

三峡工程运行对洞庭湖与荆江三口关系的影响分析*

胡光伟^{1,3} 毛德华¹ 李正最² 田朝晖³

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院 长沙 410081; 2. 湖南省水文水资源勘测局 长沙 410007;
3. 湖南省国土资源规划院 长沙 410007)

提要 三峡水库于 2003 年 6 月 1 日正式开始蓄水,其防洪、发电、航运等综合效益日益明显。根据水文泥沙观测资料,采用 BP(Back Propagation)神经网络、变差系数法、双累积曲线法等方法分析三峡工程的运行对洞庭湖与荆江三口关系的影响,结果表明:(1)从年际和年代际尺度上看,长江上游降水量减少和三峡工程建设等人类活动是影响洞庭湖水沙变异的主要因素;(2)长江中下游荆江三口分流分沙锐减,并呈现三口口门趋于淤积,藕池河和虎渡河逐渐走向衰亡;(3)从洞庭湖泥沙沉积量过程线来看,2003—2010 年洞庭湖的累计泥沙淤积量仅为 $2301 \times 10^4 \text{t}$,比多年平均值减少 95.6%;(4)运用 BP 神经网络对洞庭湖出湖水量和沙量进行模拟,结果显示模拟精度满足洞庭湖出湖水沙预测的需要。

关键词 三峡水库;洞庭湖;荆江三口;水沙变化

中图分类号 P901, TV148 **doi:** 10.11693/hyhz20130108001

洞庭湖坐落于湖南省东北部,长江干流荆江南岸,跨湘鄂两省,长江中游与洞庭湖的关系密切。江湖关系相互作用所引起的湖泊水沙过程变异,一直是水利工作者和地理学者关注的焦点问题。洞庭湖作为长江中游重要的通江型湖泊,分泄荆江松滋、太平、藕池三口来水来沙,汇合湘、资、沅、澧四水,周边的汨罗江、新墙河等中小河流直接入湖,经洞庭湖调蓄后由城陵矶注入长江,形成复杂的江湖关系(图 1),发挥着调蓄洪水和保护湿地生态系统的重要服务功能。洞庭湖全流域总集水面积达 259430km^2 ,其中洞庭湖水体面积 2625km^2 ,是中国第二大淡水湖泊,在长江中游调蓄洪水,占有重要地位。

近 100 年来在人类活动和自然的双重作用下,洞庭湖不断萎缩,防洪形势严峻。特别是三峡工程建成运行以后,荆江三口出现新的来水来沙变化,江湖关系更加复杂。前人在长江与洞庭湖的江湖关系方面有了很多研究成果(Dai, 2008, 2011, 2013; 卢金友, 1996; 卢金友等, 1999; 穆锦斌等, 2008; 李学山等, 1997; 罗敏逊等, 1998; 卢承志, 2001, 2005; 吴作平等,

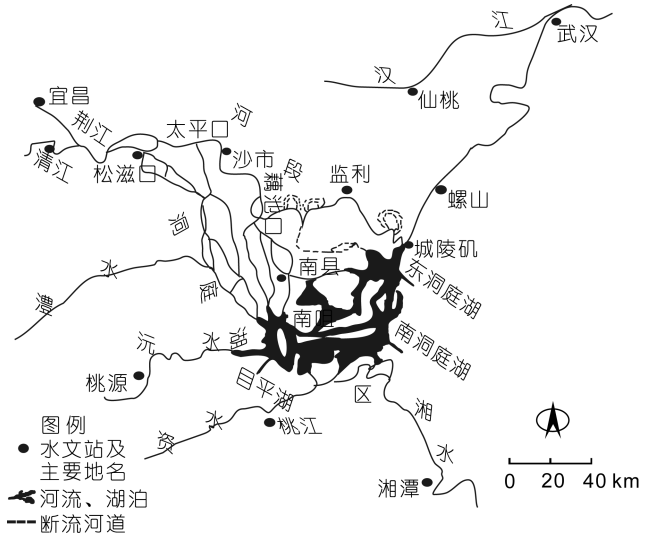


图 1 洞庭湖水系结构图

Fig.1 Drainage system of Dongting Lake

2002),特别是近 10a 来,许多学者在人类活动(围垦、三峡工程建设等)对洞庭湖的影响方面做了大量探索(李景保等, 1993; 林承坤等, 1994; 姜加虎等, 1996)。

