



# 农业资源与环境学报

中文核心期刊  
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

## 基于多元统计分析的汉丰湖水质评估及原因解析

乔哲, 何丙辉, 李天阳, 王德宝

引用本文:

乔哲, 何丙辉, 李天阳, 等. 基于多元统计分析的汉丰湖水质评估及原因解析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 261-269.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0019>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 星云湖种植空心菜生长量及净化湖水效果分析

杨绍聪, 吕艳玲, 沐婵, 张艳军, 张钟, 李晓亮, 钱荣青, 李泉清

农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 142-148 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0222>

### 不同尺度下皎口水库水体主要指标空间变异研究

魏文娟, 毛跃军, 郝虎林, 秦伟颖, 朱莹静, 王翔, 方琳

农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 157-163 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0241>

### 水葫芦根系脱落物的氮磷含量分析

张迎颖, 闻学政, 刘海琴, 李晓铭, 严少华, 秦红杰, 张志勇

农业资源与环境学报. 2015, 32(5): 485-489 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0057>

### 滇池水体沉积物磷素特征及其对藻类的影响

程文娟, 包立, 罗雄鑫, 张乃明

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 822-828 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0310>

### 苏州市农业面源污染源强解析与评价

姜滢, 王子博, 尤悦文, 徐培杰, 陈重军

农业资源与环境学报. 2015(4): 363-369 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

乔哲, 何丙辉, 李天阳, 等. 基于多元统计分析的汉丰湖水质评估及原因解析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 261–269.

QIAO Zhe, HE Bing-hui, LI Tian-yang, et al. Comprehensive assessment of water quality in Hanfeng Lake using multivariate analysis[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 261–269.

## 基于多元统计分析的汉丰湖水质评估及原因解析

乔哲, 何丙辉\*, 李天阳, 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:**为明确三峡库区最大的库中湖——汉丰湖水质的时空变化特征及其主要影响因素,在汉丰湖来水区、湖区、出水区设置14个采样点,于2015年每月下旬在各点位采集水样并分析主要水质指标,综合运用多种统计评价方法,解析汉丰湖水质的时空变化特征及主导因素。结果表明,汉丰湖水质空间变化可聚类为4个区域:南河来水区(区域1)、东河来水区(区域2)、汉丰湖上游(区域3)和汉丰湖中下游(区域4),其月份变化可聚类为2个时段:蓄水期(1—2月及9—12月)和泄水期(3—8月)。营养状态指数分析显示区域4中的调节坝(HF5)及调节坝下(XJ1)水质呈中营养状态,而其余点位及区域水质均为轻度富营养,各月份水质表现为1月、12月为中营养,10月为中度富营养,其他月份均为轻度富营养。汉丰湖水体中总氮(TN)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总磷(TP)、可溶性磷(DP)、正磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)浓度均表现为自上游向下游降低趋势。主成分分析揭示流域水土流失是汉丰湖水质恶化的主要诱因,而三峡库区水位调控也对湖区水质产生重要影响。

**关键词:**水环境;时空变化;富营养化;主成分分析;聚类分析

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)02-0261-09

doi:10.13254/j.jare.2019.0019

### Comprehensive assessment of water quality in Hanfeng Lake using multivariate analysis

QIAO Zhe, HE Bing-hui\*, LI Tian-yang, WANG De-bao

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** In this study, we aimed to clarify the temporal and spatial variation and main influencing factors of water quality in Hanfeng Lake, which is the largest lake in the Three Gorges Reservoir (TGR) region of China. A total of 14 sampling sites were studied across different regions, including the inflow, main lake body, and outlet areas of the Hanfeng Lake basin. Water samples were collected at each sampling site at the end of each month in 2015 and water quality parameters were analyzed. Multiple statistical techniques were used to identify spatial and temporal variations in water quality. The water quality of Hanfeng Lake could be clustered into four spatial regions, including the incoming water area of Nan River (Region 1), the incoming water area of East River (Region 2), the upper reaches of Hanfeng Lake (Region 3), and the middle and lower reaches of Hanfeng Lake (Region 4). Variations in water quality could also be grouped into two distinct periods: Storage period (from January to February and September to December) and drainage period (from March to August). Trophic state analysis indicated that water quality in the regulating dam (HF5) and below the regulating dam (XJ1), both of which belonged to Region 4, exhibited moderate eutrophication; Sites in other regions showed slight eutrophication. The eutrophication level was lowest in Janu-

收稿日期:2019-01-08 录用日期:2019-05-27

作者简介:乔哲(1992—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为城市水土保持。E-mail:122602403@qq.com

\*通信作者:何丙辉 E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

基金项目:国务院三峡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)

**Project supported:** Water Quality Monitoring Project of Key Tributaries of the Ecological and Environmental System of the Office of the Three Gorges Construction Committee of the State Council(JJ2015-016); Key Project of the Science and Technology Service Network Program (STS Program) of the Chinese Academy of Sciences(KFJ-EW-ST5-008)

ary and December and highest in October, reaching moderate eutrophication levels; other months showed mild eutrophication levels. The concentrations of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ), total phosphorus (TP), soluble phosphorus (DP), orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ ), and permanganate index ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) showed downward trends from upstream to downstream in the Hanfeng Lake basin. Principal component analysis results implied that soil and water losses contributed most to the deterioration of water quality in the Hanfeng Lake and the regulation of water levels related to the TGR also significantly affected the water quality.

