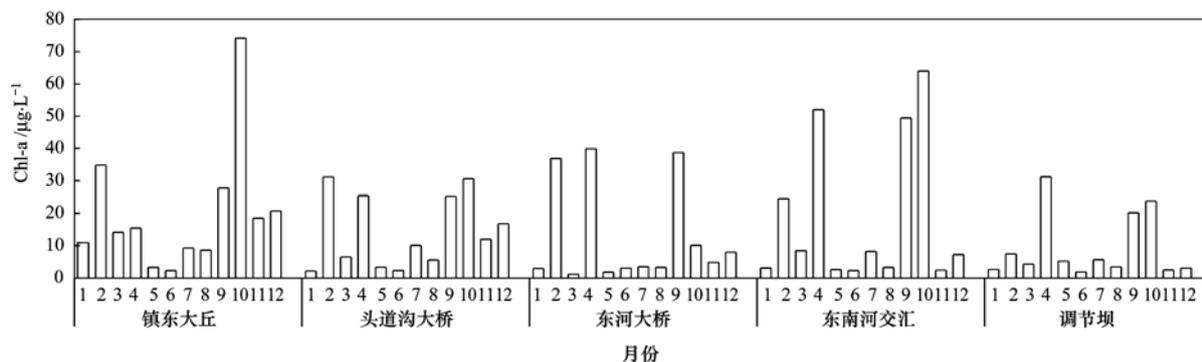


图4 汉丰湖试运行年(2015年)各点位叶绿素变化

Fig. 4 Chl-a distribution at different points Hanfeng Lake in 2015

坝,出湖断面Chl-a最低,说明汉丰湖对Chl-a削减作用明显.

2.4 高锰酸盐指数时空变化特征

图5为汉丰湖试运行年(2015年)高锰酸盐指数变化.高锰酸盐指数平均质量浓度 $1.86 \sim 7.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,年均值 $3.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.从时间上看,汉丰湖全年高锰酸盐指数处于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅱ类~Ⅲ类标准之间,表明水质状况良好,其中9~10月高锰酸盐指数超过 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明水体已遭到有机污染物的影响^[37].

从点位来看,镇东大丘、头道沟大桥等南河支流高锰酸盐指数较高,表明南河及头道河是汉丰湖有机污染来源之一,东河大桥较低,东南河交汇介于东河、南河之间;总体来看,高锰酸盐指数呈现出由上游至下游逐渐降低态势,说明汉丰湖对水体有机污染存在净化作用;出湖断面最低,说明汉丰湖作为前置库能够有效降低进入三峡小江支流的水体高锰酸盐指数浓度.

2.5 氮营养盐时空变化特征

图6为汉丰湖试运行年(2015年)总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨态氮(NH_4^+ -N)和亚硝态氮

(NO_2^- -N)时空变化. TN平均质量浓度 $0.332 \sim 3.030 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,年均值 $1.411 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO_3^- -N平均质量浓度 $0.015 \sim 1.885 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,年均值 $0.705 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4^+ -N平均质量浓度 $0.001 \sim 0.860 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,年均值 $0.251 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO_2^- -N平均质量浓度 $0.004 \sim 0.070 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,年均值 $0.023 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. TN与DN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、TP、DP、高锰酸盐指数、Chl-a变化成极显著相关关系($P < 0.01$),说明TN对水体营养状态和藻类生长等产生显著影响.

NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N之和即为DN, DN及所占比例不仅能够反映氮营养盐转化情况,而且与浮游植物生长繁殖关系密切. 由于氮源多以还原态氮形式排入水体,经过硝化作用, NH_4^+ -N氧化成 NO_2^- -N,然后再氧化成稳定的 NO_3^- -N,上述过程要消耗掉水体中大量的氧. NH_4^+ -N浓度升高表明水体近期受到污染, NO_2^- -N浓度升高表明水体污染物正在发生分解, NO_3^- -N浓度升高表明水体曾受到污染但已完成自净^[38].

