

文章编号:1672-3031(2018)06-0544-05

## 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究

焦军丽<sup>1,2</sup>, 马巍<sup>1</sup>, 裴倩楠<sup>1</sup>, 班静雅<sup>1</sup>, 王雨春<sup>1</sup>, 杨克君<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 水环境研究所, 北京 100038;

2. 四川大学水利水电学院, 水力学与山区河流开发保护国家重点试验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 支流库湾水体富营养化是三峡水库蓄水带来的主要水环境影响特征之一。根据对不同历史蓄水期间三峡库区各支流库湾的水质变化特征及富营养化状态分析表明: 三峡水库从试验性蓄水阶段进入常态调度运行后, 支流库湾的水动力条件被进一步削弱, 入河污染物扩散能力大幅度降低, 库湾水质逐渐变差, 各支流库湾普遍表现为中、富营养级水平, 年内整体表现为春季高于秋季。从三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征来看, 库湾水动力条件由河流态改变为湖库态是其发生水体富营养化的主驱动力因素, 陆域营养盐输入是库湾水体富营养化演变的物质基础

**关键词:** 三峡水库; 支流库湾; 水体富营养化; 水动力条件

**中图分类号:** X524

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.06.004

### 1 研究背景

三峡工程是我国规模最大的水利枢纽工程, 对保障长江中下游地区的防洪安全、促进长江经济带的建设与发展有着十分重要的战略意义, 但受外源性营养盐输入、水体流动条件变差、自然环境条件和人类社会活动等因素影响, 建库后各支流库湾水体富营养化问题突出。早在三峡水库蓄水之前, 已有不少学者提出三峡大坝建成后会有水体富营养化的问题<sup>[1-3]</sup>。三峡水库2003年首次蓄水, 半年后部分支流库湾就出现了藻类水华问题, 在坝前区与支流回水区等水流较平缓区域浮游植物数量增加明显, 整体上由蓄水前的贫-中营养状态转变为中-富营养状态<sup>[4-5]</sup>。随着坝前蓄水位的逐渐攀升, 回水区域进一步扩大, 有更多的支流库湾面临水体富营养化的严峻挑战。学者们针对支流库湾的水体富营养化问题开展了大量的研究工作, 但涵盖整个蓄水过程及高水位常态调度运行期的研究文献相对缺乏<sup>[6-7]</sup>。本文在查阅国内外相关文献的基础上, 结合支流库湾较长序列的监测数据, 从不同历史蓄水期三峡库区支流库湾的水质变化特征及其富营养化状态分析入手, 识别并分析了支流库湾水体富营养化加重的驱动力因素, 以期对三峡水库支流库湾水体富营养化治理提供一定的参考。

### 2 三峡库区水质数据选用概况

按照三峡工程规划, 三峡水库蓄水过程依次经历了135m(2003年)、156m(2006年)、175m试验性蓄水(2008年)和175m常态运行(2010年及以后)四个阶段, 175m蓄水位的实现标志着三峡水库正式进入正常运行阶段。随着蓄水进程的开展, 库区水文情势、水动力特性及水质状况均发生了明显变化。为详细了解三峡水库蓄水进程对库区各支流库湾水体富营养化的影响, 依据水库蓄水进程将

收稿日期: 2018-02-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505305)

作者简介: 焦军丽(1992-), 女, 河南睢县人, 硕士生, 主要从事水环境, 水力学及河流动力学。E-mail: jiaojunli1993@163.com

通讯作者: 马巍(1967-), 男, 四川平昌人, 教授级高级工程师, 主要从事水环境模拟、水生态修复与调控研究。

E-mail: 79658466@qq.com

三峡水库蓄水过程划分为三个阶段：即三峡水库蓄水前(2003年及以前)、蓄水后初期运行期(2004—2010年)和蓄水后高水位常态运行期(2011—2015年)。本文重点分析不同历史蓄水期三峡库区支流库湾的水质状况，与蓄水后高水位常态运行期支流库湾的富营养化状况。数据来源于长江流域水环境监测中心2003年以来，开展多次的“三峡水库蓄水期水环境质量状况专项调查”和“三峡水库不同蓄水位库区支流库湾富营养化专项调查研究”成果，以及2011—2015年支流水质监测调查成果，选取的主要检测指标为pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总磷和叶绿素a等。

