

# 三峡工程蓄水对洞庭湖水环境质量特征的影响

李忠武<sup>1,2</sup>, 赵新娜<sup>1,2</sup>, 谢更新<sup>3</sup>, 袁 敏<sup>1,2</sup>, 姜燕松<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082; 3. 重庆大学资源与环境学院, 重庆 400044)

**摘要:** 三峡工程的运行给洞庭湖水环境质量造成了直接或间接的影响。本研究运用主成分分析法筛选了水质污染指标, 采用基于超标权重的综合水质标识指数法对洞庭湖水质进行了评价, 并重点分析了三峡工程蓄水后洞庭湖水环境质量变化特征。主成分分析结果表明, 影响洞庭湖水环境质量的主要污染指标为总氮和总磷; 典型断面综合水质标识指数评价结果表明, 三峡工程的运行对洞庭湖水环境质量变化有一定影响, 各典型断面多年综合污染指数高于三峡工程建设前, 表现为2003年前水质多以Ⅲ类为主, 2003年后以Ⅳ类为主; ArcGIS支持下的洞庭湖水环境质量时空分析表明, 三峡工程运行后, 洞庭湖水环境污染格局发生变化, 表现为局部污染区域发生转移, 东洞庭湖及洞庭湖出口污染最重。

**关键词:** 三峡工程; 水环境质量; 主成分分析法; 水质标识指数法; 洞庭湖

DOI: 10.11821/dlyj201311005

## 1 引言

三峡工程是目前世界上的重大水利工程之一。其于2003年6月开始蓄水运行, 到2010年10月成功蓄水到175米, 在防洪和发电方面发挥了非常重要的作用。洞庭湖作为长江中下游重要的“江河吞吐器”和国际重要的湿地保护区, 在维系区域生态平衡中具有决定性的作用。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<sup>[1-3]</sup>, 且从三峡工程立项之初就一直是学术界关注的热点问题<sup>[4-6]</sup>。目前相关的研究主要集中在三峡工程对洞庭湖湿地生态、水文、泥沙变化、防洪作用等方面。其中谢永弘等<sup>[7]</sup>研究了三峡工程运行对洞庭湖湿地植被演替的影响, 认为今后应加强湿地植被生态过程及功能、湿地植被演替的调控机理研究, 同时应重视洞庭湖自身的地质演化; 顾庆福等<sup>[8]</sup>采用大湖演算模型对洞庭湖区3种不同来水组合的典型洪水进行了分析研究, 认为三峡工程建成后还不能完全解除洞庭湖区的洪水威胁; 姜加虎等<sup>[9]</sup>利用河流动力学Saint Venant模型预测了三峡工程对长江城陵矶站水位影响, 结果表明, 在枯水期三峡水库增加下泄流量的调度运行可抬高城陵矶的水位, 在丰水期减少下泄流量的调度运行, 可缓解汛期防洪的紧张状况。然而, 针对三峡工程建成前后洞庭湖水环境质量特征变化的研究涉及不多, 目前只有万群等<sup>[10]</sup>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、深入探索三峡工程蓄水前后洞庭湖水环境污染时空变异规律等研究工作亟待开展。

收稿日期: 2013-03-06; 修订日期: 2013-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271294, 40971170); 教育部新世纪人才资助项目(NCET-09-330)和湖南省自然科学基金项目(11JJ3041)

作者简介: 李忠武(1972-), 男, 湖南望城人, 博士, 教授, 主要从事环境信息系统研究。E-mail: lizw@hnu.edu.cn

2021-2030 页

水环境质量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<sup>[11]</sup>,灰色系统理论法<sup>[12]</sup>,人工神经网络法<sup>[13]</sup>,模糊数学法<sup>[14]</sup>,主成分分析法<sup>[15]</sup>,综合水质标识指数法<sup>[16]</sup>等,其中综合水质标识指数法不仅可以完整地表明水质评价指标标准的类别,还可以较好地体现水功能区目标等信息,已经在水环境质量评价中得到了广泛应用。本研究采用主成分分析法和基于超标权重的综合水质标识指数评价方法,针对三峡工程蓄水前后洞庭湖水环境质量的變化,开展三峡工程建设对洞庭湖水环境质量特征影响的研究。研究结果对于深入认识三峡工程建设对洞庭湖生态环境的影响,进而采取合理的治理措施具有重要意义。

## 2 研究区概况及数据处理

### 2.1 研究区概况

洞庭湖(28°30′-30°20′N, 110°40′-113°10′E)位于湖南省北部,长江荆江河段以南,是中国第二大淡水湖(图1)。天然湖泊面积为2625 km<sup>2</sup>,湖区内湖泊、河道纵横,洲滩广泛发育,水草广布,具有典型的湿地特征<sup>[17]</sup>。洞庭湖南接湘、资、沅、澧四水,北连长江,通过松滋、太平、藕池“三口”吞纳长江洪水,是过水性吞吐型湖泊。由于泥沙淤积严重与历史上围湖造田的原因,洞庭湖已分割为东洞庭湖、南洞庭湖与西洞庭湖三部分。