2015年TN含量在1~5月、10月较高,镇东大丘、头道沟大桥较高,东河大桥最小. TN中DN为

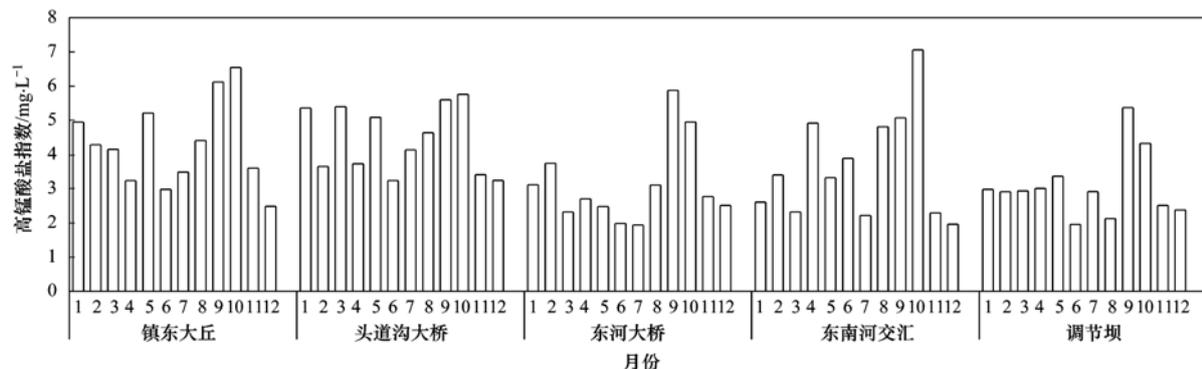


图5 汉丰湖试运行年(2015年)各点位高锰酸盐指数变化

Fig. 5 Distribution of permanganate index at different points of Hanfeng Lake in 2015

主, DN 主要成分为 NO_3^- -N, 其次为 NH_4^+ -N, NO_2^- -N 含量极低. 如表 2 所示, DN/TN 质量分数 48.72% ~ 80.72%, 溶解态无机氮是三峡入库河流中氮营养盐的主要组成, 支流来水断面 DN 占 TN 质量分数低于湖体断面; 湖体断面 1 ~ 4 月、10 ~ 12 月 NH_4^+ -N 含量低于支流, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 较高, 表明湖泊期前

置库消减营养盐、净化水质作用较明显, 湖体 5 ~ 8 月 NH_4^+ -N 高于支流, 表明河流期湖体消落带补充氮源. NO_2^- -N 含量变化较小, 表明汉丰湖持续进行自净作用. 总体来说, 镇东大丘、头道沟大桥 > 东南河交汇 > 调节坝 > 东河大桥, 南河支流氮营养盐浓度最高, 东河最低.

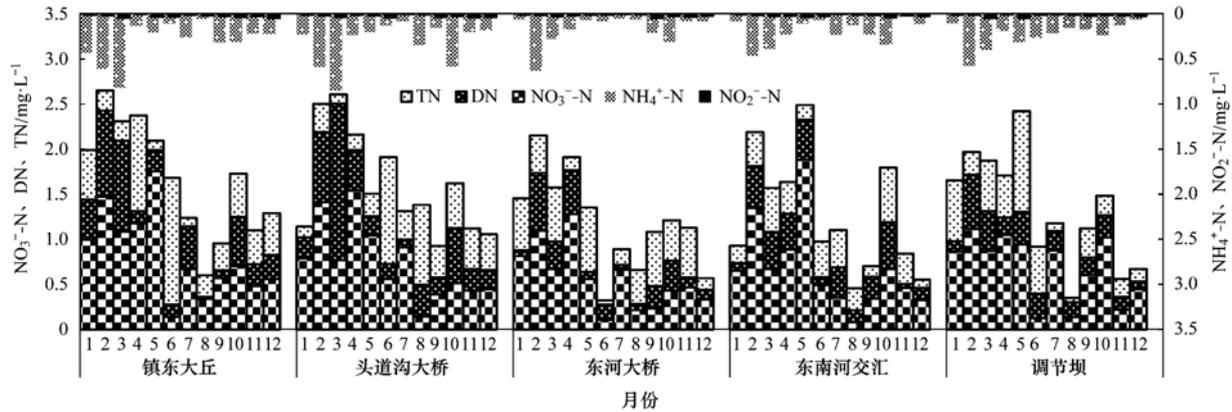


图 6 汉丰湖试运行年(2015 年)各点位氮营养盐变化

Fig. 6 Distribution of nitrogen nutrients at different points of Hanfeng Lake in 2015

2.6 磷营养盐时空变化特征

汉丰湖试运行年(2015 年)总磷(TP)、可溶性总磷(DP)、溶解性正磷酸盐(SRP)时空变化见图 7. TP 平均质量浓度 $0.082 \sim 0.311 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均值 $0.163 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; DP 平均质量浓度 $0.051 \sim 0.226 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均值 $0.120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; SRP 平均质量浓度 $0.030 \sim 0.136 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均值 $0.070 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

支流来水 TP 含量 2 ~ 5 月较高; 5 ~ 8 月湖体 TP 含量较高. 从点位看, 镇东大丘、头道沟大桥、

东南和交汇等南河支流磷含量较高, 表明南河为汉丰湖主要磷来源, 东河大桥、调节坝较低, 表明汉丰湖对磷消减作用通过水体自净和稀释净化实现.

