J. Lake Sci.(湖泊科学), 2016, **28**(4): 734-742
DOI 10.18307/2016.0406
© 2016 by *Journal of Lake Sciences*

三峡工程运行前后洞庭湖水质变化分析*

张光贵,王丑明,田　琪
(湖南省洞庭湖生态环境监测中心,岳阳 414000)

摘　要: 为了解三峡工程运行前后洞庭湖水质变化,基于1996－2013年洞庭湖水质监测数据,采用内梅罗污染指数(I_P)法对三峡工程运行前后洞庭湖水质进行评价,并对洞庭湖水质与主要污染物的时空变化特征进行分析. 结果表明, 1996－2013年洞庭湖I_P值在1.10~2.20之间,平均值为1.63,水质属轻污染~污染,总体变化平稳,但从2010年起,洞庭湖I_P值连续低于其多年平均值,总体水质趋好;主要污染物为总磷和总氮,总磷浓度变化平稳,总氮浓度则呈显著上升趋势. 与三峡工程运行前相比,三峡工程运行后洞庭湖全年和汛期总氮浓度以及南洞庭湖I_P值和总氮浓度显著升高,南洞庭湖水质显著恶化. 洞庭湖I_P值和总磷浓度的水期分布格局均由三峡工程运行前的汛期>非汛期变化为三峡工程运行后的非汛期>汛期,其空间分布格局均由三峡工程运行前的西洞庭湖>东洞庭湖>南洞庭湖变化为三峡工程运行后的西洞庭湖>南洞庭湖>东洞庭湖;从2010年起,洞庭湖I_P值的空间分布格局发生新的变化,其大小顺序变化为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖. 三峡工程运行前后洞庭湖I_P值与总磷浓度的时空变化与其水沙条件变化有关,总氮浓度受三峡工程运行影响较小,主要受湘江、资水、沅江和澧水"四水"流域氮污染的影响.
关键词: 三峡工程;水质;内梅罗污染指数;时空变化;洞庭湖

Changes of water quality in Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation

ZHANG Guanggui, WANG Chouming & TIAN Qi
(*Lake Dongting Eco-Environmental Monitoring Center of Hunan Province*, *Yueyang* 414000, *P.R.China*)

Abstract: To understand the changes of water quality in Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation, the water quality in Lake Dongting was evaluated based on the water quality monitoring data of Lake Dongting from 1996 to 2013 by using Nemerow pollution index method, and the spatial and temporal variation characteristics of water quality and main pollutants in Lake Dongting were analyzed. The results showed that the I_P values of Lake Dongting ranged from 1.10 to 2.20, with an average of 1.63 from 1996 to 2013, the water pollution level was between light pollution and pollution, the water quality did not change significantly generally, but since 2010, the I_P values of Lake Dongting had been continuously under the average for many years, and water quality became better. Total phosphorus and total nitrogen were the major pollutants in the lake, the concentration of total phosphorus did not change significantly, but the concentration of total nitrogen showed a significant upward trend. Comparing with the period before Three Gorges Project operation, the concentration of total nitrogen in Lake Dongting and the I_P values and the concentration of total nitrogen in southern Lake Dongting increased significantly after Three Gorges Project operation, the water quality in southern Lake Dongting deteriorated significantly. The order of I_P values and the concentration of total phosphorus in different water phases changed from flood season>non-flood season to non-flood season>flood season, and in spatial distribution changed from western Lake Dongting>eastern Lake Dongting>southern Lake Dongting to western Lake Dongting>southern Lake Dongting>eastern Lake Dongting, respectively before and after the Three Gorges Project operation. Since 2010, the ranking order of I_P values had changed in spatial as eastern Lake Dongting>southern Lake Dongting>western Lake Dongting. The spatial and temporal changes of I_P value and the concentration of total phosphorus associated with changes of flow and sediment conditions in Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation, the concentration of total nitrogen was less affected by the Three Gorges Project operation, mainly by nitrogen pollution of Xiangjiang River, Zishui River and so on in the four river basin.

* 2015－05－25收稿;2015－12－09收修改稿. 张光贵(1964~),男,学士,高级工程师;E-mail:zhangguanggui64@163.com.

地质测绘院　社会　0004.湖泊科学 2016-4　5 校样　张芸　　成品尺寸 185×260(mm)　45 字 44 行　2016/06/06

Keywords: Three Gorges Project; water quality; Nemerow pollution index; spatial and temporal variation; Lake Dongting

三峡工程是世界上的重大水利工程,2003 年 6 月开始蓄水运行,2010 年 10 月成功蓄水到 175 m,在防洪、发电、航运等方面发挥了非常重要的作用. 作为长江出三峡进入中下游平原后的第一个通江湖泊,洞庭湖具有调蓄长江洪水、提供饮用水和生物多样性保护等重要生态功能,在维护区域生态平衡中具有重要作用,三峡工程对长江中下游湖泊生态环境的影响,洞庭湖首当其冲. 因此,三峡工程建设对洞庭湖生态环境的影响成为当前洞庭湖研究的重点和学术界关注的热点问题[1-5]. 目前相关的研究主要集中在三峡工程对洞庭湖湿地植被、鱼类、干旱、景观格局、生态系统服务功能、东方田鼠、血吸虫病流行等方面[6-13],然而,针对三峡工程运行前后洞庭湖水污染变化的研究尚不多见,目前只有李忠武等[4]开展了初步研究. 鉴于三峡工程运行所带来的各种生态环境效应逐渐凸显,全面、深入地开展三峡工程运行前后洞庭湖水质变化研究具有十分重要的意义.

