

# 三峡水库运行对近坝区水质时空变化的影响分析

黄宇波<sup>1</sup>, 潘婷婷<sup>2</sup>, 杨霞<sup>1</sup>, 范向军<sup>1</sup>, 郭棉明<sup>1</sup>

(1.中国长江三峡集团有限公司 流域枢纽运行管理中心,湖北 宜昌 443133;

2.长江水资源保护科学研究所,武汉 430051)

**摘要:**为探究三峡水库运行对近坝区水质时空变化特征的影响,运用主成分分析和方差分析等方法分析 2015—2019 年近坝区的溶解氧(DO)、pH 值、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、粪大肠杆菌(FC)等 8 个水质参数,分析不同运行期水质变化特征.结果表明,近坝水域水质全年达到Ⅲ类及以上标准;高水位时期和消落期影响水质的主要参数为 DO,坝上低水位和蓄水期影响水质的主要参数为 TP 和 FC,坝下低水位期影响水质的主要参数为 COD, NH<sub>3</sub>-N, FC, TN, 蓄水期为 TN, TP, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, COD 和 FC. TN, TP, FC 近 5 年来显著下降,但坝下 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度有升高趋势.控制三峡水库流域内农业面源污染,提高近坝区域城镇污水收集处理率,加大船舶污染治理,是改善近坝区水质的重要措施.

**关键词:**三峡水库;水质;时空变化;主成分;趋势

**中图分类号:**X821

**文献标志码:**A

水质是水环境的重要组成部分,由于人类活动强度增大和自然环境变化,河流、湖泊、水库等水体水质受到一定威胁.水质恶化会损害水生生态系统健康,例如造成水生生物多样性下降、水体富营养化等环境问题.分析探讨水质变化的特征和驱动力,对于水资源的合理开发具有重要实践意义.土地利用变化<sup>[1-3]</sup>、污染排放<sup>[4]</sup>和水利工程建设对河流水质均会带来一定影响.如杨琴等<sup>[5]</sup>研究表明旱地与城镇用地是造成淮河流域(河南段)水污染的主要原因<sup>[5]</sup>.白洋淀水质综合污染指数 7 月最高,2 月最低,污染指数排序由大到小为夏季,秋季,春季,冬季<sup>[6]</sup>;闽江流域 4 至 12 月水质较好,上游污染物以农业面源污染为主,下游污染源主要为工业废水、生活污水、农业和禽畜养殖污水<sup>[7]</sup>.水利工程包括用于防洪发电的拦河筑坝,用于灌溉饮水修建的水库或调水工程,以及水土保持、滩涂治理等工程.水利工程会改变水质状况,例如河流筑坝会滞留营养物质<sup>[8]</sup>,降低水环境容量和水体自净能力.同时,水库存在深层缺氧、水温偏低等问题<sup>[9]</sup>.王昱等<sup>[10]</sup>研究发现外源污染源是导致甘肃黑河水质变差的主要因素,梯级筑坝则是导致水质变差的间接因素<sup>[10]</sup>.

三峡工程在防洪、发电、航运和水资源利用等方面发挥着巨大作用,三峡水库运行对水质的影响也受到专家学者的较多关注.三峡水库蓄水后,坝上呈河道型水库特征,坝下为自然河流形态,受水库运行影响,水库中物质的迁移扩散减弱,导致污染物蓄积<sup>[11]</sup>.同时,流速减缓容易诱发库湾水华等环境问题<sup>[12]</sup>.王丽婧等<sup>[13]</sup>总结了三峡水库运行后水动力改变对支流回水区水华暴发的“胁迫效益”,以及水动力改变对同等负荷条件下水体危害的“迭加效应”.目前对于三峡大坝上、下游水质特征及其与调度的关系有一定研究<sup>[14-15]</sup>,而针对敏感水域如近坝区的水质状况研究较少,水质参数在长时间尺度上对水库调度的响应还不够清楚.为阐明三峡水库运行对近坝区水质特征的影响,本研究通过分析 2015—2019 年近坝区主要水质参数,探究近坝区水体水质在不同调度时期的分布特征和变化趋势,以期为水库水资源管理和保护提供依据.

收稿日期:2021-09-10;修回日期:2021-11-16.