汉丰湖水体中磷主要以溶解态磷形式存在, 其中正磷酸盐为重要组成成分. DP 占 TP 质量分数大于 50% (表 2), 5 ~ 8 月较低, 同时支流来水断面较低; SRP 能直接被浮游植物所利用, 是地表水体限制性营养盐之一, 8 ~ 10 月 SRP 含量较高, 是 10 月发生水华条件之一.

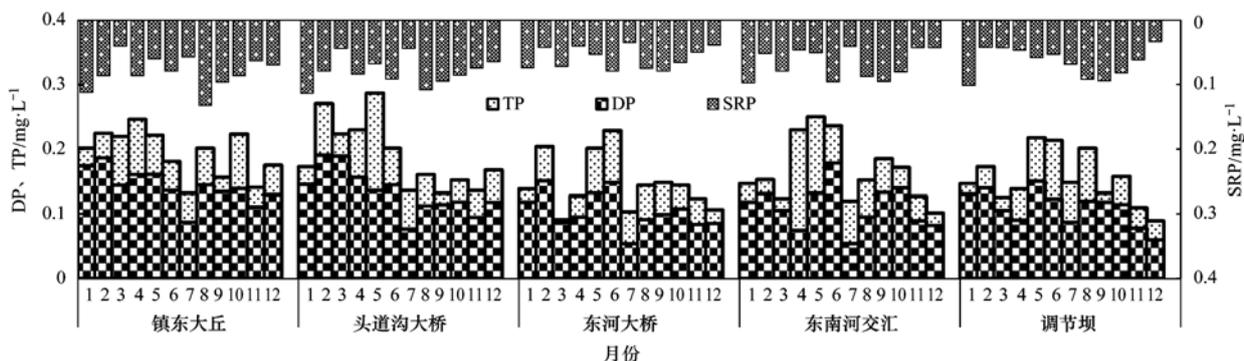


图 7 汉丰湖试运行年(2015 年)各点位磷营养盐变化

Fig. 7 Distribution of phosphorus nutrients at different points of Hanfeng Lake in 2015

2.7 氮磷比(TN/TP)变化特征

氮磷是水体主要营养物质, N/P 对藻类生长具有重要作用, 国内外通常根据 N/P 判断藻类生长限制性元素^[31]. Redfield 定律认为, 藻类细胞组成的原子比率 C: N: P = 106: 16: 1, 如果 $\text{TN}/\text{TP} < 16$, 磷被

认为是限制因素; 反之, 当 $\text{TN}/\text{TP} < 10$ 时, 氮通常被考虑为限制因素^[36]. 认为当 $\text{TN}/\text{TP} < 29$ 时, 可以形成水华的蓝藻会占优势^[39]. 表 2 是 2015 年汉丰湖逐月 TN、TP 平均浓度及比值, 1 ~ 5 月、7 月、10 月氮磷比在 8 ~ 30, 适合藻类生长; 6 月、8 ~ 9 月、

12 月氮磷比 $N/P < 7$, 表明氮限制藻类生长. 10 月水体有充足氮磷浓度及合适比例, 适宜的温度及

缓慢的水动力条件, 导致镇东大丘至东南河交汇区域发生水华.