**Keywords:** water environment; temporal and spatial variation; water eutrophication; principal component analysis; cluster analysis

三峡工程作为世界上最宏伟的水利工程之一,在防洪、发电方面带来了巨大的社会效益,但它对整个长江干流、支流流域及下游水域的环境也产生了巨大的影响<sup>[1]</sup>。三峡水库自蓄水以来,消落带土地利用变化、支流流速减缓和营养物质富集造成22条支流爆发水华<sup>[2]</sup>。湖泊富营养化不仅影响水质,扰乱水生生态系统<sup>[3]</sup>,同时富营养化湖泊中的部分藻类会释放毒素,导致水处理成本增加,甚至造成饮用水危机<sup>[4]</sup>。重庆市开州区位于三峡库区澎溪河支流回水末端,为移民人口密集的开阔平坦地形,是三峡库区面积最大、受人口影响最多的消落区<sup>[5-6]</sup>。开州区为解决消落区生态环境问题,利用水位调节坝工程拦蓄减少消落区范围,形成了兼具湖泊、河流、回水河湾等多种形态特征和明显年度周期的前置水库——汉丰湖<sup>[7-8]</sup>。其具有独特的反季节消落区湿地特点,生活污染和农业面污染源过多,受调节坝试运行期水位频繁变动以及河流-湖泊形态交替等多种因素的负

面影响,汉丰湖氮磷含量明显高于水体富营养化的临界浓度<sup>[9-11]</sup>。尽管已有研究表明汉丰湖水体富营养化程度处于中营养-轻度富营养<sup>[10,12]</sup>,但关于汉丰湖水质的时空变化特征及主导因素,尚不清楚。本研究分别在汉丰湖来水区、湖区、出水区设置多处水样采集点,通过高频次采样对汉丰湖及其支流水质因子进行监测,借助多元统计评价方法<sup>[13-15]</sup>,阐明汉丰湖水质的时空变化特征及主导因素,为三峡库区水质的监测管理提供理论指导和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

汉丰湖( $108^{\circ}25'01''\text{E}$ ,  $31^{\circ}11'13''\sim 30^{\circ}26'28''\text{N}$ )位于三峡库区澎溪河中上游的开州城区东河与南河交汇处(图1),范围东起乌杨桥水位调节坝,西至南河大邱坝,南以新城防护堤高程180 m为界,北到开州老县城所在的汉丰坝-乌杨坝一线。库周长为

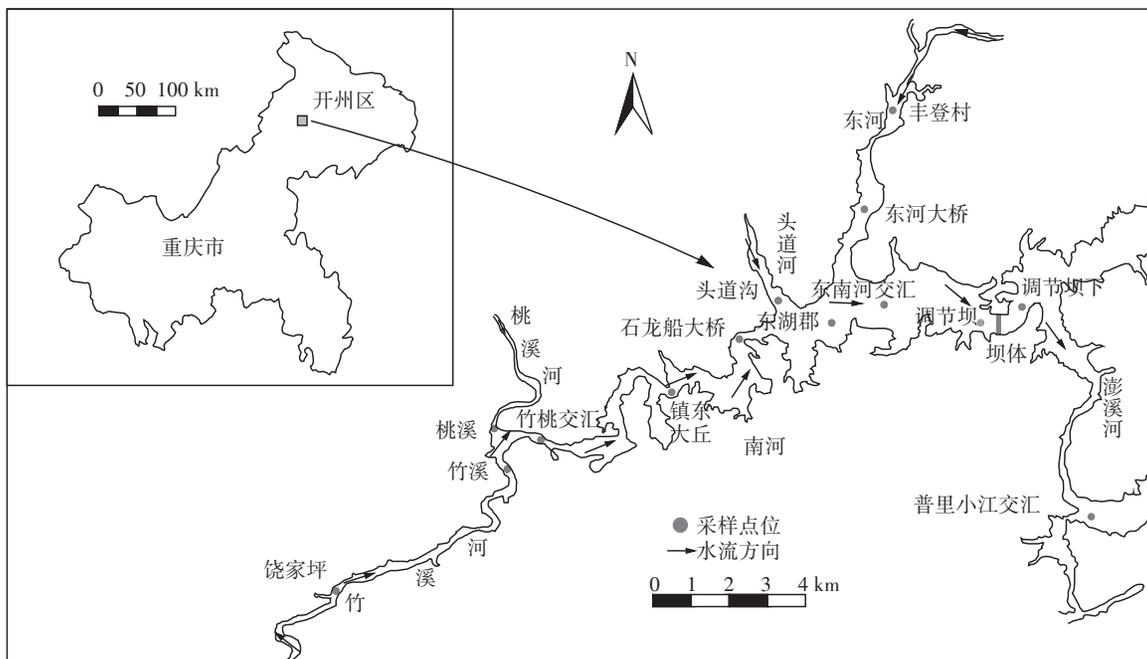


图1 研究区地理位置及采样点示意图

Figure 1 Location map of the study area and sampling sites

36.4 km,湖泊东西跨度 12.51 km,南北跨度 5.86 km,西段狭窄,东段开阔,呈“Y”字形沿城区东西延展,蓄水量 8000 万 m<sup>3</sup>,多年平均流量 24 亿 m<sup>3</sup>,其中约 89.3% 的流量来自东河(55.9%)、桃溪河(17.3%)、竹溪河(13.6%)、头道河(2.5%),是我国西部内陆最大的城市人工湖<sup>[7]</sup>。汉丰湖 2015 年水位处于 154.4~169.9 m 之间,与三峡大坝水位对比发现,在 2015 年 2—4 月下旬,由于三峡库区蓄水,汉丰湖由湖泊形态转变为低水位的河流形态,8 月中旬至 9 月受到三峡回水影响(图 2)河流形态转变为湖泊形态,具有独特性<sup>[14,16]</sup>。

1.2 采样点的设置

本研究共设置 14 个采样点,具体为:汉丰湖来水区竹溪河 ZX1、ZX2,桃溪河 TX1,竹桃交汇处 ZT1,头

道河 TD1,东河 DH1、DH2;汉丰湖湖泊区 HF1、HF2、HF3、HF4、HF5,在汉丰湖下游出水区 XJ1、XJ2,各采样点具体位置及基本信息见表 1。

