

不同水位期汉丰湖和高阳湖上覆水时空分异特征

刘双爽^{1,2,3,4},袁兴中^{1,2,4*},王晓锋^{4,5},周李磊^{1,2,3,4} (1.重庆大学建筑城规学院,重庆 400030; 2.重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400030; 3.重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400030; 4.长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室,重庆 401331; 5.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331)

摘要:为研究三峡库区不同水位条件下彭溪河流域永久性回水区高阳湖与城市内湖汉丰湖的水环境差异,确定影响湖库水环境变化的水质指标,于2018年11月~2019年10月,对两湖库上覆水进行逐月样品采集.以水质监测数据为基础,参照三峡水库调度的时间周期,将采样时间划分为蓄水区、消落期和泄水区3个时段,运用多元统计方法,分析了2个湖库的水环境时空分异特征.单因子水质评价结果显示,湖库水质等级具有时空分异性,浮游植物大量生长发育的3、4、5月及雨量充足的7、8月,2个湖大部分处于劣Ⅳ~劣Ⅴ类,而一年中其他时段主要达到地表水Ⅲ类标准.判别分析表明,透明度、溶氧、电导率、pH值、水温、水深(depth),总有机碳、总氮和氨氮均为两湖库水环境时空显著性差异的指示因子,泄水区,2个湖库水环境差异不大,但蓄水期和消落期,2个湖水环境具有明显的差异性.主成分分析显示,不同水位条件下,引起湖库水环境变化的主导因子不同,消落期水环境主要影响因子为TN、NH₃-N、水深和pH值;泄水区主要是TN、TP和EC;蓄水区主要影响因子为水深、TOC、TN、TP和NH₃-N.水体污染程度来看,汉丰湖:蓄水区>消落期>泄水区;空间表现为:HF3<HF1<HF2<HF4<HF5<HF8<HF7<HF6.高阳湖:泄水区>消落期>蓄水区;空间表现为GY2<GY3<GY1<GY5<GY6<GY4.

关键词: 汉丰湖; 高阳湖; 水环境; 判别分析; 主成分分析; 时空分异

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)11-4965-09

Spatial-temporal differentiation of water quality under different water level conditions of Hanfeng and Gaoyang Lakes in Three Gorges Reservoir. LIU Shuang-shuang^{1,2,3,4}, YUAN Xing-zhong^{1,2,4*}, WANG Xiao-feng^{4,5}, ZHOU Li-lei^{1,2,3,4} (1.School of Architectural and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2.Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3.Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 4.Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China; School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China). *China Environmental Science*, 2020,40(11): 4965~4973

Abstract: In order to understand the interactions between different water level conditions and water quality of Pengxi river, provide scientific supports for rivers ecological management of the Three Gorges Reservoir, we conducted a study to determine the spatial and temporal differentiation of water quality in Hanfeng and Gaoyang Lakes. We arranged 14 sampling sites in these two lakes and measured 10 water quality parameters once a month from December 2018 to October 2019 at these sites. Single pollution index results suggest that the water quality grade of Hanfeng and Gaoyang lakes were Class III of the National Surface Water Standard in most months. As phytoplankton blooms occurred, heavy rainfall made runoff increases, the water quality grade reached Class IV and V in spring and summer. Using the Discriminant Analysis (DA) and Analysis of Variance (ANOVA), water quality showed spatial and temporal differentiation pattern, SD, DO, EC, pH, T, depth, TOC, TN and NH₃-N were the indicative factors describing the significantly spatial-temporal difference in water environment. Using the Principal Component Analysis (PCA), pollution classification factors of water environment are TN, NH₃-N, depth and pH in flow period. Otherwise, TN, TP, EC were pollution classification factors in wet period and depth, EC, TOC, TP, TN, NH₃-N were pollution classification factors in dry period. In temporal terms, the order of pollution was storage period > falling stage > discharge period in Hanfeng Lake and discharge period > falling stage > storage period in Gaoyang Lake; the spatial pollution situation was HF3<HF1<HF2<HF4<HF5<HF8<HF7<HF6; GY2<GY3<GY1<GY5<GY6<GY4.

Key words: Hanfeng Lake; Gaoyang Lake; water quality; discriminant analysis (DA); principal component analysis (PCA); spatial-temporal disparity

2003年11月长江三峡水库蓄水后,库区水文情势及水环境状态也随之发生了改变.水位变动导致水体扰动加强,同时水体悬浮物增加,由悬浮物引起的水体物理变化包括水体透光性的降低,温度的改

收稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX07104-004-05); 国家自然科学基金资助项目(41807321)

* 责任作者, 教授, 1072000659@qq.com

变以及水库中颗粒物富集填充^[1]。水环境方面,水库水位雍升,水流变缓,水体滞留时间延长,营养物质大量聚集,加上人类活动的影响,库区的一些支流水体富营养化较为明显^[2]。诸多研究表明,三峡水库主要水质问题是富营养化,藻类水华^[3-12]。