* 2012 年湖南省研究生科研创新项目, CX2012B210 号; 2012 年度高等学校博士学科点专项科研基金联合资助项目, 20124306110009 号; 湖南省自然科学基金重点项目, 12JJ2026 号; 湖南省教育厅重点项目, 09A055 号; 湖南省水利科技重大项目, 湘财农指[2007]7 号。胡光伟, 博士研究生, Email: huguangwei5188@163.com

收稿日期: 2013-01-08, 收修改稿日期: 2013-10-21

目前对洞庭湖的研究多集中在泥沙淤积计算(王崇浩, 1997; 秦文凯等, 1998; 卢金友等, 2006; 洪林等, 2007; 李义天等, 2009; 李景保等, 2009; 郭小虎等, 2010)、洪涝与防洪、水情(李景保等, 1993, 2009)、水环境(卢宏伟等, 2004; 陈绍金, 2004)及水位(洪林等, 2007; 姜加虎等, 1996)的影响、生态系统服务功能、湿地及水生生物等方面, 吴作平(2003)提出了荆江-洞庭湖水沙数学模型。因此, 系统全面地研究在自然和人类活动双重影响下湖泊系统对水沙变异的响应, 仍是洞庭湖研究中的一个前沿领域。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

历年实测水沙数据来源于湖南省水文水资源勘测局和《长江泥沙公报 2000—2011》。文中选取洞庭湖湘、资、沅、澧四水、荆江三口和出口城陵矶等主要控制站(湘潭、桃江、桃源、石门、新江口、沙道观、弥陀寺、康家岗、管家铺、城陵矶)1951—2011年的实测水沙数据作为洞庭湖水沙过程变异分析的基础, 其中年内变化数据为 1994—2010 年逐月径流泥沙数据。

1.2 研究方法

本文应用了以下研究方法:

1) BP 神经网络。目前, 人工神经网络模型已广泛地应用于水文水资源系统的分析模拟计算中, 应用最多的是 BP(Back Propagation)人工神经网络模型。模型的具体计算方法参照文献(Karunanithi *et al*, 1994)。

2) 径流、输沙年内分配不均匀系数(C_v)常常用来反映径流、输沙年内分配情况。 C_v 值越大, 就表明各月径流量、输沙量相差越悬殊, 即年内分配不均匀, 反之亦然。其计算公式为:

$$C_v = \sigma / \bar{R} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} ; \quad \bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (i=1, 2 \dots 12) \quad (2)$$

其中, C_v 表示年内分配不均匀系数, \bar{R} 表示年内月平均径流量(或输沙量), R_i 表示年内各月径流量(或输沙量)。

3) 双累积曲线(Double Mass Curve)。双累积曲线是检验两个参数间关系一致性及其变化的常用方法。所谓双累积曲线就是在直角坐标系中绘制的同期内一个变量的连续累积值与另一个变量连续累积值的关系线, 它可用于水文气象要素一致性的检验、缺值

