

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

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

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖,潘月鹏,刘学军(1279)

兰州春夏季 PM₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)

2015年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常森(1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张扬,庄国强(1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李森,果钊(1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元(1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 边博,周燕,张琴(1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)

g-C₃N₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 范艺,王哲,赵连勤,吴德意(1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 南亚萍,周国田,苏雪莹,袁林江(1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH₄ 厌氧去除特性 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕幽,汤蜜(1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 陈珊,丁成庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)

淹水水稻土消耗 N₂O 能力及机制 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 杨雨滢,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 迟苏琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 孙松,李楚娴,张成,王永敏,王定勇(1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 容跃(1726)

《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征

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, 重庆 400715)

摘要: 汉丰湖是为解决三峡蓄水在重庆市开县(今开州区,下同)境内形成的 38 km² 消落带修建的前置库,因独特的“库中库”调控模式,季节性大范围消落区湿地、生活污染和农业面源污染源、城市和人口承载,具有特殊的水文特征及生态环境特征。2015 年汉丰湖试运行期间,汉丰湖受三峡水位调控影响,兼具湖泊、河流、回水河湾等形态特征,结合水文形态变化特征和水质指标时间聚类分析,结果表明:①试运行年水文水质有 4 个特征变化时期:5~8 月为 T1(河流形态期),1 月、3 月和 11~12 月为 T2(湖泊形态期),2 月、4 月和 9 月为 T3(水位变动期),10 月为 T4(水华敏感期)。②通过主成分分析和逐步回归分析发现汉丰湖水体富营养化在不同时期受不同主导成分影响,主成分累积贡献率在上述时期分别为 82.93%、77.61%、78.32%、88.40%。T1 时期主要水质影响指标为 DP、TP、SD、pH;T2 时期主要水质影响指标为 TN、DN、DP、TP、NO₃⁻-N;T3 时期主要水质影响指标为 SD、NH₄⁺-N、DN、T;T4 时期主要水质影响指标为 TN、DN、DO、NH₄⁺-N、pH、高锰酸盐指数、H、NO₃⁻-N。③用主成分分析简化水质指标之间的相关性,以因子得分(score values)为自变量用于多元线性回归分析,结果发现各时期 Chl-a 与因子分值明显相关,T1 时期 Chl-a 主要受水体氮含量影响,主要影响成分为 PC₂;T2 时期 Chl-a 主要受水体氮、磷营养盐状态影响,主要影响成分为 PC₁;T3 时期 Chl-a 主要受水深变化影响,主要影响成分为 PC₃;T4 时期 Chl-a 主要受水动力影响,主要影响成分为 PC₃。综上所述,汉丰湖试运行期间频繁且大幅度的水位变动是其水文水质变化的重要影响因素。

关键词: 汉丰湖;试运行年;多元统计分析;水文水质;变化特征

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1366-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.201607173

Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir

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

(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: Hanfeng Pre-reservoir is very rare in the world which is specially designed to reduce the impact of Fluctuating Zone, and it is formed in Hanfeng Lake of Three Gorges reservoir. The Hanfeng Pre-reservoir has many special hydrological characteristics and ecological environment features based on its unique “pre-reservoir” control mode, the wide seasonal wetland of Fluctuating Zone, the huge life pollution and agricultural pollution, and the pressure of huge city and excessive population. HanFeng Lake has a variety of morphological features such as lakes, rivers, and other backwater bay, for the effect of water level regulation in Three Gorges, since the successful commissioning of the Hanfeng Lake pre-dam system in 2015. The change of Hanfeng Lake hydrology and water quality during the commissioning was divided into four periods by combining Hydrological and Morphological Variation characteristics with Water quality indicators time clustering analysis: May to August as T1 (river period); January, March and November to December as T2 (lake period); February, April and September as T3 (water level fluctuation period); October as T4 (algal blooms period) in 2015. Principal component analysis and stepwise regression analysis showed that Eutrophication of Hanfeng Lake was dominated by different dominant components at different times and the water quality index factor which has a significant effect on the Chl-a was also different. Cumulative contribution rates of principal components were 82.93%, 77.61%, 78.32%, 88.40% for each period, respectively. The main water quality indicators of T1 (river period) were DP, TP, SD, pH and the significant influencing index of Chl-a was PC₂, so Chl-a was mainly affected by water nitrogen content. The main water quality indicators of T2 (lake period) were TN, DN, DP, TP, NO₃⁻-N and the significant influencing index of Chl-a was PC₁, so Chl-a was mainly affected by water eutrophication including nitrogen and phosphorus nutrient status. The main water quality indicators of T3 (water level fluctuation period) were SD, NH₄⁺-N, DN, T and the significant influencing index of Chl-a was PC₃. so Chl-a was mainly affected by water level fluctuation. The main water quality indicators of T4 (algal blooms period) were TN, DN, DO, NH₄⁺-N, pH, permanganate index, H, NO₃⁻-N and the significant influencing index of Chl-a was PC₃. so Chl-a was mainly affected by flow rate and hydrodynamic conditions. As mentioned in the review, the frequent and significant water level changes during the commissioning of Hanfeng Lake were the

收稿日期: 2016-07-25; 修订日期: 2016-10-27

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)重大项目(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

* 通信作者,E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

important factors influencing the change of hydrological and water quality characteristics.