### 3 不同蓄水期库区支流库湾水质变化特征

为客观反映蓄水运用期三峡水库支流水质的变化情况，选择与蓄水前相同的8条流域面积大于1000 km<sup>2</sup>一级支流(香溪、大宁河、梅溪河、长滩河、磨刀溪、汤溪河、小江和龙河)，对2003—2015年期间每年3—4月同期的水质监测结果进行对比分析，以保证支流水质变化分析的可比性。各支流均选择上游来水、回水中段和支流口三个代表断面的水质监测数据进行统计分析。参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)，选取pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮和总磷等5项参数，采用单因子评价法进行评价(总磷来水断面采用河流标准，其他断面采用湖库标准)。

**3.1 典型支流库湾整体水质变化特征** 蓄水前8条支流中有7条支流水质满足(或优于)Ⅲ类水标准，其中Ⅱ类水质占66.7%，Ⅲ类水质占22.2%，Ⅴ类水质仅占比11.1%，支流水质较好。蓄水后初期运行期支流水质总体较差，各支流库湾Ⅳ~劣Ⅴ类断面测次比例达52.6%，其中Ⅳ类占比最高，其次为Ⅱ~Ⅲ类，Ⅰ类和劣Ⅴ类均不足10%。蓄水后高水位常态运行期支流库湾水质继续变差，Ⅳ~劣Ⅴ类断面测次占比达69.8%，其中Ⅴ类水质占比最高，达到33.5%，Ⅰ类水质占比不足3%。不同蓄水期间各支流库湾的整体水质类别比例构成详见图1。由图1中结果可知，蓄水前支流水质符合或优于Ⅲ类的水质断面占比88.9%，蓄水后各支流水质均以Ⅳ~Ⅴ类为主，其中初期运行期满足Ⅲ类的水质断面占比下降到47.4%，高水位常态运行期满足Ⅲ类的水质断面占比进一步下降为30.2%。随着蓄水进程的推进，各支流(库湾)水质类别总体呈现逐步变差的趋势。

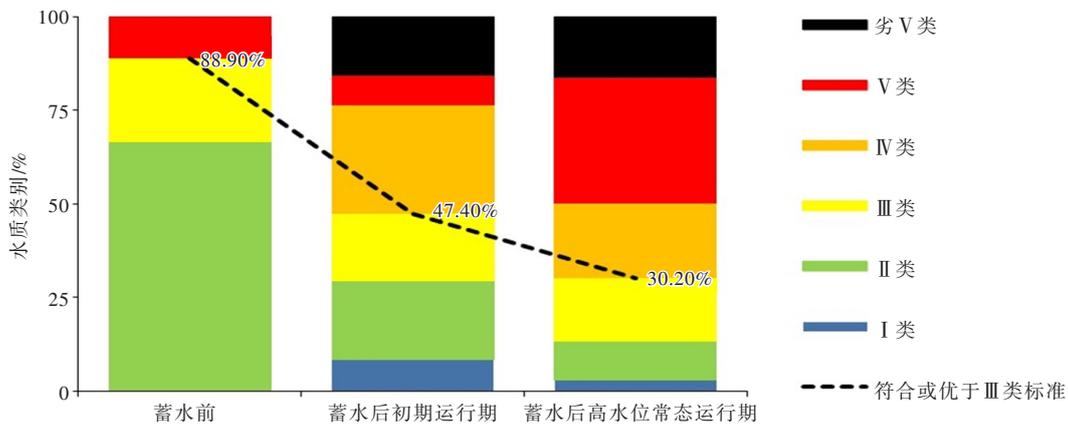


图1 三峡水库不同蓄水阶段支流整体水质类别比例构成

**3.2 支流库湾主要污染物浓度变化** 总磷是8条支流水质评价中的主要超标参数，同时也是受水动力条件变化影响较为敏感的指标，因此可用总磷为代表来分析库区各支流库湾主要污染物含量水平变化。8条支流在蓄水后初期运行期与蓄水后高水位常态运行期的总磷浓度时空分布特征见图2。蓄水后初期运行期8条支流(见图2(a))中，龙河和香溪河总磷浓度整体较高(0.15~0.16 mg/L)小江和汤溪河总磷浓度居中(0.12 mg/L)，其他支流总磷浓度均小于0.1 mg/L；蓄水后高水位常态运行期各条支流(见图2(b))总磷整体浓度均较高，均超过Ⅲ类限值，其中大宁河、龙河、汤溪河相对较低，未超过0.1mg/L，而其他支流浓度均超过0.1 mg/L，其中香溪河最高，总磷均值浓度为0.36 mg/L。总磷在蓄水后高水位常态运行期含量较初期运行期有所上升，部分河流总磷含量的变动幅度也有所增大。