1.3 样品的采集及测定

1.3.1 水样的采集

本研究于 2015 年每月下旬,选择无雨时(晴天或多云天气为主)采集水样。采样时,依据不同的水深(*h*),水样采集深度不同,具体方法为:*h*<5.0 m 时,采集表层水(距离水体表面 0.5 m),当 5.0 m<*h*<10.0 m 时,采集底面上方 0.5 m 处水样;当 *h*≥10.0 m 时,则采集表层、中层(实测水深一半处)与底层水。

1.3.2 测定指标及方法

现场测定:采用美国哈希便携式多参数水质仪直接测定叶绿素(Chl-a)、水温(*T*)、pH 值、电导率(EC)和溶解氧(DO),用 50 m 的皮尺测定水深(*h*),用塞氏盘测定透明度(SD)。

室内测定:其他指标利用 2.5 L 的采样器采集水样,注入用湖水润洗过的塑料瓶密封保存,当日运回实验室进行测定。固体悬浮物(TSS)采用称质量法测定,高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)采用酸性高锰酸钾法测定。采集的水样分成 2 份,1 份用 0.45 μm 滤膜抽滤,过滤后的溶液用于测定硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、正磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)和可溶性磷(DP);另外 1 份不抽滤,用于测定总氮(TN)和总磷(TP)。TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,TP 和 DP 采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度

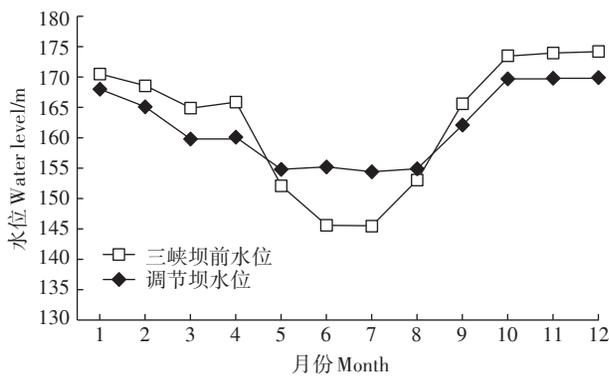


图 2 汉丰湖与三峡库区水位变动图

Figure 2 Changes of water level in Hanfeng Lake and Three Gorges Reservoir

表 1 采样点信息

Table 1 Information of sampling sites in the Hanfeng Lake

区域 Regions	采样点 Sampling sites	名称 Name	定位 Location		备注 Remarks
			经度 Longitude(E)	纬度 Latitude(N)	
来水区	ZX1	饶家坪	108°13'41"	31°06'26"	竹溪河上游
	ZX2	竹溪	108°18'45"	31°08'59"	
	TX1	桃溪	108°18'38"	31°09'24"	
	ZT1	竹桃交汇	108°19'13"	31°09'24"	
	TD1	头道沟	108°23'58"	31°11'13"	
	DH1	丰登村	108°26'58"	31°15'30"	
	DH2	东河大桥	108°25'01"	31°12'05"	
湖泊区	HF1	镇东大丘	108°22'22"	31°10'16"	浮游植物监测点
	HF2	石龙船大桥	108°19'41"	31°11'37"	
	HF3	东湖郡	108°24'40"	31°11'16"	
	HF4	东南河交汇	108°24'47"	31°11'19"	浮游植物监测点
	HF5	调节坝	108°26'11"	31°11'22"	浮游植物监测点
出水区	XJ1	调节坝下	108°27'59"	31°11'28"	
	XJ2	普里小江交汇	108°29'17"	31°08'11"	汉丰湖汇入小江处

法测定,NO<sub>3</sub>-N采用紫外分光光度法测定,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用纳氏试剂比色法测定,NO<sub>2</sub>-N采用紫外分光光度法测定,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P采用钼酸铵分光光度法测定。具体测定方法均参照文献[17]。

1.4 数据分析

采用Excel 2010进行数据处理,SPSS 19.0软件进行聚类分析、方差分析和主成分分析。研究采用综合营养状态指数法,对汉丰湖水体营养化程度进行评价,其计算公式为:

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

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数;W<sub>j</sub>为第j种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(j)为第j种参数的营养状态指数;m为评价因子个数。

各项营养状态指数计算方法:

$$TLI(Chl-a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl-a) \quad (2)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (3)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (4)$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD) \quad (5)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln COD_{Mn}) \quad (6)$$

式中:Chl-a单位为mg·m<sup>-3</sup>,SD单位为m;其他指标单位均为mg·L<sup>-1</sup>。

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,分为贫营养、中营养、轻度富营养、中度富营养、重度富营养等5个级别,即TLI(Σ)≤30为贫营养;30<TLI(Σ)≤50为中营养;50<TLI(Σ)≤60为轻度富营养;60<TLI(Σ)≤70为中度富营养;TLI(Σ)>70为重度富营养。

2 结果与分析

2.1 水体营养化程度的时空分布评估

表2表示了汉丰湖流域水质富营养化状况的空间聚类特征。从表中可以看出,汉丰湖流域的富营养化程度可聚类为4个空间区域。第1区域位于南河来水区,包括了TX1、ZT1、ZX1、ZX2四处采样点,该区各采样点水质呈轻富营养化特征;第2区域则位于东河来水区,包括了DH1、DH2两处采样点,且各采样点水质均为轻富营养;第3区域属于汉丰湖上游,包括了HF1、HF2、TD1三处采样点,该区各采样点水质均为轻富营养;第4区域位于汉丰湖流域中下游,包括了HF3、HF4、HF5、XJ1、XJ2五处采样点,其中HF5和XJ1采样点水质营养程度为中营养,其余采样点水质为轻度富营养。