Key words: Hanfeng Lake; commissioning; multivariate statistical analysis; hydrology and water quality; variation characteristics

2003年6月蓄水以来,三峡库区正常蓄水高程175 m与汛限制水位145 m形成30 m消落带,消落带是库区径流、污染物汇集区域^[1]. 落干期消落带拦截碳氮磷等污染物质,淹水期消落带植被衰亡有机残体腐烂分解释放碳氮磷等元素,消落带土壤与上覆水体之间存在物质交换与迁移过程,消落带是污染物的“汇”、“源”^[2]. 农业生产中污染物质、库区居民生活垃圾及地表径流携带营养物质在消落期沉积于消落带土壤中^[3],淹没期向水中释放氮、磷以及有机污染物,使水体呈现不同程度营养状态^[4]. 三峡水库部分支流库湾发生不同程度水华现象^[5],已成为备受关注的生态环境问题之一,同时,因干流水体倒灌及顶托作用引起支流水体的流速减缓、水位升高等显著水文梯度变化特征^[6],使得支流库湾营养盐受地表径流输入、干流倒灌、底泥和消落带释放等多种因素影响^[7].

河流水质具有季节性和区域性特征^[8],其变化会对水生态系统产生一系列影响^[9]. 并且各因素之间也存在着一定的相关性,使在高维空间中研究水质污染程度的变化规律变得十分复杂,多元统计在对多维复杂数据集分析中具有明显优势,可以快速发掘水质监测数据中隐藏在大规模原始数据集中的重要信息,有效快捷地分析系统中变量间的内在规律. 近年来,多元统计分析已成为有效评估海洋、河流和湖泊水质时空变化特征以及识别水体污染源的有效工具^[10].

三峡水库运行在开县境内会形成面积45 km²的消落带^[11],汉丰湖是三峡库区最大库中湖,也是前置库在三峡的首次应用^[12]. 汉丰湖试运行期间受三峡水位调控影响显著,兼具湖泊、河流、回水河湾等多种形态特征且年度周期重现. 汉丰湖水文条件及生态环境特征十分特殊,因其独特“库中库”调控模式,季节性大范围消落区湿地、庞大的生活污染和农业面污染源、巨大的城市和人口承载,特别是关系到环湖居住36万三峡移民的安稳致富,在三峡库区具有非常独特的生态和经济地位,同时直接影响下游小江流域乃至三峡库区水质环境. 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^[4,13]、汉丰湖夏季及支流浮游植物群落与环境因子^[14,15]等蓄水期、泄水期单一水文形态下的水质水生态研究^[16,17],尚无对三

峡水位年际影响下湖泊、河流、回水河湾等水文形态周期变化下的水文水质特征研究.

2012年5月汉丰湖水位调节坝通过竣工验收,2013年开始进行试验性运行,同年5月出现浮萍漂浮现象^[18],2015年10月监测到水华现象^[19]. 本研究以2015年为汉丰湖典型试运行年,利用聚类分析、因子分析、回归分析等多元统计分析方法,分析汉丰湖水文水质变化特征,探究汉丰湖水文形态周期变化下的水质变化规律及主导因子,以为汉丰湖运行及库区其他相似水文特征下的支流回水末端地区水环境治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域及研究对象

开县境内地形为人口密集的开阔平坝,距县城4.5 km的调节坝以上消落区面积24 km²,最大消落深度18.5 m,是三峡库区面积最大、受影响人口最多的消落区. 汉丰湖是西部内陆最大城市人工湖泊,东起水位调节坝,南河、东河、澎溪河(小江)交汇呈“Y”字形沿县城东西延展,蓄水量8 000万 m³,湖泊东西长12.51 km,南北宽5.86 km. 调节坝以上控制流域面积3 198.6 km²^[11].

汉丰湖建成正式运行后,水位调节坝以上减少消落带面积14.48 km²,水位消涨幅度由18.5 m降至6.5 m,并形成典型的双重水位变化. 冬季,三峡库区高水位运行期间,汉丰湖维持在175 m高水位;夏季,当三峡水库水位消落至145 m时,由于水位调节坝的蓄水作用,汉丰湖水位保持在168.5 m^[20].

1.2 调查采样与分析方法

布置5个控制断面及采样点(图1),分别为调节坝(HF1)、东南河交汇(HF2)、东河(HF3)、头道沟(HF4)、南河(HF5);每月下旬采样一次;根据2015年汉丰湖试运行期蓄水方案和三峡水库蓄水时间^[21],设置断面中垂线分层采样,采样点水深(H)分别在水面以下0.5 m、 $1/2H$ 、 $H-0.5$ m等分上、中、下三层采样. 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 H (水深)、 T (水温)、pH、DO(溶解氧)、Chl-a(叶绿素)等指标,SD(透明度)采用塞氏盘法, v (流速)采用便携式流速仪(LGY, NS, 中国)测定;

采集水样低温(4℃)保存,到达实验室后立刻进行样品测试,参照文献[22]测定 TSS(总固体悬浮物)、高锰酸盐指数、TN(总氮)、DN(可溶性总

氮)、 NO_3^- -N(硝态氮)、 NH_4^+ -N(氨氮)、 NO_2^- -N(亚硝态氮)、TP(总磷)、DP(可溶性总磷)、SRP(正磷酸盐)等指标。



地图数据来源为文献[23]

图1 汉丰湖采样断面示意

Fig. 1 Sampling point distributions in Hanfeng Lake

1.3 数据处理及分析方法

多元统计分析法包括因子分析(FA)^[24]、系统聚类分析(CA)^[25]、主成分分析(PCA)^[26]等能够在处理数据过程中保留原始变量大部分信息,其中主成分分析能够克服变量选择时的冗余和相关,有助于选择信息量最丰富的因子进行模型构造^[27],在研究水质污染状况及水质时空变化规律中应用广泛^[28]。

(1) 系统聚类分析

聚类是按照特定标准把一个数据分割成不同类,使得类内相似性及类间差异性尽可能大^[29],水质评价中常根据采样时间和采样地点对水质时空变化特征进行聚类分析^[30],分析水质变化时空变化特征或分析指标间相似性^[31,32]。研究中以欧式距离(Euclidean distance)度量样本间距离,运用Ward算法生成层次结构聚类树,具体方法参考文献[33]。