的插补或资料校正, 以及水文气象要素的趋势性变化及其强度的分析。

2 洞庭湖流域水沙特征分析

2.1 径流、输沙年际变化

洞庭湖水沙主要来自湘、资、沅、澧四水以及荆江三口, 入湖洪道很多, 河网交叉, 入湖水沙变化影响因素众多。1951—2011 年洞庭湖区实测水沙资料(表 1)显示, 三口、四水多年平均入湖径流量为 $2822 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 城陵矶出湖多年平均径流量 $2862 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 其中三口来水 $911 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占出湖总水量的 32.28%, 四水来水 $1655 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占出湖总水量 58.65%, 区间补给量为 $255.9 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占出湖水量 9.07%。三口、四水多年平均输沙量为 $14131 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 其中三口入湖沙量 $11453 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 占入湖总沙量的 81.05%, 四水入湖沙量为 $2678 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 占入湖总沙量的 18.95%。城陵矶出湖多年平均输沙量 $3850 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 湖内多年淤积沙量 $10282 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 淤积率 72.76%。三峡蓄水运用前期(1994—2002 年)四水总量为 $1908 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 三峡蓄水后四水总量为 $1555 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 衰减率为 18.5%; 而三口多年平均水量为 $911 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 三峡蓄水运用前期水量为 $616 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 蓄水后水量为 $500 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 与多年平均值相比, 两个时期的水量衰减率分别为 32.1%和 44.9%。下荆江裁弯前后三口和四水入湖水量分别为 $886 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 和 $834 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 、 $1729 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 和 $1699 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 裁弯前后两者水量变化并不大, 可以看出三峡蓄水运行后, 三口四水来水量均发生了变化, 三口来水量的锐减应该归因于三峡水库的蓄水作用。三峡蓄水前三口入湖沙量的比例稳定在 75%—81%。三峡水库蓄水后由于水库的拦沙作用, 荆江泥沙量减少, 三口入湖泥沙大幅下降, 三口在三峡运行期(2003—2011 年)的来沙量仅为 $1233 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 占入湖沙量的比例降为 58.6%, 比三峡运行前期(1994—2002 年)平均值衰减 $5141 \times 10^4 \text{t}/\text{a}$, 减少率为 80.7%。

图 2 即为洞庭湖三口入湖和城陵矶出湖年径流量与年输沙量双累积曲线, 从图上看, 入湖和出湖水沙 60 多年来均已发生明显的变化, 荆江三口的入湖沙量和城陵矶出湖沙量衰减十分显著。根据双累积曲线斜率可得出, 入湖水沙双累积曲线斜率 K 由第 1 时段的 14.4 衰减到第 5 时段的 2.1, 衰减率为 85.4%; 而出湖水沙双累积曲线斜率 K 由第 1 时段的 1.8 衰减到第 5 时段的 0.7, 衰减率为 61.1%; 特别要指出的是,

表 1 洞庭湖历年入湖出湖径流泥沙统计(1951—2011 年)
Tab.1 Runoff and sediment in and out of the Dongting Lake in history

统计时段 (年份)	入湖水量(10^8m^3)				入湖沙量(10^4t)			出湖 沙量	泥沙淤积	泥沙淤积率 (%)
	三口	四水	区间	合计	三口	四水	合计			
1951—1958	1592.5	1732.6	310.4	3635.5	21414.4	4126.9	25541.3	6714.4	18826.9	73.7
1959—1966	1338.4	1474.9	221.4	3034.6	19057.5	2836.9	21894.4	5412.5	16481.9	75.3
1967—1972	1021.6	1728.7	231.3	2981.7	14109.0	4082.5	18191.5	5263.3	12928.2	71.1
1973—1980	834.3	1698.8	255.8	2788.9	11079.4	3665.6	14745.0	3838.8	10906.3	74.0
1981—1998	697.1	1701.4	316.0	2714.5	9384.9	2333.3	11718.2	2917.9	8800.2	75.1
1999—2002	625.2	1815.5	373.0	2813.7	5660.2	1164.7	6824.9	2030.0	4794.9	70.3
2003	568.7	1754.0	362.0	2684.7	2050.1	1176.0	3226.1	1750.0	1476.1	45.8
2004	524.3	1499.0	306.0	2329.3	1443.4	913.4	2356.8	1430.0	926.8	39.3
2005	643.3	1511.0	261.0	2415.3	2393.0	640.4	3033.4	1590.0	1443.4	47.6
2006	182.6	1597.0	207.0	1986.6	162.0	1026.4	1188.4	1520.0	-331.6	-27.9
2007	543.6	1405.0	208.0	2156.6	1329.9	815.3	2145.2	1120.0	1025.2	47.8
2008	528.7	1512.0	213.0	2253.7	732.7	790.6	1523.3	1740.0	-216.7	-14.2
2009	444.9	1346.0	199.6	1990.5	827.0	373.4	1200.5	1670.0	-469.6	-39.1
2010	566.0	1817.5	201.3	2584.8	928.0	1249.3	2177.3	2620.0	-442.7	-20.3
2011	276.2	1027.5	189.7	1493.4	148.4	201.2	349.6	1460.0	-1110.4	-317.6
2003—2011	475.4	1496.6	238.6	2210.5	1112.7	798.4	1911.2	1655.6	255.6	13.4
1951—2011	911.12	1655.39	255.9	2822.38	11453.24	2678.26	14131.49	3849.97	10281.53	72.76