水质评价是环境质量评价的主要内容,其为水资源合理开发利用和水体污染综合防治提供了科学依据. 目前常用的方法包括单因子评价法、灰色系统理论法、人工神经网络法、模糊数学法、主成分分析法、综合水质标识指数法和内梅罗污染指数法等[4,14],其中内梅罗污染指数法既突出了污染最为严重的污染因子,同时也一定程度上兼顾了其它水质较好的参评因子对总体结果的贡献,尤其避免了在计算过程中各因子权重人为赋值的主观影响,在水质评价中得到了广泛应用[14-18]. 本研究基于 1996－2013 年水质监测数据,采用内梅罗污染指数法对三峡工程运行前后洞庭湖水质进行评价,并对洞庭湖主要污染物与水质的时空变化特征进行分析,以期为深入认识三峡工程建设对洞庭湖生态环境的影响、防控洞庭湖水质污染提供参考和依据.

1 材料与方法

1.1 洞庭湖概况

洞庭湖(28°44′~29°35′N,111°53′~113°05′E)位于湖南省北部、长江中游荆江南岸,北接长江松滋、太平、藕池“三口”,南纳湘、资、沅、澧“四水”,经城陵矶汇入长江,湖体呈近似“U”字形,总流域面积 25.72×10^4 km^2,集水面积 104×10^4 km^2,水位 33.50 m 时(岳阳站,黄海基面),湖长 143.00 km,最大湖宽 30.00 km,平均湖宽 17.01 km,湖泊面积 2625 km^2,最大水深 23.5 m,平均水深 6.39 m,相应蓄水量 167×10^8 m^3,是我国第二大淡水湖. 受泥沙淤积、筑堤建垸等自然和人类活动的影响,洞庭湖现已明显地分化为西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖 3 个不同的水域. 洞庭湖为一典型的过水性洪道型湖泊[19],兼具河流与湖泊双重属性,其水流方向大致为西洞庭湖→南洞庭湖→东洞庭湖→长江[20]. 一般地,4－9 月为汛期,10 月－翌年 3 月为非汛期.

1.2 数据来源

本研究中的水质数据来源于湖南省洞庭湖生态环境监测中心. 除个别断面稍有变动外,洞庭湖水质监测断面基本固定,全湖共设 11 个监测断面,其中西洞庭湖区 3 个,分别是南嘴(S1)、蒋家嘴(S2)和小河嘴(S3);南洞庭湖区 3 个,分别是万子湖(S4)、横岭湖(S5)和虞公庙(S6);东洞庭湖区 5 个,分别是鹿角(S7)、君山(S8)、扁山(S9)、岳阳楼(S10)和洞庭湖出口(S11). 洞庭湖水质监测断面分布见图 1.

1.3 水质评价方法

1.3.1 内梅罗污染指数 内梅罗污染指数由美国叙拉古大学内梅罗(Nemerow NL)教授于 1974 年提出[21],其计算公式为:

$$I_P = \sqrt{\frac{(I^i_{\max})^2 + (\bar{I})^2}{2}} \tag{1}$$

其中,

$$\bar{I} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_i \ , \ I_i = \frac{C_i}{C_{oi}} \tag{2}$$

式中, I_P为内梅罗污染指数; $I^i_{\max}$ 为所有污染评价因子中污染指数最大值; $\bar{I}$ 为所有评价因子污染指数平均

值;I_i为第 i 项评价因子的污染指数;C_i为第 i 项评价因子的实测值;C_{oi}为第 i 项评价因子的水质标准值.