(2) 主成分分析

主成分分析是将多指标简化为少量综合指标,用少数变量尽可能多反映原变量信息,保证原信息损失小且变量数目尽可能少^[33],具体方法参考文献[33]。

(3) 多元线性回归

多元线性回归用含有多个解释变量线性回归模型,解释因变量与其他多个自变量之间的线性关系。估计多元线性回归方程中未知参数是多元线性回归分析核心任务之一,其中 t -test 用于检验回归系数, R^2 用于验证预测结果的精确度^[34],具体方法参考

文献[33]。

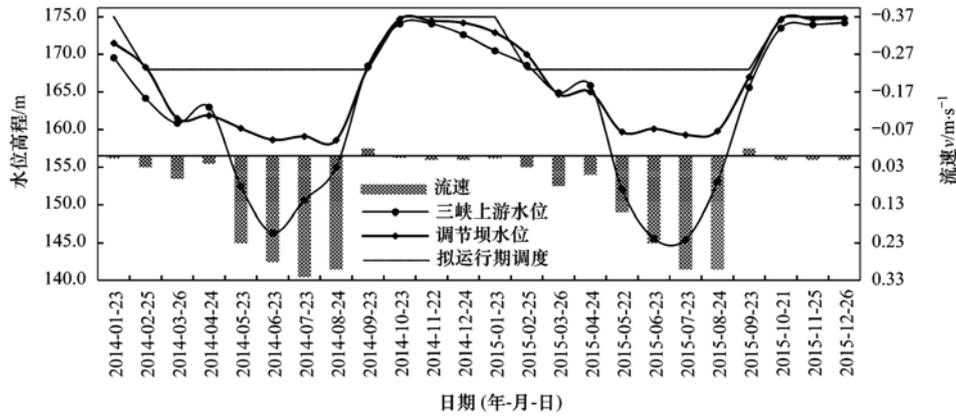
多元统计分析等均利用 SPSS 16.0 处理, $P < 0.05$ 为显著性相关, $P < 0.01$ 时为极显著相关。

2 结果与讨论

2.1 水文形态与水体分层变化特征

以调节坝为汉丰湖水位监测断面,调节坝闸门底板高程 156.50 m^[11],图2为2014年1月~2015年12月汉丰湖调节坝流速及水位与监测当日三峡大坝上游水位时间变化。2015年汉丰湖调节坝水深 2.80~18.50 m,平均流速 $-0.02 \sim 0.32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。1月、11~12月汉丰湖水深受三峡蓄水影响,水位增高、水域面积加大、流速减缓,接近天然湖泊形态;2~4月受三峡泄水影响,水域面积减小、水位降低,消落带裸露,湖泊形态向河流形态演替;5~8月三峡水位低于坝底高程,汉丰湖呈自然河流形态;汛期末9月三峡开始蓄水影响,三峡水位快速抬升,淹没消落带,呈现部分回水河湾特征,同时汉丰湖流域来水短时间内补给不足,造成下游小江回流补给汉丰湖出现倒流,但东河、南河来水呈下泄状态,调节坝出现典型回水特征,上层水体为倒流回水,下层水体为下泄^[35];10月后上游来水与下游回水在汉丰湖相互顶托达到相对平衡出现水体滞流状态^[36],水体基本静止呈湖泊形态。

水温垂向分层现象不明显,1~4月、9~12月出现了水温弱分层现象,9月、10月最明显,表底水



流速正值为上流流向下游,负值为三峡回水下游流向上游;三峡水位数据来源为文献[37]

图2 2014~2015年汉丰湖调节坝流速及水位与三峡坝前水位变化

Fig. 2 Map of distribution flow rate and water level of regulating dam and upstream water level of TGR per month of (2014-2015)

温差为 1.09 ~ 2.17℃, 1 ~ 4 月、9 ~ 12 月表底温差均小于 1.00℃, 东河大桥、东南河在 1 ~ 2 月出现了微弱的逆温分层现象, 表层水温略低于底层水温, 表底逆温最大达到 -0.76℃, 这是因为冬季为湖泊表层水温受气温降低的影响而降低, 底层水体降温滞后, 其与 3 ~ 4 月春季气温回升时水库水体形成的弱正温分层过程正好相反; 到 5 月以

后, 上游来流量增大, 汉丰湖恢复成河流形态, 流速增大, 水温分层消失, 这与前人预测及监测的结果相符^[35], 9 ~ 10 月受三峡蓄水影响, 顶托回水使汉丰湖水位持续缓慢上升, 下游三峡回水水温高于上游支流来水, 形成水温弱分层, 11 ~ 12 月随着气候降低使上层水温降低、上下层水体混合, 上下层温差逐渐减小(图 3)。

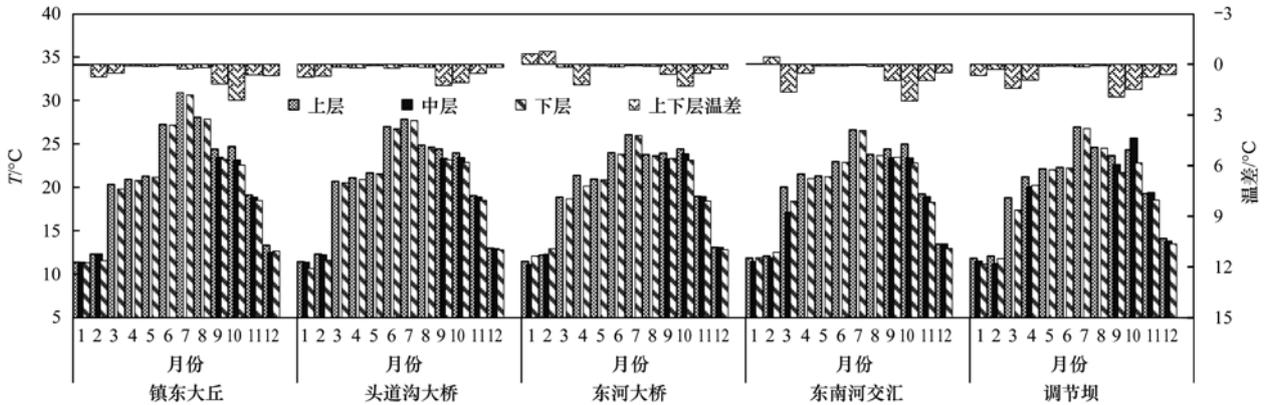


图3 汉丰湖水体水温变化及分层特征

Fig. 3 Variation of water temperature and characteristics of stratification in Hanfeng Lake