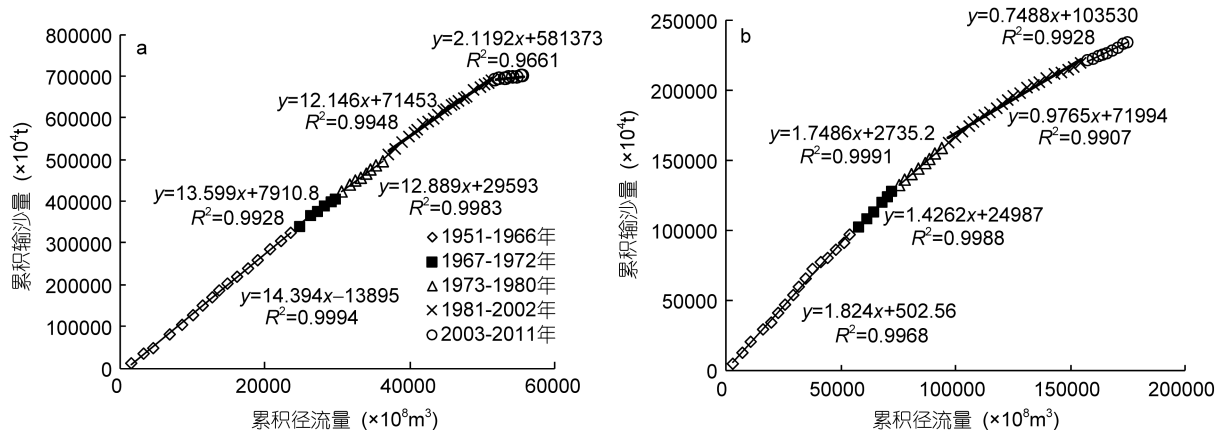


图 2 洞庭湖水沙双累积曲线

Fig.2 Water and Sediment double cumulative curve of Dongting Lake
a: 三口入湖; b: 城陵矶出湖

第 4 阶段入湖水沙曲线斜率 K 由 14.4 锐减到 2.1, 说明 2003—2011 年洞庭湖的入湖水沙的变化与三峡蓄水运行关系密切, 而出湖的水沙曲线的走势变化并不强烈。可见, 长江干流的水利工程对洞庭湖入湖水沙的影响是不同步的, 入湖泥沙的衰减变化速率远大于出湖泥沙的衰减速率。

2.2 径流、输沙季节变化

湖南省为典型的大陆性亚热带季风气候, 4—10 月全省降水量占全年总降水量的 68%—84%。湖区年降水量 1100—1400mm, 4—6 月降雨占年总降水量的

50%以上, 汛期(5—10月)径流量占年均径流量的 75%, 洞庭湖水位始涨于 4 月, 7—8 月最高, 11 月到翌年 3 月为枯水期。三口洪水过程与长江干流一致, 峰型肥胖, 历时较长。三口来水来沙年内分配极不均匀, 多年平均汛期 5—10 月来水占全年来水总量的 96.81%以上, 来沙则占 99.56%以上; 而四水峰型尖瘦, 历时较短, 历年平均汛期来水约占全年的 65%, 来沙占全年的 83%。

