

三峡水库蓄水不同阶段总磷的变化特征

翟婉盈^{1*}, 湛若云², 卓海华¹, 陈水松¹, 王超³ (1.长江流域水环境监测中心, 湖北 武汉 430019; 2.南水北调中线水源有限责任公司, 湖北 丹江口 442700; 3.长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051)

摘要: 基于三峡水库 2003 年后的蓄水特点, 本文将 2003~2017 年划分为 4 个蓄水阶段. 根据三峡水库 2003~2017 年每月的水文水质数据, 分析了自蓄水以来不同蓄水阶段总磷的变化特征. 研究发现, 首次蓄水阶段, 三峡水库的滞留效应从 2005 年开始凸显. 蓄水试运行阶段, 干流断面总磷年均浓度在 2008 年沿程明显降低, 此后清溪场断面受到乌江高浓度总磷汇入的一定影响. 高水位正常运用期, 除清溪场断面外, 从铜罐驿至官渡口断面, 总磷年均浓度呈现沿程降低的现象. 上游梯级电站运行后, 除官渡口断面外, 干流其余断面总磷年均浓度随时间逐渐减小. 官渡口断面于 2016 年首次出现总磷年均浓度高于沱口断面的现象. 且总磷丰水期年均值不再明显高于枯水期. 同时, 在此蓄水阶段总磷浓度与流量相关性不显著, 朱沱、铜罐驿和官渡口断面总磷浓度与悬浮物浓度相关性不显著.

关键词: 三峡水库; 蓄水; 总磷

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)12-5069-10

Variation characteristics of total phosphorus in different periods in the Three Gorges Reservoir after its impoundment. ZHAI Wan-ying^{1*}, ZHAN Ruo-yun², ZHUO Hai-hua¹, CHEN Shui-song¹, WANG Chao³ (1. Yangtze Valley Water Environment Monitoring Center, Wuhan 430019, China; 2. Water Sources Company of South-to-North Water Diversion, Danjiangkou 442700, China; 3. Changjiang Water Resource Protection Institution, Wuhan 430051, China). *China Environmental Science*, 2019, 39(12): 5069~5078

Abstract: Based on the monthly water quality and hydrology data from 2003 to 2017, the variation characteristics of total phosphorus (TP) was investigated in the four periods which were divided by the different impoundment feature of the Three Gorges Reservoir after 2003. In the initial water impoundment process, the phosphorus retention effect of the Three Gorges Dam began at 2005. During the trial impoundment period, a marked decrease was observed in annual mean TP concentration along the main stream of the reservoir in 2008. Since then, the TP concentration in Qingxichang section was affected due to the inflow of Wu River with the high TP concentration. At the water level of 175m, there was a dramatic decrease in annual mean TP concentration from Tongguanyi sections to Guandukou section except Qingxichang section. After the operation of cascade hydropower stations upstream, a marked reduction of annual mean TP concentration happened along the main river channel sections except Guandukou section. A higher annual mean concentration of TP in Guandukou section than that in Tuokou section was observed for the first time in 2016. Meanwhile, the average concentration of TP in the flood season was no longer significantly higher than that in the dry season. In this period, no significant correlation was found between the concentration of TP and the water flow discharge in almost sections. In addition, no significant correlation was found between the concentration of TP and suspended volatile matters (SS) in Zhutuo, Tongguanyi and Guandukou section.

Key words: Three Gorges Reservoir; impoundment; total phosphorus

磷是水体中重要的营养元素, 是限制水体自养生物生长的主要因子^[1-3]. 磷元素从陆地向海洋输送的主要途径是河流, 约占 75%~94%^[4]. 因此河流磷通量的输送对维持海洋生态系统及流域自身水生系统尤为重要^[5-6].

河流筑坝形成水库会改变河流原始水体环境, 进一步造成水库水文情势发生变化, 并影响营养盐的迁移转化^[7-8]. 一方面, 河流筑坝会产生磷滞留效应. 大量的研究表明磷会由于蓄水滞留在水库中, 从而使输出到下游的磷含量受到影响^[9-10]. 水库对磷滞

留的主导机制为颗粒态磷的沉降, 而颗粒态磷是水体磷的主要形式^[11]. 由于筑坝形成水库引起河流水动力条件改变, 导致颗粒物沉降作用加速, 从而使颗粒态磷从河流中去除^[12]. 根据模型计算, 2000 年全球河流总磷负荷的 12% 被滞留在水库中^[13]. 另一方面, 筑坝蓄水淤积的大量沉积物内源性磷面临释放风

收稿日期: 2019-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402207); 国务院三峡工程建设委员会办公室三峡水库运行维护管理资金项目(JJ2015-008, JJ2015-047, JJ2016-012)

* 责任作者, 高级工程师, wyzhai@iccas.ac.cn

险^[14].已有研究报道九龙江北溪西坡电站库区的沉积物已经处于磷释放状态^[15].河流筑坝对磷迁移转化影响的本质是河流携带的磷在河流-水库体系中的重新分配^[5].因此,研究磷经大坝拦截产生的水库效应具有重要的科学和现实意义.

长江是世界第三大河流,三峡大坝是世界最大的水利工程.2003 年三峡大坝建成后,经过了 135, 139,156 和 175m 试验性蓄水后,于 2011 年进入高水位正常运用期.三峡水库成库后的特殊水文条件决定了对库区磷的研究不能完全等同于一般河流,也不能完全等同于一般水库.本文基于三峡水库 2003 年后的蓄水特点,将 2003~2017 年划分为 4 个蓄水阶段,根据三峡水库 2003~2017 年每月的水文水质数据,分析了自蓄水以来不同蓄水阶段总磷的变化特征,揭示了三峡的水库效应对磷的影响.

1 材料与方法

1.1 样点布设

本研究的空间范围为三峡水库干流段,从库尾至库首共选取朱沱(重庆市永川区)、铜罐驿(重庆主城区上游)、寸滩(重庆主城区)、清溪场(涪陵城区下游)、沱口(万州城区上游)、官渡口(巴东城区上游)6 个断面,以及嘉陵江的代表断面北碚和乌江的代表断面武隆,各监测断面的位置如图 1 所示.由于三峡水库从 2003 年首次蓄水,因此本研究的时间范围选取 2003 年 1 月~2017 年 12 月.同时,为更好地分析蓄水后水体总磷的时空变化,本文将 2002 年各断面总磷年均浓度作为蓄水后的对照值.根据断面的月流量数据,本文的丰水期指年度内的 7~10 月,枯水期指年度内的 1~4 月.