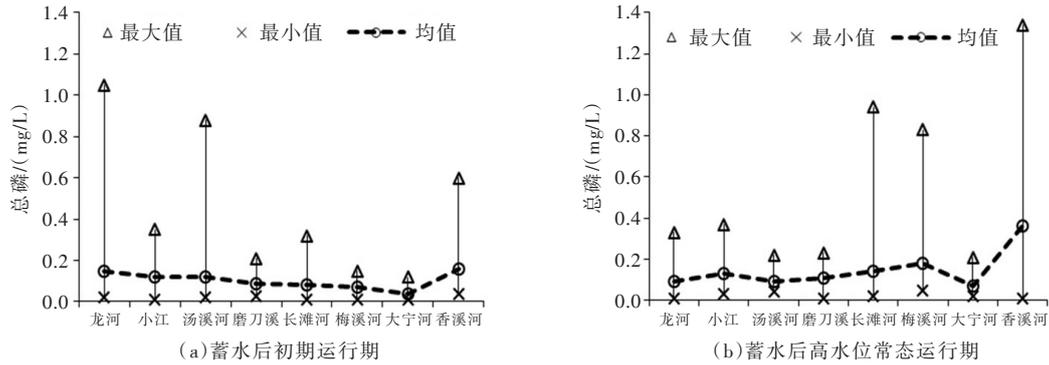


图2 蓄水后初期运行期与高水位常态运行期8条支流总磷浓度特征统计

#### 4 高水位常态运行期支流库湾水体富营养化演变分析

**4.1 高水位常态运行期支流库湾水体富营养化演变规律** 三峡库区支流水系众多，对于不同的水域，由于区域地理特性、自然气候条件、水生生态系统和污染特性等诸多差异，会出现不同的优势藻类种群与不同类型水生生物的失衡<sup>[3]</sup>。但是，富营养化发生的必要条件基本上是一样的，即TP、TN等营养盐相对比较充足、缓慢的水流流态和适宜的温度条件<sup>[3,8]</sup>。从上面的分析可以看出，三峡水库蓄水后各支流水体的污染负荷日益增多，再加上蓄水所带来的水动力条件的变化，使得三峡库区支流库湾水体富营养化日趋严重。春、秋两季是库区各支流库湾水体富营养化较为严重的季节，表现为藻类生长迅速，水华现象明显<sup>[8]</sup>，主要源于这段时间水温升高，光照充足，加快了藻类的光合作用速度，促使藻类的生长繁殖。为了解高水位常态运行期支流库湾水体富营养化演变规律，选取2011—2015年支流水质监测调查成果，对三峡水库16~28条支流春、秋两季的富营养化状况进行分析。本部分内容选用营养状态指数法(Trophic State Index)TSI法<sup>[9]</sup>对调查研究水域的富营养化状态进行评价，主要评价指标为叶绿素a(chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)。评价标准为：TSI<30贫营养；30≤TSI≤50中营养；50<TSI≤60轻度富营养；60<TSI≤70中度富营养；TSI>70重度富营养。

2011—2015年三峡库区支流富营养状况表明(图3)：库区各支流普遍为中营养和富营养等级，其中春季富营养以轻度富营养为主，其次为中度营养，还出现个别重度富营养情况；秋季以中营养和轻度富营养为主，个别支流出现中度富营养。春季库区支流富营养化维持较高水平，富营养化的支流2011—2015年每年占比32.1%~58.6%，平均占比44.0%；其中2013年富营养化支流比例最高，达58.6%，但未出现重度富营养化支流。秋季库区支流富营养化变化较大，富营养化的支流2011—2015年每年占比0%~58.9%，平均占比27.9%；2012年秋季未出现富营养化支流，但2014年富营养化支流占比达到最高的58.9%。所监测的库区支流的营养水平从季节上整体表现为春季高于秋季。蓄水后高水位常态运行期(175 m)蓄水面积进一步增大，水流条件的变化及新淹没的大量土地等因素，都进一步导致水体中营养盐的大量富集，到春秋两季适宜的温度变化及降雨时，硅藻、甲藻等优势藻种开始大量繁殖，水体富营养化加重。