汉丰湖和高阳湖为澎溪河流域 2 个重要的湖库,在保障三峡库区水质安全方面起到重要作用^[13-14]。目前相关研究,更多关注澎溪河温室气体通量等和藻类生长发育,藻类生长室内培养模拟^[15-18]。研究成果表明,澎溪河流域季节性水华问题值得关注^[4,6,8,19-20]。水环境变化是在自然要素和人为要素共同干预下产生的,存在着复杂的演化机制,虽然澎溪河流域水华的产生时间及特定物种的生命周期,生长机理研究已取一定成果,但未来湖库的发展还有许多不确定性,所以进行长时间尺度的水环境跟踪监测必不可少。汉丰湖水位调节坝于 2016 年 8 月 31 日正式运行,湖泊水域生态环境发生改变。2018 年,汉丰湖首次采用夏季水位维持 170.28m,意味着汉丰湖成为一个城市内湖。考虑到澎溪河流域水环境对整个三峡库区的重要性,本文通过探究汉丰湖和高阳湖水水质变化,了解该区域水质状况,为库区水资源管理和保护提供科学可靠的动态信息,也为全面把握澎溪河流域的水质变化积累基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉丰湖位于三峡库区腹心地带一级支流澎溪河的上游,开州城区(31°11'13"N,108°25'01"E)东河与南河交汇处,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 180m 为界,北到老县城所在的汉丰坝-乌杨坝一线。汉丰湖是三峡水库蓄水后在澎溪河开州段形成的具有特色“库中库”,常年水位为 170~175m,是我国西部内陆最大的城市人工湖。高阳湖为三峡水库蓄水倒灌澎溪河流域而形成的巨大平湖(31°5'48"N,108°40'20"E),地处澎溪河下游永久回水区中部,地势平坦,上游水体经峡谷流入此处,流速减缓,具有类似湖泊的地貌环境及水文水力特征。该水域在夏季低水位时期平均水深不足 15m,冬季高水位时期平均水深将超过 40m,形成近似于“浅水湖泊-深水湖泊”的季节性交替特征。

1.2 样品采集与处理

2018 年 11 月~2019 年 10 月逐月月初对汉丰湖和高阳湖水体进行采集监测,汉丰湖设置 8 个样点, HF1(南河河口), HF2(石龙船大桥), HF3(头道河河口), HF4(东湖郡), HF5(湖中心), HF6(东河河口), HF7 文峰塔芙蓉坝)和 HF8(调节坝);高阳湖设置 6 个采样点, GY1(湖库出口), GY2(高阳村库湾), GY3(湖库中心), GY4(高阳镇库湾), GY5(明月坝库湾)和 GY6(湖库入口),具体采样点见图 1。现场使用哈希便携式水质仪监测 pH 值,溶解氧(DO),电导率(EC),水温(T),赛氏盘测定透明度(SD)。同时,选用 500mL 清洁的聚乙烯瓶在水下 0.5m 深度处进行水样采集,置于 4℃ 保温箱运回实验室,进行湖水化学指标测定。室内测定总氮(TN),总磷(TP),总有机碳(TOC),氨氮(NH₃-N)。总有机碳(TOC)的测定采用 TOC 2000 总有机碳分析仪(METASH);总氮(TN),氨氮(NH₃-N)采用 FIA-6000+流动注射分析仪测定;总磷(TP)采用离子色谱仪(SHINE)测定。

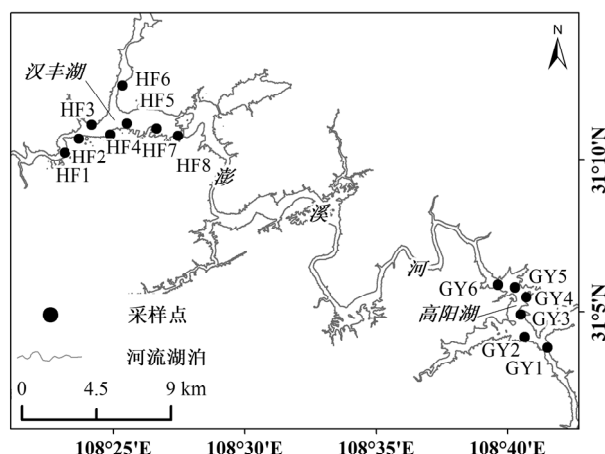


图 1 采样点位置示意

Fig.1 Sampling sites distribution

1.3 数据分析方法

三峡水库调度的方式:10 月初开始蓄水,从 145m 蓄水到 175m, 11~12 月初维持在正常蓄水位 175m 运行;为满足发电需要,5 月底,水库水位消落到 155m;6~9 月为汛期,水库维持防洪限制水位 145m。依据三峡调度水库水位变动的周期性规律,将一周年监测时段分为蓄水期(10~12 月)、消落期(1~5 月)、泄水期(6~9 月)。文中采用地表水最差因子评价法对 2 个湖库水质进行等级判别,评价的依据参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[21]。然后基

于分类结果,用判别分析识别具有空间显著性差异的水质指标;再在不同空间类别上分析时间尺度水质分异特征;最后,运用主成分分析方法进一步研究不同空间类别上不同时期影响湖库水质时空分异的潜在因素.分析均在 IBM SPSS Statisticts24.0, Canoco for Windows 5.0 和 Microsoft Office Excel 2010 中实现.

2 结果与讨论

2.1 单因子水质评价结果

参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[21],对 2018 年 11 月~2019 年 10 月汉丰湖和高阳湖 2 个湖库逐月监测的 pH 值,DO,TP,TN 和 NH₃-N 数据进行分析(表 1).两湖 pH 值各月均达到Ⅲ类地表水标

准.从 DO 浓度来看,汉丰湖全年均达到 I 类水标准;高阳湖在蓄水期,冬季月份,DO 浓度较低,10 月最低,劣Ⅳ类,11 月达到Ⅲ类水标准,其他月份为 I 类~Ⅱ类地表水.从 TP 浓度来看,汉丰湖 8,9 和 12 月 3 个月份浓度较低,属于Ⅲ类水标准,其他月份为劣Ⅳ~劣 V 类;高阳湖 TP 浓度显著低于汉丰湖,绝大多数月份属于Ⅲ类水标准.两湖 TN 浓度全年都较高,汉丰湖在 3~4 月藻类生长季节以及雨水较多的 7 月,水体 TN 含量最高;同样,暴雨冲刷季节,高阳湖 TN 浓度也最高.从 TN 浓度来看,汉丰湖 3,4 和 7 月水质达到劣 V 类,其他月份大多属于Ⅲ类水,少数月份劣Ⅳ类;高阳湖大多数月份为Ⅲ类水标准,7 月份水体较差,属劣 V 类标准.从 NH₃-N 指标浓度方面,两个湖泊水质均处于 I 类~Ⅱ类地表水.