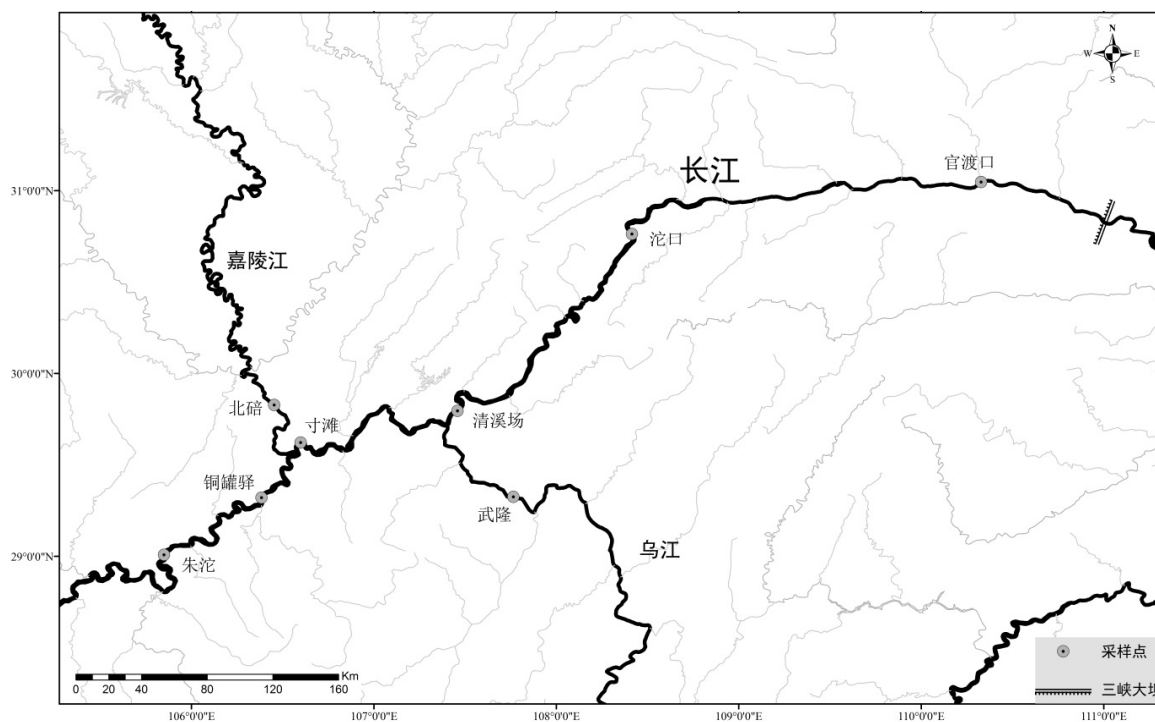


图 1 采样点位置示意

Fig.1 Location of the monitoring sites

1.2 数据来源

本研究所选取 8 个断面的监测数据来自长江水利委员会,各断面的监测频率为每月 1 次,监测值为断面各测点均值.总磷的测定采用钼酸铵分光光度法(GB11893-1989)^[16],且水样采集后,保持原水样进行总磷的预处理.溶解态磷则将原水样经 0.45 μ m 微孔滤膜过滤后进行测定.悬浮物的测定采用重量法

(GB11901-1989)^[17].采用 t 检验分析干流沿程总磷浓度差异是否显著, $P<0.05$ 为达到显著水平.采用皮尔逊相关系数分析总磷与流量和悬浮物的相关关系, $P<0.05$ 为显著相关, $P<0.01$ 为极显著相关.

2 结果与讨论

2.1 三峡水库蓄水特点

三峡水库位于长江上游,西起重庆市江津区,东至湖北省宜昌市,长达 660km,面积约 1084km².三峡水库于 2003 年 6 月首次蓄水至 135m,同年 11 月蓄水至 139m,2006 年 10 月蓄水至 156m,2008 年和 2009

年开展了 175m 试验性蓄水,2010 年 10 月成功蓄水至 175m,从此逐步进入高水位正常运用期.本文根据三峡水库 2003 年后的蓄水特点,将 2003~2017 年划分为 4 个蓄水阶段,如表 1 所示.

表 1 三峡水库蓄水不同阶段干流断面平均流速(m/s)和悬浮物(mg/L)的变化范围

Table 1 The range of average velocity(m/s) and SS(mg/L) in the main stream sections during the different impoundment period of the Three Gorges Reservoir

蓄水不同阶段	时间范围	参数	朱沱	寸滩	清溪场	沱口	官渡口
I 首次蓄水阶段	2003-01~	流速	0.63~2.66(1.52)	1.76~2.77(2.16)	0.37~2.91(1.27)	0.15~1.52(0.65)	0.11~0.8(0.39)
	2005-12	悬浮物	17~1139(307)	17~1208(330)	15~1600(335)	27~1505(245)	10~1148(141)
II 蓄水试运行阶段	2006-01~	流速	0.76~2.68(1.44)	0.17~2.88(1.78)	0.17~2.56(0.83)	0.09~1.78(0.40)	0.07~1.16(0.23)
	2010-12	悬浮物	16~1923(315)	29~2413(338)	12~1739(274)	2~1459(136)	9~1503(92)
III 高水位正常运用期	2011-01~	流速	0.86~2.53(1.40)	0.3~2.82(1.33)	0.16~2.27(0.63)	0.08~1.17(0.30)	0.06~0.67(0.22)
	2013-12	悬浮物	28~1079(155)	23~972(171)	21~893(151)	3~532(50)	13~181(46)
IV 上游梯级电站运行后	2014-01~	流速	0.9~2.61(1.48)	0.34~2.48(1.32)	0.16~1.55(0.56)	0.10~1.23(0.30)	0.09~0.65(0.23)
	2017-12	悬浮物	6~159(31)	7~209(35)	2~238(34)	1~122(17)	19~103(38)

注: 1.括号中为各断面流速和悬浮物的多年均值; 2.铜罐驿断面无流速数据,故没有进行统计比较.

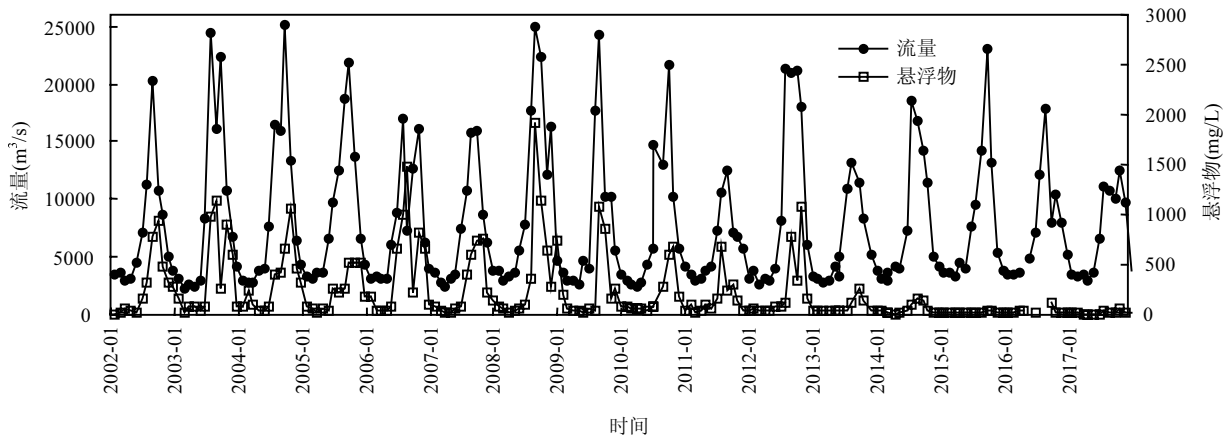


图 2 朱沱断面流量与悬浮物随时间变化情况

Fig.2 Temporal distribution of Water flow discharge and SS concentration in Zhutuo section