**4.2 三峡库区支流库湾水体富营养化加重的驱动力因素分析** 三峡水库蓄水前，支流主要营养盐浓度本底值较高，不同水期的均值都超过了国际公认的富营养化阈值(TP 0.02 mg/L, TN 0.2 mg/L)<sup>[10]</sup>。但蓄水前大多数支流流速较大(平均流速在1.0 m/s以上)，流速快使得水体透明度低、入河污染物扩散能力强，因此，较大的水流流速导致的低透光率和有限的污染物滞留时间限制了河道内的藻类生长<sup>[6]</sup>。随着三峡水库蓄水进程的逐渐推进，三峡库区水位的大幅度抬升极大的地降低了入库支流的水流流速，其中175m试验性蓄水阶段各支流库湾的平均流速就已低于0.01 m/s，部分时段还会受长江干流水位顶托而形成回水区，使支流库湾流速进一步降低<sup>[8]</sup>。国际上根据水库的流速特征，一般将河流型水库划分为河流型水体(>0.2 m/s)、过渡型水体(0.05~0.2 m/s)、湖泊型水体(0.05 m/s)<sup>[11]</sup>。按照

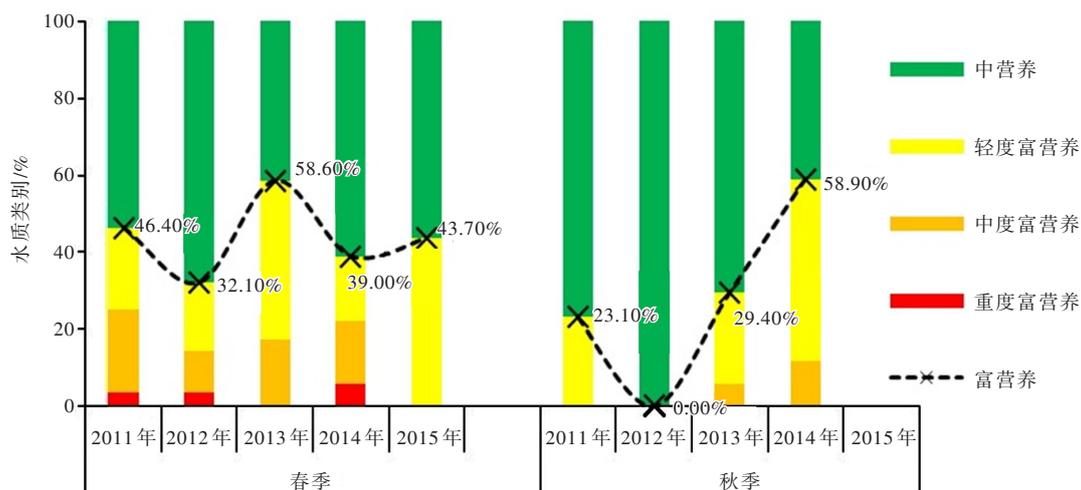


图3 2011~2015年三峡库区支流富营养化比例变化

此标准, 三峡水库蓄水后, 部分支流回水区由蓄水前的河流型逐渐转变为过渡型与湖泊型, 水动力条件的变化使得库区支流水体透明度及透光性显著增加, 入河污染物的滞留时间大幅度延长, 给水体营养盐累积与富营养化发展创造了有利条件。库湾水动力条件的变化是支流库湾水体富营养化趋势性演变的主驱动力因素, 这一观点也得到前人类似研究的支持, 比如邱光胜等<sup>[6]</sup>通过对三峡水库蓄水前及蓄水后初期运行期支流富营养化及水华现状的研究, 提出三峡水库支流中藻类生长的限制因子不是营养盐, 其富营养化加重的原因是蓄水后支流流速的降低。本文以更长系列的监测资料分析结果再次证实了三峡库区支流库湾水体富营养加重的最主要原因是蓄水后水动力条件的改变, 而非水体营养盐浓度较高<sup>[12]</sup>。