表 2 汉丰湖运行年(2015 年)氮磷质量浓度比

Table 2 Nitrogen/phosphorus ratio of Hanfeng Lake during the commissioning period of Three Gorges Reservoir

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
TN/mg·L ⁻¹	1.434	2.294	1.919	1.863	1.974	1.162	1.145	0.690	0.958	1.569	0.950	0.828
$\omega(DN/TN)/\%$	74.94	86.75	77.31	78.15	76.20	48.72	80.72	54.33	68.75	74.58	63.03	75.54
TP/mg·L ⁻¹	0.161	0.205	0.153	0.179	0.236	0.212	0.128	0.172	0.151	0.170	0.128	0.128
$\omega(DP/TP)/\%$	85.79	79.96	81.58	61.53	61.56	69.14	55.90	65.53	80.83	76.48	72.07	75.43
$\omega(TN/TP)/\%$	8.88	11.19	12.53	10.42	8.38	5.48	8.94	4.01	6.35	9.23	7.45	6.46

3 讨论

3.1 汉丰湖水质现状

2015 年对汉丰湖水质指标时间因子分析得出 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 值为 0.714, Bartlett 球型检定值为 0.00, 表明采用因子分析方法可行. 通过降维(特征值大于 1)提取出 5 个主成分, 累积贡献率达到 77.31%, 能够体现水质指标绝大多数信息.

水质因子载荷矩阵具体见表 3. 第一主成分 F_1 贡献率 27.73%, 与其关联的水质指标有 DN、TN、 $NO_3^- - N$ 、TP, 反映水体氮磷等营养盐浓度特征, 表明汉丰湖水质主要受氮磷影响; 第二主成分 F_2 贡献率 19.17%, 与其相关联的有 pH、DO、Chl-a 等指标, 代表汉丰湖浮游植物生长状况. 第三主成分 F_3 贡献率 14.87%, 与其相关的有 v 、TSS、 T 、SD 等指标, 反映汉丰湖水质时间变化显著, 温度、试运行期汉丰湖湖泊形态变化的流速改变, 直接影响 TSS、SD 季度性变化; 第四主成分 F_4 的贡献率 8.60%, 与其相关的因子主要有 SRP 和 DP, 代表汉丰湖浮游植物可利用的溶解态磷浓度变化; 第五主成分 F_5 贡献率 6.94%, 与其相关的有 $NO_2^- - N$ 值, $NO_2^- - N$ 浓度升高表明水体污染物正在发生分解, 反映汉丰湖自净能力, 表明汉丰湖对水体富营养化的消减控制作用.

结合表 3 水质因子载荷矩阵, 将标准化处理水质数据代入方程, 计算出因子得分及综合得分排名(表 4). 得分越高, 表明水质受污染程度越高, 总体来说, 汉丰湖水质污染程度由上游至下游逐渐减轻, 镇东大丘 > 头道沟大桥 > 东南河交汇 > 东河大桥 > 调节坝, 表明汉丰湖发挥作为前置库沉降泥沙、消减营养盐、控制水体富营养化作用.

3.2 汉丰湖水质控制效果分析

2015 年监测点水体因子分析得分及富营养化评价得分(TLI)按点位由上游到下游综合分析如图 8 所示. 全年点位监测结果因子分析排名前 50% 的

表 3 水质因子载荷矩阵¹⁾

Table 3 Factor loading matrix of water quality in Hanfeng Lake

指标	因子载荷矩阵				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
DN	0.95	0.13	-0.07	-0.02	0.01
TN	0.89	0.22	-0.01	0.06	0.02
$NO_3^- - N$	0.83	-0.20	-0.06	-0.10	-0.12
TP	0.61	0.09	0.25	0.51	-0.13
$NH_4^+ - N$	0.59	0.51	-0.15	0.10	0.14
pH	-0.06	0.87	0.19	0.07	-0.06
DO	0.34	0.83	0.12	0.01	-0.01
Chl-a	0.21	0.76	-0.07	0.22	0.07
H	-0.19	0.57	-0.37	0.03	-0.13
v	0.04	-0.17	0.86	-0.02	-0.22
TSS	0.13	-0.03	0.84	-0.02	-0.24
T	-0.29	0.24	0.75	0.05	0.26
SD	0.19	-0.16	-0.74	-0.26	-0.32
SRP	-0.11	0.07	0.01	0.91	-0.04
DP	0.60	0.15	-0.04	0.69	-0.08
高锰酸盐指数	0.00	0.52	0.18	0.58	0.25
$NO_2^- - N$	-0.03	-0.05	-0.06	-0.04	0.92
贡献率%	27.73	19.17	14.87	8.60	6.94
累计贡献率%	27.73	46.90	61.77	70.37	77.31