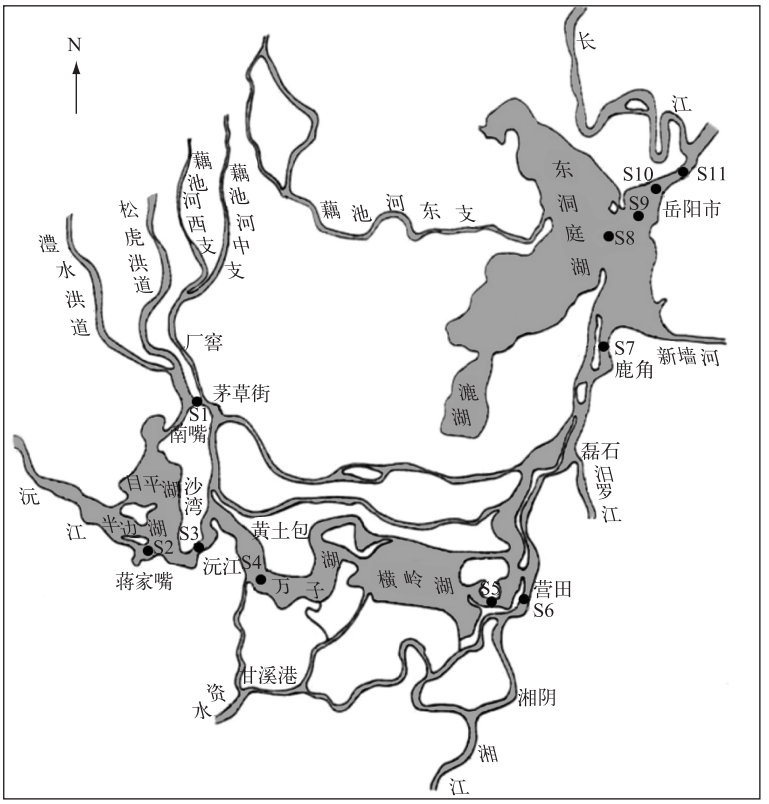


图 1 洞庭湖水质监测断面

Fig.1 Sampling sections of water quality monitoring in Lake Dongting

1.3.2 评价因子与水质标准的选择 已有研究结果表明,洞庭湖水质呈现以氮、磷污染为主兼有机污染的特征[22]. 根据洞庭湖水质污染特征并兼顾评价结果的可比性(监测断面基本固定,取样方法一致即均取标准澄清样,评价因子相同),本研究选择高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)、总氮(TN)和总磷(TP)5 个监测指标作为评价因子.

根据洞庭湖水域环境功能与保护目标[23],选择《地表水环境质量标准》(GB 3838－2002)的Ⅲ类标准作为水质标准,COD_{Mn}、BOD_5、NH_3-N、TN 和 TP 的水质标准浓度分别为 6、4、1.0、1.0 和 0.05 mg/L.

1.3.3 污染分担率 为找出主要污染物,引入污染分担率 k_i,计算公式为:

$$k_i = I_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} I_i \times 100\% \tag{3}$$

将 k_i按从大到小的顺序累加,确定$\sum k_i$>70%的前几项污染物为主要污染物.

1.3.4 水质污染分级 一般来说,如果 $I_P \leqslant 1$,说明水质较好,水体较清洁;如果 $I_P > 1$,则水质较差,水体受到污染. 内梅罗污染指数的水质污染分级具体为:$I_P \leqslant 1$,清洁;$1 < I_P \leqslant 2$,轻污染;$2 < I_P \leqslant 3$,污染;$3 < I_P \leqslant 5$,重污染;$I_P > 5$,严重污染[15].

1.4 数据分析与统计

数据经检查、剔除特异值等预处理后,采用 Microsoft Office Excel 2003 和 IBM SPSS 19.0 软件对数据进行统计处理和分析. 水质污染趋势分析采用 Daniel 的趋势检验,相关性用 Pearson 相关系数表示,均值差异性比较采用两独立样本的 t 检验.

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

2 结果与分析

2.1 水质评价结果

1996－2013 年洞庭湖水质评价结果可知,洞庭湖 I_P值在 1.10~2.20 之间,平均值为 1.63,对照水质污染分级标准,水质属轻污染~污染,总体变化平稳,但从 2010 年起,洞庭湖 I_P值连续低于其平均值,总体水质趋好(图 2).

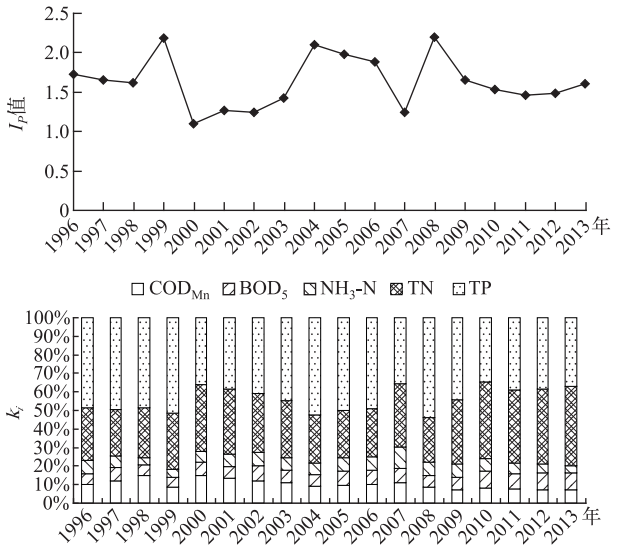


图 2 1996－2013 年洞庭湖 I_P值和 k_i的年际变化

Fig.2 Annual variations of I_P value and k_i evaluation factors in Lake Dongting during 1996－2013

1996－2013 年洞庭湖 COD_{Mn}的污染分担率在 7.05%~15.12%之间,平均值为 10.13%;BOD_5的污染分担率在 5.34%~9.38%之间,平均值为 7.35%;NH_3-N 的污染分担率在 3.74%~11.40%之间,平均值为 6.47%;TN 的污染分担率在 23.80%~42.83%之间,平均值为 32.08%;TP 的污染分担率在 34.60%~53.87%之间,平均值为 43.98%,评价因子污染分担率的大小顺序为 TP>TN>COD_{Mn}>BOD_5>NH_3-N,主要污染物为 TP 和 TN(图 2). 2010 年前,洞庭湖的首要污染物为 TP,从 2010 年起,洞庭湖首要污染物为 TN.