2.2 主要水质指标时间变化特征

图 4 为汉丰湖 2015 年主要水质指标时间变化特征, 相关性分析发现水位、流速等指标与部分水质指标显著相关 ($P < 0.05$), 表明汉丰湖水质时间变化受水文变化影响. 主要水质指标变化呈现较为显著时段特征, 1 月汉丰湖呈自然湖泊形态, 水体透明度较高, 氮磷含量较低; 2 月受三峡泄水影响汉丰湖水位降低, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TN 、 TP 、 Chl-a 平均浓度分别增加 3.2、1.6、1.3、6.2 倍, 表明水位降低扰动消落带底泥造成氮磷释放污染水体, 藻类死亡沉降使水体透明度增大; 3 月水位持续降低, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度降低, 但流速逐渐增大使水体更新加快, 氮、磷、 Chl-a

浓度有所降低, 3 ~ 4 月水位小幅回升, 流速减缓, 较高氮、磷含量及适宜温度及水动力条件, Chl-a 浓度升高. 5 ~ 8 月汉丰湖呈自然河流形态, 流速较大, 水体滞留时间短, 水动力条件不适宜藻类生长, Chl-a 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量降低、高锰酸盐指数增大, 表明受流域有机污染增强, 5 月氮磷、高锰酸盐指数较大可能与春耕期农业面源污染有关; 9 月三峡蓄水水位影响汉丰湖, 下游三峡小江顶托回水淹没汉丰湖消落带, 流速为负, Chl-a 浓度升高. 10 月汉丰湖出现水体流滞, 呈湖泊形态, 同时完全淹没消落带, 大面积消落带植被衰亡有机残体腐烂分解释放碳、氮、磷等元素, 氮、磷、高锰酸盐指数、 pH 等指标

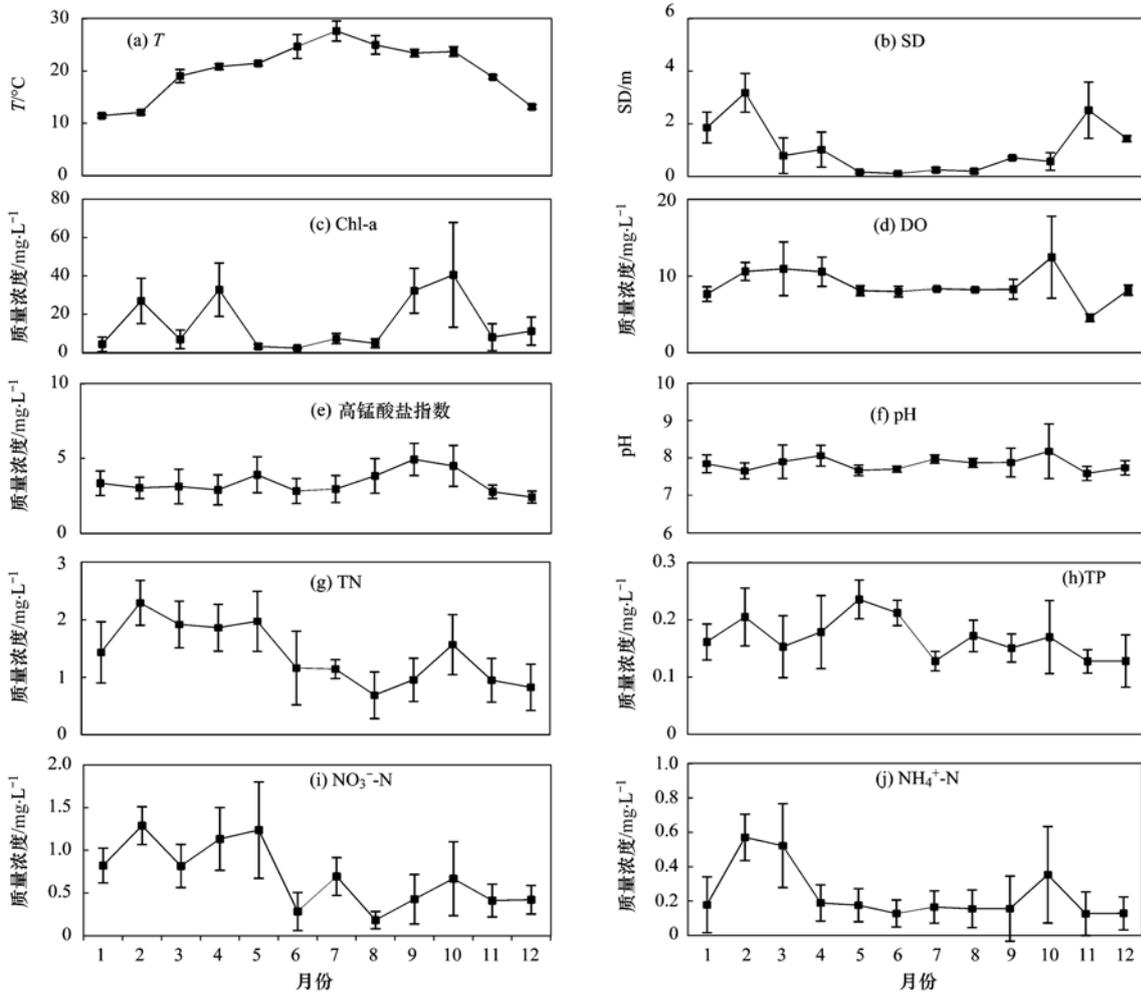


图 4 汉丰湖主要水文水质时间变化特征

Fig. 4 Characteristics distribution of main hydrological and water quality time change in Hanfeng Lake