2.1.1 首次蓄水阶段 2003 年 1 月~2005 年 12 月为首次蓄水阶段,实现了 139m 蓄水,形成库容约为 140×10⁸m³ 的巨大水库,占未来三峡水库总库容的 36%.在此蓄水阶段,官渡口、沱口断面为水库区,清溪场为回水变动区,寸滩、铜罐驿和朱沱为上游区,不受蓄水的影响.从表 1 中各断面的平均流速可以看出,处于水库区的沱口和官渡口断面平均流速范围分别为 0.15~1.52m/s 和 0.11~0.8m/s,回水变动区的清溪场断面平均流速范围为 0.37~2.91m/s,上游区的寸滩断面平均流速范围为 1.76~2.77m/s,表明三峡水库成库后库区流速明显减缓.与成库后水文变化情况类似,库区内官渡口和沱口断面悬浮物浓度多年均值明显比上游区寸滩和朱沱断面小.流速和悬

浮物的变化表明成库后库区水体流速变缓,泥沙沉积加速,库区内悬浮物浓度随之减小.

2.1.2 蓄水试运行阶段 2006 年 1 月~2010 年 12 月为蓄水试运行阶段,经历了 156m 蓄水和 175m 试验性蓄水,成为水库水环境质量演替以及峡谷河道型水库生态系统重构的重要过渡性阶段^[18].此阶段除朱沱断面外其余断面均已成库.从表 1 可以看出,库区内除寸滩断面外,其余断面的平均流速和悬浮物浓度均较上游区明显减小,比首次蓄水阶段也有所降低.

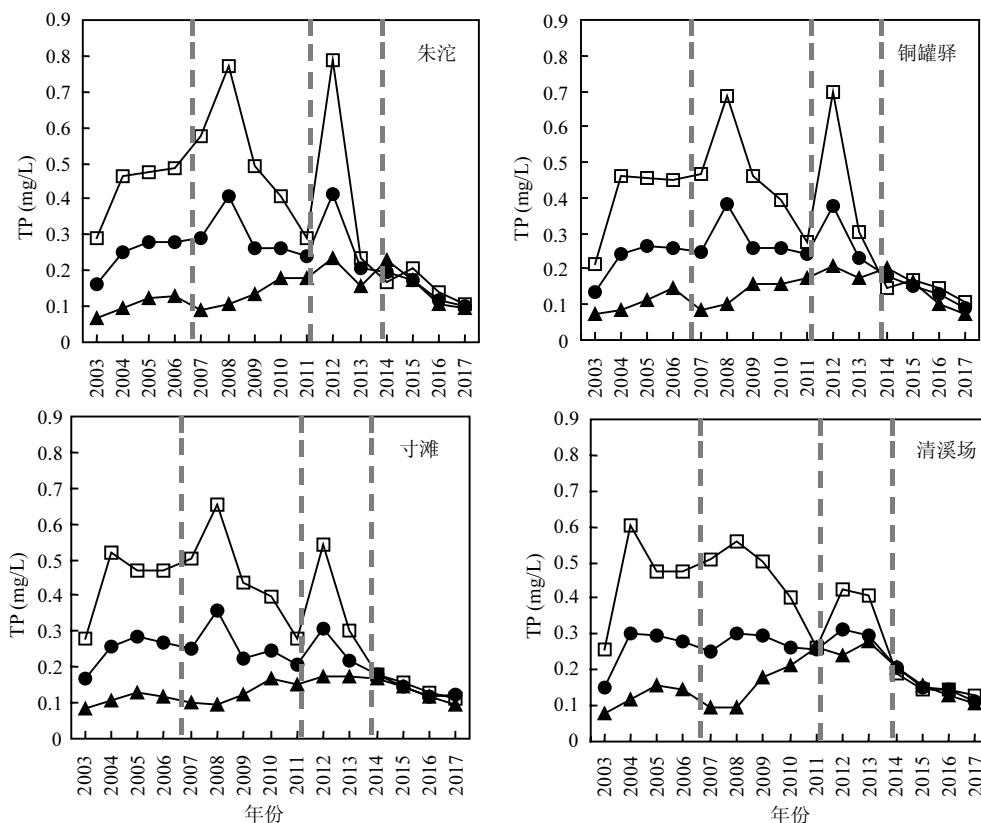
2.1.3 高水位正常运用期 2011 年 1 月~2013 年 12 月为高水位正常运用期.这一阶段采取“冬蓄夏泄”的调蓄方式:1 月上旬~6 月上旬,水库水位从 173.07m 逐渐下降至 151.94m; 6 月中旬~9 月上旬,

水库水位在 145~153.70m 波动;9 月中旬~10 月下旬,水库水位从 160.00m 上升到 173.93m;11 月上旬~12 月下旬,水库水位在 173.60~175.00m 之间波动^[19].从表 1 可以看出,在此阶段平均流速从朱沱至官渡口断面呈沿程逐渐变缓的趋势.除朱沱断面外,其余断面平均流速比上一阶段有所减缓.悬浮物浓度从朱沱至官渡口断面呈沿程变小的趋势,且入库断面朱沱的悬浮物浓度比上一阶段有所降低.

2.1.4 上游梯级电站建成后 2014 年 1 月~2017 年 12 月为上游梯级电站运行后阶段.金沙江下游分布有已建的向家坝、溪洛渡以及在建的白鹤滩、乌东德电站 4 大梯级电站.向家坝电站是金沙江干流梯级开发的最下一级,正常蓄水位 380m,总库容 51.63 亿 m^3 ,2012 年 10 月起开始蓄水发电^[20].溪洛渡电站位于向家坝电站上游,正常蓄水位 600m,总库容 126.7 亿 m^3 ,2013 年 5 月开始蓄水发电^[20].尽管此阶段三峡水库的调蓄方式与上一阶段相同,但由于上游向家坝和溪洛渡电站的蓄水发电,三峡库区的物质传输和迁移转化等都可能受到影响.从图 2 可以看出,2014 年后入库断面朱沱的流量并未大幅改变,但悬浮物浓度大量降低,该阶段的多年均值较上一阶段减小了约 80%.