### 2.2 数据来源

本研究中的水质数据由洞庭湖环境监测站提供。各项水质指标按照地表水环境质量标准(GB3838—2002)中的基本项目分析方法进行测定。为了全面研究洞庭湖水质,本研究选择了11个监测断面,完整收集其水质数据进行相关研究。各监测点均为洞庭湖环境监测站确定的常年水环境监测断面(图1),其中断面1、2、3位于西洞庭湖,断面4、5、6位于南洞庭湖,断面7、8、9、10位于东洞庭湖,断面11位于洞庭湖出口(洞庭湖汇入长江口),并分别代表所在洞庭湖区域的水环境质量特征。

### 2.3 指标选择

主成分分析是一种常用的多指标统计方法,其采用降维处理技术将原有的多变量转化为少数几个综合指标<sup>[18]</sup>,已经在水质指标选择及评价方面得到了广泛的研究和应用。本研究首先对洞庭湖水质监测指标(包括溶解氧、五日生化需氧量、化学需氧量、高锰酸钾指数、总氮、总磷、氨氮、铜、锌、氟化物、砷、铅、镉、石油类、粪大肠菌群)进行因子分析。分析结果显示, Bartlett球度检验相伴概率为0.000,小于显著性水平0.05,这说明本研究中的相关数据适于进行因子分析<sup>[19]</sup>。同时,应用SPSS18.0模型进行主成分分析,原15个指标的全部信息可由7个主成分反映(表1),累计贡献率为87.957%。

第一主成分(F1)的贡献率为30.767%,从主成分载荷值可以看出与第一主成分关系密切的是氨氮、总氮、铜、锌、化学需氧量、粪大肠菌群,这6项指标表征了氮营养盐污染指标、有机污染物综合指标及重金属污染指标,涵盖范围比较全面。同时,为了尽量不丢失其他主成分的信息,进一步从其他主成分里选取特征值大于0.7的指标,分别为砷、氟化物及总磷。综上分析,本研究最终选取氨氮、总氮、铜、锌、化学需氧量、粪大肠菌群、砷、总磷、氟化物9个指标作为评价指标。

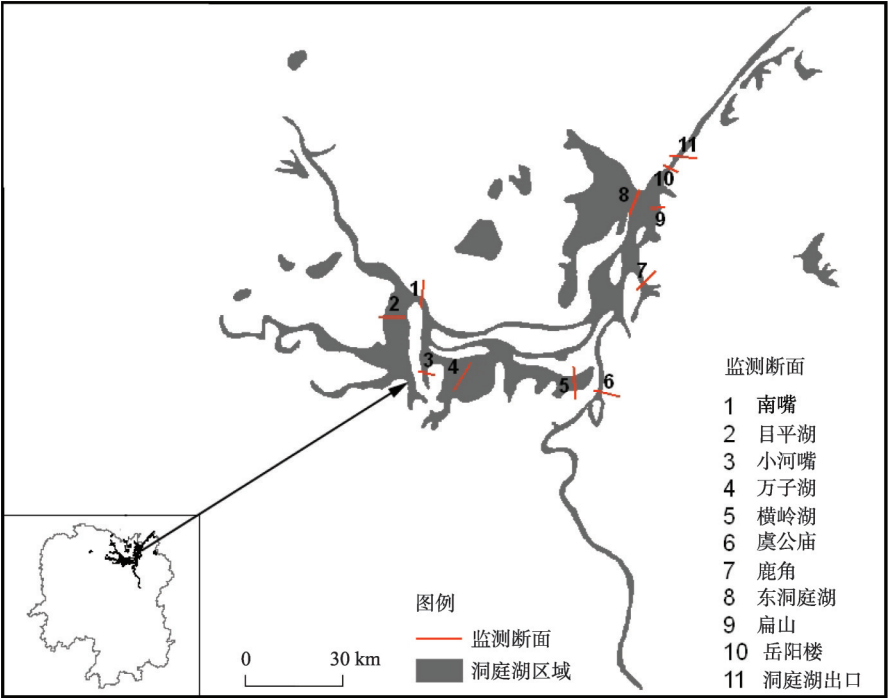


图 1 洞庭湖水环境监测断面示意图

Fig.1 Diagram of water environment showing the monitoring section in Dongting Lake Area

表 1 主成分分析中的因子载荷值

Tab.1 Factor loading values of the principal component analysis (PCA)