表 1 汉丰湖和高阳湖全年水体理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of Hanfeng and Gaoyang Lake

湖库	指标	11 月	12 月	1 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
汉丰湖	pH 值	7.86	7.65	7.78	8.11	8.03	8.21	9.10	8.58	9.34	8.23	7.57
	DO	7.67	7.26	9.32	11.02	7.44	9.41	16.32	13.17	15.80	12.99	8.38
	TP	0.07	0.04	0.07	0.15	0.10	0.09	0.06	0.06	0.04	0.05	0.06
	TN	1.09	1.11	1.25	2.27	2.33	1.27	0.73	2.51	0.75	1.62	1.53
	NH ₃ -N	0.17	0.05	0.12	0.56	0.33	0.19	0.01	0.05	0.03	0.06	0.07
高阳湖	pH 值	8.03	7.63	8.41	8.20	8.50	8.90	9.07	8.35	9.38	8.16	7.51
	DO	5.33	6.42	9.24	10.58	8.27	13.26	18.08	11.41	16.77	7.29	4.79
	TP	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.08	0.04	0.02	0.04
	TN	1.27	1.30	1.17	1.24	1.42	1.13	0.65	2.34	0.50	1.52	1.53
	NH ₃ -N	0.112	0.022	0.009	0.017	0.129	0.044	0.021	0.083	0.001	0.016	0.004

表 2 空间尺度判别分析统计检验
Table 2 Eigenvalue, Wilks' Lambda, Chi-square, test of spatlal DA

判别函数	特征值	相关性	Wilks 的 λ 值	卡方系数	自由度	显著性
1	71.931	0.993	0.014	32.171	9	0

表 3 结构矩阵
Table 3 Structure matrix

变量	函数
水深(depth)	-0.361
NH ₃ -N	0.193
T	-0.18
TP ^a	-0.121
TN	0.089
pH 值	-0.075
TOC	0.056
EC	0.043
DO	0.037

注:a表示未使用该变量.

表 4 空间尺度判别分析的分类函数系数
Table 4 Classification function coefficients of spatlal DA

变量	分组	
	1	2
SD	-252.942	-379.484
DO	432.718	380.177
EC	-5.432	-5.564
pH 值	4.15×10 ³	4.03×10 ³
T	10.404	45.766
水深(depth)	-7.086	-0.637
TOC	282.236	299.547
TN	230.728	-101.847
NH ₃ -N	1.95×10 ⁴	1.87×10 ⁴
(Constant)	-2.08×10 ⁴	-1.95×10 ⁴

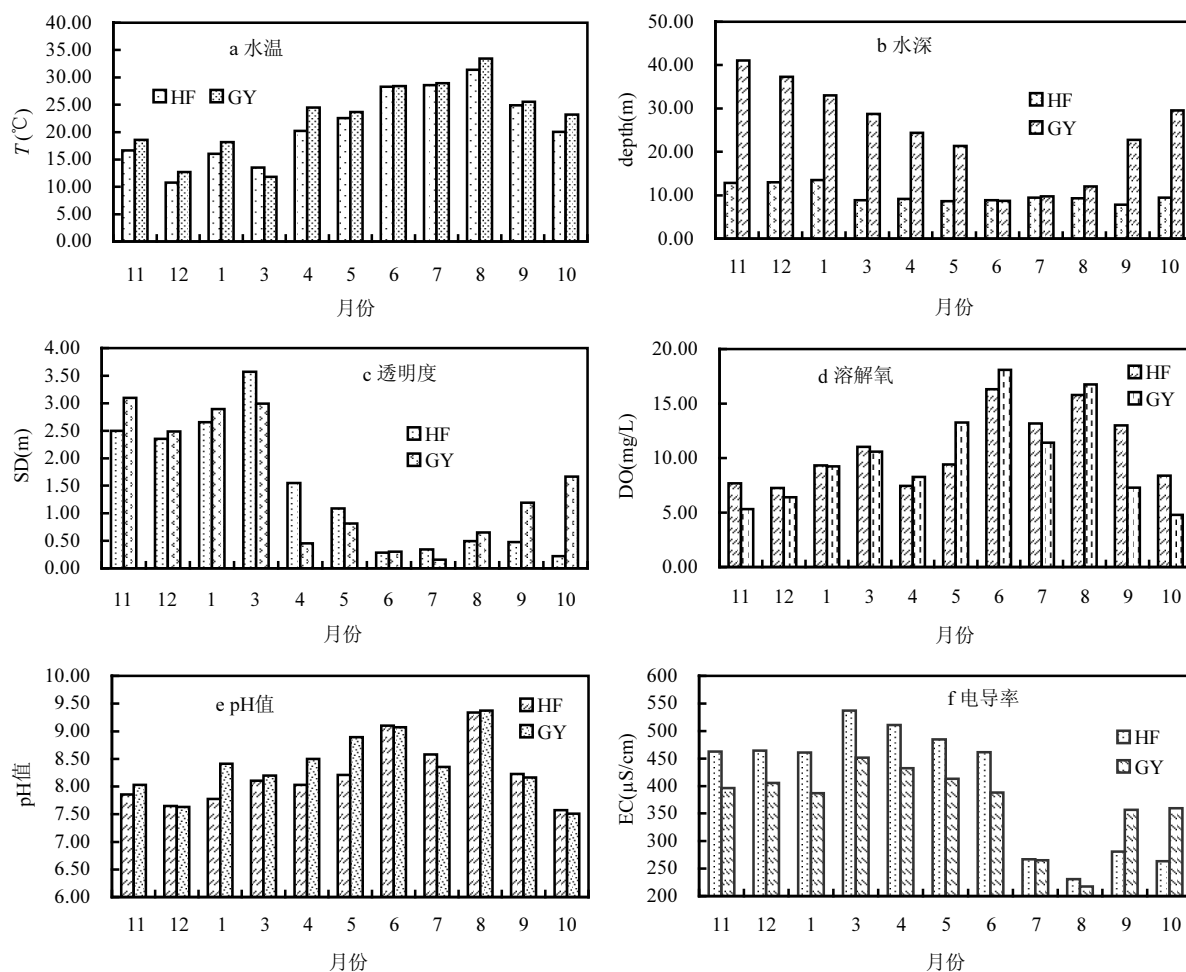
注:Fisher's线性判别函数.