基金项目:长江水科学联合基金(U2040220)

作者简介(通信作者):黄宇波(1990—),男,湖北宜昌人,中国长江三峡集团有限公司工程师,博士,研究方向为水库生态环境监测与管理,E-mail:yubo618@163.com.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

三峡枢纽区位于湖北省宜昌市夷陵区,东至乐天溪大桥,西至秭归县城,南到鸡公岭,北到乐天溪镇八河口村,总面积约 12.8 km<sup>2</sup>,辖区内污染源来自水电生产、生活、旅游、航运等社会经济活动。三峡枢纽区近坝区水域是重要的饮用水水源地,为三峡坝区及秭归县提供生活用水。本研究在三峡大坝的坝前和坝下水域进行水质样品采集,上下游纵向距离为 10 km,其中坝前水域设有上游太平溪(S1)、上引航道(S2)和副坝(S3)3 个断面,坝下设有下引航道(S4)和乐天溪断面(S5)2 个断面(样点布设见图 1)。

干流及近岸监测包括干流太平溪与乐天溪两个断面,每个断面在左岸、中泓、右岸布设 3 条采样垂线,以及左岸上引航道和下引航道、右岸副坝的 3 个测点。采样频次为每月 1 次,采样方法参照《水环境监测规范》(SL219-2013)。水温、pH 值、电导率、溶解氧采用便携式水质分析仪 HQ40d(美国)现场测定,其余指标测定参照《水和废水监测方法》<sup>[16]</sup>。水质数据主要为三峡集团流域管理中心组织开展的《三峡枢纽区生态与环境监测》,水位、流量数据摘自中国长江三峡集团有限公司水情信息。

### 1.2 统计分析

将样点以三峡大坝为界划分为坝上(S1—S3)和坝下(S4—S5)。根据水库全年调度运行规律划分为 4 期,第 1 期为消落期(1 至 5 月),第 2 期为低水位时期(6 至 8 月),第 3 期为蓄水期(9 至 10 月),第 4 期为高水位时期(11 至 12 月)。采用方差分析比较水质参数在不同运行期的差异,采用 Spearman 相关分析检验 2015—2019 年入库流量(Q1)、出库流量(Q2)、库区水位与水质参数的关系,采用主成分分析近坝区不同运行时期水质变化的主导因子;方差分析和相关分析用 SPSS 19 完成,PCA 分析及作图在 R 软件中用 FactoMineR 包完成。所有的检验以  $P < 0.05$  作为显著水平。

## 2 结果

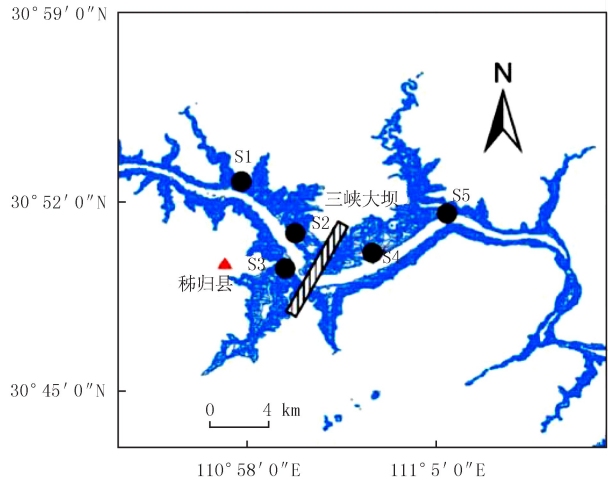
### 2.1 三峡水库出、入库流量与库区水位特征

三峡水库库区水位及出、入库流量逐月变化过程如图 2 所示,三峡水库随季节进行水位调控,消落期水位开始下降;低水位时期平均入库流量达到全年峰值,为 21 674.53 m<sup>3</sup>/s,平均水位降至最低 148.34 m;蓄水期,水位逐渐上升;到高水位维持在 175 m 左右,平均入库流量由 18 677.8 m<sup>3</sup>/s 降至 8 169.4 m<sup>3</sup>/s,平均出库流量由 15 049.3 m<sup>3</sup>/s 降至 8 360.2 m<sup>3</sup>/s。

### 2.2 水质变化特征

近坝区水体水质在不同运行期的均值见表 1。研究区域整体为弱碱性,近坝区水质评价执行国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(TN,FC 不参评),近坝水域全年均达到Ⅲ类水质标准,其中 1,4 期为Ⅱ类,2,3 期由于 TP 质量浓度上升,达到Ⅲ类。近坝水域水质参数空间差异不显著。

分析坝上水域水质可知,pH 值在第 4 期显著高于 1~3 期( $P < 0.05$ ),DO 在 1,4 期显著高于 2,3 期



S1. 太平溪, S2. 上引航道, S3. 副坝, S4. 下引航道, S5. 乐天溪。

图1 三峡大坝近坝区样点图

Fig.1 Sample sites near Three Gorges Dam

( $P < 0.05$ ).COD 在 2,3 期显著高于 1 期,低于 4 期( $P < 0.05$ ).TN,FC 在 2 期高于其他时期, $NH_3-N$  4 期最高, $BOD_5$ ,TP 在各运行期无显著差异.