1) 黑体字表示较高因子载荷

表 4 因子得分排名表

Table 4 Spatial factor score table

监测点	因子得分					综合得分	排名
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5		
镇东大丘	0.88	1.27	1.19	1.86	0.15	0.97	1
头道沟大桥	0.68	1.09	1.05	1.46	0.20	0.85	2
东河大桥	-0.54	0.16	0.00	-0.47	-0.15	-0.26	4
东南河交汇	0.21	1.15	0.66	0.70	-0.52	0.07	3
调节坝	-0.61	0.33	1.06	-0.62	-0.61	-0.43	5

监测频次中镇东大丘 > 头道沟大桥 > 东河大桥 > 东南河交汇 > 调节坝, 因子得分较高月份多出现在镇东大丘和东南河交汇, 表明受污染程度较重, 因子得分较低月份多出现在调节坝和东南河交汇, 表明水体污染程度较低; 总体来说, 南河支流排名较高, 污染较重; 调节坝出水断面排名较低, 水质较好, 表明汉丰湖对水体污染有一定控制消减作用.

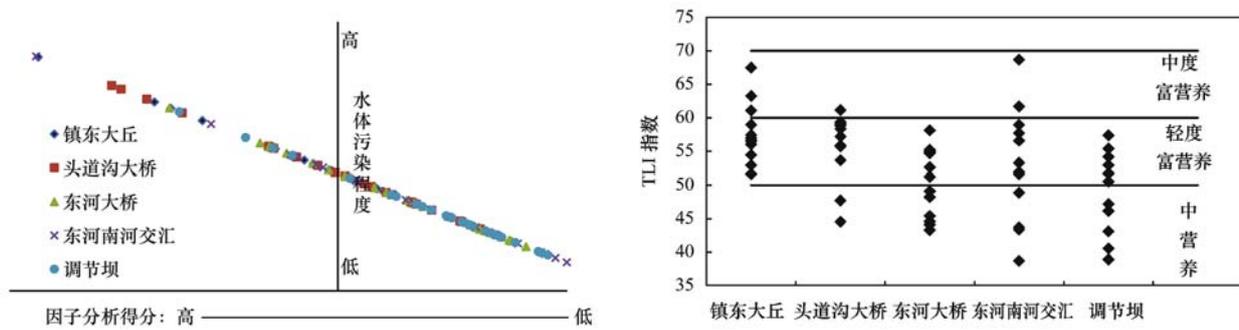


图 8 2015 年汉丰湖各监测点因子分析得分及 TLI 指数变化

Fig. 8 Distribution of FA and TLI of TGR at different points of Hanfeng Lake in 2015

富营养化评价得分 (TLI) 中, 2015 年中富营养化月份占全年比例: 镇东大丘 100%, 平均营养化指数 57.79; 头道沟大桥 83.33%, 平均营养化指数 55.88; 东河大桥 50.00%, 平均营养化指数 50.14; 东南河交汇 66.67%, 平均营养化指数 52.93; 调节坝 50.00%, 平均营养化指数 48.70。试运行年, 上游南河支流来水轻度富营养化至中度富营养化, 下游调节坝出水断面中营养至轻度富营养化, 营养化程度镇东大丘 > 头道沟大桥 > 东南河交汇 > 东河大桥 > 调节坝, 表明汉丰湖前置库对上游支流南河水断面营养化指数有良好的消减效果。

因子分析及富营养化评价表明, 汉丰湖水质最差断面为南河控制断面镇东大丘, 主要污染支流为南河支流, 东河支流水质情况较好, 对汉丰湖污染贡献较小。将镇东大丘作为来水断面, 调节坝为出水断面, 计算汉丰湖对南河来水的消减作用, 平均消减率及最大消减率见表 5。可以看出, 三峡前置库汉丰

湖试运行良好, 对污染指标均有较好消减效果, 其中 Chl-a 消减效果最好, 平均消减率 57.73%, 1~2 月、11~12 月消减率较高; 高锰酸盐指数年平均消减率 28.12%, 5~8 月消减率较高; SRP、TP、TN、TSS、NO₂⁻-N、DN、DP 等年平均消减率 20.15%~22.81%, 总体表现为 1~3 月、11~12 月消减率较高; NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 等年平均消减率 16.92%~18.74%, 1~3 月、11~12 月消减率较高; 水体年平均富营养化指数降低 15.74%, 1~3 月、10~12 月降低幅度较大。3~10 月部分指标消减率为负, 表明低水位河流形态时期, 汉丰湖消落带成为污染物的源使出湖断面污染浓度高于入湖支流断面。综上所述, 汉丰湖 2015 年 1~3 月、10~12 月高水位湖泊形态试运行期间, 对各水质指标均有明显的控制效果, 且除高锰酸盐指数外消减率均高于 5~8 月河流形态时期。结果表明, 三峡前置库汉丰湖可有效控制水体富营养化, 消减三峡入库水体污染物浓度。