升高,浮游植物大量繁殖, DO 出现过饱和, Chl-a 浓度最高达 $74.19 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 藻类种群密度 $29.19 \times 10^6 \text{ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 汉丰湖出现水华暴发现象^[38]; 11 ~ 12 月氮、磷、高锰酸盐指数、Chl-a 降低, 水质较好。

2.3 聚类分析

采用系统聚类分析多元统计法对汉丰湖 2015 年 1 ~ 12 月采样点的 17 个水文、水质指标进行时间聚类分析, 所聚类过程见图 5。结合水文形态时间变化特征和时间聚类分析树状图, 将汉丰湖试运行年水文、水质时间变化分为 4 个时期: 2015 年 5 ~ 8 月为一个时期 (T1 期), 河流形态时期; 2015 年 1 月、3 月和 11 ~ 12 月为一时期 (T2 期), 湖泊形态时期; 2015 年 2 月、4 月和 9 月为一时期 (T3 期), 水位变动时期; 2015 年 10 月为一时期 (T4 期), 水华暴发时期。

2.4 主成分分析

为探究 4 个时期水质变化规律, 对 2015 年汉丰

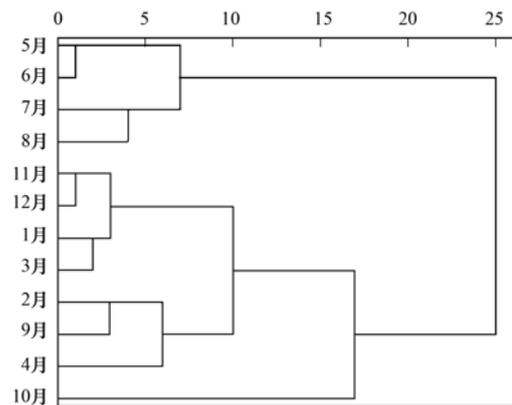


图 5 汉丰湖水文水质时间聚类分析图谱

Fig. 5 Dendrogram of hydrological and water quality time hierarchical cluster analysis in Hanfeng Lake

湖逐月水质指标进行因子分析, 通过降维 (特征值大于 1) 提取若干个主成分, 其累积贡献率体现水质指标绝大数信息^[39]。进行因子分析前, 先对数据进行 KMO (Kaiser-meyer-olkin) 值分析和 Bartlett 球型

检验[(χ^2) , Bartlett's test of sphericity], 结果见表 1. 其中有 3 个时期检验统计量(KMO)值大于 0.6, 说明研究中监测数据基本适合用于因子分析.

表 1 汉丰湖试运行年(2015 年)分期水质数据 KMO 值分析和 Bartlett 球型检验

Table 1 Data table for Kaiser-meyer-olkin and Bartlett's test of sphericity of staging water quality for commissioning of Hanfeng Lake in 2015

分类序号	分期类型	KMO	Bartlett
1	河流形态期	0.555	0.000
2	湖泊形态期	0.680	0.000
3	水位变动期	0.662	0.000
4	水华敏感期	0.737	0.000

由表 2 可知, 采用 Kaiser 标准化正交旋转法, 根据主成分提取特征值(>1)原则每个时期分别提取 4~5 个主成分, 最大限度减少荷载变量个数且使分析数据反映更多信息, 主成分累积贡献率之和分别为 82.93%、77.61%、78.32%、88.40%.

(1) T1(河流形态期)

PC₁(第一主成分): 因子负荷 25.87%, 反映信息量最大. DP、TP 正相关程度较高、SD、pH 负相关程度较高, 反映汉丰湖水体污染状态. PC₂(第二主成分): 因子负荷 20.42%, DN、NO₃⁻-N、TN 均具有较高正相关度, 反映汉丰湖水体氮含量. PC₃(第三主成分): 因子负荷占 12.89%, H 呈正相关关系, v 呈负相关关系, 反映汉丰湖河流状态特征. PC₄(第四主成分): 因子负荷为 12.40%, TSS 呈负相关关系, 反映汉丰湖湖体外源泥沙对水质的影响. PC₅(第五主成分): 因子负荷为 11.35%, NH₄⁺-N 呈正相关关系, DO 呈负相关关系, 反映汉丰湖水质状态.

(2) T2(湖泊形态期)

PC₁(第一主成分): 因子负荷 27.65%, 反映信息量最大. TN、DN、DP、TP、NO₃⁻-N 正相关程度较高, 反映汉丰湖水体氮、磷营养盐状态, 是湖泊期水体富营养化重要体现. PC₂(第二主成分): 因子负荷为 18.59%, DO、pH、均具有较高正相关度, 反映汉丰湖水体物理状态. PC₃(第三主成分): 因子负荷占 11.81%, T 呈正相关关系, 反映汉丰湖湖泊期水体弱分层特征. PC₄(第四主成分): 因子负荷为 11.78%, NO₂⁻-N、Chl-a 呈正相关关系, 反映汉丰湖湖污染及浮游植物变化特征. PC₅(第五主成分): 因子负荷为 7.78%, H 呈正相关关系, 反映汉丰湖湖泊形态特征.

(3) T3(水位变动期)

PC₁(第一主成分): 因子负荷为 29.46%, 反映信息量最大. SD、NH₄⁺-N、DN 正相关程度较高、T 负相关程度较高, 反映汉丰湖水位变动期间氮营养盐形态转化特征; PC₂(第二主成分): 因子负荷为 20.86%, NO₃⁻-N、v, 反映汉丰湖水位变动造成流速变化对水体自净影响. PC₃(第三主成分): 因子负荷占 15.97%, Chl-a、pH、H、DO 呈正相关关系, 反映汉丰湖水深 H 变化过程中营养状态造成的浮游植物生长对水体酸碱度、溶解氧的影响. PC₄(第四主成分): 因子负荷为 12.04%, PO₄⁻-P、DP 呈正相关关系, 反映汉丰湖水位变动期磷元素变化特征.