表3表示了汉丰湖流域水质富营养化状况的时间聚类特征。从表中可以看出,汉丰湖流域的富营养化程度可聚类为两个时间周期。第1个时期属于蓄水期,时间为当年1—2月和9—12月,此时间段,1月、12月的水质营养程度为中营养,2月、9月、11月的水质为轻度富营养,而10月份水质为中度富营养;第2个时期为泄水期,时间为3—8月,此时段中各月水质均为轻度富营养。

2.2 汉丰湖环境因子特征

图3为汉丰湖流域水体理化指标时空变化。水体蓄水期和泄水期水温在4个空间区域差异均显著(P<0.05),其平均值分别为17.22、23.46℃;蓄水期和泄水期pH值在南河来水区、东河来水区与汉丰湖上

表2 各采样点综合评价与空间聚类结果

Table 2 Results of comprehensive evaluation and sampling sites clustering

项目 Items	南河来水区(第1区) Incoming water area of Nan River (Region 1)				东河来水区(第2区) Incoming water area of East River(Region 2)		汉丰湖上游(第3区) Upper reaches of Hanfeng Lake(Region 3)			汉丰湖中下游(第4区) Middle and lower reaches of Hanfeng Lake (Region 4)				
	TX1	ZT1	ZX1	ZX2	DH1	DH2	HF1	HF2	TD1	HF3	HF4	HF5	XJ1	XJ2
	综合指数评价	53.4	58.0	54.3	56.8	50.3	53.2	58.3	56.5	54.9	54.2	55.4	49.5	49.3
富营养程度	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	中	中	轻富

表3 各月份综合评价与时间聚类结果

Table 3 Results of comprehensive evaluation and sampling month clustering

项目 Items	蓄水期(第1时期) Storage period(Period 1)						泄水期(第2时期) Drainage period(Period 2)					
	1月	2月	9月	10月	11月	12月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
综合指数评价	49.4	55.3	58.5	60.2	50.6	49.4	53.8	57.8	54.8	54.8	53.6	54.8
富营养程度	中	轻富	轻富	中富	轻富	中	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富	轻富

游差异均不显著( $P>0.05$ ),在汉丰湖中下游差异显著( $P<0.05$ ),其平均值分别为7.8、7.9;蓄水期和泄水期DO在东河来水区、汉丰湖上游及汉丰湖中下游差异不显著( $P>0.05$ ),在南河来水区差异显著( $P<0.05$ ),其平均值分别为8.79、8.75  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;蓄水期和泄水期EC在东河来水区和汉丰湖上游差异不显著( $P>0.05$ ),在南

河来水区和汉丰湖中下游差异显著( $P<0.05$ ),其平均值分别为427.54、408.71  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (图3)。

如图4所示,采样期间汉丰湖流域蓄水期和泄水期的平均TSS浓度分别为10.14、43.94  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;平均SD分别为1.18、0.29 m。从时间上看,蓄水期TSS浓度比泄水期低76.92%,而蓄水期的SD高于泄水期。