表 5 前置库汉丰湖各项水质指标消减率

Table 5 Cut rates of water quality indexes in pretank of Hanfeng Lake

项目	TSS /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	Chl-a /μg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	DN /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	DP /mg·L ⁻¹	SRP /mg·L ⁻¹	TLI
镇东大丘	21.009	3.972	13.563	1.668	1.209	0.830	0.285	0.026	0.194	0.143	0.081	57.792
调节坝	16.648	2.855	5.733	1.327	0.943	0.690	0.231	0.020	0.155	0.110	0.064	48.697
1 月	63.33	29.06	73.96	16.81	31.91	13.20	76.09	12.41	26.99	24.96	9.59	23.72
2 月	58.11	32.32	83.05	25.75	29.36	24.13	5.10	26.32	23.00	24.78	51.28	18.46
3 月	64.47	32.46	54.13	18.97	37.26	20.13	51.51	-7.39	42.67	26.84	-5.92	27.02
4 月	-8.33	26.19	8.92	28.00	5.38	11.08	-42.47	-87.80	43.60	43.56	45.79	9.23
5 月	21.05	35.48	-57.45	-15.64	34.40	46.13	-55.14	-44.76	1.84	6.45	3.94	6.06
6 月	21.05	34.20	20.43	45.30	-43.95	10.73	-148.33	63.00	-18.02	9.68	32.93	9.76
7 月	22.14	16.49	38.57	4.67	4.22	-30.25	18.27	36.11	-12.35	0.00	-20.25	2.81
8 月	22.22	51.78	60.14	41.67	16.04	59.74	-51.81	28.33	0.00	17.39	30.86	19.94
9 月	1.09	13.16	25.04	-17.50	-22.04	-6.12	-434.22	13.44	15.63	12.10	2.27	5.67
10 月	-2.53	35.21	62.80	14.12	-1.49	-45.24	24.64	57.69	29.30	17.58	5.30	17.90
11 月	36.00	17.76	84.22	49.09	50.18	54.34	43.18	30.31	21.95	29.39	2.70	26.49
12 月	35.21	1.01	84.79	47.86	35.77	20.33	73.09	47.02	48.88	53.58	52.73	21.47
平均	20.76	28.12	57.73	20.47	21.98	16.92	18.74	21.69	20.17	22.81	20.15	15.74

4 结论

(1) 汉丰湖试运行期间, 汉丰湖受三峡水位调控影响, 兼具湖泊、河流、回水河湾等多种形态特征. 水质指标变化幅度较大, TN 平均质量浓度 $0.332 \sim 3.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 平均质量浓度 $0.082 \sim 0.311 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年平均营养化指数 53.09, 水体呈轻度富营养化.

(2) 汉丰湖各控制断面监测结果表明, 南河及头道沟等支流控制断面水质较差, 镇东大丘平均富营养化指数 57.79, 东河控制断面较好, 湖体控制断面调节坝水质较好, 调节坝平均营养化指数 48.70; 东南河交汇断面位于两河交汇处, 水动力条件复杂, 水质变化频繁, 是水华发生敏感区域; 总体上湖体水质由上游至下游逐渐变好, 污染程度镇东大丘 > 头道沟大桥 > 东河大桥 > 东南河交汇 > 调节坝, 表明汉丰湖对水体水质控制作用明显.

(3) 汉丰湖作为三峡前置库在试运行年对水体富营养化控制效果显著, 对污染指标均有较好消减效果, 其中 Chl-a 消减效果最好, 平均消减率 57.73%, 高锰酸盐指数年平均消减率 28.12%, SRP、TP、TN、TSS、 NO_2^- -N、DN、DP 等年平均消减率 20.15% ~ 22.81%, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 等年平均消减率 16.92% ~ 18.74%, 水体年平均富营养化指数降低 15.74%. 汉丰湖 2015 年 1 ~ 3 月、10 ~ 12 月高水位湖泊形态试运行期间, 对各水质指标均有明显的控制效果, 且除高锰酸盐指数外消减率均高于 5 ~ 8 月河流形态时期. 结果表明, 三峡前置库汉丰湖可有效控制水体富营养化, 消减三峡入库水体污染物浓度.