2.2 水环境因子的时空变化

采用 Wilks'λ 判别分析法,对表征汉丰湖和高阳湖空间显著性差异的水质指标进行分析,得到统计

检验结果如表 2 所示,1 个判别函数基本解释了所有水质指标.从判别函数的结构矩阵(表 3)及分类函数系数(表 4)可以看出,除 TP 外,SD、DO、EC、pH 值、T、水深、TOC、TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 这 9 个水质指标可用来识别 2 个湖库的空间差异性.空间显著性水质指标的年均值差异分布如图 2,因高阳湖为三峡水库回水区,受三峡大坝水位的调控影响,而汉丰湖为前置湖,受水位调节坝调控,所以 2 个湖库水位差距大.其次,DO、EC、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TOC 空间差异性也较为明显.水中 DO 的含量主要是来自于水体中水生生物的释放和水面与大气交界面的吸收^[22],汉丰湖入湖支流多,生境差异明显,高水位时期,高阳湖水温存在分层,所以受浮游生物生存活动及水温影响,DO 差异大.EC 与水体碱度和溶解性盐类有关^[23].水体营养盐的变化主要受人类活动及生物消耗的影响^[24-25],汉丰湖属于城市内湖,受人类活动影响比高阳湖严重.

2 个湖库在不同时期的水环境参数差异分布如图 3,泄水期 2 个湖库水环境没有较大差异,消落期和蓄水期差异明显.从湖库自身来看,泄水期湖库水环境与其他时段有显著差异.泄水期降水多,径流冲刷携带的有机颗粒物进入湖库,水体有机质含量高;该时期水体温度高,水生生物新陈代谢消耗的营养盐相对多,水文水力过程促使营养盐循环加快,所以该时期其他营养盐含量低.EC 与水体碱度和溶解性盐类有关,雨季大量降水对离子的稀释,而致使 EC 降低^[26].消落期 2 个湖库水环境指标差异明显,主要是受人类活动的影响.4~5 月浮游生物大量繁殖,生物固氮能力增强,导致水体总氮浓度增加. $\text{NH}_3\text{-N}$ 在消落期浓度最高,主要是水华期受微生物活动的影响^[27].蓄水期,高阳湖处于澎溪河下游,除消落带营养元素的释放累积外,还受上游汉丰湖的影响^[28].汉丰湖受到的人类干扰相对强,所以消落期和蓄水期汉丰湖营养盐含量比高阳湖要高.