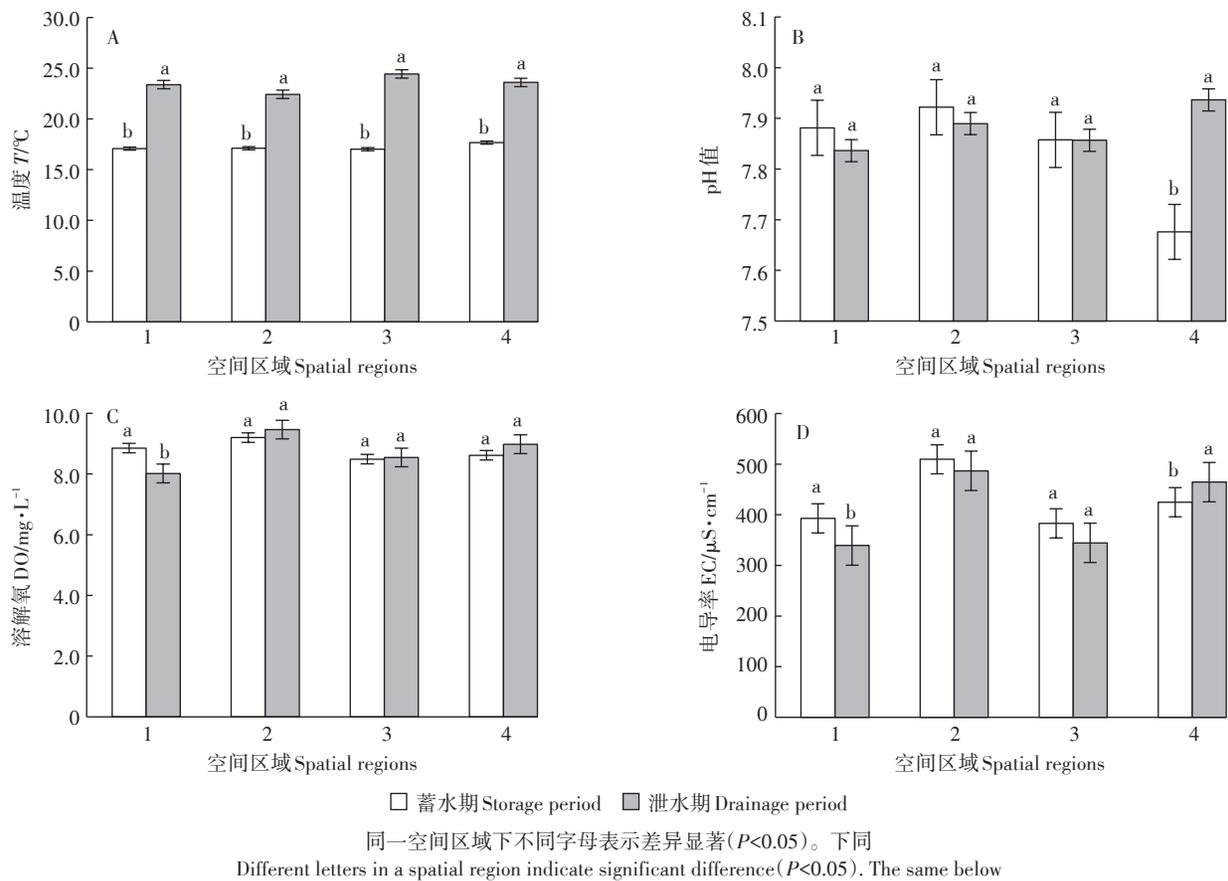


图3 汉丰湖水体理化性质

Figure 3 Changes of water physical and chemical properties in the Hanfeng Lake

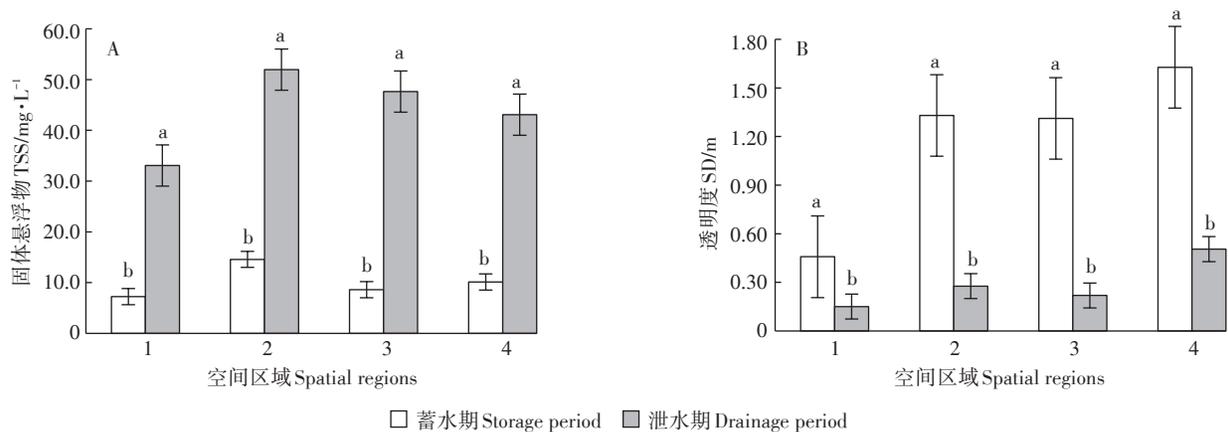


图4 汉丰湖流域固体悬浮物(A)和透明度(B)变化

Figure 4 Variations of water TSS(A) and SD(B) in the Hanfeng Lake

各采样区域蓄水期与泄水期的TSS和SD均具有显著差异( $P < 0.05$ )。

汉丰湖流域Chl-a变化如图5所示,平均Chl-a浓度为 $10.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从时间上看,总体表现出2月、4月、10月较高,5—8月较低,其中最高值出现在南河(镇东大丘)的10月,为 $74.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从空间上看,镇东大丘( $19.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) > 东南河交汇( $18.54 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) > 调节坝( $8.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),表现出上游向下游递减的趋势。汉丰湖流域的平均 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度为 $3.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从时间上看,蓄水期比泄水期增加6.03%,但在各区域差异均不显著( $P > 0.05$ );从空间上看,表现出上游向下游递减的趋势,东河来水区低于南河来水区。按照地表水环境标准,水质为I~II类。

汉丰湖流域的TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N平均浓度分别为 $1.720$ 、 $1.280$ 、 $0.180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图6A)。从时间上看,蓄水期TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N的含量均高于泄水期,增幅分别为24.83%、32.58%和32.63%,而蓄水期 $\text{NO}_2^-$ -N含量较泄水期低63.96%。从空间上看,汉丰湖中下游的各形态氮含量总体上低于上游,表现出上游向下游递减趋势,且东河来水区含量低于南河来水区。

流域的TP、DP和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P的平均浓度为 $0.174$ 、 $0.150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图6B);其中蓄水期磷各形态浓度均高于泄水期,同时表现为上游向下游递减的趋势,且东河来水区含量低于南河来水区。

### 2.3 汉丰湖水质变化主导因素

从表4可以看出,提取出了具有较大贡献率的5个主成分,分别为a1、a2、a3、a4、a5,其累积的贡献率达到73.83%。其中,主成分a1方差贡献率为28.78%,主要与TSS、TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N和T有关联,

代表汉丰湖水体的氮污染和温度变化,其中氮素营养包括TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N,与第一主成分呈正相关,TSS和T与其呈负相关;主成分a2的贡献率为16.90%,主要关联参数有Chl-a、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和SD,代表汉丰湖的有机物及浮游植物的生长状况,反映湖泊的富营养化状况,有机物浓度增加,引起浮游植物生长,从而导致SD的降低。主成分a3的贡献率为12.65%,主要相关参数为h,反映汉丰湖水质受三峡库区水位调控的影响较大;主成分a4的贡献率为9.15%,与其相关的因子主要有 $\text{PO}_4^{3-}$ -P和DO,且其与 $\text{PO}_4^{3-}$ -P浓度呈