2.2 蓄水不同阶段总磷的变化特征

从 2003 年首次蓄水起,三峡水库干流断面总磷质量浓度随时间变化情况如图 3 所示.朱沱、铜罐驿和寸滩断面呈现相似的变化趋势,总磷浓度年均值和丰水期均值在 2008,2012 年出现极大值,从 2013 年起,总磷浓度年均值和丰水期均值逐渐降低.与 2003 年相比,朱沱、铜罐驿和寸滩断面 2017 年总磷浓度年均值分别降低了 38%、34%和 27%,丰水期均值分别降低了 63%、50%和 60%.与丰水期不同,枯水期总磷年均浓度分别升高了 44%、5%和 9%.由于清溪场断面位于长江和乌江交汇口下游,其总磷浓度的变化趋势与上游寸滩断面并不相同.沱口和官渡口断面从 2003 年首次蓄水起就位于水库区,总磷浓度变化受到蓄水的一定影响.特别是离大坝最近的官渡口断面,2004~2015 年,总磷浓度较上游沱口断面明显降低($p < 0.01$).所有断面总磷浓度的季节性波动从 2014 年起基本消失,而 2014 年之前,丰水期均值明显高于枯水期,可能表明总磷的面源污染较点源污染突出.总磷的主要来源是颗粒的陆源输入,丰水期降雨强度较大,增强了颗粒磷的陆源输入,从而提高了水体中总磷的浓度^[21].不同蓄水阶段总磷的变化特征具体如下.



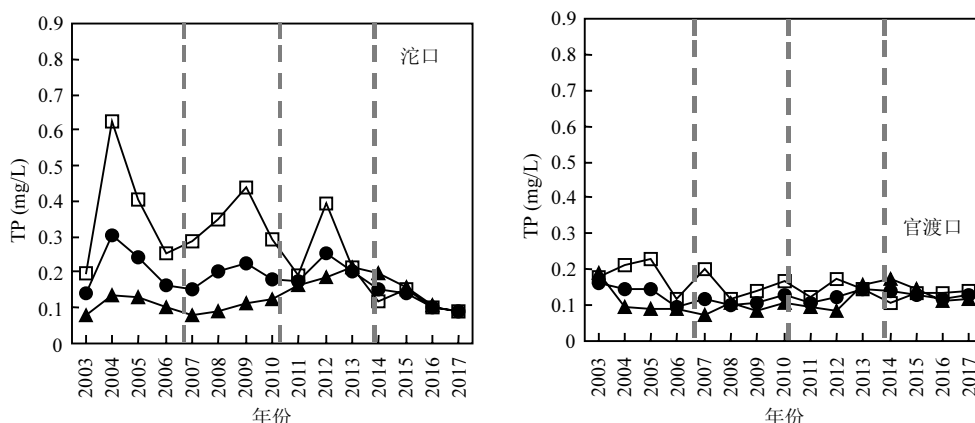


图3 三峡库区总磷年均值、丰水期均值和枯水期均值时间变化情况

Fig.3 Temporal distribution of TP in the Three Gorges Reservoir. The circular symbol indicates dates of annual average, the square symbol indicates dates of flood season average and the triangle symbol indicates dates of dry season average

—●— 年均值 —□— 丰水期 —▲— 枯水期

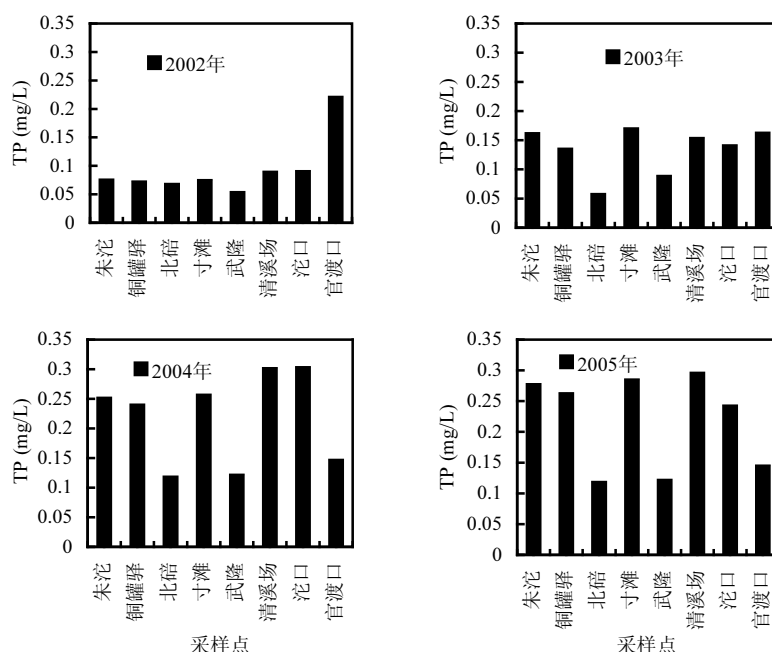


图4 蓄水前和首次蓄水阶段总磷年均浓度空间变化情况

Fig.4 Distribution and variation of the annual mean concentration of TP in the initial water impoundment process and before the impoundment

2.2.1 首次蓄水阶段(2003~2005 年) 2003 年 6 月三峡水库首次蓄水后,官渡口、沱口为水库区,清溪场为回水变动区,寸滩、铜罐驿和朱沱为上游区。上游区断面在此阶段不受蓄水的影响, 2003~2005 年寸滩、铜罐驿和朱沱总磷的变化趋势基本一致(图 3)。图 4 为蓄水前(2002 年)和首次蓄水阶段各断面总磷浓度的变化情况。从图 4 可以看出,蓄水前官渡口断面总磷浓度约是上游朱沱断面的 3 倍。与 2002 年相比,2003 年首次蓄水后,上游来水(朱沱断面)总磷年均浓度增加了 114%,嘉陵江(北碚断面)

总磷年均浓度减小了 15%,乌江(武隆断面)总磷年均浓度增加了 65%,位于库区的沱口断面总磷年均浓度增加了 56%,而官渡口断面总磷年均浓度则减少了 26%。2004 年上游来水总磷浓度继续增加,但位于库区的沱口断面和位于回水区的清溪场断面总磷浓度的增加量比上游寸滩断面更大,同时官渡口断面总磷年均浓度继续降低(比上年度降低了 10%)。2003 年三峡水库首次蓄水后,大量的农田被淹没,由于淹没土壤带来的磷污染负荷随之上升,可能导致位于库区的沱口断面总磷浓度随之增加^[7]。

官渡口断面离大坝最近,尽管 2003 年 6 月首次蓄水后,7 月总磷浓度增加了 98%,但年均浓度与蓄水前相比,呈持续降低现象.可能是由于首次蓄水后官渡口断面流速变缓,悬浮物浓度大幅降低所致.从图 4 中 2005 年的变化情况可以看出,位于回水区的清溪场断面和位于水库区的沱口和官渡口断面总磷浓度沿程明显降低($P<0.05$),表明水库的滞留效应在该年度开始凸显.

2.2.2 蓄水试运行阶段(2006~2010 年) 此阶段除朱沱断面外其余断面均已成库.从图 5 可以看出,2006~2007 年还未出现总磷浓度从铜罐驿至官渡口沿程降低的现象.直到 2008 年三峡水库开展 175m 试验性蓄水,干流断面总磷年均浓度从朱沱至官渡口沿程明显降低.到 2009 年和 2010 年,由于乌江总

磷浓度(武隆断面)大幅增加,导致位于乌江下游的清溪场断面总磷年均浓度比上游寸滩断面增高.而 2009 年之前,武隆断面总磷年均浓度均比干流寸滩断面低.