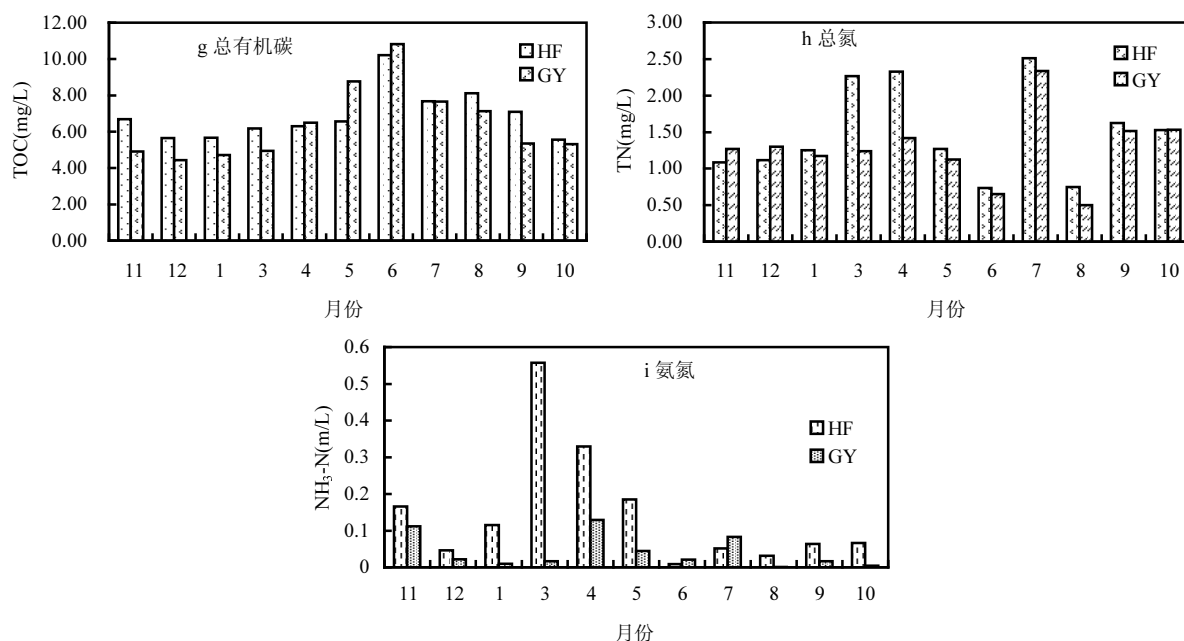


图2 空间显著性差异指标年均值变化

Fig.2 Annum mean value variations of spatial significant different factors

2 个湖库污染物主要是氮磷营养盐,影响最大的因素是人为干扰,包括旅游开发、渔业养殖、消落带耕种,致使营养盐流入湖库,沉降富集,致使水华发生,威胁水质安全.由于近两年汉丰湖的旅游开发,湖水受到的人为干扰不断增加,呈现出了调节坝附近水质逐渐恶化的趋势.

2.3 湖库水环境因子污染特征识别

水库水质恶化致使水体物理、化学性质发生变化,生物群落组成改变,降低了水体使用价值和功能^[29],对 2 个湖库水质指标数据进行因子分析,找出湖库水环境的主要影响因子,分析结果见表 5.

消落期因子分析提取了 2 个主成分,方差累计贡献率 83.35%;泄水期提取 3 个主成分,方差累计贡献率 74.05%;蓄水期提取 3 个主成分,方差累计贡献率 89.18%.消落期与第 1 主成分(贡献率 55.54%)密切相关的是 TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, pH 值, DO, 水深和 TP, 主要代表水体氮磷和酸碱度水平;第 2 主成分(贡献率 55.54%)相关较大的是 SD, TOC 和 EC, 代表水体有机物和离子水平.泄水期与第 1 主成分(贡献率 34.56%)密切相关的是 TP, TN 和 pH 值, 代表水体氮磷含量和酸碱度水平;第 2 主成分(贡献率 24.78%)密切相关的是 EC, 代表水体离子水平;第 3 主成分(贡献率 14.70%)密切相关的是 SD, 代表水体透光性.蓄水期与第 1 主成分(贡献率 61.04%)密切相关的是水深, T, TOC, $\text{NH}_3\text{-N}$, SD 和 DO, 代表水位, 水温, 有机物及透光性;第 2 主成分(贡献率 17.94%)密切相关的是 EC 和 pH 值, 代表水体酸碱度和离子水平;第 3 主成分(贡献率 10.20%)密切相关的是 TN, 代表水体氮含量.

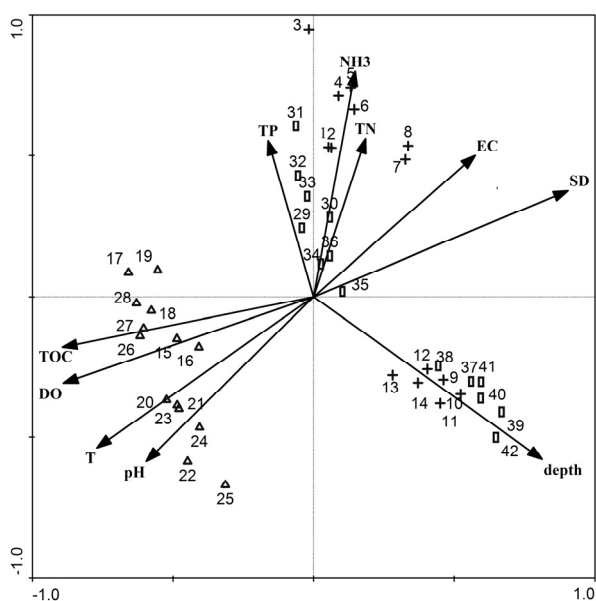


图3 不同时期水质指标的分布规律

Fig.3 The distribution of water quality indexes during different seasons

+代表消落期, △代表泄水期, □代表蓄水期; 1~8, 15~22, 29~36 代表汉丰湖采样点; 9~14, 23~28, 37~42 代表高阳湖采样点

空间因子得分分析可以找出污染类型和监测点的相关性, 因子得分越高, 监测点受该种污染类

型的影响就越大^[30].消落期,HF1-4 主要受第 2 主成分影响,说明水体有机物污染显著.该采样区为南河河口,石龙船大桥,头道河河口与东湖郡区域,四周主要为城市住宅区,水体受人类活动影响显著,易在 3 月底~5 月中下旬出现水华.HF5-7 主要受第 1 主成分的影响,说明水体受氮磷污染较强.该采样区为东河河口,湖中心,文峰塔芙蓉坝区域,有船只码头存在.HF8 为坝前区,主要受第 2 主成分的影响,有机污染显著.随着水库泄水,营养物在坝前富集,生物量累积增加,有机污染较大.GY1-3 主要受第 1 主成分的影响,水体氮磷影响显著.该

区域属于人类活动密集的乡镇聚集区,上游营养物质的输入富集以及水华发生,导致氮磷浓度偏高.GY4-6 主要受第 2 主成分的影响,有机污染显著.而 GY2-4 属于开阔平湖区,营养物质外源输入充分,水华易发生.

泄水期,HF5-8,GY1-3 主要受第 1 主成分的影响,雨季径流冲刷携带的氮磷物质输入湖库,水体营养盐含量增加.HF3,GY4-6 主要受第 2 主成分的影响,该区域离子含量浓度较大.HF1-2 主要受第 3 主成分影响,河口水动力强,加上降雨影响,水体透光性受较大干扰.