(4) T4(水华敏感期)

PC₁(第一主成分): 因子负荷为 37.69%, 反映信息量最大. DO、NH₄⁺-N、pH、高锰酸盐指数、H 正相关程度较高, NO₃⁻-N 呈负相关关系, 反映汉丰湖水体污染状态. PC₂(第二主成分): 因子负荷为 28.91%, DP、PO₄⁻-P、DN、TN、TP、TSS、Chl-a 均具有较高正相关度, 反映汉丰湖水华期间氮磷含量特征及浮游植物生长特征, 是水体富营养化重要体现. PC₃(第三主成分): 因子负荷占 10.95%, v 呈负相关关系, 反映水动力特征对水华影响. PC₄(第四主成分): 因子负荷为 10.85%, SD 呈正相关关系, NO₂⁻-N 呈负相关关系, 反映水华对透明度影响.

2.5 逐步回归分析

王丽平等^[34]选择 6 个主成分因子的分值(Score values PC_n)作为自变量进行多元线性回归得出大宁河 Chl-a 的预测回归模型为: $\lg(\text{Chl-a}) = 0.579 - 0.191 \times (\text{Score1}) - 0.013 \times (\text{Score2}) - 0.013 \times (\text{Score3}) + 0.042 \times (\text{Score4}) + 0.134 \times (\text{Score5}) - 0.059 \times (\text{Score6})$, 相关系数 $R = 0.731$. 其对水质理化指标进行因子分析并获得能够代替原有变量大部分信息且相互独立的因子变量基础上, 进行多元线性回归分析, 提高了统计稳定性, 避免了单纯使用多元线性回归方法的局限性. 本研究以 2015 年汉丰湖 4 个时期主成分因子的分值为自变量、Chl-a 为因变量进行逐步回归, 得到 Chl-a 的预测回归模型如表 3 所示.

汉丰湖既是城市内湖, 也是典型的水敏性湿地公园^[40], 同时在试运行期不同特征时期具有湖泊、河流、回水河湾等多种形态特征, 湖泊水质还具有季节性和区域性特征, Chl-a 影响因素众多, 且各因素之间也存在着一定的相关性, 使在高维空间中水文、水质、水生态的变化规律变得十分复杂. 因此

表 2 汉丰湖试运行年(2015年)分期水质主成分载荷矩阵

Table 2 Staging water quality of principal component loading matrix for commissioning of Hanfeng Lake in 2015

T1(河流形态期)主成分旋转载荷矩阵						T3(水位变动期)主成分旋转载荷矩阵				
监测指标	主成分					监测指标	主成分			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅		PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
DP	0.924	0.083	0.014	0.16	0.017	<i>T</i>	-0.93	-0.295	0.089	0.04
TP	0.859	0.242	0.151	0.049	0.029	SD	0.876	0.111	-0.079	-0.262
SD	-0.709	0.121	0.463	0.087	0.022	NH ₄ ⁺ -N	0.875	-0.005	0.238	0.111
pH	-0.708	-0.169	0.111	0.254	0.579	DN	0.724	0.6	0.042	0.023
Chl-a	-0.646	0.141	-0.169	0.573	0.105	TN	0.66	0.654	0.002	-0.041
<i>T</i>	-0.643	-0.211	-0.405	0.353	0.037	NO ₃ ⁻ -N	0.533	0.738	-0.077	-0.082
NO ₂ ⁻ -N	0.63	0.471	0.018	0.054	-0.3	<i>v</i>	0.316	0.73	0.149	-0.117
DN	0.076	0.977	0.081	-0.019	-0.032	TSS	-0.304	0.673	0.071	-0.24
NO ₃ ⁻ -N	0.126	0.968	-0.012	-0.044	0.044	NO ₂ ⁻ -N	-0.083	-0.601	0.03	0
TN	0.229	0.796	-0.085	-0.068	-0.443	TP	0.328	0.541	0.156	0.438
<i>v</i>	-0.056	-0.161	-0.905	0.022	0.017	Chl-a	-0.044	0.175	0.898	0.197
<i>H</i>	0.145	-0.364	0.705	-0.273	0.12	pH	-0.454	0.071	0.779	-0.121
TSS	0.259	0.187	-0.059	-0.813	0.275	<i>H</i>	0.169	-0.275	0.777	0.151
PO ₄ ⁻ -P	0.456	-0.472	-0.182	0.641	0.118	DO	0.429	0.248	0.715	-0.27
高锰酸盐指数	0.314	0.324	-0.291	0.574	-0.095	PO ₄ ⁻ -P	-0.337	-0.292	-0.033	0.825
DO	-0.261	-0.037	0.406	-0.107	0.803	DP	0.564	0.226	0.032	0.719
NH ₄ ⁺ -N	-0.188	0.171	0.362	0.24	-0.731	高锰酸盐指数	-0.455	-0.406	0.229	0.588
贡献率/%	25.87	20.42	12.89	12.4	11.35	贡献率/%	29.46	20.86	15.97	12.04
累计贡献率/%	25.87	46.29	59.18	71.58	82.93	累计贡献率/%	29.46	50.32	66.28	78.32