指标	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
溶解氧(mg/l)	-0.453	0.376	0.155	0.310	-0.241	0.535	0.372
高锰酸盐指数(mg/l)	-0.201	0.682	0.258	0.273	0.014	-0.556	-0.055
化学需氧量(mg/l)	-0.666	0.543	0.200	-0.108	0.062	-0.135	0.335
五日生化需氧量(mg/l)	0.566	0.428	-0.131	0.402	-0.229	-0.339	0.196
氨氮(mg/l)	0.775	0.411	-0.119	-0.141	0.282	0.062	0.016
总氮(mg/l)	0.762	-0.112	-0.213	-0.275	0.299	-0.069	0.184
总磷(mg/l)	-0.324	-0.263	0.399	0.712	0.022	0.012	-0.170
铜(mg/l)	0.737	0.201	0.114	-0.118	-0.550	0.018	-0.127
锌(mg/l)	-0.673	0.429	-0.120	-0.420	-0.016	0.068	-0.087
氟化物(mg/l)	0.213	0.202	0.771	0.011	0.324	0.132	-0.216
砷(mg/l)	0.478	0.706	0.129	-0.057	-0.134	0.294	-0.190
镉(mg/l)	-0.546	0.162	0.491	-0.491	0.188	-0.127	0.032
铅(mg/l)	0.472	-0.083	0.551	-0.428	-0.405	-0.035	0.126
石油类(mg/l)	0.416	-0.548	0.530	0.060	0.126	-0.060	0.360
粪大肠菌群(个/L)	0.624	0.370	-0.200	0.257	0.408	0.234	0.201
特征值	4.615	2.536	1.794	1.621	1.201	0.922	0.614
方差的 %	30.767	16.905	11.961	10.820	7.274	6.145	4.201
累积 %	30.767	47.673	59.633	70.442	77.717	83.861	87.957

2.4 水质评价方法

**2.4.1 权重确定** 权重系数是表示某一指标项在指标项系统中的重要程度。由于各单项评价指标对环境综合体的贡献存在差异，因此应分别赋予不同的权重<sup>[20]</sup>。本研究采用超标倍数赋权法进行权重计算，该方法与水质标准相对应，计算简单，客观性较强，且能够在一定程度上反映各指标对污染程度的贡献率。权重值越大，对污染程度的贡献率越大。

$$W_i = \frac{C_i/S_i}{\sum_{i=1}^n C_i/S_i}$$

(1)

式中： $W_i$ 为第  $i$  个水质指标的权重； $C_i$ 为该指标的实测值； $S_i$ 为第  $i$  个水质指标各级标准的算术平均值。

**2.4.2 单因子水质标识指数的确定** 单因子水质指数  $P_i$  由一位整数及小数点后二位或三位有效数字组成<sup>[21]</sup>，表示为：

$$P_i=X_1X_2X_3$$

(2)

式中： $X_1$ 代表第  $i$  项水质指标的水质类别； $X_2$ 代表监测数据在  $X_1$  类水质变化区间中所处的位置，按四舍五入的原则计算确定； $X_3$ 代表水质类别与功能区划设定类别的比较结果，视评价指标的污染程度  $X_3$  为一位或两位有效数字<sup>[21]</sup>。

2.4.3 综合水质标识指数的确定

(1) 断面综合水质标识指数的确定

综合水质标识指数为单因子水质标识指数与相应水质指标权重的乘积之和<sup>[16]</sup>。

$$I_{wQ} = \sum_{i=1}^n P_i * W_i = X_1.X_2.C_3.X_3$$

(3)

式中： $I_{wQ}$ 为综合水质标识指数； $P_i$ 为第  $i$  个水质指标的单因子水质标识指数； $W_i$ 为第  $i$  个水质指标的权重； $X_1.X_2$ 等同于单因子水质标识指数中的  $X_1.X_2$ ； $C_3$ 是参与评价的水质指标中劣于水环境功能区目标的单项指标数目。如果  $C_3=0$ ，说明所有参与评价的水质指标均达到水环境功能区目标，如果  $C_3=1$ ，说明参与综合水质评价的指标中有一个指标不能达到功能区目标，如果  $C_3=2$ ，说明有两个指标不能达到功能区目标，以此类推<sup>[21]</sup>。 $X_3$ 等同于模型 2 中的  $X_3$ 。

(2) 水质级别的判定

通过综合水质标识指数  $I_{wQ}$  的整数位和小数点后第一位  $X_1.X_2$ ，可以判定综合水质级别<sup>[16]</sup>（表 2）。

(3) 区域综合水质标识指数的确定

由各个断面综合水质标识指数相加，计算洞庭湖区水域的综合水质标识指数，计算方法如模型<sup>[22]</sup>4。

$$P = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_{wQj}$$

(4)

式中： $m$ 为断面个数。

3 结果与分析

3.1 洞庭湖水环境主要污染物分析

利用模型 2，得到 2004 年到 2009 年各断面不

表 2 基于综合水质标识指数的综合水质级别判定标准

Tab.2 Comprehensive water quality classification based on the comprehensive water quality index