1996－2013 年洞庭湖 TP 和 TN 浓度的年际变化(图 3)表明,TP 浓度总体变化平稳,与李有志等[19]得出的 TP 浓度呈显著上升趋势的结论不一致. 与 I_P值相似,从 2010 年起,洞庭湖 TP 浓度的年均值连续低于多年平均值,TN 浓度则呈显著上升趋势. 趋势检验结果表明,TN 浓度的秩相关系数 r_s为 0.661,大于其临界值 W_P(0.564),表明 TN 浓度在 0.01 水平(双侧)上升趋势有显著意义.

洞庭湖水质污染的年际变化主要受 TP 浓度的影响,洞庭湖 I_P值和 TP 浓度具有相同的时间分布,二者的 Pearson 相关系数高达 0.977,呈极显著正相关(P<0.01). 从 2010 年起,洞庭湖总体水质趋好与 TP 浓度的连续走低有较好的一致性. 有研究结果表明,入湖泥沙是洞庭湖水体 TP 的重要来源[24],而洞庭湖泥沙主要来源于长江“三口”[25],三峡工程运行后,长江“三口”来沙大幅下降,其占洞庭湖总入湖沙量的比例由 1996－2002 年的 81.5%下降为 2003－2012 年的 57.2%,相应地,洞庭湖泥沙沉积率由 73.7%下降为 11.5%(表 1),2009 年后,洞庭湖出湖沙量大于入湖水量,总体呈冲刷状态[26],导致洞庭湖水体 TP 浓度下降. 2003－2008 年尽管长江“三口”来沙减少,但入湖沙量仍大于出湖沙量,洞庭湖总体仍沿袭以前的淤积态势,湖水 TP 浓度较高. 1999、2004 和 2008 年洞庭湖 I_P值较高,水质呈污染,主要是由于 TP 浓度较高所致.

2.2 三峡工程运行前后洞庭湖水质的水期变化

与三峡工程运行前相比,三峡工程运行后洞庭湖 I_P值、TP 和 TN 浓度均有不同程度的升高,其中 TN 浓

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

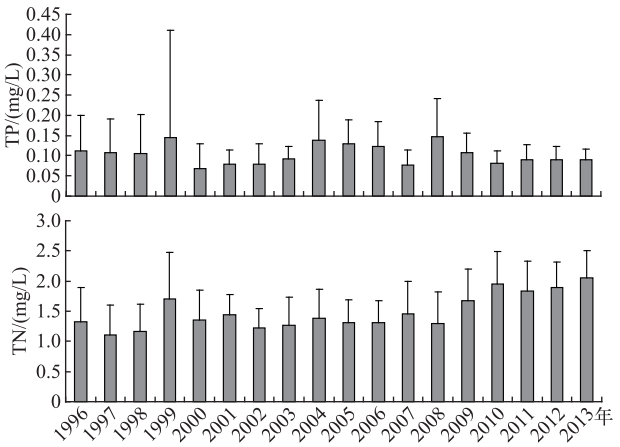


图 3 1996－2013 年洞庭湖 TP、TN 浓度的年际变化

Fig.3 Annual variations of TP, TN concentrations in Lake Dongting during 1996－2013

表 1 三峡工程运行前后洞庭湖区来水来沙情况统计[25,27]

Tab.1 Annal incoming flow and sediment of Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation

年份	入湖水量/($\times10^8$ m^3)		出湖水量/($\times10^8$ m^3)	入湖沙量/($\times10^4$ t)		出湖沙量/($\times10^4$ t)	淤积量/($\times10^4$ t)	沉积率/%
	“三口”	“四水”		“三口”	“四水”			
1996－2002	657	1874	2958	6960	1580	2250	6290	73.7
2003－2012	493	1523	2292	1127	842	1743	226	11.5

度显著上升($P<0.05$). 就不同水期而言,汛期洞庭湖 I_P 值和 TP 浓度有所下降,而 TN 浓度显著上升($P<0.05$);非汛期,洞庭湖 I_P 值、TP 和 TN 浓度均有不同程度的升高,但均无显著性差异($P>0.05$). 三峡工程运行前后洞庭湖 I_P 值和 TP 浓度的水期分布格局发生明显变化,均由三峡工程运行前的汛期>非汛期变化为三峡工程运行后的非汛期>汛期,TN 浓度的水期分布格局没变,仍然表现为非汛期>汛期. 洞庭湖 I_P 值水期分布格局变化结果与申锐莉等[15]的研究结果基本一致(表 2,图 4).