表4 水质因子载荷矩阵

Table 4 Factor loadings of water quality in the Hanfeng Lake

指标 Index	主成分 Principal component				
	a1	a2	a3	a4	a5
TN	0.845	-0.073	-0.309	0.032	-0.248
$\text{NO}_3^-$ -N	0.805	-0.094	-0.341	-0.104	-0.377
TSS	-0.761	0.228	-0.261	0.205	-0.145
$\text{NH}_4^+$ -N	0.615	0.074	0.226	-0.007	0.405
T	-0.612	0.522	0.104	-0.195	-0.219
TP	0.554	0.512	-0.376	-0.017	0.225
Chl-a	0.526	0.611	0.399	0.228	-0.116
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	0.266	0.683	0.310	-0.295	-0.103
SD	0.490	-0.651	0.280	-0.119	-0.015
EC	0.163	-0.511	-0.101	0.408	0.335
DP	0.457	0.474	-0.448	0.031	0.260
h	0.497	-0.307	0.618	-0.154	0.067
pH	0.187	0.464	0.566	0.352	-0.555
$\text{PO}_4^{3-}$ -P	0.075	0.412	-0.085	-0.613	0.418
DO	0.344	0.334	0.279	0.613	0.193
$\text{NO}_2^-$ -N	-0.186	0.193	-0.418	0.492	0.087
贡献率/%	28.78	16.90	12.65	9.15	6.35

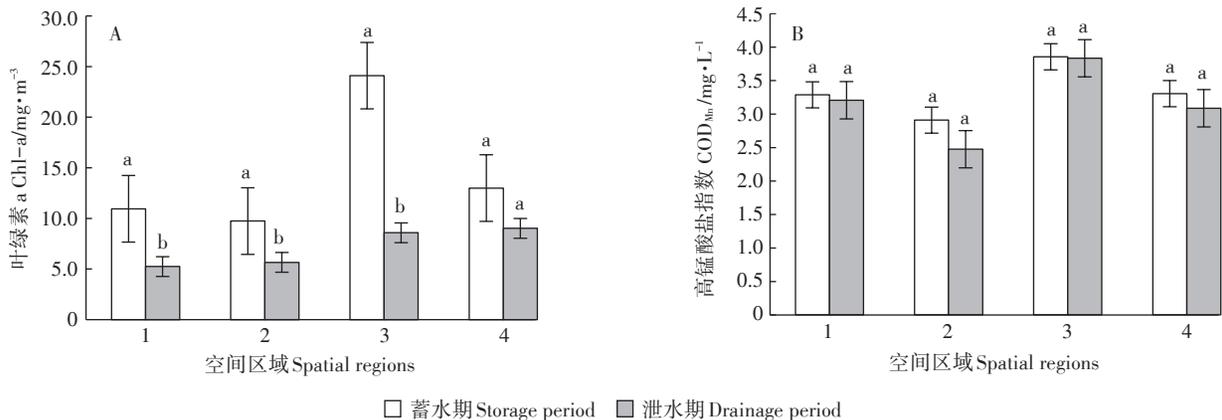


图5 汉丰湖流域叶绿素a(A)和高锰酸盐指数(B)变化

Figure 5 Distribution of phytoplankton Chl-a(A) and variation of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ (B) in the Hanfeng Lake

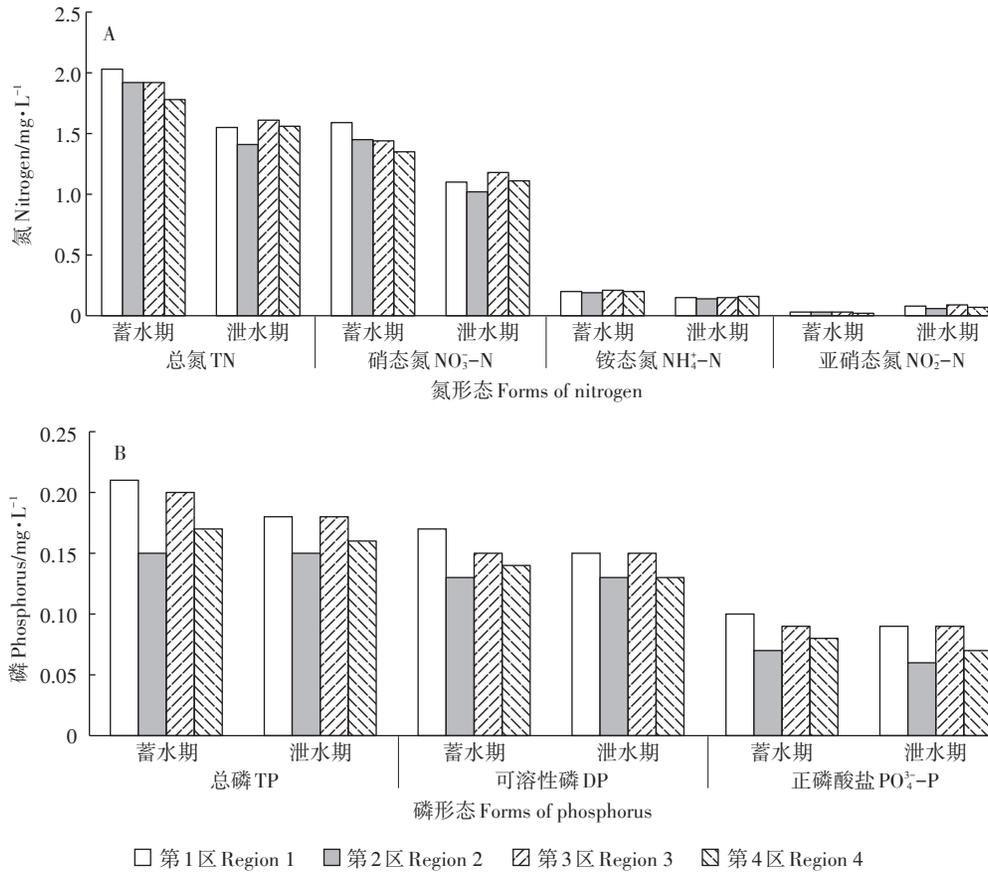


图6 汉丰湖流域各形态氮(A)、磷(B)的浓度变化  
Figure 6 Variations of water nitrogen(A) and phosphorus(B) in the Hanfeng Lake