判断依据	综合水质级别
$1.0 \leq X_1.X_2 \leq 2.0$	I 类
$2.0 < X_1.X_2 \leq 3.0$	II 类
$3.0 < X_1.X_2 \leq 4.0$	III 类
$4.0 < X_1.X_2 \leq 5.0$	IV 类
$5.0 < X_1.X_2 \leq 6.0$	V 类
$6.0 < X_1.X_2 \leq 7.0$	劣 V 类但不黑臭
$X_1.X_2 > 7.0$	劣 V 类并黑臭

同监测指标单因子水质标识指数，经加权平均得到各监测断面不同监测指标年均单因子水质标识指数（表3）。

表3 2004–2009年各监测断面不同指标年均单因子水质标识指数值

Tab.3 Monitoring sections of annual average single factor water quality identification index for different indicators dueing 2004–2009

控制单元	断面名称	氨氮	总氮	铜	锌	化学需氧量	粪大肠菌群	砷	总磷	氟化物
西	南嘴	2.30	4.31	1.40	1.40	2.30	2.40	1.10	5.12	1.20
	目平湖	2.10	4.22	1.50	1.40	1.80	2.10	1.10	5.43	1.20
	小河嘴	2.30	4.31	1.40	1.40	1.90	2.00	1.10	5.62	1.20
南	万子湖	2.40	4.42	1.40	1.40	2.30	2.50	1.10	5.63	1.30
	横岭湖	2.20	4.21	1.50	1.70	2.20	1.90	1.10	5.12	1.30
	虞公庙	2.80	5.32	1.60	1.70	2.10	2.30	1.10	4.61	1.30
东	鹿角	3.10	5.32	1.80	1.20	1.60	3.30	1.10	5.02	1.30
	东洞庭湖	3.01	4.92	1.80	1.20	1.60	2.90	1.10	5.03	1.30
	扁山	2.90	5.12	2.00	1.20	1.60	3.20	1.10	5.12	1.30
	岳阳楼	3.10	5.32	1.80	1.20	1.60	3.00	1.10	5.02	1.30
出口	洞庭湖出口	3.10	5.42	1.80	1.20	1.60	3.00	1.10	5.02	1.30

根据2004-2009年间各监测断面不同监测指标年均单因子水质指数（表3），通过对各断面进行加权平均的方法计算得到洞庭湖各监测指标年均单因子水质标识指数（图2）。从图2可以看出，洞庭湖各水质污染指标中总氮和总磷单因子水质标识指数值最高，分别达到了4.81和5.22，其中总氮达到GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅳ类水质，总磷达到了Ⅴ类水质，均超过了《湖南省主要地表水系水环境功能区划》中渔业用水要求。氨氮和粪大肠菌群的单因子水质标识指数分别为2.60和2.60，达到地表水环境质量的Ⅱ类水质。化学需氧量、铜、锌、氟化物、砷的单因子水质标识指数较小，均达到地表水环境Ⅰ类水质标准，说明这五类污染物不是影响洞庭湖水水质特征的主要指标。

以上分析表明，洞庭湖水水质污染指标中总氮和总磷污染最严重，其次是氨氮和粪大肠菌群，这几项指标均属于表征水体富营养化的重要指标，可间接反映洞庭湖水水质富营养化状况及程度。这主要是由于目前仍有大量工业废水、未经处理的生活污水以及含有农药化肥的农业退水排入湖内，加之入湖水系带来的污染物质，使得洞庭湖水环境中的氮、磷营养盐浓度过高。据估算，2008年，湖区工业废水排放量为 $27723\times10^4$  t，城市生活污水排量为 $40300\times10^4$  t，平均生活污水处理率低于20%，主要污染物总氮和总磷的入湖量分别为59049 t和6913 t，其中来源于畜禽养殖、城镇生活和农田径流污染的总氮和总磷分别占入湖总量的81%和83%<sup>[23]</sup>。从污

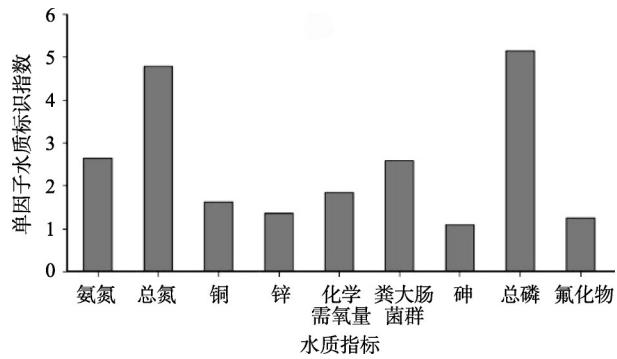


图2 洞庭湖主要污染物指标单因子水质标识指数图  
Fig.2 Single factor water quality identification index of main pollutants in Dongting Lake



染结构来看,洞庭湖区工业性污染比重有所下降,面源污染和生活性污染有所上升,有机污染负荷呈逐年增加状态。

3.2 洞庭湖水环境污染指数时间变化分析

3.2.1 洞庭湖整体水环境污染指数随时间变化规律 通过模型3和模型4,得到洞庭湖2004年至2009年综合污染指数值,根据表2中的标准可判定各年份综合水质特征的级别(表4)。由表4可以看出,洞庭湖2004年至2009年水质污染指数整体超过国家地表水质Ⅲ