参考文献:

- [1] Kay P, Armstrong A, McDonald A, *et al.* A pilot study of the efficacy of residuum lodges for managing sediment delivery to impoundment reservoirs [J]. *Water and Environment Journal*, 2009, **23**(1): 52-62.
- [2] Paul L, Pütz K. Suspended matter elimination in a pre-dam with discharge dependent storage level regulation [J]. *Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters*, 2008, **38**(3-4): 388-399.
- [3] 边金钟, 王建华, 王洪起, 等. 于桥水库富营养化防治前置库对策可行性研究 [J]. *城市环境与城市生态*, 1994, **7**(3): 5-10.
- Bian J Z, Wang J H, Wang H Q, *et al.* Practicability of pre-dam for eutrophication control in Yuqiao reservoir [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1994, **7**(3): 5-10.
- [4] 张毅敏, 张永春, 左玉辉. 前置库技术在太湖流域面源污染控制中的应用探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2003, **25**(6): 342-344.

- Zhang Y M, Zhang Y C, Zuo Y H. Discussion on application of pre-dam in the nonpoint pollution control of Lake Tai basin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2003, **25**(6): 342-344.
- [5] 张毅敏, 段金程, 晁建颖, 等. 河口前置库系统在太湖富营养化控制中的应用研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2013, **29**(3): 273-277.
- Zhang Y M, Duan J C, Chao J Y, *et al.* Application of estuary pre-dam to eutrophication control in Gehu lake [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(3): 273-277.
- [6] Paul L, Pütz K. Suspended matter elimination in a pre-dam with discharge dependent storage level regulation [J]. *Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters*, 2008, **38**(3-4): 388-399.
- [7] Wicher-Dysarz J, Kanclerz J. Functioning of small lowland reservoirs with pre-dam zone on the example of Kowalskie and Stare Miasto lakes [J]. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 2012, **14**: 885-897.
- [8] Bian B, Hua G F, Li L, *et al.* Elimination of agricultural nonpoint source pollution using a pre-dam in the Taihu Lake basin: perspective from a laboratory study [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**(40-42): 7450-7459.
- [9] 陈志笃, 王立志. 云蒙湖前置库生态效益评价 [J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(28): 11489-11490, 11527.
- Chen Z D, Wang L Z. Study on the ecological benefit evaluation of Yunmeng Lake pre-reservoir system [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(28): 11489-11490, 11527.
- [10] Paul L. Nutrient elimination in pre-dams; results of long term studies [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1-3): 289-295.
- [11] 吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 等. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3504-3518.
- Lü M Q, Wu S J, Chen C D, *et al.* A review of studies on water level fluctuating zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3504-3518.
- [12] Whigham D F. Ecological issues related to wetland preservation, restoration, creation and assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **240**(1-3): 31-40.
- [13] Azza N, Denny P, Van De Koppel J, *et al.* Floating mats: their occurrence and influence on shoreline distribution of emergent vegetation [J]. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(7): 1286-1297.
- [14] 任雪梅, 杨达源, 徐永辉, 等. 三峡库区消落带的植被生态工程 [J]. *水土保持通报*, 2006, **26**(1): 42-43, 49.
- Ren X M, Yang D Y, Xu Y H, *et al.* Eco-vegetation project on water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, **26**(1): 42-43, 49.
- [15] 陈芳清, 张丽萍, 谢宗强. 三峡地区废弃地植被生态恢复与重建的生态学研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 286-291.
- Chen F Q, Zhang L P, Xie Z Q. Vegetation restoration of wasteland in three gorges area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(3): 286-291.
- [16] Anbumozhi V, Radhakrishnan J, Yamaji E. Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **24**(5): 517-523.
- [17] Holmes P M, Esler K J, Richardson D M, *et al.* Guidelines for improved management of riparian zones invaded by alien plants in