分析坝下水域水质参数发现,pH,DO 在 1,4 期的值高于 2,3 期,其中 pH 值 1,4 期显著大于 2,3 期( $P < 0.05$ ),1,4 期之间无差异;DO 质量浓度 1 期显著大于 4 期,也显著大于 2,3 期( $P < 0.05$ ).2 期  $BOD_5$ ,COD,TP,TN,FC 高于其他运行期.

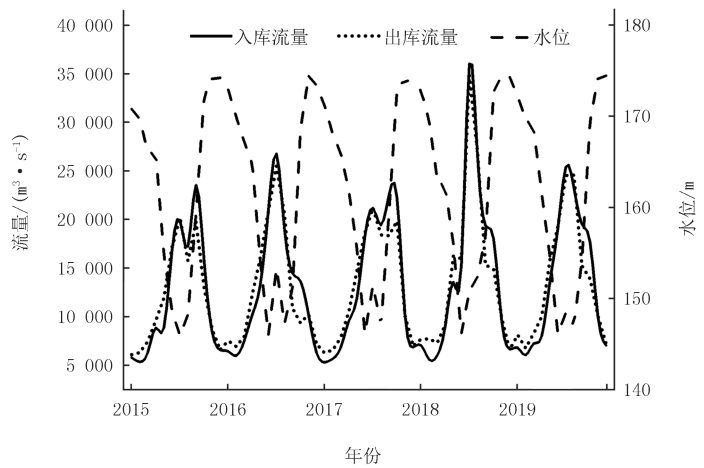


图2 2015-2019年三峡水库出、入库流量与库区水位逐月变化  
Fig.2 Monthly inflow, outflow and water level of Three Gorges Reservoir from 2015 to 2019

表 1 2015—2019 年三峡近坝区不同运行期各水质参数均值

Tab. 1 Mean value of water quality parameters in different operation period from 2015 to 2019 near Three Gorges Dam

水质指标	坝上				坝下			
	1 期	2 期	3 期	4 期	1 期	2 期	3 期	4 期
DO/( $mg \cdot L^{-1}$ )	9.12	7.51	7.49	8.34	9.63	7.46	7.61	8.65
pH	8.05	7.95	7.93	8.08	8.08	7.93	7.92	8.08
COD/( $mg \cdot L^{-1}$ )	1.42	2.20	1.93	2.37	1.42	2.12	1.85	1.64
$BOD_5$ /( $mg \cdot L^{-1}$ )	0.78	0.83	0.77	0.84	0.77	0.82	0.76	0.79
$NH_3-N$ /( $mg \cdot L^{-1}$ )	0.04	0.06	0.07	0.11	0.04	0.05	0.07	0.04
TP/( $mg \cdot L^{-1}$ )	0.08	0.09	0.08	0.07	0.09	0.10	0.08	0.07
TN/( $mg \cdot L^{-1}$ )	1.93	2.06	1.80	1.55	1.97	2.04	1.80	1.70
FC/( $个 \cdot L^{-1}$ )	2 866.39	10 784.30	6 319.78	2 279.08	3 530.87	14 728.89	8 641.67	2 691.17

### 2.3 水质长期变化趋势

为探究水库运行后库区水质的长期变化趋势,应用 Mann-Kendall'test 分别对坝上、坝下以及所有样点的水质参数变化趋势进行分析(见表 2),结果表明,坝上 TN,TP,FC 浓度呈逐年显著降低趋势;与 2015 年相比,坝下  $NH_3-N$  有一定升高,TP,TN 质量浓度显著降低.对所有样点的参数趋势分析显示,DO,pH, $NH_3-N$  呈逐年显著升高趋势,而 TP,TN,FC 浓度显著降低,其他水质参数无明显变化.研究表明近年来长江流域 I 至 III 类水质断面比例上升 7.2 个百分点,说明三峡近坝区水域水质逐步改善,与长江流域水质整体好转的趋势一致<sup>[17]</sup>.TN,TP,FC 浓度持续降低说明近年来长江保护工作取得一定成效,通过采取水土保持、污染物总量控制、污水治理等措施,有效改善了水质<sup>[18]</sup>.