类水质标准。除2007年综合水质达到Ⅲ类外( $I_{wq}=3.940$ ),2004年到2009年综合水质均属Ⅳ类水质。2004年至2007年,综合污染指数呈下降趋势,说明洞庭湖水质在此期间有所好转。2007

年以后,污染指数呈明显上升态势,到2009年,综合污染指数值为4.441,超过了2004年的综合水质标识指数值,达到最高点,污染程度进一步加剧。

3.2.2 洞庭湖典型监测断面水环境污染指数随时间变化规律 在西、南、东洞庭湖区域分别选取小河嘴、万子湖和东洞庭湖3个监测断面作为典型分析断面,分别对1995年至2009年水质进行综合评价(表5)。

由表5可见,小河嘴、万子湖和东洞庭湖断面综合水质达到了国家《地表水环境质量标准》中的Ⅲ类或Ⅳ类水质,但3个断面均未能达到《湖南省主要地表水系水环境功能区划》所执行的渔业用水区标准。同时,根据典型断面的综合水质标识指数变化规律(图3)可知,小河嘴断面水质状况在1995年至2009年的14年间变动较大,且总体上表现为逐渐恶化的趋势,其中2003年以前,水质状况基本上在Ⅲ类至Ⅳ类水之间变化,2000年水质状况最好,达到国家地表水Ⅱ级标准;2004年开始,水质污染程度加重,除2007年以外,其他年份基本维持在Ⅳ类水质以上。万子湖断面在14年间亦表现出水质污染程度日益加重的趋势,其中1997年与2000年水质污染程度最低,水质状况最好,达到国家Ⅲ类水质标准;而在三峡工程运行后2004年至2009年中,各年份均在Ⅳ级标准以上。东洞庭湖水质状况在14年内变化不大,但总体呈缓慢恶化的趋势,其中水质状况在2002年最佳。三个断面的水质变化趋势从整体上与洞庭湖整体水质变化趋势基本一致。

洞庭湖区是湖南省重要的粮、鱼、棉基地,也是全国重要的商品粮和渔业基地。湖区居民向洞庭湖排放的各种工业、农业污染物,导致洞庭湖水质不断恶化,生态系统遭到破坏。同时,城市化进程加速和面源污染加剧使得洞庭湖水质不断恶化,目前洞庭湖整体处于中、富营养化状态<sup>[24]</sup>。

其原因除了以上几方面外,三峡工程的运行也是一个重要影响因素。三峡工程自

表5 1995–2009洞庭湖典型断面综合水质标识指数值

Tab.5 The comprehensive water quality identification index value for typical section in Dongting Lake, 1995–2009

代表区域	典型断面	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009
西	小河嘴	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
南	万子湖	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
东	东洞庭湖	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ

2003 年开始蓄水运行, 其截流作用对洞庭湖的来水量、入湖泥沙量及水位等造成了直接或间接的影响。根据 1996 年到 2009 年洞庭湖水文资料可知, 1996 年到 2002 年年均入湖水量为 281 亿  $\text{m}^3$ , 而 2003 到 2009 年年均入湖水量为 206.7 亿  $\text{m}^3$ , 三峡水库蓄水后, 洞庭湖入湖水量大大减少, 较 1996 年到 2002 年年均入湖水量减少了 26%<sup>[25]</sup>。相对于入湖水量的减少, 入湖泥沙量的减少更为明显。1996-2002 年年均入湖泥沙量为 10802 万吨, 2003-2009 年年均入湖泥沙量

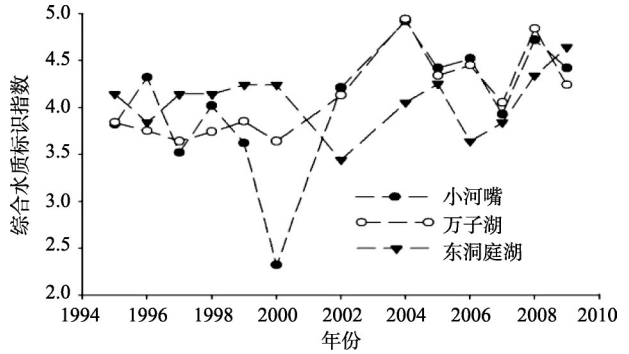


图3 典型断面综合水质标识指数趋势

Fig.3 Changing trend of comprehensive water quality identification index for typical sections