表 2 洞庭湖不同水期水质对比

Tab.2 Comparison of water quality in Lake Dongting in different water periods

水期	污染指标	三峡工程运行前			三峡工程运行后			均值 t 检验结果
		样本数	平均值	标准差	样本数	平均值	标准差	
全年	I_P 值	7	1.54	0.37	11	1.69	0.31	$P>0.05$
	TP/(mg/L)	7	0.100	0.026	11	0.106	0.024	$P>0.05$
	TN/(mg/L)	7	1.33	0.20	11	1.58	0.30	$P<0.05$
汛期	I_P 值	7	1.61	0.33	11	1.57	0.17	$P>0.05$
	TP/(mg/L)	7	0.105	0.023	11	0.097	0.016	$P>0.05$
	TN/(mg/L)	7	1.28	0.17	11	1.56	0.30	$P<0.05$
非汛期	I_P 值	7	1.48	0.48	11	1.84	0.54	$P>0.05$
	TP/(mg/L)	7	0.089	0.037	11	0.116	0.040	$P>0.05$
	TN/(mg/L)	7	1.50	0.40	11	1.60	0.35	$P>0.05$

2.3 三峡工程运行前后洞庭湖水质的空间变化

与三峡工程运行前相比,三峡工程运行后西洞庭湖 I_P 值和 TP 浓度有所下降,TN 浓度则有所上升,但均

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

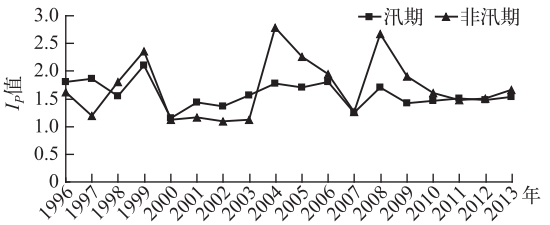


图 4 1996－2013 年洞庭湖不同水期 I_P 值的年变化

Fig.4 Annual variations of I_P value in Lake Dongting in different water periods during 1996－2013

无显著性差异($P>0.05$);南洞庭湖的 I_P 值、TP 和 TN 浓度均有不同程度的上升,其中 I_P 值和 TN 浓度有显著上升($P<0.05$),水质显著恶化;东洞庭湖的 I_P 值、TP 和 TN 浓度均有不同程度的上升,但均无显著性差异($P>0.05$). 三峡工程运行前后洞庭湖 I_P 值和 TP 浓度的空间分布格局发生一些变化,其大小顺序均由三峡工程运行前的西洞庭湖>东洞庭湖>南洞庭湖变化为三峡工程运行后的西洞庭湖>南洞庭湖>东洞庭湖,即南洞庭湖 I_P 值和 TP 浓度均超过东洞庭湖,上升为第二位,从 2010 年起,洞庭湖 I_P 值的空间分布格局发生了新的变化,I_P 值的大小顺序变化为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖;洞庭湖 TN 浓度的空间分布格局没变,仍然表现为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖,此结果与王崇瑞等[28]的研究结果一致(表 3,图 5).

表 3 洞庭湖不同湖区水质对比

Tab.3 Comparison of water quality in Lake Dongting in different lake areas

湖区	污染指标	三峡工程运行前			三峡工程运行后			平均值 t 检验结果
		样本数	平均值	标准差	样本数	平均值	标准差	
西洞庭湖	I_P 值	7	2.14	1.33	11	1.75	0.47	$P>0.05$
	TP/(mg/L)	7	0.142	0.092	11	0.114	0.035	$P>0.05$
	TN/(mg/L)	7	1.12	0.15	11	1.31	0.32	$P>0.05$
南洞庭湖	I_P 值	7	1.33	0.14	11	1.69	0.37	$P<0.05$
	TP/(mg/L)	7	0.085	0.009	11	0.103	0.031	$P>0.05$
	TN/(mg/L)	7	1.20	0.09	11	1.57	0.37	$P<0.05$
东洞庭湖	I_P 值	7	1.46	0.28	11	1.68	0.21	$P>0.05$
	TP/(mg/L)	7	0.090	0.024	11	0.102	0.019	$P>0.05$
	TN/(mg/L)	6	1.51	0.25	11	1.76	0.26	$P>0.05$

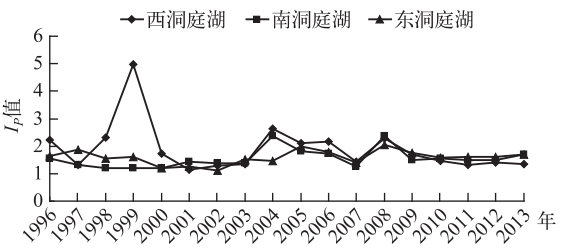


图 5 1996－2013 年洞庭湖不同湖区 I_P 值的年变化

Fig.5 Annual variations of I_P values in Lake Dongting in different lake areas during 1996－2013

3 讨论

一般地,洞庭湖水体汛期表现为淤积,非汛期表现为冲刷[29],洞庭湖来水、来沙主要集中在汛期,三峡工程运行后汛期来水量减少、含沙量降低,致使 TP 浓度下降、I_P 值减小. 非汛期 TP 浓度的升高有两方面的原

因,一方面是来水量尤其是长江"三口"来水量减少[30],另一方面是水面比降增大,流速增大,水体冲刷作用增强,特别是三峡水库汛后蓄水期(9－10 月),洞庭湖出流加快[31],加速泥沙再悬浮和底泥中 TP 的二次释放. 非汛期 TP 浓度升高,导致其 I_P 值增大.