表 2 各水质参数的 Mann-Kendall'test 的 Z 得分

Tab. 2 Mann-Kendall'test Z score of water quality parameters

水质指标	DO	pH	COD	$BOD_5$	$NH_3-N$	TP	TN	FC
坝上	0.60	0.40	0.24	-0.04	0.94	-5.34**	-2.67**	-2.43*
坝下	0.26	0.49	0.22	0	2.12*	-4.49**	-2.35*	-1.79
所有位点	2.30*	2.05*	0.85	1.86	3.73**	-10.62**	-3.39**	-2.43*

注:\*\*代表  $P < 0.01$ ,\*代表  $P < 0.05$ ,表 3 同.

### 2.4 相关性分析

水质参数与 Q1, Q2 和库区水位进行 Spearman 相关分析可知(表 3),近坝区 DO, pH 与 Q1, Q2 显著负相关( $P < 0.01$ ),而与库区水位正相关( $P < 0.01$ ).COD, FC,  $\text{NH}_3\text{-N}$  与 Q1, Q2 显著正相关( $P < 0.05$ ),与水位显著负相关( $P < 0.05$ ).TP, TN 均与库区水位显著负相关, TN 仅与 Q2 正相关,而 TP 与 Q1, Q2 无显著相关关系.  $\text{BOD}_5$  在坝上水域与 Q1, Q2 无显著关系,但在坝下水域与 Q1, Q2 显著正相关( $P < 0.05$ ).

表 3 水质参数与入库流量、出库流量、库区水位相关性系数

Tab. 3 Correlation coefficients between water quality, inflow, outflow and water level

水质指标	坝上			坝下		
	Q1	Q2	库区水位	Q1	Q2	库区水位
DO	-0.72**	-0.65**	0.43**	-0.74**	-0.66**	0.46**
pH	-0.49**	-0.47**	0.38**	-0.52**	-0.46**	0.37**
COD	0.62**	0.50**	-0.29*	0.62**	0.49**	-0.28*
$\text{BOD}_5$	0.16	0.13	-0.18	0.31*	0.28*	-0.25
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.41**	0.39**	-0.26**	0.39**	0.38**	-0.20
TP	0.07	0.11	-0.30*	0.15	0.16	-0.31*
TN	0.20	0.31*	-0.56**	0.19	0.29*	-0.52**
FC	0.63**	0.67**	-0.59**	0.75**	0.77**	-0.69*

对坝上水域水质参数进行主成分分析(图 3),结果表明,前 2 个主成分(Dim1 和 Dim2)解释了 75.30% 的变量变化,第一主成分中 DO, Q1, Q2 得分系数较高,反映了短期水文变化引起的水质参数(DO)的变化(表 4).第二主成分中 COD,  $\text{BOD}_5$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  得分系数较高,反映了有机污染物对水质的影响.第三主成分中 TP, TN, FC, 库区水位(water level, WL)得分系数高,反映了水位变化对水质参数的影响.将所有样本按照不同运行期分组,环境参数在组内箭头长短表示影响的大小.分析结果表明,1 期和 4 期水质的主要影响参数为 DO, 2 期和 3 期水质的主要影响参数为 TP, TN 和 FC.

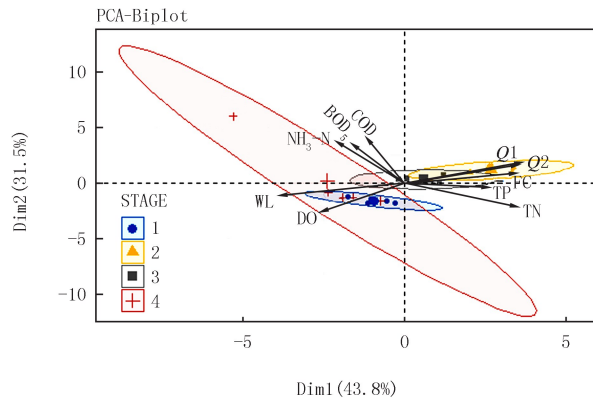


图3 三峡大坝坝上水域水质参数主成分分析图

Fig. 3 Principal component analysis plot of the water quality in the upstream of Three Gorges Dam

表 4 三峡大坝坝上水域主成分得分系数表

Tab. 4 Principal component analysis score of the water quality in the upstream of Three Gorges Dam

主成分	DO	COD	$\text{BOD}_5$	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	TN	FC	Q1	Q2	WL
1	<b>-0.27</b>	0.02	-0.06	-0.01	-0.19	-0.05	0.11	<b>0.35</b>	<b>0.32</b>	-0.14
2	-0.05	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	<b>0.31</b>	0.14	-0.11	0.04	-0.07	-0.05	-0.04
3	0.11	0.09	0.16	0.03	<b>0.64</b>	<b>0.33</b>	<b>0.21</b>	-0.22	-0.15	<b>-0.20</b>

注:加粗数据表示与该主成分显著相关的水质参数得分系数,表 5 同.