2.2.3 高水位正常运用期(2011~2013 年) 从图 6 可以看出,2011~2013 年,除清溪场断面外,干流总磷年均浓度从铜罐驿至官渡口断面呈现沿程降低的现象(北碚与武隆断面不参与比较).2011~2013 年武隆断面总磷年均浓度仍然大幅高于干流寸滩断面浓度,导致 2011,2013 年乌江下游清溪场断面总磷年均浓度显著高于上游寸滩断面.而 2012 年清溪场断面总磷年均浓度仅略高于寸滩断面,可能是由于该年入库断面朱沱的总磷年均浓度较 2011 年增加了 73%,从而使得乌江总磷通量的贡献率有所下降.

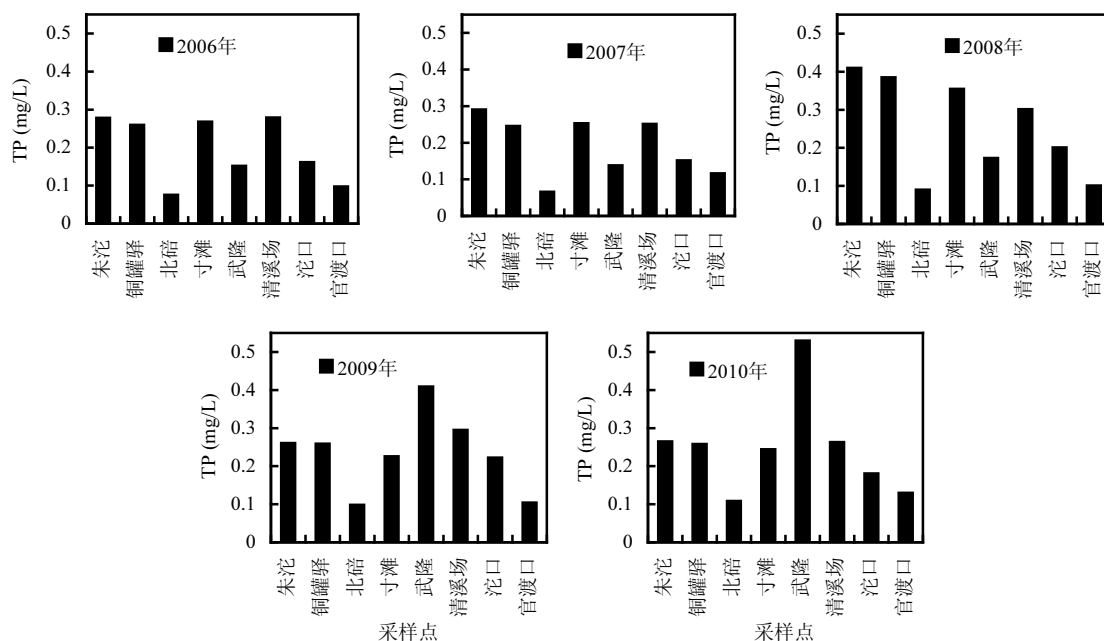


图 5 蓄水试运行阶段总磷年均浓度空间变化情况

Fig.5 Distribution and variation of the annual mean concentration of TP at the trial impoundment operation stage

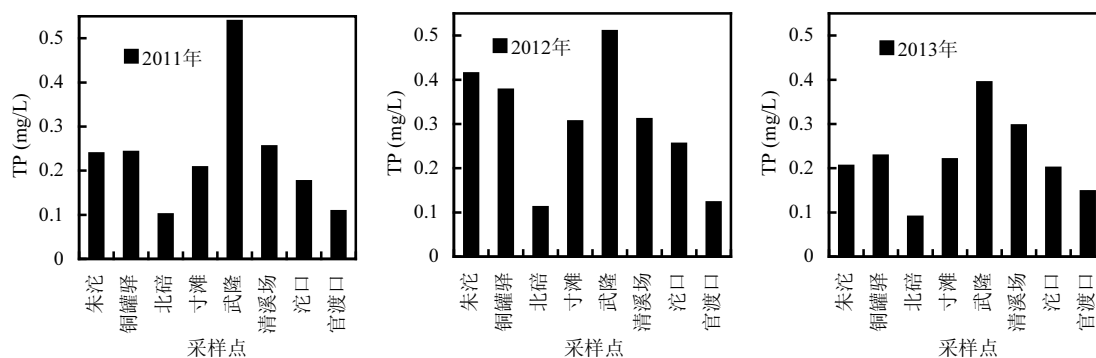


图 6 高水位正常运用期总磷年均浓度空间变化情况

Fig.6 Distribution and variation of the annual mean concentration of TP at the water level of 175m

2.2.4 上游梯级电站运行后(2014~2017 年) 2012 年 10 月三峡水库上游的向家坝电站蓄水发电,2013 年 5 月溪洛渡电站蓄水发电,受上游梯级电站蓄水发电的影响,朱沱断面自 2014 年后悬浮物浓度较上一阶段减小了约 80%.从图 3 各断面总磷浓度随时间变化情况可以看出,2014 年后除官渡口断面外,干流其余断面总磷年均浓度呈现随时间逐渐减小的趋势.与 2014 年年均浓度相比,朱沱至沱口断面 2017 年总磷年均浓度分别减小了 48%、50%、30%、46%

和 41%.同时,总磷浓度的季节性变化基本消失,各断面丰水期总磷年均浓度不再明显高于枯水期,可能表明此阶段总磷的面源污染不再是主要控制因素.从库区断面 2014~2017 年的空间变化可以看出(图 7),总磷年均浓度沿程逐渐降低的趋势逐渐消失.到 2016 年,首次出现蓄水后官渡口断面总磷年均浓度高于沱口断面的现象,2017 年该现象更加明显,这可能是因为从 2016 年起,在坝内沉淀的大量颗粒态磷的释放速率开始大于沉淀和吸附速率.