三峡工程运行前洞庭湖不同湖区 TP 浓度的分布格局与其泥沙来源不同[30]有关,西洞庭湖区泥沙主要来源于长江"三口",这部分入湖泥沙首先在西洞庭湖落淤后经南洞庭湖再入东洞庭湖,同时藕池东支河泥沙直入东洞庭湖,使得不同湖区泥沙含量和 TP 浓度表现为西洞庭湖>东洞庭湖>南洞庭湖. 三峡工程运行后,由于长江"三口"来沙占洞庭湖总入湖沙量的比例减少,"四水"来沙占洞庭湖总入湖沙量的比例上升,再加上清水入湖对水体的冲刷,使得西洞庭湖泥沙含量和 TP 浓度下降,南、东洞庭湖泥沙含量和 TP 浓度上升. 2010 年后,由于洞庭湖 TP 浓度空间分布格局进一步变化为东洞庭湖>西洞庭湖>南洞庭湖,首要污染物由 TP 变化为 TN,再加上洞庭湖 TN 浓度一直呈现东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖的空间分布格局,使得从 2010 年起洞庭湖水质污染的空间分布格局变化为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖. 此结果与李忠武等[4]的研究结果基本一致. 1999 年西洞庭湖 I_P 值高达 4.97,水质属重污染,主要是由于 TP 浓度高,达 0.339 mg/L,超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类标准 5.78 倍.

三峡工程运行前后洞庭湖 TN 浓度空间分布格局的一致性,表明洞庭湖 TN 浓度受三峡工程运行影响较小,同时也暗示湘、资、沅、澧"四水"是洞庭湖 TN 的主要来源. 秦迪岚等[23]研究结果表明,湘、资、沅、澧"四水"TN 的输入量占洞庭湖 TN 总输入量的 74%,其中湘江 TN 的输入贡献最大,占洞庭湖 TN 总输入量的 46%,资水次之,占 12%,在各入湖河流中,湘江和资水入湖口 TN 浓度较高. 较高 TN 浓度的湘江与资水汇入东、南洞庭湖,造成了目前洞庭湖 TN 浓度的空间分布格局. 与三峡工程运行前相比,三峡工程运行后 TN 浓度在西、南、东洞庭湖均有不同程度的上升,其中南洞庭湖 TN 浓度有显著上升,表明湘江、资水等"四水"流域氮污染不断加剧. 另外,三峡工程运行后,洞庭湖水位降低、水量减小也是导致洞庭湖 TN 浓度升高的原因之一. 南洞庭湖水质显著恶化主要是由于 TN 和 TP 浓度的上升,尤其是 TN 浓度的显著上升.

东洞庭湖成为目前洞庭湖水质污染较重的区域,除与三峡工程的运行有关外,还受下列因素的影响:1)东洞庭湖是洞庭湖湖水的汇聚地,污染物在此累积[32];2)东洞庭湖离洞庭湖出湖口近,受长江水流顶托,容易在出湖口附近形成污染物的富集[33];3)作为湖南北部政治、经济、文化中心的岳阳市坐落于此,人类活动频繁,日常生活与生产所产生的大量氮、磷污染物会对周边水质造成较大影响[34].

由于三峡工程运行时间短,其对洞庭湖生态环境的影响还没有完全显现,因此本研究所得结论仅仅是初步结果,对三峡工程运行前后洞庭湖水质的变化仍需进行长期跟踪观测与研究.

4 参考文献

[1] Zhao SQ, Fang JY, Miao SL *et al*. The 7-decade degradation of a large freshwater lake in Central Yangtze River, China. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 431-436.

[2] Ou CM, Li JB, Zhang ZQ *et al*. Effects of the dispatch modes of the Three Gorges Reservoir on the water regimes in the Lake Dongting area in typical years. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, **22**(4): 594-608.

[3] Hu Guangwei, Mao Dehua, Li Zhengzui *et al*. Research overview on the influence of the Three Gorges project construction on Lake Dongting. *Journal of Natural Disasters*, 2013, **22**(5): 44-52(in Chinese with English abstract). [胡光伟, 毛德华, 李正最等. 三峡工程建设对洞庭湖的影响研究综述. 自然灾害学报, 2013, **22**(5): 44-52.]

[4] Li Zhongwu, Zhao Xinna, Xie Gengxin *et al*. Water environmental quality properties of Lake Dongting affected by construction of the Three Gorges Project. *Geographical Research*, 2013, **32**(11): 2021-2030(in Chinese with English abstract). [李忠武, 赵新娜, 谢更新等. 三峡工程蓄水对洞庭湖水环境质量特征的影响. 地理研究, 2013, **32**(11): 2021-2030.]

[5] Tian Zebin, Wang Lijing, Li Xiaobao *et al*. Characteristics analysis of pollutant influx and outflux in Lake Dongting. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 1008-1015(in Chinese with English abstract). [田泽斌, 王丽婧, 李小宝等. 洞庭湖出入湖污染物通量特征. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 1008-1015.]

[6] Xie Yonghong, Chen Xinsheng. Effects of Three-Gorge Project on succession of wetland vegetation in Lake Dongting. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**(6): 684-687(in Chinese with English abstract). [谢永宏, 陈心胜. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究, 2008, **29**(6): 684-687.]