坝下水域水质参数主成分分析表明(图 4),前 2 个主成分(Dim1 和 Dim2)解释了 70.70%的变量变化,第一主成分中,DO,COD,FC,Q1 得分系数高,反映了短期水文变化引起的水质参数变化;第二主成分中,TP,TN,库区水位(WL)得分系数较高,反映了水位对营养盐的影响;第三主成分中, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, Q2 得分系数高,反映了 Q2 对区域污染因子的影响(表 5)。1, 4 期水质的主要影响参数为 DO, 2 期水质的主要影响参数为 COD, NH<sub>3</sub>-N, FC, TN, 3 期水质的影响参数在 2 期的基础上增加 BOD<sub>5</sub> 和 TP(图 4)。

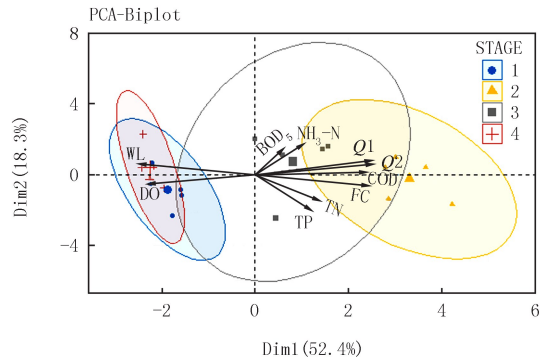


图4 三峡大坝坝下水域水质参数主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis plot of the water quality downstream of Three Gorges Dam

表 5 三峡大坝坝下水域主成分得分系数表

Tab. 5 Principal component analysis score of the water quality downstream of Three Gorges Dam

主成分	DO	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP	TN	FC	Q1	Q2	WL
1	<b>-0.38</b>	<b>0.25</b>	-0.19	0.09	-0.02	-0.20	<b>0.21</b>	<b>0.20</b>	0.10	-0.01
2	0.25	-0.06	0.14	-0.17	<b>0.34</b>	<b>0.52</b>	0.06	-0.05	0.08	<b>-0.30</b>
3	0.20	-0.10	<b>0.61</b>	<b>0.32</b>	-0.25	0.14	-0.18	0.12	<b>0.22</b>	-0.13

### 3 讨 论

三峡水库运行对近坝区水质的影响既有水库调度与季节的交互效应,也有水文情势改变后对部分物质迁移转化的影响。

按照 GB 3838—2002 水质标准,年内高水位时期(4 期)和消落期(1 期)水质为Ⅱ类,低水位期(2 期)TP 质量浓度上升,水质出现Ⅲ类.DO 在高水位和消落期高于其他时期,坝上 TN, FC 在低水位期高于其他时期;坝下 COD, BOD<sub>5</sub>, TP, TN, FC 在低水位期最高(表 1)。由此可见,部分污染物浓度在低水位期增大。

坝上与坝下水质在不同调度运行阶段的影响参数不同。坝上主成分分析表明,高水位期(11 至 12 月)和消落期(1 至 5 月)影响水质的主要参数为 DO,低水位(6 至 8 月)和蓄水期(9 至 10 月)主要为 TP, FC(图 3)。DO 与 Q1, Q2 在第一主成分中得分系数高(表 4),反映了流量变化影响水体产氧与好氧过程。高水位时期,流量较小,近坝区藻类生长,有利于产氧,DO 含量升高,而随着消落期流量逐渐增大,水体浊度增大,近坝区干流藻类生长受抑制。由于坝上 COD, NH<sub>3</sub>-N, FC 与 Q1 显著正相关(表 3),说明流量增加使得水体中陆源输入的污染物增加,导致耗氧过程增强,使 DO 降低。COD, NH<sub>3</sub>-N, BOD<sub>5</sub> 在第二主成分中得分系数高,主要反映了水质污染状况。近坝 COD, NH<sub>3</sub>-N, BOD<sub>5</sub> 更多来源于城镇生产生活、船舶污染排放,近坝区在低水位时期漂浮物聚集,也会导致 COD, NH<sub>3</sub>-N 质量浓度升高<sup>[19]</sup>。研究表明 NH<sub>3</sub>-N 与 BOD<sub>5</sub> 在蓄水前后基本没有变化<sup>[20]</sup>,说明外源污染是主因。TP, TN, FC 和水位在第三主成分中得分系数高,反映了水位变化带来的水体营养改变。当三峡水库处于高水位和消落期时,库区蓄积的水量大,水库对污染物的稀释作用强,并且此时流量小,有利于 TP, FC 等颗粒态为主的营养物质的沉降,导致 TP, FC 降低。在低水位时期和蓄水期,处于长江流域雨季,FC 与 Q1, Q2 显著正相关(表 3),说明此时水质变化主要受降雨径流冲刷的面源污染输入影响。