当然, 除了水动力条件的改变, 库区污染负荷的不断增加及蓄水所致支流库湾处的水温分层现象也是影响三峡库区支流库湾水体富营养化的重要因素。三峡库区经济的飞速发展及城市化进程的不断推进, 导致三峡库区支流库湾的污染负荷不断增加。充足的营养盐负荷、适宜的温度与光照条件, 加上随着蓄水进程不断推进所引起的回水范围的扩大, 导致了库湾水质逐渐变差, 富营养化状态日益严重<sup>[8]</sup>。三峡水库蓄水也可能导致部分支流库湾形成局部水温分层<sup>[13]</sup>, 水温分层使得水层间的物质不易传输, 而且底部在缺氧、低温状态下, 有机污染物降解的速率会大大减弱, 同时还会促进底泥中营养盐的释放, 从而使得底层水体的营养盐浓度较高。当季节变化等因素导致水温分层消失后, 水体的垂向紊动作用增强, 表、底层水体交换频繁使得水体中营养盐浓度升高<sup>[14]</sup>。

## 5 结论

(1) 2003—2015年期间, 在三峡库区被调查的8条流域面积大于1000 km<sup>2</sup>的一级支流中, 随着蓄水进程的推进, 各支流(库湾)水质类别总体呈现逐步变差的趋势, 其中满足(或优于)Ⅲ类水标准的占比由66.7%锐减至30.20%; 主要超标因子总磷在蓄水后高水位常态运行期含量较初期运行期有所上升, 同时部分河流总磷含量的变动幅度也有所增大。

(2) 2011—2015年期间, 三峡水库16~28条支流中春、秋两季的富营养化整体较为严重, 普遍为中营养和富营养等级。所监测的库区支流的营养水平从季节上整体表现为春季高于秋季, 春季库区支流富营养化平均占比为44.0%, 比秋季高16.1%。

(3) 库湾水动力条件的变化是支流库湾水体富营养化趋势性演变的主驱动力因素, 同时库区污染负荷的不断增加及蓄水所致支流库湾处的水温分层现象也是影响三峡库区支流库湾水体富营养化的重要因素。

参 考 文 献:

- [ 1 ] 罗固源, 刘国涛, 王文标. 三峡库区水环境富营养化污染及其控制对策的思考[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(3): 1-4.
- [ 2 ] 刘永明, 贾绍凤, 等. 三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 67-72.
- [ 3 ] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报, 2003, 21(309): 49-52.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 254-258.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 刘德富, 杨正健, 纪道斌. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454.
- [ 8 ] 刘玉洁, 尹真真. 三峡水库支流回水区富营养化时空分布特征[J]. 环境保护科学, 2014, 40(2): 30-34.
- [ 9 ] CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2): 361-369.
- [ 10 ] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [ 11 ] STRSKRABA M, TUNDISI J G. Guidelines of Lake Management[M]. International lake Environment Committee, 1999.
- [ 12 ] 曾辉, 宋立荣, 于志刚, 等. 三峡水库“水华”成因初探[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3): 336-340.
- [ 13 ] 曹广晶, 惠二青, 胡兴娥. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1254-1259.
- [ 14 ] 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.

Study on the characteristics of eutrophication evolution of tributaries of the Three Gorges Reservoir

JIAO Junli<sup>1, 2</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, PEI Qiannan<sup>1</sup>, BAN Jingya<sup>1</sup>, WANG Yuchun<sup>1</sup>, YANG Kejun<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Institute of water environment, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering & Institute

of Water Conservancy and Hydroelectric Power Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The eutrophication of tributary is one of the main water environmental problems caused by the water storage of the Three Gorges Reservoir. According to the changes of water quality and the eutrophication status of the tributaries of the Three Gorges Reservoir during the different historical impoundments, it is shown that the hydrodynamic conditions of the tributary are further weakened after the Three Gorges Reservoir enters the normal operation from the experimental storage stage. The ability to disperse pollutants into the river decreases significantly, and the water quality of the reservoir bay gradually becomes worse. The tributaries show moderate and eutrophication levels. The overall performance during the year is higher in spring than in autumn. From the characteristics of eutrophication evolution of the tributaries in the Three Gorges Reservoir area, the change of the hydrodynamic conditions of the reservoir bay from the river state to the lake reservoir state is the main driving force for its eutrophication. The nutrient input is the material basis.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; tributary; eutrophication; hydrodynamic conditions;

(责任编辑: 杨 虹)