为了更直观地得出径流、输沙季节变化情况, 下面用径流、输沙年内分配不均匀系数 C_v 来反映径流、输沙年内分配情况。计算结果见表 2。

表 2 三口、四水、城陵矶径流和输沙年内分配系数表(1994—2010 年)

Tab.2 Annual distribution coefficients of runoff and sediment transport during 1994—2010 in Jingjiang River at Sankou Section (where three rivers outlets are located), Sishui (four local tributaries to the Dongting Lake, namely Xiangshui, Zishui, Yuanshui and Lishui rivers), and Chenglingji (a major outlet of Jingjiang River to Changjiang (Yangtze) River)

年份	径流量年内分配系数			输沙量年内分配系数		
	三口	四水	城陵矶	三口	四水	城陵矶
1994	3.981	1.806	1.745	5.058	3.154	1.793
1995	4.314	2.338	2.147	5.147	5.962	1.519
1996	4.669	2.947	2.903	6.057	7.251	2.383
1997	5.171	1.486	1.672	7.316	2.950	1.607
1998	5.355	2.281	2.253	6.155	4.569	2.558
1999	4.743	2.739	2.948	5.926	4.714	2.494
2000	4.198	1.868	1.563	5.201	4.281	1.653
2001	3.939	2.200	1.598	4.914	5.537	1.666
2002	4.722	2.181	2.244	6.611	3.913	1.786
2003	4.674	2.572	2.034	6.366	6.542	2.348
2004	3.860	2.472	2.248	7.727	5.825	2.433
2005	4.100	2.600	1.851	6.326	5.800	2.619
2006	4.893	2.088	2.010	10.032	5.748	2.410
2007	4.603	1.853	2.148	5.968	4.837	2.051
2008	3.957	1.655	1.718	6.595	4.233	2.184
2009	4.942	2.249	2.101	8.389	4.019	2.603
2010	4.788	2.732	2.225	7.193	4.860	3.271

从表 2 的计算结果可以看出,洞庭湖区的进出湖水沙年内分配是不均匀的,无论是径流量年内分配不均匀系数还是输沙量的年内分配不均匀系数的变化均呈现出失衡的规律。荆江三口 5 个代表水文站 1994—2010 年的径流量 C_v 值整体上无明显变化,其中 1997 年和 1998 年的年内径流分配极不平衡,2000 年以后与 20 世纪 90 年代相比,年内分配不均匀系数有增大趋势,表明年内分配没有之前均匀;三口输沙 C_v 值的整体趋势是由小到大呈递增变化, C_v 值则从 1994 年的 5.058 增加到 2010 年的 7.193,其中 2006 年的不均匀系数最大,2006 年,长江流域发生了百年一遇的高温伏旱天气(Dai *et al.*, 2008; 戴志军等, 2008; 刘红等, 2008), 并且目前世界上最大的三峡水库进行第二期下闸蓄水,两者的共同作用导致了长江中下游汛期出现水资源匮乏。湖南四水径流量的季节变化不明显,而输沙量的变化较强烈,其中在 1996 年和 2003 年的年内分配不均匀系数最大,分别为 7.251 和 6.542,表明输沙量的季节变化较径流量的季节变化要大。从城陵矶的径流和输沙 C_v 值来看,整体上均呈现出增大趋势,尤其以输沙量的季节变化较为强烈,特别是从 2003 年之后,城陵矶的输沙量季节变化就呈增大趋势,这主要是三峡季节性调度运用的结果。

各站各时段年内分配不均匀性不同,三口径流 C_v 值最大 5.355 发生在 1998 年,最小值 3.360 发生在 2004 年,而输沙量变化比较明显,输沙 C_v 值最大 10.032 发生在 2006 年,最小 4.914 发生在 2001 年。