T2(湖泊形态期)主成分旋转载荷矩阵						T4(水华敏感期)主成分旋转载荷矩阵				
监测指标	主成分					监测指标	主成分			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅		PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
DP	0.898	0.168	-0.162	0.113	0.015	NO ₃ ⁻ -N	-0.945	0.035	0.286	-0.027
TP	0.855	0.064	-0.069	0.323	-0.001	DO	0.918	0.296	0.127	0.183
TN	0.754	0.322	0.317	0.077	-0.119	NH ₄ ⁺ -N	0.906	0.269	0.042	0.093
DN	0.731	0.528	0.33	0.075	-0.126	pH	0.896	0.216	-0.259	-0.104
NO ₃ ⁻ -N	0.717	0.298	0.025	-0.18	-0.205	高锰酸盐指数	0.857	0.393	-0.182	-0.177
高锰酸盐指数	0.687	0.26	0.061	0.054	0.391	<i>H</i>	0.752	0.335	0.353	0.142
PO ₄ ⁻ -P	0.687	-0.184	-0.393	-0.269	-0.028	<i>T</i>	0.628	0.247	0.386	0.385
NH ₄ ⁺ -N	0.522	0.469	0.435	0.315	-0.132	DP	0.437	0.87	-0.081	0.064
DO	0.173	0.918	0.101	0.008	0.006	PO ₄ ⁻ -P	0.416	0.833	0.026	0.239
pH	0.157	0.817	-0.089	-0.092	0.33	DN	-0.287	0.807	0.395	-0.033
SD	-0.25	-0.666	0.081	-0.445	0.205	TN	0.547	0.805	0.042	0.06
<i>T</i>	-0.161	-0.105	0.874	0.18	0.118	TP	0.093	0.728	-0.497	0.312
<i>v</i>	0.248	0.543	0.586	-0.143	-0.262	TSS	0.32	0.726	0.308	-0.08
Chl-a	0.176	0.056	-0.036	0.89	0.131	Chl-a	0.634	0.72	-0.034	-0.048
NO ₂ ⁻ -N	-0.066	-0.043	0.437	0.747	-0.163	<i>v</i>	0.024	-0.108	-0.74	-0.044
<i>H</i>	-0.149	-0.039	-0.044	0.043	0.791	NO ₂ ⁻ -N	-0.187	-0.17	0.101	-0.938
TSS	0.262	0.267	0.306	-0.234	0.419	SD	-0.246	-0.113	0.567	0.734
贡献率/%	27.65	18.59	11.81	11.78	7.78	贡献率/%	37.69	28.91	10.95	10.85
累计贡献率/%	27.65	46.25	58.06	69.83	77.61	累计贡献率/%	37.69	66.6	77.55	88.40

1) 黑体字表示较高因子载荷

表 3 Chl-a 和环境因子的回归方程

Table 3 Stepwise multiple regression between Chl-a and environmental factors

分期序号	回归方程	R ²	Sig.
T1(河流形态期)	lg(Chl-a) = 0.221 × (Score1) - 0.579 × (Score2) - 0.023 × (Score3) + 0.024 × (Score4) + 0.071 × (Score5)	0.603	P < 0.01
T2(湖泊形态期)	lg(Chl-a) = 0.301 × (Score1) - 0.228 × (Score2) - 0.159 × (Score3) + 0.005 × (Score4) + 0.227 × (Score5)	0.476	P < 0.05
T3(水位变动期)	lg(Chl-a) = -0.069 × (Score1) + 0.252 × (Score2) - 0.485 × (Score3) - 0.208 × (Score4)	0.606	P < 0.01
T4(水华敏感期)	lg(Chl-a) = -0.325 × (Score1) + 0.002 × (Score2) + 0.526 × (Score3) - 0.484 × (Score4)	0.774	P < 0.01

利用聚类分析、主成分分析、回归分析等方法提取主要影响分析. 不同特征时期由表 3 结合表 2 主成分分析可知, T1(河流形态期) Chl-a 主要影响成分为 PC_2 , 主要指标为 DN、 NO_3^- -N、TN, 表明 Chl-a 主要受汉丰湖水体氮含量影响显著; T2(湖泊形态期) Chl-a 主要影响成分为 PC_1 , 主要指标为 TN、DN、DP、TP、 NO_3^- -N, 表明 Chl-a 主要受汉丰湖水体氮、磷营养盐状态影响显著; T3(水位变动期) 主要影响成分为 PC_3 , 主要指标为 Chl-a、pH、 H 、DO, 表明 Chl-a 主要受汉丰湖水深 H 变化过程影响显著; T4(水华敏感期) 主要影响成分为 PC_3 , 主要指标为 v , 表明 Chl-a 主要受水动力特征影响显著.

3 结论

(1) 2015 年汉丰湖试运行期间, 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. 1 月和 10~12 月受三峡蓄水影响, 水位较高、水域面积较大、流速缓慢, 接近天然湖泊形态; 5~8 月三峡水位低于坝底高程, 汉丰湖呈自然河流形态; 2~4 月受三峡泄水影响, 汉丰湖水域面积减小、水位降低, 消落带裸露, 湖泊形态向河流形态演替; 9 月受三峡支流小江回水壅水影响, 水位升高, 淹没消落带, 呈现部分回水河湾特征. 根据主要水质指标显著的时段变化特征, 可分为 4 个时期, 其中 2015 年 5~8 月为 T1(河流形态期), 2015 年 1 月、3 月和 11~12 月为 T2(湖泊形态期), 2015 年 2 月、4 月和 9 月为 T3(水位变动期), 2015 年 10 月为 T4(水华敏感期).