表 5 影响湖库水环境质量的主要因素识别
Table 5 Identification of main influence factors of water environmental quality of Lakes

理化指标	消落期主成分		泄水期主成分			蓄水期主成分		
	F1	F2	F1	F2	F3	F1	F2	F3
SD	0.075	-0.944	-0.095	-0.646	0.680	0.920	-0.148	-0.101
DO	0.897	-0.143	0.697	0.593	-0.251	-0.810	0.389	-0.380
EC	-0.168	-0.846	0.182	-0.685	-0.604	0.537	0.778	-0.149
pH 值	0.917	0.227	0.837	0.265	-0.020	0.471	0.786	-0.296
T	0.597	0.440	0.599	0.540	0.066	0.971	0.057	0.019
水深(depth)	0.854	0.384	0.611	0.293	0.463	0.991	0.046	0.017
TOC	-0.336	0.759	-0.485	0.468	0.275	-0.922	0.295	0.094
TN	-0.979	0.126	-0.730	0.447	-0.084	0.305	0.455	0.820
NH ₃ -N	-0.961	0.000	-0.453	0.324	-0.504	-0.829	0.109	-0.003
TP	-0.892	0.409	-0.723	0.518	0.156	-0.732	0.292	0.270
特征值	5.554	2.781	3.456	2.478	1.470	6.105	1.793	1.020
方差贡献率(%)	55.543	27.810	34.561	24.782	14.705	61.046	17.935	10.203
累积贡献率(%)	55.543	83.353	34.561	59.344	74.048	61.046	78.981	89.184

蓄水期,HF1-4 主要受第 3 主成分的影响,水体氮含量高,主要是周围人类活动造成的外源污染.HF6 东河河口区,主要受第 1 主成分影响,该区域主要受上游乡村生活污水、农田耕作的影响,水质污染严重.HF5,HF7~8 主要受第 2 主成分的影响,蓄水期水位稳定的条件下,水质较好. GY1-3 主要受第 1 主成分的影响,三峡蓄水外源输入有机物增加,水质产生变化.GY4-6 受主要第 3 主成分影响,水体受氮含量的影响显著.

综合得分可以反映采样区污染的轻重,消落期(ZFf): HF8 > GY2 > HF7 > HF6 > GY3 > GY1 > GY4 > HF5 > HF4 > GY5 > GY6 > HF3 > HF2 > HF1 泄水期(ZFd): GY2 > HF8 > HF7 > HF6 > GY3 > GY1 > GY4 > GY5 > HF5 > HF4 > HF2 > HF3 > HF1 蓄水期(ZFs):HF5 > GY2 > GY3 > HF2 >

HF7 > HF8 > HF6 > HF4 > GY1 > HF1 > GY4 > GY5 > GY6 > HF3.

蓄水期受主要受降雨和人类活动影响,汉丰湖东河河口水质最差,石龙船大桥次之,调节坝,文峰塔芙蓉坝和湖心区较好,南河河口及头道河河口最好.消落期和泄水期来看,汉丰湖受污染程度坝前区,文峰塔芙蓉坝区,湖中心区最严重,其次为东河河口和东湖郡区域,而南河河口,头道河河口与石龙船大桥区域最好.各时期高阳湖整体呈现:GY2 (高阳村库湾)区水质最差;其次为平湖区及村镇聚集区,包括 GY1(湖库出口),GY3(湖库中心),GY4 (高阳镇库湾),GY5(明月坝库湾),GY6(湖库入口)水质最好(图 4).

高阳湖入湖口水流较大,周围村落少且距离湖区位置远,所以水质相对于平湖区及下游出水口要

好.广阔的平湖区,水流减慢,上游污染物在此分散降解,主要受周围居民生活的影响,消落期三峡泄水,水位,温度和营养盐浓度达到藻类生长条件,易在平湖区爆发水华,水质较差.高阳湖 GY2 处在库湾,狭窄河道库湾,水流慢,水动力条件与平湖区有差别,上游营养物质容易在此聚集,周边村落生活垃圾,生活污水,农业面源污染相对严重,所以水质最差.

2018 年汉丰湖首次全年水位控制在 170.28m,成为真正意义上的城市内湖,周围人类活动影响显著,随着水流水动力条件的改变,有机质营养盐的降解能力变弱,水质稍差.与之前的研究^[17,31-39]相比,

蓄水期,HF1-4 主要受第 3 主成分的影响,水体氮含量高,主要是周围人类活动造成的外源污染.HF6 东河河口区,主要受第 1 主成分影响,该区域主要受上游乡村生活污水、农田耕作的影响,水质污染严重.HF6-8 主要受第 2 主成分的影响,蓄水期水位稳定的条件下,水质较好.水环境空间差异性不同.截止 2015 年,汉丰湖基本呈现东河河口区水质最好,其次为调节坝前、湖心区,南河河口区水质最差.但近几年,随着旅游的发展,东河河口、文峰塔、芙蓉坝和调节坝等片区的开发利用,水质逐渐恶化,反而该片区比南河河口,石龙船大桥等空间区域水质差.