3 三峡工程运行对洞庭湖与荆江三口关系的影响

2003 年 6 月 1 日三峡工程正式下闸蓄水,开始按 135—139m 调度运行,根据数据资料统计,它对长江年径流量的影响不显著,但是人为的水库调度因素对长江流量的季节变化有很明显的影响,也因此影响洞庭湖水位、水量及输沙的季节变化。

3.1 对荆江三口入湖水量的影响

3.1.1 三口分流量的变化 荆江三口分流分沙的衰减是洞庭湖水沙变化的直接原因。随着下荆江裁弯、葛洲坝兴建和三峡水库的蓄水运行,由三口进入洞庭湖的径流量呈现递减变化趋势。三峡工程运行前,三口分流总量为 $987 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,而三峡水库运行期 2003—2011 年,由三口进入洞庭湖的径流量已下降为 $475 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,缩减幅度达 52%;荆江三口的总分流比由下荆江裁弯前的 32.0%下降为三峡运行初期的 12.0%(表 3)。其中,藕池口在三口分流量和分流比

表 3 宜昌站、荆江三口分时段径流量(10^8m^3)、分流比(%)统计表
Tab.3 Runoff($\times 10^8\text{m}^3$) and split ratio(%) at Yichang Station and Sankou Section (see caption of Table 2)

统计时段	径流量($\times 10^8\text{m}^3$)				三口合计	分流比(%)			
	宜昌	松滋口	太平口	藕池口		松滋口	太平口	藕池口	三口合计
1951—1966 年	4404	510	208	690	1408	11.6	4.7	15.7	32.0
1967—1972 年	4164	445	186	390	1022	10.7	4.5	9.4	24.5
1973—1980 年	4301	428	160	247	834	9.9	3.7	5.7	19.4
1981—1993 年	4414	395	139	201	735	8.9	3.2	4.6	16.7
1994—2002 年	4268	336	123	158	616	7.9	2.9	3.7	14.4
2003—2011 年	3967	282	90	104	475	7.1	2.3	2.6	12.0

中衰减速度最快, 1951—1966 年其多年平均分流量为 $690 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$, 2003—2011 年其多年平均分流量仅为 $104 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$, 减小幅度达 84.9%; 相应的分流比则由 15.7% 下降为 2.6%。

根据长江科学院的研究成果显示, 三峡水库的清水下泄导致长江中下游河床冲刷后, 长江沿程同流量下的水位下降, 以流量 $2 \times 10^4\text{m}^3/\text{s}$ 和 $3 \times 10^4\text{m}^3/\text{s}$ 为例, 宜昌、沙市、石首的水位将分别下降 0.91m 和 0.79m、1.82m 和 1.55m、2.45m 和 2.03m。从而进一步导致三口分流大幅度衰减。长江科学院预测三峡运行 40a 后, 由于同流量下水位的下降, 长江出现 $2 \times 10^4\text{m}^3/\text{s}$ 和 $3 \times 10^4\text{m}^3/\text{s}$ 流量时, 进入虎渡河、藕池河的流量分别减少至 $250\text{m}^3/\text{s}$ 和 $780\text{m}^3/\text{s}$ 、 $320\text{m}^3/\text{s}$ 和 $820\text{m}^3/\text{s}$ 。