坝下主成分分析表明,高水位期和消落期的主要影响参数为 DO(图 4),低水位运行阶段,水质主要影响参数为 NH<sub>3</sub>-N, COD 和 FC,坝下蓄水期的主要影响参数为 BOD<sub>5</sub>, COD, TP, TN, NH<sub>3</sub>-N, FC。第一主成分中,DO, COD, FC 和 Q1 的得分系数高(表 5),COD 是反映受工农业、生活有机污染物和还原性无机物质污染程度的指标<sup>[21-22]</sup>,FC 则是生活排污指标,说明坝下水质与上游来流生产生活面源污染物输入有关。第三

主成分中,  $BOD_5$ ,  $NH_3-N$  和  $Q_2$  得分系数高(表 5), 说明  $BOD_5$  和  $NH_3-N$  受  $Q_2$  影响。研究表明,  $Q_2$  在雨季时较大, 会加剧坝下河流底部扰动, 促进有机氮向  $NH_3-N$  转化进入水体, 是  $NH_3-N$  升高的原因之一<sup>[23]</sup>。除此以外,  $BOD_5$  和  $NH_3-N$  来自于生活排污和主要支流汇入(高家溪), 随着近坝区城镇生活和旅游人数增加以及翻坝航运增长, 坝下的  $BOD_5$  和  $NH_3-N$  增加。相关分析显示, 坝下  $BOD_5$  和  $NH_3-N$  与  $Q_1, Q_2$  显著正相关(表 3), 说明库区汇集的面源污染物随出库进入到坝下, 进一步升高了坝下  $BOD_5$  和  $NH_3-N$  质量浓度, 导致近年来  $NH_3-N$  质量浓度显著增加(表 2), 因此, 坝下水质受外源污染与水库运行的交互影响。

分析表明, 近坝水域 TN 和 TP 受水位影响显著(表 3), 且 TN, TP 质量浓度近 5 年来显著下降(表 2)。TN, TP 呈降低趋势, 一方面得益于移民政策和水库环境保护措施, 使得三峡库区农业化肥施用量降低, 城镇污水处理厂增加, 减少了 TN, TP 的负荷<sup>[24]</sup>。另一方面是由于水库运行后, 水位抬升, 水库的自净能力有所增加。长江中上游梯级水库的相继运行, 有效减少了长江泥沙含量, 颗粒污染物随之降低。长江流域磷矿资源丰富, 磷肥、磷石膏等企业多沿河而建, 水体 TP 质量浓度与面源污染有关, 泥沙颗粒物对氮、磷有一定吸附作用<sup>[25]</sup>, 水库中颗粒物的沉降促进了氮、磷等物质的沉降, 是近十年来 TP 含量下降的重要原因<sup>[26]</sup>, 对 COD 等其他物质降低也有一定作用<sup>[27]</sup>。与浅水湖泊相比, 深水水库中营养物质沉降后, 进入内源循环过程比较缓慢, 污染物以吸附为主, 难以进入上层水体, 这是深水湖泊和水库控制外源污染比浅水湖泊更有效的原因<sup>[28]</sup>。因此, 水库运行改变了水文情势, 随之改变了 TN, TP 的迁移转化过程, 一定程度上促进了 TN, TP 质量浓度的下降。

## 4 结 论

(1) 三峡水库近坝区水质空间差异不大, 时间差异显著。主成分分析显示坝上水域水质主要受季节因素影响, 坝下水域水质受水库运行与季节因素的交互影响。高水位和消落期水质优于低水位和蓄水期水质, 且高水位和消落期水质主要影响参数为 DO; 坝上低水位和蓄水期影响水质的主要参数为 TP 和 FC, 坝下低水位期影响水质的主要参数为 COD,  $NH_3-N$ , FC, TN, 蓄水期为 TN, TP,  $BOD_5$ ,  $NH_3-N$ , COD 和 FC。