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

[7] Zhu Yi, Lu Cai, Hu Huijian *et al*. Changes in fish community structure in West Lake Dongting after the operation of the Three Gorges Dam. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 844-852(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2014.0605. [朱轶, 吕偲, 胡慧建等. 三峡大坝运行前后西洞庭湖鱼类群落结构特征变化. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 844-852.]

[8] Sun Zhandong, Huang Qun, Jiang Jiahu *et al*. Recent hydrological droughts in Lake Dongting and its association with the operation of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(2): 251-256(in Chinese with English abstract). [孙占东, 黄群, 姜加虎等. 洞庭湖近年干旱与三峡蓄水影响分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(2): 251-256.]

[9] Huang Qun, Jiang Jiahu, Lai Xijun *et al*. Changes of landscape structure in Lake Dongting wetlands and the evaluation on impacts from operation of the Three Gorges Project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(7): 922-927(in Chinese with English abstract). [黄群, 姜加虎, 赖锡军等. 洞庭湖湿地景观格局变化以及三峡工程蓄水对其影响. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(7): 922-927.]

[10] Yang Li, Xie Binggeng, Qin Jianxin *et al*. Changes in Lake Dongting wetland landscape pattern related to pre-and post-construction of the Three Gorges Dam. *Journal of Natural Resources*, 2013, **28**(12): 2068-2080(in Chinese with English abstract). DOI 10.11849/zrzyxb.2013.12.005. [杨利, 谢炳庚, 秦建新等. 三峡建坝前后洞庭湖湿地景观格局变化. 自然资源学报, 2013, **28**(12): 2068-2080.]

[11] Dai Yong, Li Jingbao, Liu Zheng. Ecosystem service function value evaluation after operation of Three Gorges Reservoir in the Lake Dongting wetland. *Resource Development & Market*, 2011, **27**(12): 1104-1106(in Chinese with English abstract). [代勇, 李景保, 刘正. 三峡水库运行后洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估. 资源开发与市场, 2011, **27**(12): 1104-1106.]

[12] Zhang Meiwen, Wang Yong, Li Bo *et al*. Possible impacts of the Three Gorges Project and converting farmland into lake on the *Microtus fortis* population in Lake Dongting region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(8): 2100-2106(in Chinese with English abstract). [张美文, 王勇, 李波等. 三峡工程和退田还湖对洞庭湖区东方田鼠种群的潜在影响. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2100-2106.]

[13] Zheng Qingfang, Zhu Chaofeng, Li Yiyi. Influence of Three Gorges Reservoir operation on oncomelania and schistosomiasis in Lake Dongting region. *Yangtze River*, 2015, **46**(15): 51-53, 81(in Chinese with English abstract). DOI 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.15.013. [曾庆芳, 朱朝峰, 李以义. 三峡工程运行对洞庭湖区钉螺及血吸虫病的影响. 人民长江, 2015, **46**(15): 51-53, 81.]

[14] Xu Bin, Lin Canyao, Mao Xinwei. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Lake Taihu. *Water Resources Protection*, 2014, **30**(2): 38-40(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.02.008. [徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析. 水资源保护, 2014, **30**(2): 38-40.]

[15] Shen Ruili, Bao Zhengyu, Zhou Min *et al*. Temporal-spatial evolution of water quality in Lake Dongting, China. *J Lake Sci*, 2007, **19**(6): 677-682(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2007.0609. [申锐莉, 鲍征宇, 周旻等. 洞庭湖湖区水质时空演化(1983－2004). 湖泊科学, 2007, **19**(6): 677-682.]

[16] Shen Ruili, Zhang Jianxin, Bao Zhengyu *et al*. Water quality assessment in Lake Dongting(2002－2004), China. *J Lake Sci*, 2006, **18**(3): 243-249(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2006.0308. [申锐莉, 张建新, 鲍征宇等. 洞庭湖水质评价(2002－2004). 湖泊科学, 2006, **18**(3): 243-249.]

[17] Ma Yi, Zhou Jian, Huang Zhijiu *et al*. The status quo of Nemerow pollution index in the comprehensive assessment of the water quality of Fuxi River in Zigong city. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(25): 15576-15577, 15621(in Chinese with English abstract). [马懿, 周健, 黄治久等. 内梅罗污染指数法综合评价自贡市釜溪河水质现状. 安徽农业科学, 2011, **39**(25): 15576-15577, 15621.]

[18] Zhou Xiaobai, Zhang Ninghong, Zhang Yong *et al*. Preliminary study on the relationship between the water quality and the aquatic biological health status of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 271-278(in Chinese with English abstract). [周笑白, 张宁红, 张咏等. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探. 环境科学, 2014, **35**(1): 271-278.]

[19] Li Youzhi, Liu Fen, Zhang Canming. Anaiysis of change trend of water environment and cause in the Lake Dongting wetland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(8/9): 1295-1300(in Chinese with English abstract). [李有志, 刘芬, 张灿明. 洞庭湖湿地水环境变化趋势及成因分析. 生态环境学报, 2011, **20**(8/9): 1295-1300.]