3.1.2 三口断流天数的变化 三峡工程运行后三口断流发生了不同程度的变化, 主要表现为通流时间推迟、断流时间提前及断流持续时间延长等。

长期以来, 荆江三口洪道及三口口门河段泥沙逐年淤积萎缩, 致使枯水期除松滋口的新江口常年

保持少量分流进入洞庭湖外, 其他口门(沙道观、管家铺、康家岗、弥陀寺)连年断流(图 3), 且三口断流天数呈增加趋势, 近年来三口断流时间每年都保持在 5—6 个月左右, 康家岗站每年断流时间长达 8 个月。据 2003—2010 年数据统计, 沙道观、弥陀寺、管家铺和康家岗年平均断流天数已分别达到 205d、147d、180d 和 260d, 与三峡运行前(1994—2002 年)多年平均值相比, 沙道观和康家岗断流天数分别增加 14d 和 7d。其中, 2006 年受长江上游降水量偏少、三峡蓄水等综合因素影响, 三口入湖断流天数显著增加, 沙道观、弥陀寺、管家铺、康家岗断流天数分别达到 269d、206d、235d、336d。断流时间主要出现在 1—4 月、11—12 月等枯水月份, 这一时段与三峡工程调节补水运行期相吻合, 因此, 根据枯水季节的长短变化, 优化三峡水库补水调度方案, 在保障水库枯水期发电、航运及灌溉需求的同时, 适时加大水库下泄流量或提前预泄, 以此来增加宜昌—枝城段河道径流量, 保证洞庭湖区的工农业生产及生活用水安全。

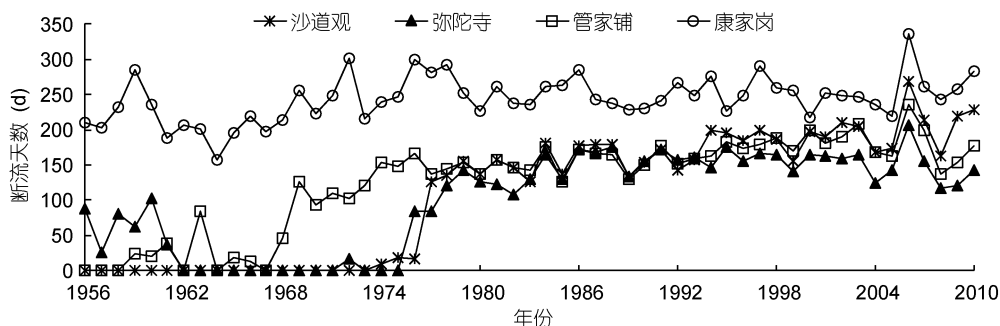


图 3 荆江三口断流天数趋势图

Fig.3 Trend of no-flow days in Sankou Section of Jingjiang River

3.2 对荆江三口及洞庭湖冲淤变化的影响

3.2.1 洞庭湖的冲淤变化 从 1956—2010 年的泥沙统计数据和洞庭湖泥沙沉积量过程线(图 4)可以看

出, 受三峡工程拦蓄水沙作用的影响, 荆江三口分流量明显萎缩, 洞庭湖的泥沙沉积量表现出明显的衰减趋势, 泥沙沉积量已由三峡运行前(1956—2002 年)的

12439 $\times 10^4$ t/a 降至三峡运行期的 426 $\times 10^4$ t/a, 泥沙淤积减少幅度达 96.6%; 泥沙沉积率由三峡运行前的 73.4% 降为三峡运行期的 20.2%。2006 年出湖沙量为 1520 $\times 10^4$ t, 三口四水来沙量为 1188 $\times 10^4$ t, 如果考虑区间来沙量, 2006 年洞庭湖呈冲淤平衡状态, 除 2007 年稍有淤积外, 2008—2011 洞庭湖均呈现冲刷状态。从图 4 中可以看出洞庭湖的淤积量在逐年减少, 特别是三峡工程运行后减少幅度有增大趋势, 而且在 2006 年表现

出突变现象。荆江三口年均入湖沙量由 1956—1966 年、1996—2002 年的 19590 $\times 10^4$ t、6960 $\times 10^4$ t 减少至 2003—2011 年的 1112.7 $\times 10^4$ t, 减小幅度分别为 97.83% 和 93.88%。在未考虑区间来沙情况下, 三峡运行 9a 来, 洞庭湖年平均入湖沙量为 1911.2 $\times 10^4$ t, 为多年平均入湖沙量 14131 $\times 10^4$ t 的 15.9%; 2003—2011 年洞庭湖的累积泥沙淤积量仅为 2300.6 $\times 10^4$ t, 较 1994—2002 年累计淤积沙量 52325 $\times 10^4$ t 减少了 50024 $\times 10^4$ t, 减少幅度达 95.6%。