为 2309.5 万 t, 后者比前者泥沙入湖量减少了 79%<sup>[25]</sup>。洞庭湖入湖水量及入湖泥沙量的减少直接导致湖水水位回落, 1996-2009 年城陵矶秋季水位变化明显, 2009 年城陵矶水位平均下降 2.11 m, 最大降幅 3.12 m<sup>[26]</sup>。洞庭湖湿地面积也在逐渐缩减, 2003 年丰水期面积为 2505  $\text{km}^2$ , 枯水期面积为 1240  $\text{km}^2$ , 到 2009 年湿地面积丰水期时为 1403  $\text{km}^2$ , 枯水期时为 973  $\text{km}^2$ <sup>[27]</sup>。洞庭湖属于过水型湖泊, 20 世纪 90 年代起换水频率较快, 约为 4.7 天/次, 三峡工程运行后水量减少, 换水频率变为 214 天/次<sup>[28]</sup>, 换水频率的减少, 直接导致污染物的沉积, 使水体水质污染程度加剧。同时, 三峡工程建设后成为著名的旅游景区, 旅游业污染物及豪华游轮排放物等直接顺江水进入洞庭湖, 也在一定程度上使得洞庭湖水环境污染加剧。

### 3.3 洞庭湖水环境污染指数空间变化研究

在 ArcGIS 9.3 空间分析模块支持下, 以 2004 年到 2009 年各年份综合水质标识指数为指标, 经过反距离加权插值分析, 得到洞庭湖 2004 年到 2009 年综合水质的空间分布格局 (图 4)。由图 4 可看出, 重点污染区域是万子湖与小河嘴断面, 其次是目平湖、横岭湖与虞公庙断面, 东洞庭湖与洞庭湖出口水域污染最轻, 水质状况最好。2005 年水质状况最好的区域是横岭湖、虞公庙及南嘴断面区域, 东洞庭湖与鹿角区域次之, 万子湖与小河嘴区域仍是污染最重的区域。2006、2007 年污染情况大致相似, 污染重点区域依旧是万子湖与小河嘴断面水域, 但目平湖区域 2005 年比 2006 年污染严重。从 2008 年的污染分布图中可看出, 除虞公庙断面污染较轻, 其他断面均呈现出不同程度的污染, 与前几年的污染分布规律相比较, 东洞庭湖区域污染状况明显加重。从 2004-2008 年洞庭湖水水质污染状况分布规律中可看出, 洞庭湖水水质仍呈现局部污染严重的现象, 洞庭湖三个区域以及出湖口区域水污染由重到轻依次为: 西洞庭湖、南洞庭湖、东洞庭湖、洞庭湖出口<sup>[29]</sup>。但是, 2009 年的污染分布状况与前 5 年有所不同, 重点污染区域分布在洞庭湖出口与东洞庭湖区, 南洞庭湖与西洞庭湖污染较轻, 这与前人研究所得结论存在一些差异<sup>[24, 30]</sup>。

东洞庭湖濒靠岳阳市, 市区人口增加和工业发展使得大量生活污水及工业废水进入东洞庭湖; 同时, 东洞庭湖区农业及水产养殖业发达, 农药和化肥的使用量大。因此, 各种工业废水, 农业污水及生活污水不断地排入东洞庭湖, 使水质污染状况加剧。洞庭湖水体动向大致由西洞庭湖流经南洞庭湖向东洞庭湖方向流动, 在洞庭湖出口汇入长江, 所以水