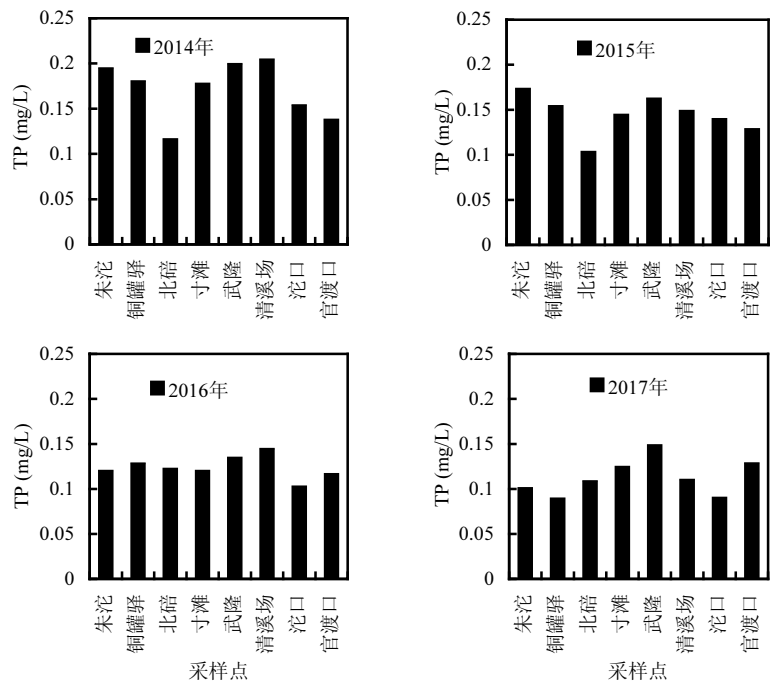


图 7 上游梯级电站运行后总磷年均浓度空间变化情况

Fig.7 Distribution and variation of the annual mean concentration of TP after the operation of cascade hydropower stations upstream

2.3 蓄水不同阶段总磷与流量和悬浮物的关系
由于河流中磷主要以颗粒态的形式传输,因此悬浮物和流量对磷的迁移转化非常重要^[22-23].本文

基于各断面每月的总磷、流量和悬浮物数据,对蓄水 4 个阶段的总磷与流量和悬浮物相关性进行了分析.

表 2 三峡水库蓄水不同阶段干流断面总磷与流量的相关性分析

Table 2 Correlations between the concentration of TP and the water flow discharge in the mainstream sections during the different impoundment period of the Three Gorges Reservoir						
蓄水不同阶段	朱沱	铜罐驿	寸滩	清溪场	沱口	官渡口
I	$y=0.0198x+0.055$ ($r^2=0.669, P<0.01$)	$y=0.0183x+0.054$ ($r^2=0.583, P<0.01$)	$y=0.0126x+0.078$ ($r^2=0.666, P<0.01$)	$y=0.0135x+0.062$ ($r^2=0.529, P<0.01$)	$y=0.0119x+0.062$ ($r^2=0.460, P<0.01$)	$y=0.0041x+0.092$ ($r^2=0.495, P<0.01$)
II	$y=0.0325x+0.040$ ($r^2=0.781, P<0.01$)	$y=0.0295x+0.044$ ($r^2=0.824, P<0.01$)	$y=0.0191x+0.065$ ($r^2=0.741, P<0.01$)	$y=0.0182x+0.059$ ($r^2=0.744, P<0.01$)	$y=0.0139x+0.016$ ($r^2=0.631, P<0.01$)	$y=0.0044x+0.058$ ($r^2=0.494, P<0.01$)
III	$y=0.0326x+0.051$ ($r^2=0.577, P<0.01$)	$y=0.0289x+0.076$ ($r^2=0.590, P<0.01$)	$y=0.0141x+0.099$ ($r^2=0.786, P<0.01$)	$y=0.0088x+0.184$ ($r^2=0.371, P<0.01$)	$y=0.0093x+0.102$ ($r^2=0.657, P<0.01$)	$y=0.003x+0.092$ ($r^2=0.331, P<0.01$)
IV	$y=0.0028x+0.126$ ($r^2=0.062, P>0.05$)	$y=0.001x+0.129$ ($r^2=0.011, P>0.05$)	$y=0.0025x+0.114$ ($r^2=0.107, P<0.05$)	$y=0.0028x+0.121$ ($r^2=0.075, P>0.05$)	$y=8 \times 10^{-6}x+0.121$ ($r^2=1 \times 10^{-6}, P>0.05$)	$y=0.0002x+0.125$ ($r^2=0.003, P>0.05$)

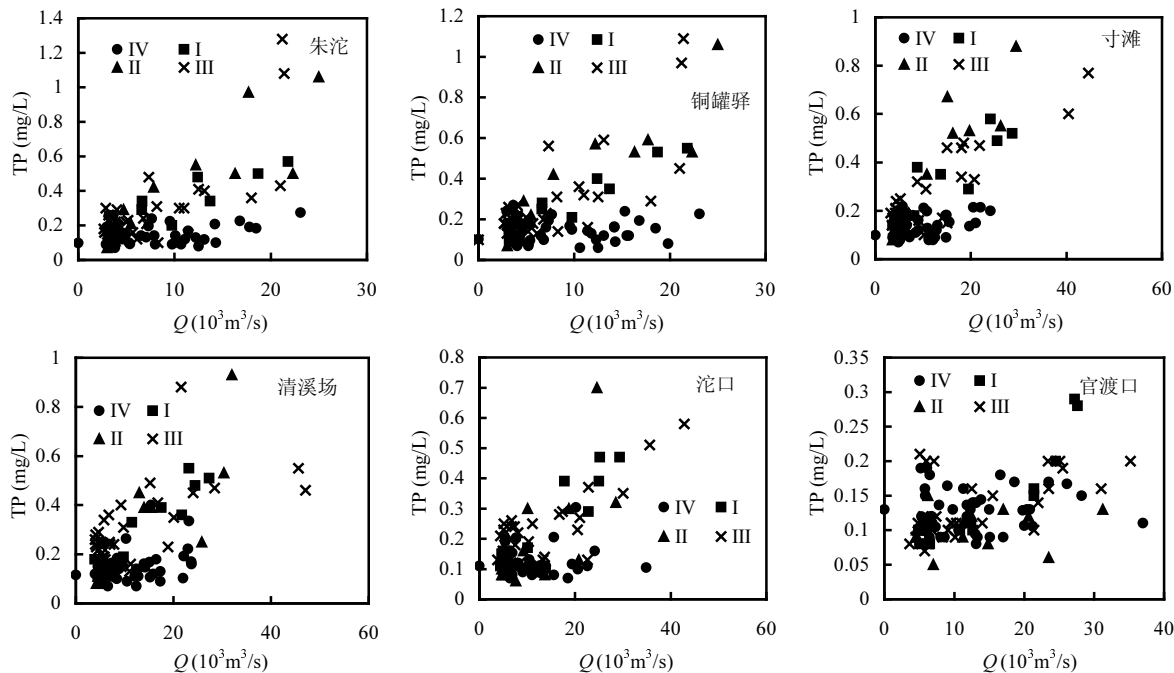


图 8 三峡库区各断面不同蓄水阶段总磷与流量的相关性

Fig.8 Correlations between the concentration of TP and the water flow discharge in the mainstream sections during the different impoundment period of the Three Gorges Reservoir

表 3 三峡水库蓄水不同阶段干流断面总磷与悬浮物的相关性分析

Table 3 Correlations between the concentration of TP and SS in the main stream sections during the different impoundment period of the Three Gorges Reservoir