(2) 水库运行改变了水文情势, 一定程度上促进了近坝水域 TN, TP 质量浓度的下降, 但是受旅游、航运等人类活动的影响, 坝下  $NH_3-N$  有升高趋势。控制面源污染, 提高近坝区域城镇污水收集处理率, 加大船舶污染治理, 是改善近坝区水坝的重要措施。

## 参 考 文 献

- [1] 张惠芳, 刘欢, 苏辉东, 等. 1995—2014 年拉萨河流域水环境变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 770-778.  
ZHANG H F, LIU H, SU H D, et al. Analysis on trend and driving force for water environmental change of the Lhasa River Basin(1995-2014)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 770-778.
- [2] 项颂, 万玲, 庞燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 160-170.  
XIANG S, WAN L, PANG Y. Spatial-temporal variation of inflow river water quality under land use effect[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(1): 160-170.
- [3] 王竹, 刘扬, 王芳, 等. 秦皇岛水质时空分布特征及归因分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 63-71.  
WANG Z, LIU Y, WANG F, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and evaluation analysis of surface water quality in Qinhuangdao City[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 63-71.
- [4] 韩爽, 夏春龙, 王永东, 等. 大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1568-1575.  
HAN S, XIA C L, WANG Y D, et al. Changes in water quality and identification of the sources of water pollution in the drainage basin of Dahuofang Reservoir[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(7): 1568-1575.
- [5] 杨琴, 汤秋鸿, 张永勇. 淮河流域(河南段)水质时空变化特征及其与土地利用类型的关系[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1519-1530.  
YANG Q, TANG Q H, ZHANG Y Y. Spatiotemporal changes of water quality in Huai River Basin(Henan section) and its correlation with land use patterns[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(9): 1519-1530.
- [6] 王欢欢, 白洁, 刘世存, 等. 白洋淀近 30 年水质时空变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1051-1059.  
WANG H H, BAI J, LIU S C, et al. Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1051-1059.
- [7] 汤云, 卢毅敏, 吴升. 闽江流域水质时空分布特征及污染源解析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 30-35.  
TANG Y, LU Y M, WU S. Spatio-temporal distribution and source identification of water pollutants in Minjiang River Basin[J]. Journal of

- Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 30-35.
- [8] AVILÉS A, NIELL F X. The control of a small dam in nutrient inputs to a hypertrophic estuary in a Mediterranean climate[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 180(1/2/3/4): 97-108.
- [9] 姚维科, 崔保山, 刘杰, 等. 大坝的生态效应: 概念、研究热点及展望[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 428-434.  
YAO W K, CUI B S, LIU J, et al. Ecological effects of dam: Concepts, research hotspots and prospects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4): 428-434.
- [10] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1539-1551.  
WANG Y, LU S G, FENG Q, et al. Effect of cascade dam construction on the spatio-temporal variations of water quality in Heihe River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1539-1551.
- [11] XIA J J, XU G H, GUO P, et al. Tempo-spatial analysis of water quality in the Three Gorges reservoir, China, after its 175-m experimental impoundment[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(9): 2937-2954.
- [12] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 7-11.  
CAI Q H, HU Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 7-11.
- [13] 王丽娟, 李虹, 杨正健, 等. 三峡水库蓄水运行初期(2003—2012年)水环境演变特征的“四大效应”[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1109-1118.  
WANG L J, LI H, YANG Z J, et al. Four effects of water environment evolution in early period(2003-2012) after impoundment of the Three Gorges reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1109-1118.
- [14] 张馨月, 马沛明, 高千红, 等. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(3): 633-645.  
ZHANG X Y, MA P M, GAO Q H, et al. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3): 633-645.
- [15] 黄玥, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡水库水位调度对出库水质影响分析与水质预测[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 78-85.  
HUANG Y, HUANG Z L, XIAO W F, et al. Analysis and prediction of effects of Three Gorges Reservoir water level scheduling on the outflow water quality[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(4): 78-85.
- [16] GILCREAS F W. Standard methods for the examination of water and waste water[J]. *American Journal of Public Health and the Nation's Health*, 1966, 56(3): 387-388.
- [17] 陈善荣, 何立环, 张凤英, 等. 2016—2019年长江流域水质时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1100-1108.  
CHEN S R, HE L H, ZHANG F Y, et al. Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016—2019[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1100-1108.
- [18] 杨盼, 卢路, 王继保, 等. 基于主成分分析的 spearman 秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 76-80.  
YANG P, LU L, WANG J B, et al. Analysis of water quality trend in the main stream of the Yangtze River based on principal component analysis[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 76-80.
- [19] 张馨月, 高千红, 闫金波, 等. 三峡水库近坝段水面漂浮物对水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 609-618.  
ZHANG X Y, GAO Q H, YAN J B, et al. Water quality affected by floating debris near the dam section of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(3): 609-618.
- [20] 熊中福, 王定勇, 蒋冬梅. 三峡水库 156m 高程蓄水后重庆段水质变化的分析与评价[J]. *安全与环境学报*, 2009, 9(1): 85-89.  
XIONG Z F, WANG D Y, JIANG D M. Water quality analysis and evaluation of Chongqing segment with the water storage level up-lifted to 156 m in the Three Gorge Reservoir[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2009, 9(1): 85-89.
- [21] 田思瑶, 于晓彩, 塔荣风, 等. 辽东湾中部近岸海域 COD、石油类、叶绿素分布特征及富营养化状态评价[J]. *大连海洋大学学报*, 2019, 34(5): 739-745.  
TIAN S Y, YU X C, TA R F, et al. Distribution characteristics of COD, petroleum, chlorophyll a and evaluation of eutrophication status in the coastal waters in central Liaodong Bay[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(5): 739-745.
- [22] 朱长军, 赵方星, 李步东, 等. 基于主成分分析及 WQImin 的大黑汀水库水质评价[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 52-58.  
ZHU C J, ZHAO F X, LI B D, et al. Water quality evaluation of Daheiting reservoir based on principal component analysis and WQImin [J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2021, 49(3): 52-58.
- [23] 杨乐, 张焯, 侯培强, 等. 三峡水库中下游水体氮磷时空变化与机制分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(6): 732-738.  
YANG L, ZHANG Y, HOU P Q, et al. Temporal and spatial variation on nitrogen and phosphorus in the middle and lower reaches of the Three Gorges reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(6): 732-738.
- [24] XIANG R, WANG L J, LI H, et al. Water quality variation in tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015[J]. *Water Research*, 2021, 195: 116993.
- [25] 戴卓, 李文杰, 杨胜发, 等. 三峡水库泥沙淤积对氮磷污染物的影响[J]. *人民长江*, 2020, 51(2): 23-27.