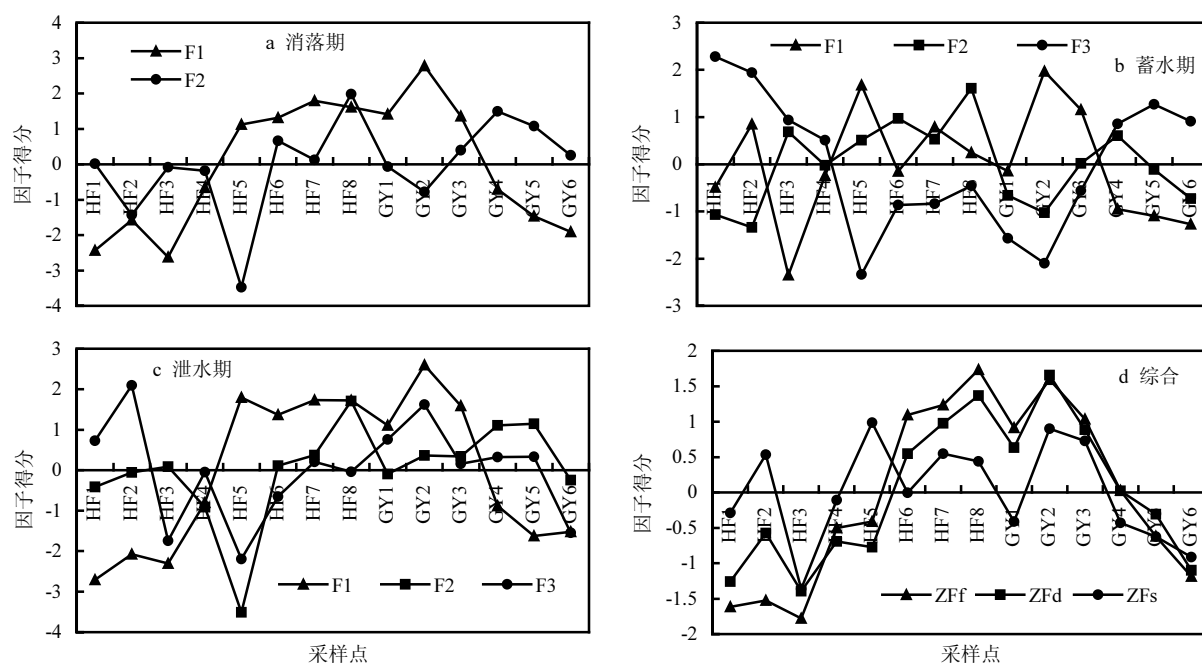


图 4 湖库不同时期主成分得分对比

Fig.4 Comparisons of principal component scores between different seasons in Hanfeng and Gaoyang Lakes

3 结论

3.1 依据水质评价标准分析,汉丰湖和高阳湖多数月份水质等级为Ⅲ类,并且存在时空分异性,浮游植物大量繁殖的 3~5 月份以及雨量充足的 7~8 月份,部分区域处于劣Ⅳ~劣Ⅴ类.

3.2 湖库全年水环境分析显示,泄水期,湖库内部差异显著,2 个湖库没有较大差异.消落期和蓄水期,湖库内部差异不大,2 个湖库水环境差异明显,汉丰湖营养盐浓度高于高阳湖,人类活动影响较大.

3.3 不同水位条件下,引起湖库水环境变化的主导因子不同,消落期主要是 TN、NH₃-N、水深和

pH 值;泄水期主要是 TN、TP 和 EC 影响;蓄水期主要是水深、TOC、TP、TN 和 NH₃-N.湖水受污染的时空差异来看,汉丰湖水体污染程度表现为:蓄水期>消落期>泄水期;空间上:HF3<HF2<HF2<HF4<HF5<HF8<HF7<HF6.高阳湖受污染程度为:泄水期>消落期>蓄水期;空间上:GY2<GY3<GY1<GY5<GY6<GY4.

参考文献:

- [1] Bilotta G S, Brazier R E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota [J]. water research, 2008, 42:2849-2861.
- [2] 姚绪娇.三峡水库香溪河库湾浮游植物群落结构演替规律研究 [D].