负相关,与DO呈正相关,代表汉丰湖的磷污染和水体物理环境状况,说明磷的增加导致浮游植物生长,浮游植物造成DO的降低;主成分a5的贡献率仅有6.35%,与其相关的因子有pH值,且呈负相关,该成分主要反映汉丰湖的酸碱环境。

因子得分系数排序(表5)表现为来水区:桃溪(0.29)>竹桃交汇(0.20)>东河大桥(0.18)>丰登村(0.12)>头道沟(-0.07)>饶家坪(-0.15)>竹溪(-0.22);湖泊区:镇东大丘(0.23)>东湖郡(0.02)>东南河交汇(-0.02)>调节坝(-0.16)>石龙船大桥(-0.35),除石龙船大桥以外,污染程度表现出上游向下游递减的趋势;出水区:普里小江交汇(0.22)>调节坝下(-0.30)。

### 3 讨论

从空间聚类角度分析,汉丰湖流域水质监测点可聚类为4个空间区域,第1区域为汉丰湖南河来水区,该区周边耕地较多,施肥量较高,加之城镇污水排放,导致水中氮、磷浓度高(TN: 1.22~2.33 mg·L<sup>-1</sup>; TP:

表5 因子得分系数表

Table 5 Spatial factor score coefficient of different sites

采样点 Sample sites	因子得分 Factor score					综合 Composite	排名 Rank
	a1	a2	a3	a4	a5		
饶家坪	-0.26	-0.29	0.20	0.05	-0.21	-0.15	10
竹溪	-0.56	-0.37	0.69	-0.44	0.23	-0.22	12
桃溪	0.47	0.37	0.05	0.07	0.08	0.29	1
头道沟	-0.17	-0.34	0.15	0.30	0.16	-0.07	9
丰登村	0.28	0.11	-0.10	0.11	-0.09	0.12	6
东河大桥	0.46	0.13	-0.11	-0.03	-0.05	0.18	5
竹桃交汇	0.70	0.12	-0.48	0.04	-0.33	0.20	4
镇东大丘	0.47	0.06	0.12	-0.15	0.35	0.23	2
石龙船大桥	-0.86	-0.21	-0.11	0.28	0.18	-0.35	14
东湖郡	0.16	0.35	-0.36	-0.15	-0.43	0.02	7
东南河交汇	0.32	0.26	-0.82	0.09	-0.81	-0.02	8
调节坝	-0.75	-0.11	0.62	-0.47	1.23	-0.16	11
调节坝下	-0.63	-0.84	0.39	0.47	0.14	-0.30	13
普里小江交汇	0.37	0.77	-0.25	-0.16	-0.46	0.22	3

0.123~0.257 mg·L<sup>-1</sup>), 水体呈轻度富营养化。第2区域为东河来水区, 该区附近分布有城镇和耕地, 生活污水排放和不合理施肥, 导致水体呈轻度富营养化。第3区域为汉丰湖上游, 该区内有河道的护岸工程建设, 人为扰动频繁, 排污口较多, 氮、磷浓度较高(TN: 1.301~2.683 mg·L<sup>-1</sup>; TP: 0.15~0.283 mg·L<sup>-1</sup>), 导致水体轻度富营养化。第4区域为汉丰湖流域中下游, 受上游的第1和第3区域影响, 水体氮、磷相对较高(TN: 1.334~2.722 mg·L<sup>-1</sup>; TP: 0.208~0.254 mg·L<sup>-1</sup>), 导致富营养化程度加深; 该区的HF4采样点位于湖泊中心地带, 受南河和东河来水的双重影响, 使得水体轻度富营养化; 而HF5采样点位于坝前, 人为扰动较小, 再加上周边植物对污染物的吸附作用, 使水体营养程度为中营养; 而XJ1采样点位于调节坝下200 m左右位置, 周边无排污口和农田, 且湖泊呈河流形态( $v=0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 不利于营养物质的富集, 水体营养程度为中营养, 与坝前基本保持一致; XJ2采样点位于汉丰湖与普里河的交汇处, 受到汉丰湖和普里河的双重影响, 该处水体呈轻度富营养化。

从时间聚类角度分析, 汉丰湖流域的蓄水期受三峡蓄水的影响较大。其中1月、12月营养化程度只有中营养, 通过环境指标数据分析, 这两个月的TN、TP、COD<sub>Mn</sub>的含量相对较低, 人为扰动较小, 降雨量较低, 径流携带营养盐入湖较少, 再加上温度较低, 水体不分层, 营养化程度较低; 10月温度较高(24.10℃), 营养盐浓度较大(TN=1.64 mg·L<sup>-1</sup>, TP=0.21 mg·L<sup>-1</sup>), 污染程度较深(COD<sub>Mn</sub>=5.22 mg·L<sup>-1</sup>), 爆发了甲藻水华, 导致营养化程度达到中度富营养。汉丰湖流域泄水期, 3—8月的水体富营养化水平都达到轻度富营养, 分析可能有以下几方面原因: 3—8月湖泊呈河流形态, 河流冲刷导致底泥扰动, 再加上雨量充沛, 雨水携带泥沙进入湖泊, 泥沙中含有较多的营养盐, 而且此期间水温逐步回升, 导致沉积物中营养盐的内源释放加强, 增加了水体中富营养物含量, 浮游植物在营养盐充足的环境下大量繁殖可能会引起水体富营养化程度增加; 此外, 相比其他月份, 4—8月钓鱼人数、游客数量增加, 水体过度频繁扰动导致底泥中营养盐缓慢释放, 投放鱼饵等人活动影响也可能是造成水体富营养化的原因。