蓄水不同阶段	朱沱	铜罐驿	寸滩	清溪场	沱口	官渡口
I	$y=0.0003x+0.128$ ($r^2=0.379, p<0.01$)	$y=0.0003x+0.112$ ($r^2=0.406, p<0.01$)	$y=0.0004x+0.094$ ($r^2=0.689, p<0.01$)	$y=0.0004x+0.103$ ($r^2=0.636, p<0.01$)	$y=0.0004x+0.128$ ($r^2=0.421, p<0.01$)	$y=8\times10^{-5}x+0.115$ ($r^2=0.153, p<0.01$)
II	$y=0.0005x+0.149$ ($r^2=0.747, p<0.01$)	$y=0.0004x+0.143$ ($r^2=0.743, p<0.01$)	$y=0.0004x+0.146$ ($r^2=0.800, p<0.01$)	$y=0.0004x+0.164$ ($r^2=0.743, p<0.01$)	$y=0.0005x+0.111$ ($r^2=0.772, p<0.01$)	$y=0.0002x+0.087$ ($r^2=0.729, p<0.01$)
III	$y=0.001x+0.135$ ($r^2=0.879, p<0.01$)	$y=0.0008x+0.154$ ($r^2=0.879, p<0.01$)	$y=0.0006x+0.147$ ($r^2=0.771, p<0.01$)	$y=0.0005x+0.218$ ($r^2=0.402, p<0.01$)	$y=0.0009x+0.167$ ($r^2=0.720, p<0.01$)	$y=0.0006x+0.096$ ($r^2=0.308, p<0.01$)
IV	$y=0.0005x+0.134$ ($r^2=0.084, p>0.05$)	$y=0.0004x+0.123$ ($r^2=0.059, p>0.05$)	$y=0.0006x+0.116$ ($r^2=0.267, p<0.01$)	$y=0.001x+0.116$ ($r^2=0.52, p<0.01$)	$y=0.0005x+0.113$ ($r^2=0.107, p<0.05$)	$y=0.0002x+0.119$ ($r^2=0.019, p>0.05$)

总磷与流量的相关性分析见表 2 和图 8,可以看出 I,II,III 阶段干流各断面的总磷浓度与流量极显著相关($P<0.01$),而上游梯级电站运行后仅寸滩断面的总磷浓度与流量显著相关($P<0.05$),其余断面的总磷浓度与流量相关性不显著。

总磷与悬浮物的相关性分析见表 3 和图 9,可以看出 I,II,III 阶段干流各断面的总磷浓度与悬浮物浓度极显著相关($P<0.01$),而上游梯级电站运行后仅寸滩和清溪场断面的总磷浓度与悬浮物浓度极显著相关($P<0.01$),沱口断面总磷浓度与悬浮物浓度显著相关($P<0.05$),其余断面的总磷浓度与悬浮物相关性不显著。

上游梯级电站运行后三峡水库干流的总磷与

流量和悬浮物的相关性变化可能与水体中磷的组成变化有关.从图 10 可以看出,2014 年上游梯级电站运行后,朱沱断面悬浮物年均浓度大幅降低,与上一阶段(2011~2013 年)的多年均值相比,2014~2017 年悬浮物的多年均值降低了约 80%.悬浮物浓度降低的同时,朱沱断面溶解态磷比例大幅提高.2014~2017 年溶解态磷占总磷比例的范围为 57%~70%,在此阶段溶解态磷成为水体磷的主要组成部分.2014 年上游梯级电站运行后,上游来水悬浮物浓度大大减少,水体中磷的主要成分由颗粒态磷向溶解态磷转变,可能导致库区大部分断面总磷与流量和悬浮物相关性不显著.而寸滩和清溪场断面分别位于库区两大支流嘉陵江和乌江

下游,其总磷浓度除受上游来水影响外,还受到入库支流水质的影响。从表3总磷与悬浮物的相关性分析可以看出,2014 年上游梯级电站运行后,寸滩

($P<0.01$)、清溪场($P<0.01$)和沱口($P<0.05$)断面随着离入库支流汇入点距离的增加,总磷与悬浮物的相关性减弱。

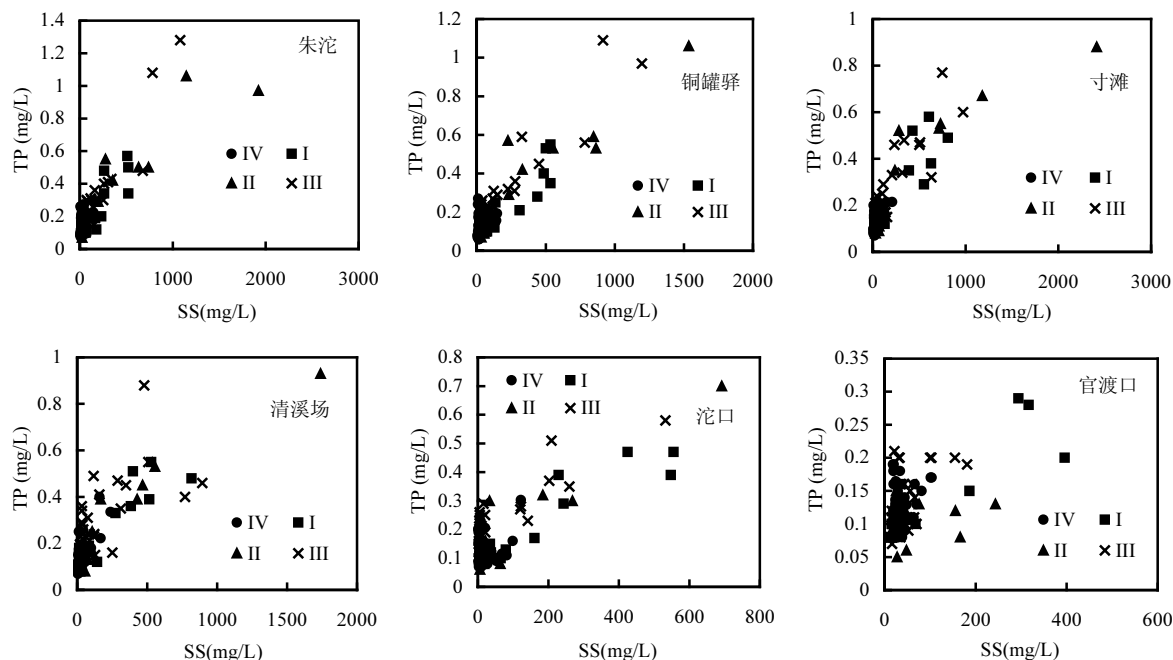


图9 三峡库区各断面不同蓄水阶段总磷与悬浮物的相关性

Fig.9 Correlations between the concentration of TP and SS in the mainstream sections during the different impoundment period of the Three Gorges Reservoir

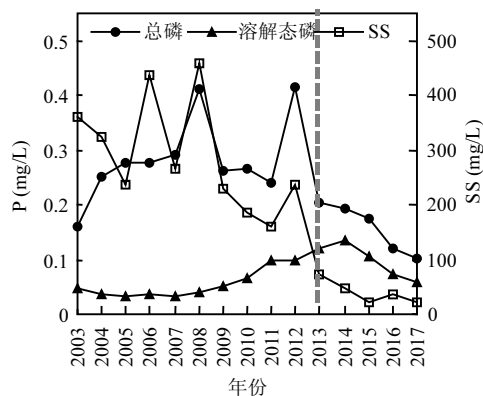


图10 朱沱断面总磷、溶解态磷和悬浮物年均浓度变化情况

Fig.10 Temporal distribution of the annual mean concentration of TP,dissolved phosphorus and SS in Zhutuo section