- DAI Z, LI W J, YANG S F, et al. Influence of sediment deposition on Nitrogen and Phosphorus pollutants in Three Gorges Reservoir area [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(2): 23-27.
- [26] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1150-1162.
- LOU B F, ZHUO H H, ZHOU Z, et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstem during recently 18 years [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1150-1162.
- [27] 余明星, 邱波, 夏凡, 等. 三峡水库蓄水前后干流水质特征与变化趋势研究 [J]. *人民长江*, 2011, 42(23): 34-38.
- YU M X, QIU B, XIA F, et al. Research on water quality characteristics and variation of mainstream of Yangtze River before and after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. *Yangtze River*, 2011, 42(23): 34-38.
- [28] QIN B Q, ZHOU J, ELSER J J, et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3191-3198.

## Effects of Three Gorges Reservoir operation on spatiotemporal variation of water quality near the dam

Huang Yubo<sup>1</sup>, Pan Tingting<sup>2</sup>, Yang Xia<sup>1</sup>, Fan Xiangjun<sup>1</sup>, Guo Mianming<sup>1</sup>

(1. River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China;  
2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

**Abstract:** In order to explore the spatiotemporal variation of water quality and the effects of the dam operation on the water quality near Three Gorges Dam, principal component analysis (PCA) and variance analysis were used to study the water quality characteristic near the dam from 2015 to 2019, including dissolved oxygen (DO), pH, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), ammonia (NH<sub>3</sub>-N), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and fecal coliforms (FC). The results showed that the water quality near the dam reached or above class III standard. The main parameter affecting water quality was DO in high water level period and water releasing period. In the reservoir the dominant parameter affecting water quality were TP and FC in the low water level and impounding period. While in the downstream of the dam the dominant factor affecting water quality were COD, NH<sub>3</sub>-N, FC and TN in the low water level period, TN, TP, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, COD and FC in the impounding period. TN, TP and FC concentration decreased significantly in recent 5 years, but NH<sub>3</sub>-N concentration in the downstream of the dam showed an increasing trend. Controlling agricultural non-point source pollution in the three Gorges Reservoir basin, increasing the rate of urban sewage collection and treatment near the dam area, and strengthening pollution control from ships are important measures to improve the water quality near the dam.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; water quality; spatiotemporal variation; principle component analysis; trend

[责任编辑 赵晓华 陈留院]