[20] Zhang Min, Zhang Weijun. Water quality analysis and water environment protection in Lake Dongting. *Journal of Changjiang Engineering Vocational College*, 2011, **28**(4): 16-18, 23(in Chinese with English abstract). [张敏, 张伟

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

军. 洞庭湖水质状况分析与水环境保护研究. 长江工程职业技术学院学报, 2011, **28**(4): 16-18, 23.]

[21] Guan Boren. Evaluation of Nemerow's pollution index. *Environmental Science*, 1979, (4): 67-71(in Chinese with English abstract). [关伯仁. 评内梅罗的污染指数. 环境科学, 1979, (4): 67-71.]

[22] Zhong Zhenyu, Chen Can. Water quality and eutrophication analysis in Lake Dongting. *Environmental Science and Management*, 2011, **36**(7): 169-173(in Chinese with English abstract). [钟振宇, 陈灿. 洞庭湖水质及富营养状态评价. 环境科学与管理, 2011, **36**(7): 169-173.]

[23] Qin Dilan, Luo Yueping, Huang Zhe *et al*. Pollution status and source analysis of water environment in Lake Dongting. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(8): 193-198(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1003-6504.2012.08.042. [秦迪岚, 罗岳平, 黄哲等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析. 环境科学与技术, 2012, **35**(8): 193-198.]

[24] Yang Han, Huang Yanfang, Li Liqiang *et al*. Eutrophication study of Lake Dongting. *Gansu Environmental Study and Monitoring*, 1999, **12**(3): 120-122(in Chinese with English abstract). [杨汉, 黄艳芳, 李利强等. 洞庭湖的富营养化研究. 甘肃环境研究与监测, 1999, **12**(3): 120-122.]

[25] Zhu Lingling, Chen Jianchi, Yuan Jing *et al*. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(3): 348-357(in Chinese with English abstract). [朱玲玲, 陈剑池, 袁晶等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响. 水科学进展, 2014, **25**(3): 348-357.]

[26] Zhou Yongqiang, Li Jingbao, Zhang Yunlin *et al*. Silting/scouring process responses of Lake Dongting basin to the operations of TGR and thresholds of water-sediment regulation. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(3): 409-421(in Chinese with English abstract). DOI 10.11821/dlxb201403012. [周永强, 李景保, 张运林等. 三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值. 地理学报, 2014, **69**(3): 409-421.]

[27] Pan Feng. Lake Dongting water and sediment evolution and its influencing factors. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(28): 9894-9896(in Chinese with English abstract). [潘峰. 洞庭湖水沙演变特征及其影响因素分析. 安徽农业科学, 2014, **42**(28): 9894-9896.]

[28] Wang Chongrui, Li Hong, Yuan Xiping. Temporal-spatial distribution of nitrogen and phosphorus in fishery waters of the Lake Dongting. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(7): 928-936(in Chinese with English abstract). [王崇瑞, 李鸿, 袁希平. 洞庭湖渔业水域氮磷时空分布分析. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(7): 928-936.]

[29] Jiang Jiahu, Huang Qun, Sun Zhandong. Research on sediment silting and beach land variation in the Lake Dongting area. *Yangtze River*, 2009, **40**(14): 74-75(in Chinese with English abstract). [姜加虎, 黄群, 孙占东. 洞庭湖泥沙淤积与洲滩变化研究. 人民长江, 2009, **40**(14): 74-75.]

[30] Li Yuelong. Chorography of Lake Dongting(top volume). Changsha: Hunan People's Publishing House, 2013: 223-268(in Chinese). [李跃龙. 洞庭湖志(上册). 长沙: 湖南人民出版社, 2013: 223-268.]

[31] Fang Chunming, Hu Chunhong, Chen Xujian. Impacts of Three Gorges Reservoir's operation on the three outlets of Jingjiang River and Lake Dongting. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(1): 36-41(in Chinese with English abstract). [方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响. 水利学报, 2014, **45**(1): 36-41.]

[32] Bu Yuexian. Statistical analysis of water quality parameters and their spatiotemporal distribution characteristics in Lake Dongting. *Environmental Pollution & Control*, 1991, **13**(3): 2-4(in Chinese with English abstract). [卜跃先. 洞庭湖水质指标及其时空分布特征的统计分析. 环境污染与防治, 1991, **13**(3): 2-4.]

[33] Wang Xu, Xiao Weihua, Zhu Weiyao *et al*. Effects of water level variation on water quality in Lake Dongting. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, **10**(5): 59-62(in Chinese with English abstract). DOI 10.3724/SP.J.1201.2012.05059. [王旭, 肖伟华, 朱维耀等. 洞庭湖水位变化对水质影响分析. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(5): 59-62.]

[34] Wang Wei, Lu Shaoyong, Jin Xiangcan *et al*. Spatial distribution research of nitrogen in sediments and the overlying water of Lake Dongtinghu. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(12F): 6-10(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.12F.002. [王伟, 卢少勇, 金相灿等. 洞庭湖沉积物及上履水体氮的空间分布. 环境科学与技术, 2010, **33**(12F): 6-10.]

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06