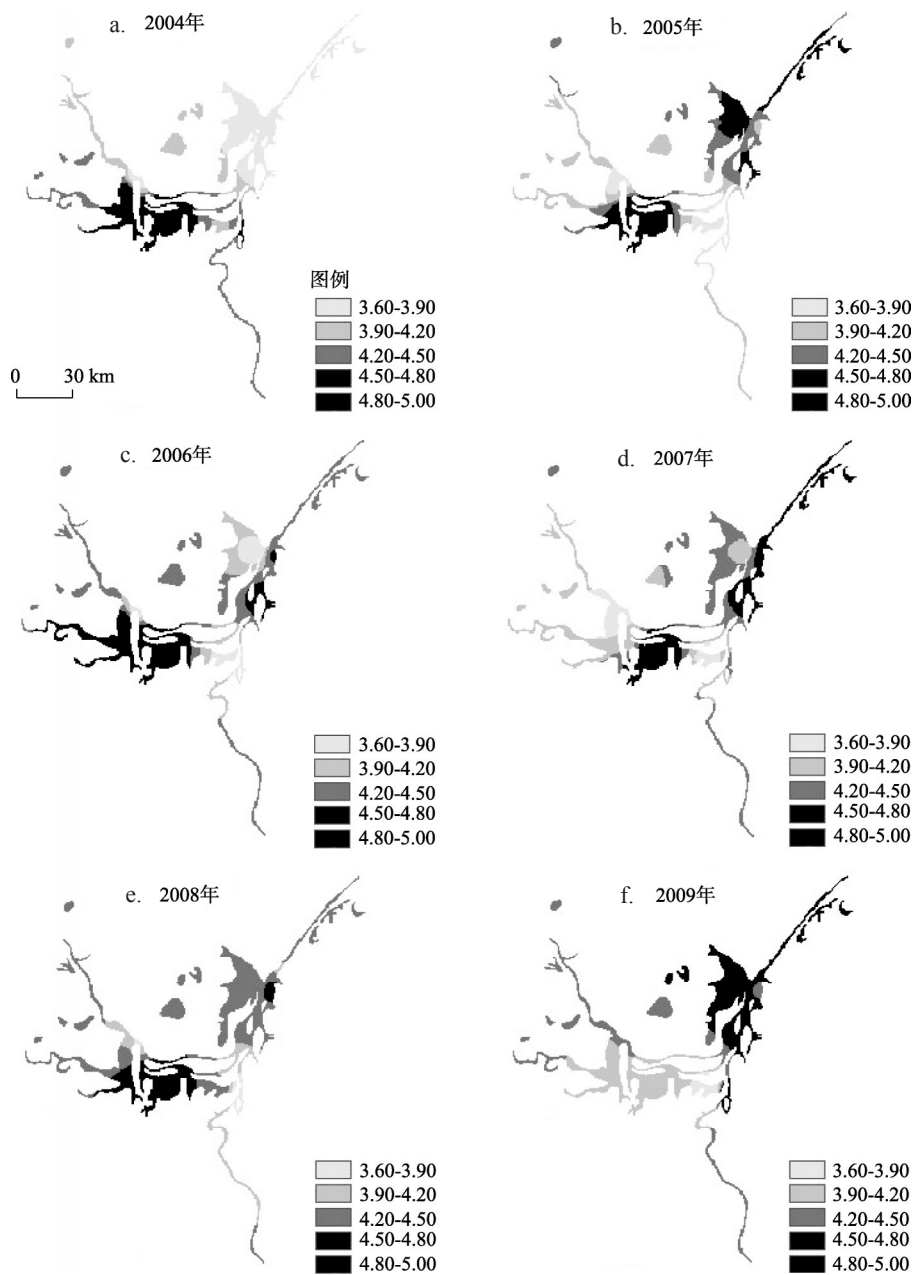


图4 2004-2009年综合水质标识指数反距离加权插值图

Fig.4 The inverse distance weighted interpolation of comprehensive water quality identification index during 2004-2009

体中的污染物质也集中流向东洞庭湖及洞庭湖出口。以往东洞庭湖水域面积大，来水流量与出水流量大，过水速度快，自净能力强，污染物富集较少，因此水质较好。但三峡工程蓄水后，洞庭湖入湖水量、入湖泥沙量急剧减少，水位逐年降低，东洞庭湖面积急剧减小，减幅约为32%<sup>[27]</sup>，洞庭湖水环境库容减小，污染物承载力下降，水流速度变慢，换水周期延长，自净能力降低，导致该区水质主要污染物质总氮和总磷的排放量大于水环境容量，总氮及总磷大量集中于该区，从而使得该区富营养化程度加剧，水质污染状况加重。



## 4 结论

(1) 洞庭湖的主要污染物为氮磷污染物。

主成分分析表明, 洞庭湖主要水质污染物为总氮和总磷, 二者污染比重在所有污染指标中最大。这一结果与以往洞庭湖水质监测与分析所得到结果一致, 表明主成分分析法选择污染指标具有可行性。

(2) 三峡工程的运行对洞庭湖典型断面水环境质量变化有一定负面效应。

通过对洞庭湖1995年到2009年间的小河嘴、万子湖及东洞庭湖三个典型断面的综合水质标识指数比较分析得知, 2003年至2009年洞庭湖水质污染指数值略高于1995年至2003年洞庭湖水质污染指数值, 说明洞庭湖水环境质量在三峡工程运行后有所下降, 三峡工程的运行对洞庭湖典型断面水环境质量变化有一定负面效应。

(3) 2004年至2009年间, 洞庭湖水环境质量呈恶化趋势, 且污染空间格局也发生了变化。

2004至2009年间, 洞庭湖水水质整体在Ⅲ类水质之上, 但水环境污染状况并不乐观。2007年水环境质量最好, 2009年污染最重。空间上, 2004到2008年重点污染区域是小河嘴和万子湖等局部地区, 西洞庭湖与南洞庭湖污染状况比东洞庭湖及洞庭湖出口严重。但2009年污染区域发生转移, 东洞庭湖及洞庭湖出口污染最重。