- 宜昌:三峡大学, 2013.
- Yao X J. Succession of Phytoplankton Assemblages in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013.
- [3] 李 哲, 方 芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 36–44.
- Li Z, Fang F, Guo J S, et al. Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007 [J]. J. Lake Sci., 2009, 21(1): 36–44.
- [4] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169–177.
- Cai Q H, Sun Y X. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects [J]. J. Lake Sci., 2012, 24(2): 169–177.
- [5] 康元昊, 施军琼, 杨燕君, 等. 三峡库区汝溪河浮游植物动态及其与水质的关系 [J]. 水生态学杂志, 2018, 39(6): 23–29.
- Kang Y H, Shi J Q, Yang Y J, et al. Phytoplankton community dynamics and water quality assessment in Ruxi River, a tributary of Three Gorge Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(6): 23–29.
- [6] 郭劲松, 陈海燕, 李 哲, 等. 三峡水库水环境相关研究统计及展望 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1177–1186.
- Guo J S, Chen H Y, Li Z, et al. Bibliometric and hot topic analysis of related literatures on water environment in Three Gorges Reservoir [J]. J. Lake Sci., 2018, 30(5): 1177–1186.
- [7] Webber M, Li M T, Chen J, et al. Impact of the Three Gorges Dam, the South–North Water Transfer Project and water abstractions on the duration and intensity of salt intrusions in the Yangtze River estuary [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(11): 4411–4425.
- [8] 曾 辉. 长江和三峡库区浮游植物季节变动及其与营养盐和水文条件关系研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006.
- Zeng H. Phytoplankton in Yangtze and Three Gorges Reservoir: dynamics and relationship with nutrients and hydrological conditions [D]. Wuhan: the Chinese Academy of Sciences Institute of Hydrobiology, 2006.
- [9] Zhao J, Fu G, Lei K, et al. Multivariate analysis of surface water quality in the Three Gorges area of China and implications for water management [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(9): 1460–1471.
- [10] Chaonan Han, Binghui Zheng, Yanwen Qin, et al. Impact of upstream river inputs and reservoir operation on phosphorus fractions in water–particulate phases in the Three Gorges Reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610–611: 1546–1556.
- [11] 张 智, 宋丽娟, 郭蔚华. 重庆长江嘉陵江交汇段浮游藻类组成及变化 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(6): 695–699.
- Zhang Z, Song L J, Guo W H. Phytoplankton community composition and change in the confluence of Changjiang River and Jialing River of Chongqing [J]. China Environmental Science, 2005, 25(6): 695–699.
- [12] 李梦婕, 江 韬, 何仁江, 等. 三峡库区典型农田小流域水化学特征及变化规律 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1062–1068.
- Li M J, Jiang T, He R J, et al. Water chemistry characteristics of a typical agricultural small watershed in Three Gorge Reservoir area and its changing tendency [J]. China Environmental Science, 2012, 32(6): 1062–1068.
- [13] 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.
- [14] 李 哲, 王 胜, 郭劲松, 等. 三峡水库 156m 蓄水前后彭溪河回水区藻类多样性变化特征 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 227–231.
- Li Z, Wang S, Guo J S, et al. Phytoplankton diversity in backwater area of the Pengxi River in the Three Gorges Reservoir before and after 156m impoundment [J]. J. Lake Sci., 2012, 24(2): 227–231.
- [15] 蒋 滔, 郭劲松, 李 哲, 等. 三峡水库不同运行状态下支流彭溪河水–气界面温室气体通量特征初探 [J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1463–1470.
- Jiang T, Guo J S, Li Z, et al. Air–water surface greenhouse gas flux in Pengxi River at different operational stages of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1463–1470.
- [16] 秦 宇, 张渝阳, 李 哲, 等. 三峡彭溪河水华期间水体 CH₄ 浓度及其通量变化特征初探 [J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1578–1588.
- Qin Y, Zhang Y Y, Li Z, et al. CH₄ Fluxes during the algal bloom in the Pengxi River [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1578–1588.
- [17] 付 莉. 三峡水库彭溪河永久回水区水环境与藻类生长关系 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- Fu L. Aquatic environment and its relevance to alga community and growth in permanent backwater area in Pengxi River of Three Gorge Reservoir [D]. Chongqing: Xinan University, 2015.
- [18] 李 斌, 徐丹丹, 王志坚, 等. 三峡库区蓄水 175m 对汉丰湖不同生物类群 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(8): 1426–1432.
- Li B, Xu D D, Wang Z J, et al. Effects of the 175m impoundment (the first time) in the stable carbon and nitrogen isotope ratios ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) of different organisms in Hanfeng Lake from the Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science, 2013, 33(8): 1426–1432.
- [19] 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 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): 22–26.
- [20] 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): 1104–1113.
- Chen Y, Huang H, Peng W Q. Research on eutrophication driven factors of Hanfeng Lake based on exploratory data analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1104–1113.
- [21] GB3838–2002 地表水环境质量标准 [S].
- GB3838–2002 Environmental quality standard for surface water [S].
- [22] 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 and Environment in the Yangtze Basin, 2011,

- 20(3):311-316.
- [23] 王 昱,卢世国,冯 起,等.黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析 [J]. 中国环境科学, 2019,39(10):4194-4204.
- Wang Y, Lu S G, Feng Q, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in the upper and middle reaches of Heihe River [J]. China Environmental Science, 2019, 39(10):4194-4204.
- [24] Dan Z, Huai C, Xing Z Y, et al. Nitrous oxide emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir [J]. Ecological Engineering, 2013,60:150-154.
- [25] Gao Q, Li Y, Cheng Qi Y, et al. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013 [J]. Water Research, 2016,92: 262-274.
- [26] 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等.三峡库区古夫河水质时空分异特征 [J]. 生态学报, 2013,33(17):5385-5396.
- Ran G H, Ge J W, Miao W J, et al. Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(17):5385-5396.
- [27] 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.
- [28] Zhang J L, Zheng B H, Liu L S, et al. Seasonal variation of phytoplankton in the DaNing River and its relationships with environmental factors after impounding of the Three Gorges Reservoir: A four-year study [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2: 1479-1490.
- [29] Zhang S T, Xue J Z, Yao J L, Wu H X. Temporal and spatial variation of water environment in Daning Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2010,3(2):1-8.
- [30] 王书航,姜 霞,金相灿.巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响 [J]. 湖泊科学, 2011,23(6):873-880.
- Wang S H, Jiang X, Jin X C. Spatial-temporal variations of aquatic environmental factors and their influences to algal blooming in Lake Chaohu [J]. J. Lake Sci., 2011,23(6):873-880.
- [31] 谢经朝,赵秀兰,何丙辉,等.汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 [J]. 环境科学, 2019,40(4):1760-1769.
- Xie J C, Zhao X L, He B H, et al. Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin [J]. Environmental Science, 2019, 40(4):1760-1769.
- [32] 杨 凡,杨正健,纪道斌,等.三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素 a 和营养盐的空间分布特征 [J]. 环境科学, 2019,40(11):4944-4952.
- Yang F, Yang Z J, Ji D B, et al. Spatial distribution characteristics of chlorophyll a and nutrient salts in tributaries of different river sections in the Three Gorges Reservoir Area during the flood season [J]. Environmental Science, 2019,40(11):4944-4952.
- [33] Sun Z B, Chen Z J, Liao X Y, et al. Characteristics of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus losses in a typical small watershed in Three Georges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(8):1720-1725.
- [34] 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,(3):922-927.
- [35] 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,(3):928-935.
- [36] 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 B, He B H, Wang D B. 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.

致谢: 本实验的现场采样及室内分析工作由张跃伟,武帅楷,王芳,扈玉兴及重庆师范大学龚小杰,刘欢,刘婷婷,孔维苇等协助完成,一并深表感谢。

作者简介: 刘双爽(1986-),女,山东泰安人,重庆大学博士研究生,主要从事湿地生态学研究.发表论文 1 篇。