3 结论

3.1 首次蓄水阶段,位于库区的沱口断面2004年总磷浓度出现较大的增量,三峡水库的滞留效应从2005年开始凸显。

3.2 蓄水试运行阶段,干流断面总磷年均浓度在

2008 年沿程明显降低,而 2009 年和 2010 年,由于乌江总磷浓度大幅增加,导致位于乌江下游的清溪场断面总磷年均浓度高于上游寸滩断面。

3.3 高水位正常运用期,除清溪场断面外,从铜罐驿至官渡口断面,总磷年均浓度呈现沿程降低的现象。

3.4 上游梯级电站运行后,除官渡口断面外,干流其余断面总磷年均浓度呈现随时间逐渐减小的趋势。官渡口断面于 2016 年首次出现总磷年均浓度高于沱口断面的现象,2017 年该现象更加明显。此阶段干流的总磷浓度与流量和悬浮物的相关性改变,总磷浓度的季节性波动基本消失。

参考文献:

- [1] 赵晨英,臧家业,刘 军,等.黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应 [J]. 中国环境科学, 2016,36(7):2115-2127.
Zhao C Y, Zang J Y, Liu J, et al. Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. China Environmental Science, 2016, 36(7):2115-2127.
- [2] 肖春艳,武 俐,赵同谦,等.南水北调中线源头区蓄水前土壤氮磷分布特征 [J]. 中国环境科学, 2013,33(10):1814-1820.

- Xiao C Y, Wu L, Zhao T Q, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorous in soils from the middle line source area of the South-to-North Water Division Project [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(10):1814-1820.
- [3] 苏青青,刘德富,刘绿波,等.三峡水库蓄水期支流水体营养盐来源估算 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(10):3925-3932.
- Su Q Q, Liu D F, Liu L B, et al. Analysis of the nutrient supply of tributaries in the Three Gorges Reservoir during impounding period [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(10):3925-3932.
- [4] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems [J]. *Earth Science Review*, 2000,51:109-135.
- [5] 周 涛,程天雨,虞宁晓,等.乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应 [J]. *生态学杂志*, 2018,37(3):707-713.
- Zhou T, Cheng T Y, Yu N X, et al. Nitrogen and phosphorus retention in cascade reservoirs along the upper reaches of Wujiang River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018,37(3):707-713.
- [6] 周建军,张 曼,李 哲.长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策 [J]. *湖泊科学*, 2018,30(4):865-880.
- Zhou J J, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4):865-880.
- [7] 刘宁宁.近 50 年长江流域建坝与营养盐物质输送研究进展 [J]. *环境化学*, 2017,36(7):1579-1587.
- Liu N N. Review on the nutrients transport in Yangtze River with responses to the damming in the drainage basin in the past 50years [J]. *Environmental Chemistry*, 2017,36(7):1579-1587.
- [8] 曾红平,高 磊,陈建耀,等.渝江长湖水库沉积物营养元素沉积历史重构及源解析 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(10):3910-3918.
- Zeng H P, Gao L, Chen J Y, et al. Historical reconstruction and source identification of sediment nutrient elements in the Changhu Reservoir, Wengjiang River. *China Environmental Science*, 2017,37(10):3910-3918.
- [9] 王耀耀,吕林鹏,纪道斌,等.向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 [J]. *环境科学*, 2019,40(8):1-15.
- Wang Y Y, Lv L P, Ji D B, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and retention effects of nutrient in Xiangjiaba Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019,40(8):1-15.
- [10] 柴 超,俞志明,宋秀贤,等.三峡工程蓄水前后长江口水域营养盐结构及限制特征 [J]. *环境科学*, 2007,28(1):64-69.
- Chai C, Yu Z M, Song X X, et al. Characteristics of nutrient structures and limitation in the Yangtze River estuary before and after water storage of the Three Gorges Project [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1):64-69.
- [11] 姜保锋,印士勇,穆宏强,等.三峡水库蓄水前后干流总磷浓度比较 [J]. *湖泊科学*, 2011,23(6):863-867.
- Lou B F, Yin S Y, Mu H Q, et al. Comparison of total phosphorus concentration of Yangtze River within the Three Gorges Reservoir before and after impoundment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(6):863-867.
- [12] 冉祥滨,于志刚,姚庆祯,等.水库对河流营养盐滞留效应研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2009,21(5):614-622.
- Ran X B, Yu Z G, Yao Q Z, et al. Advances in nutrient retention of dams on river [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009,21(5):614-622.
- [13] Maavara T, arsons C T, idenour C, t al. Global phosphorus retention by damming [J]. *PNAS*, 2015,112(51):15603-15608.
- [14] 鲍林林,李叙勇,苏静君.筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征 [J]. *生态学报*, 2017,37(14):4663-4670.
- Bao L L, Li X Y, Su J J. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of entrophication in dam regulated rivers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(14):4663-4670.
- [15] 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,等.河流库区沉积物——水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 [J]. *环境科学*, 2014,35(9):3325-3335.
- Chen Z H, Chen L W, Wu Y Q, et al. Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2014,35(9):3325-3335.
- [16] GB11893-1989 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法 [S].
- GB11893-1989 Water quality-Determination of total phosphorus-Ammonium molybdate spectrophotometric method [S].
- [17] GB11901-1989 水质悬浮物的测定重量法 [S].
- GB11901-1989 Water quality-Determination of suspended substance-Gravimetric method [S].
- [18] 郭 胜,李崇明,郭劲松,等.三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征 [J]. *环境科学*, 2011,5(32):1265-1272.
- Guo S, Li C M, Guo J S, et al. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment [J]. *Environmental Science*, 2011,5(32):1265-1272.
- [19] 程 瑶.干一支流相互作用下三峡水库典型支流物质输运及水华生消过程研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2018.
- Chen Y. Research on the algae bloom and mass transport of typical tributary in the Three Gorges Reservoir under the interaction of mainstream and tributary [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018.
- [20] 刘尚武,张小峰,吕平毓,等.金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应 [J]. *湖泊科学*, 2019,31(3):656-666.
- Liu S W, Zhang X F, Lv P U, et al. Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019,31(3):656-666.
- [21] 雷 沛,张 洪,单保庆.丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 [J]. *环境科学*, 2012,33(9):3038-3045.
- Lei P, Zhang H, Shan B Q. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012,33(9):3038-3045.
- [22] Zhou J, Zhang M, Lin B, et al. Lowland fluvial phosphorus altered by dams [J]. *Water Resource Research*, 2015,51:2211-2226.
- [23] Zhou J, Zhang M, Lu P. The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtzeriver [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49:3659-3669.

作者简介: 翟婉盈(1985-),女,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要从事水环境分析化学研究.发表论文 4 篇。