- South Africa [J]. *South African Journal of Botany*, 2008, **74** (3): 538-552.
- [18] 涂修亮, 陈建, 吴文华. 三峡库区退化生态系统植被恢复与重建研究[J]. *湖北农业科学*, 2000, (2): 29-31.
Tu X L, Chen J, Wu W H. Study on plant restoration and reconstruction in degradation ecosystems of the Three-Gorge Reservoir area [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2000, (2): 29-31.
- [19] 秦明海, 高大水, 操家顺, 等. 三峡库区开县消落区水环境治理水位调节坝设计[J]. *人民长江*, 2012, **43**(23): 75-77, 100.
Qin M H, Gao D S, Cao J S, *et al.* Design of water level regulating dam for water environmental improvement of drawdown area of Kaixian County in Three Gorges Reservoir area [J]. *Yangtze River*, 2012, **43**(23): 75-77, 100.
- [20] 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 928-935.
Huang Q, He B H, Zhao X L, *et al.* Temporal variation of trophic status in drawdown area of Hanfeng Lake in the storage period of Three Gorges Reservoir in China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 928-935.
- [21] 郭劲松, 谢丹, 李哲, 等. 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价[J]. *环境科学*, 2012, **33** (4): 1129-1135.
Guo J S, Xie D, Li Z, *et al.* Algal community structure and water quality assessment on drawdown area of Kaixian waters in Three Gorges Reservoir during winter storage period [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- [22] 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 922-927.
Wang Y F, Zhao X L, He B H, *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 922-927.
- [23] 朱梦灵, 潘晓洁, 郑志伟, 等. 汉丰湖入湖支流浮游植物群落结构及环境因子影响分析[J]. *水生态学杂志*, 2014, **35** (6): 46-52.
Zhu M L, Pan X J, Zheng Z W, *et al.* Phytoplankton community structure and its correlation with environmental factors in tributaries of Hanfeng Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(6): 46-52.
- [24] 李斌, 王志坚, 金丽, 等. 人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析[J]. *生态学报*, 2012, **32**(5): 1519-1526.
Li B, Wang Z J, Jin L, *et al.* Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon and nitrogen isotope analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(5): 1519-1526.
- [25] 郑志伟, 胡莲, 邹曦, 等. 汉丰湖富营养化综合评价与水环境容量分析[J]. *水生态学杂志*, 2014, **35**(5): 22-27.
Zheng Z W, Hu L, Zou X, *et al.* Eutrophication assessment and analysis of nutrient loading in Hanfeng Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(5): 22-27.
- [26] 交通运输部长江三峡通航管理局. 关于三峡水库 2015 年试验性蓄水实施计划安排及有关事宜的通告 [EB/OL]. <http://www.cjmsa.gov.cn/9/368/2/39/63/5502663.html>, 2015-09-07.
- [27] 肖凤娟. 遵循过程的汉丰湖消落带湿地景观设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [28] 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.
- [29] 庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 等. 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2446-2452.
Qing X Y, Ren Y F, Lü Z Q, *et al.* Characteristics of total nitrogen and total phosphorus pollution and eutrophication assessment of secondary river in urban Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2446-2452.
- [30] 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 三峡库区汉丰湖水质的时空变化特征分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, **38** (3): 136-142.
Huang Q, He B H, Zhao X L, *et al.* Analysis on spatiotemporal variation characteristics of water quality of Hanfeng Lake in Three Gorges Reservoir Region of China [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, **38**(3): 136-142.
- [31] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流华生消机理及其调控 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [32] 中国长江三峡集团公司水情情况 [EB/OL]. <http://www.ctgpc.com.cn/sxjt/sqqk/index.html>.
- [33] Wu B B, Wang G Q, Jiang H, *et al.* Impact of revised thermal stability on pollutant transport time in a deep reservoir [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **535**: 671-687.
- [34] 刁晓君, 李一葳, 王曙光. 水生生物过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 107-113.
Diao X J, Li Y W, Wang S G. Effects of outbreak and extinction of algal blooms on the microbial community structure in sediments of Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 107-113.
- [35] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽娟, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 641-648.
Zheng B H, Zhang J L, Wang L J, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning river during sensitive period of algal blooms [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 641-648.
- [36] 李飞鹏, 张海平, 陈玲. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3854-3861.
Li F P, Zhang H P, Chen L. Temporal and spatial distribution of environmental factors and chlorophyll-a and their correlation analysis in a small enclosed lake [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3854-3861.
- [37] 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 等. 大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3748-3754.
Yang F X, Jian H M, Tian L, *et al.* Distribution characteristics of COD and DO and its influencing factors in the Daliaohe Estuary [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3748-3754.
- [38] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 1-6.
Zheng B H, Cao C J, Qin Y W, *et al.* Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29** (1): 1-6.
- [39] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [J]. *Science*, 1983, **221** (4611): 669-671.

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行