(2) 主成分分析结果表明, 汉丰湖水体富营养化现象在不同时期受不同主导成分影响, 不同时期对 Chl-a 有显著影响水质指标因子不同, 主成分累积贡献率分别为 82.93%、77.61%、78.32%、88.40%. 用主成分分析简化水质指标之间的相关性, 以因子得分(Score values)为自变量用于多元线性回归分析中. 结果发现各时期 $\lg(\text{Chl-a})$ 与因子分值明显相关, T1(河流形态期) 主要水质影响指标为 DP、TP、SD、pH, T1(河流形态期) Chl-a 主要影响成分为 PC_2 , 汉丰湖水体氮含量影响显著; T2(湖泊形态期) 主要水质影响指标为 TN、DN、DP、TP、 NO_3^- -N, T2(湖泊形态期) Chl-a 主要影响成分为 PC_1 , 汉丰湖水体氮、磷营养盐状态影响显著; T3(水位变动期) 主要水质影响指标为 SD、 NH_4^+ -N、DN、 T , T3(水位变动期) 主要影响成分为 PC_3 , 汉丰湖水深 H 变化过程影响显著; T4(水华敏感期) 主要水质

影响指标为 TN、DN、DO、 NH_4^+ -N、pH、高锰酸盐指数、 H 、 NO_3^- -N, T4(水华敏感期) 主要影响成分为 PC_3 , 水动力特征影响显著. 综上所述, 汉丰湖试运行期间频繁且大幅度的水位变动是其水文水质变化的重要影响因素, 消落带在河流期为营养盐的“汇”、在湖泊期为营养盐的“源”, 水位变动直接影响水动力条件以及营养盐的释放与富集, 最终影响水体富营养化状态.

参考文献:

- [1] 张翔. 三峡库区消落带典型植物淹水后汞的动态变化及其释放特征[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [2] 杜立刚. 三峡库区消落带植被淹水碳氮磷释放及消落带氮磷交换通量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [3] 谢德体, 范小华, 魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(1): 39-47.
- Xie D T, Fan X H, Wei C F. Effects of the riparian zone of the three-gorges reservoir on the water-soil environment of the reservoir area [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2007, 29(1): 39-47.
- [4] 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.
- [5] 邱光胜, 胡圣, 叶丹, 等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 311-316.
- Qiu G S, Hu S, Ye D, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of Three Gorges Reservoir [J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3): 311-316.
- [6] Ward J V, Tockner K, Schiemer F. Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity[J]. River Research and Applications, 1999, 15(1-3): 125-139.
- [7] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2061-2069.
- Zhang L, Wei J J, Fu L, et al. Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi river backwater area, three gorges reservoir [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2061-2069.
- [8] Singh K P, Malik A, Mohan D, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)-a case study[J]. Water Research, 2004, 38(18): 3980-3992.
- [9] Cullaj A, Hasko A, Miho A, et al. The quality of Albanian natural waters and the human impact [J]. Environment International, 2005, 31(1): 133-146.
- [10] 曲疆奇, 张清靖, 刘盼, 等. 北京陶然亭湖水质的时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1077-1084.
- Qu J Q, Zhang Q J, Liu P, et al. Spatiotemporal variation patterns of water quality of Taoranting Lake, Beijing of China

- [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(4): 1077-1084.
- [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.
Lv 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] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 in China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, **38**(3): 136-142.
- [19] 杨兵, 何丙辉, 王德宝. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4586-4595.
Yang B, He B H, Wang D B. Hanfeng pre-dam commissioning eutrophication status and control evaluation in three gorges reservoir [J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4586-4595.
- [20] 徐静波. 水位变动下消落带湿地公园的生态规划研究——以三峡水库汉丰湖国家湿地公园为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Bouza-Deaño R, Tornero-Rodríguez M, Fernández-Espinosa A J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2008, **361**(3-4): 227-239.
- [25] Xu H S, Xu Z X, Wu W, *et al.* Assessment and spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan River Basin, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **13**: 1641-1652.
- [26] 赵丽, 朱永明, 付梅臣, 等. 主成分分析法和熵值法在农村居民点集约利用评价中的比较 [J]. 农业工程学报, 2012, **28**(7): 235-242.
Zhao L, Zhu Y M, Fu M C, *et al.* Comparative study on intensive use of rural residential land based on principal component analysis and entropy method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(7): 235-242.
- [27] 于珊珊. 小兴凯湖水质变化及驱动力因子分析 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.
- [28] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 71-75.
Hou P Q, Ren Y F, Wang X K, *et al.* Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 71-75.
- [29] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 [J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 359-369.
Xu H S, Xu X Z, Tang F F, *et al.* Spatiotemporal variation analysis and identification of water pollution sources in the Zhangweinan River Basin [J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 359-369.
- [30] Varol M, Şen B. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques; a case study of Behrimaz Stream, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **159**(1-4): 543-553.
- [31] 伊元荣, 海米提·依米提, 王涛, 等. 主成分分析法在城市河流水质评价中的应用 [J]. 干旱区研究, 2008, **25**(4): 497-501.
Yi Y R, Haimit Y, Wang T, *et al.* Application of principal component analysis in analyzing water quality of urban rivers [J]. Arid Zone Research, 2008, **25**(4): 497-501.
- [32] McKenna Jr J E. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis

- [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, **18**(3): 205-220.
- [33] 朱建平. 应用多元统计分析[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2012.
- [34] 王丽平, 郑丙辉. 大宁河叶绿素 a 的因子分值-多元线性回归预测模型研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(9): 1120-1124.
Wang L P, Zheng B H. Prediction of chlorophyll-a in the Daning River by principal component scores in multiple linear regression models[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(9): 1120-1124.
- [35] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
Yang Z J, Liu D F, Ma J, *et al.* Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
- [36] 开县人民政府, 中国环境科学研究院. 汉丰湖流域水污染控制总体实施方案[Z]. 2013.
- [37] 中国长江三峡集团公司. 水情情况[EB/OL]. <http://www.ctgpc.com.cn/sxjt/sqk/index.html>, 2014-01-23/2015-12-26.
- [38] 刁晓君, 李一葳, 王曙光. 水华生消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.
- [39] 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.
- [40] 王斌来, 蒋云龙. 探索三峡库区生态治理模式: 汉丰湖 城在湖中 湖在山中[N]. *人民日报*, 2016-08-01(13).

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohu River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₂ ⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)