长江流域土壤主要以紫色砂页岩为主, 成土过程快, 质地松软, 易于风化、流失和崩塌, 加上地形陡、降雨强度大, 水土流失严重, 再加之泄水期流速较大( $v=0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 冲刷力强, 导致TSS高于蓄水期, SD低于

蓄水期; 蓄水使水位抬高, 淹没岸边植被, 通过微生物的作用向水中释放氮磷元素, 且释放量随pH值的增加而提高, 河床底泥在淹水条件下向水体释放氮磷营养盐, 加之水流过缓( $v=0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 有机物更容易富集, 导致蓄水期TN、TP、COD<sub>Mn</sub>浓度高于泄水期。根据湖库发生富营养化的条件: TN>0.2 mg·L<sup>-1</sup>, TP>0.02 mg·L<sup>-1</sup>, 汉丰湖流域TN浓度达到临界值的8.6倍, TP则为8.7倍, 表明汉丰湖各断面水体TN与TP的浓度均远超富营养化阈值。蓄水期, 水体中溶解态氮(以NO<sub>3</sub>-N为主)占TN的87.79%, 溶解态磷(磷酸盐)占TP的84.76%, 说明水体氮、磷的来源与化肥使用联系密切。这与王娟等<sup>[18]</sup>对澎溪河回水区的研究结果一致。

#### 4 结论

(1) 汉丰湖水质变化可聚类为南河来水区、东河来水区、汉丰湖上游、汉丰湖中下游4个空间区域, 及蓄水期和泄水期2个时段。汉丰湖各空间区域水质处于中营养及轻度富营养状态, 同时水质在1月和12月为中营养, 10月为中度富营养, 2—9月及11月为轻度富营养。

(2) 汉丰湖水质指标TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、DP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD<sub>Mn</sub>浓度变化趋势一致, 表现为自上游向下游降低趋势。TN、TP浓度达到富营养化临界值的8.6、8.7倍, 应加强对TN、TP输入的控制。

(3) 各指标中TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TSS和温度是水质变化的主要解释指标, 而Chl-a、COD<sub>Mn</sub>及水深也对水质变化有重要贡献。汉丰湖流域水土流失是湖区水质恶化的主要诱因, 而三峡库区水位调控也影响汉丰湖的水质变化。

#### 参考文献:

- [1] Zhao P, Tang X, Tang J, et al. Assessing water quality of Three Gorges Reservoir, China, over a five-year period from 2006 to 2011[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(13): 4545-4558.
- [2] Stone R. The legacy of the Three Gorges dam[J]. *Science*, 2011, 333(6044): 817-817.
- [3] 吕笑天, 吕永龙, 宋帅, 等. 气候变化与人类活动双重驱动的冷水湖泊富营养化[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7375-7386. LÜ Xiao-tian, LÜ Yong-long, SONG Shuai, et al. Eutrophication in cold-water lakes driven by combined effects of climate change and human activities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7375-7386.
- [4] 杨硕, 孔进, 徐少昌, 等. 饮用水去除藻毒素研究进展[J]. *净水技术*, 2017, 36(6): 41-45, 53. YANG Shuo, KONG Jin, XU Shao-chang, et al. Research progress

- on algae toxins removal in drinking water treatment[J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(6):41-45, 53.
- [5] 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.
- DU Li-gang. Carbon, nitrogen and phosphorus release from the vegetation and flux of nitrogen, phosphorus of WLFZ in the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [6] 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 Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, 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.
- [7] 杨 兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征[J]. 环境科学, 2017, 38(4):1366-1375.
- YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao. Hanfeng pre-reservoir commissioning time variation feature of the hydrology and water quality in Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4):1366-1375.
- [8] 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 Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao. Hanfeng pre-dam commissioning eutrophication status and control evaluation in Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12):4586-4595.
- [9] 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 Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):922-927.
- [10] 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):22-26.
- ZHENG Zhi-wei, HU Lian, ZOU Xi, et al. Eutrophication assessment and analysis of nutrient loading in Hanfeng Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(5):22-26.
- [11] 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.
- [12] 陈 焰, 黄 宏, 彭文启, 等. 基于探索性数据分析的汉丰湖富营养化驱动因子研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5):169-178.
- CHEN Yan, HUANG Hong, PENG Wen-qi, et al. Research on eutrophication driven factors of Hanfeng Lake based on exploratory data analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(5):169-178.
- [13] Bouguerne A, Boudoukha A, Benkhaled A, et al. Assessment of surface water quality of Ain Zada dam (Algeria) using multivariate statistical techniques[J]. *International Journal of River Basin Management*, 2016, 15(2):133-143.
- [14] Wang J, Liu G, Liu H, et al. Multivariate statistical evaluation of dissolved trace elements and a water quality assessment in the middle reaches of Huaihe River, Anhui, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 583:421-431.
- [15] Anoushirvan M B, Saeed M, Mohsen E, et al. Water quality assessment of the most important dam (Latyan dam) in Tehran, Iran[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25:29227-29239.
- [16] 张恩仁, 张 经. 三峡水库对长江N、P营养盐的截留效应的模型分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1):41-48.
- ZHANG En-ren, ZHANG Jing. Analysis of the Three-Gorge Reservoir impacts on the retention of N and P in the Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(1):41-48.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:701-705.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.
- [18] 王 娟, 胡正峰, 张 磊, 等. 三峡库区支流澎溪河回水区水质调查与评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7):67-74.
- WANG Juan, HU Zheng-feng, ZHANG Lei, et al. Water quality survey and evaluation in the backwater area of the Pengxi River in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 33(7):67-74.