## 参考文献(References)

- [1] Ou Chaomin, Li Jingbao, Zhang Zhaoqing, et al. Effects of the dispatch modes of the Three Gorges Reservoir on the water regimes in the Dongting Lake area in typical years. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(4): 594-608.
- [2] 贺清云, 朱翔. 三峡工程建设背景下的洞庭湖区治水方略探讨. *地理研究*, 2003, 22(2): 160-168.
- [3] 李景保, 张照庆, 欧朝敏, 等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应. *地理学报*, 2011, 66(9): 1251-1260.
- [4] 王宏, 蔡强国, 朱远达. 应用EUROSEM模型对三峡库区陡坡地水力侵蚀的模拟研究. *地理研究*, 2003, 22(5): 579-589.
- [5] 李景保, 常疆, 吕殿青, 等. 三峡水库调度运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应. *地理学报*, 2009, 64(11): 1342-1352.
- [6] 刘彦随, 冯德显. 三峡库区土地持续利用潜力与途径模式. *地理研究*, 2001, 20(2): 139-145.
- [7] 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.
- [8] 顾庆福, 王建家. 三峡工程对洞庭湖典型洪水的防洪作用分析. *人民长江*, 2004, 35(2): 9-10.
- [9] 姜加虎, 黄群. 三峡工程对洞庭湖水位影响研究. *长江流域资源与环境*, 1996, 5(4): 367-374.
- [10] 万群, 申升, 汪铁, 等. 三峡工程截流后洞庭湖水体污染及风险分析. *环境科学与技术*, 2012, 35(61): 225-228.
- [11] 解莹, 李叙勇, 王慧亮, 等. 漆河流域上游地区主要河流污染特征及评价. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 645-653.
- [12] Ip W, Hu B, Wong H, et al. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(3): 284-290.
- [13] Aguilera P, Frenich AG, Torres J, et al. Application of the Kohonen neural network in coastal water management: methodological development for the assessment and prediction of water quality. *Water research*, 2001, 35(17): 4053-4062.
- [14] Karmakar S, Mujumdar P. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 1088-1105.
- [15] Olsen R L, Chappell R W, Loftis J C. Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis: Literature review and Illinois River watershed case study. *Water Research*, 2012, 46(9): 3110-3122.
- [16] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2005, 33(4): 482-488.
- [17] 蒋卫国, 潘英姿, 侯鹏, 等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价. *地理研究*, 2009, 28(6): 1665-1672.

- [18] 高惠璇. 应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社, 2008. 265-289.
- [19] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析 (PCA) 评价海洋沉积物中重金属污染来源. 环境科学, 2006, 27(1): 137-141.
- [20] 朱青, 周生路, 孙兆金, 等. 两种模糊数学模型在土壤重金属综合评价中的应用与比较. 环境保护科学, 2004, 30(3): 53-57.
- [21] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 321-325.
- [22] 方勇, 李忠武, 曾光明, 等. 红壤丘陵区典型流域地表水水环境特征研究: 以浏阳河流域为例. 中国环境检测, 2007, 23(4): 85-88.
- [23] 秦迪岚, 黄哲, 罗岳平, 等. 洞庭湖区污染控制区划与控制对策. 环境科学研究, 2011, 24(7): 748-755.
- [24] 李正最, 谢悦波. 洞庭湖富营养化支持向量机评价模型研究. 人民长江, 2010, 41(10): 75-78.
- [25] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组, 中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究(第七卷). 北京: 知识产权出版社, 2008. 223-312.
- [26] 黄群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析. 湖泊科学, 2011, 23(3): 424-428.
- [27] 姜端午, 黄树春, 张宛平, 等. 基于地质环境遥感调查与检测数据探讨洞庭湖演变规律. 国土资源遥感, 2010, 86(增): 124-129.
- [28] 卢江林. 百年梦想: 中国三峡工程决策纪实. 武汉: 长江出版社, 2005. 46.
- [29] 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.
- [30] 申锐莉, 鲍征宇, 周旻, 等. 洞庭湖湖区水质时空演化(1983-2004年). 湖泊科学, 2007, 19(6): 677-682.

## Water environmental quality properties of Dongting Lake affected by construction of the Three Gorges Project

LI Zhongwu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xinna<sup>1,2</sup>, XIE Gengxin<sup>3</sup>, YUAN Min<sup>1,2</sup>, JIANG Yansong<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China; 3. College of Resource and Environmental Science of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The water environmental quality of Dongting Lake has been directly or indirectly influenced by the construction and operation of the Three Gorges Project. In the study, the water pollution indexes were selected by using the principal component analysis. Then the paper evaluated the water quality of Dongting Lake based on overweight comprehensive water quality identification index method, and analyzed the water environmental quality variation after the impounding of the Three Gorges Reservoir. TN and TP were found to be the main pollution indexes through the principal component analysis. The comprehensive water quality identification index of the typical sections indicated that the construction and operation of the Three Gorges Project produced negative effects on the water environmental quality of Dongting Lake for the index was higher than that before the construction. Before 2003, the water quality identification index mainly belonged to class III, while after 2003, it mainly belonged to class IV. Temporal and spatial analysis of water environmental quality under the support of ArcGIS showed that there was an obvious change in water environmental pollution distribution after the operation of the Three Gorges Project: some local pollution area transferred to other places, and east Dongting Lake and outlet of the lake were the most polluted areas.

**Key word:** Three Gorges Project; principal component analysis; water quality identification index method; Dongting Lake