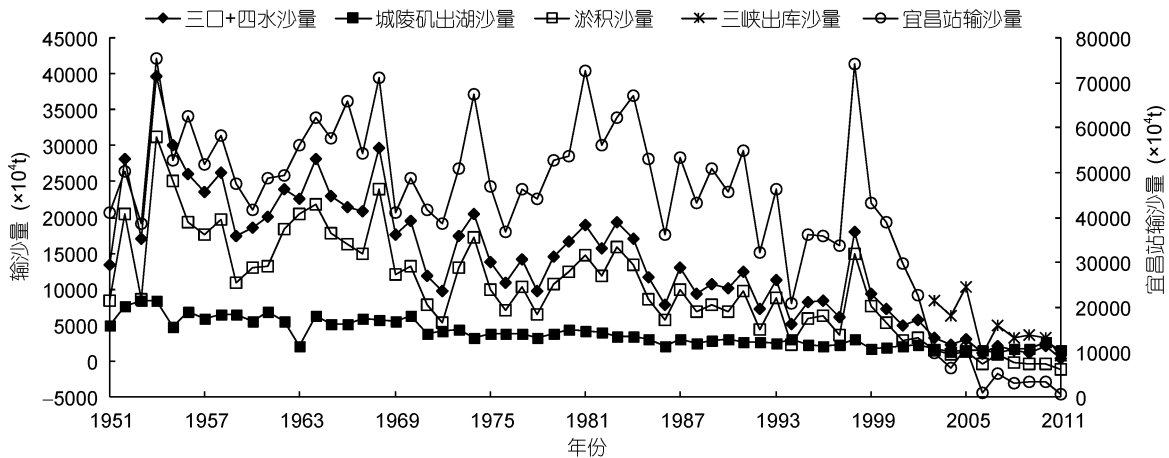


图 4 1951—2011 年洞庭湖泥沙沉积量过程线

Fig.4 Process of sedimentation in Dongting Lake from 1951 to 2011

3.2.2 三口分流洪道的冲淤变化 根据卢金友(1996)、罗敏逊等(1998)、彭玉明等(2007)的研究, 自 1952 年以来, 荆江三口一直处于冲淤状态。1952—1995 年数据资料显示, 三口分流道泥沙淤积总量为 26480 $\times 10^4$ m³, 年淤积量 601.8 $\times 10^4$ m³, 其中松滋河总淤积量为 5847 $\times 10^4$ m³, 按照河长 289.3km 计算, 平均淤积面积为 203m², 年平均淤积 137 $\times 10^4$ m³; 虎渡河(河长 131.7km)总淤积 3779 $\times 10^4$ m³, 平均淤积面积 287m², 年均淤积 87.9 $\times 10^4$ m³; 藕池河(河长 306.1km)总淤积 16854 $\times 10^4$ m³, 平均淤积面积 551m², 年均淤积 392 $\times 10^4$ m³, 三河底高程平均淤高分别为 0.63m、1.176m、1.84m。

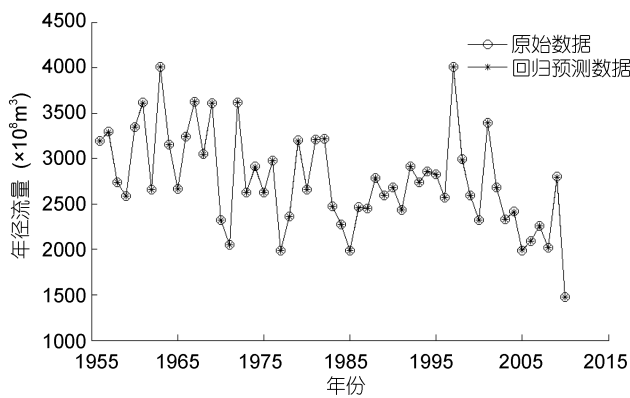
根据 1952 年、1995 年和 2003 年三口分流道 1:5000 水道地形图资料量算, 1995—2003 年三口洪道总淤积泥沙 4771 $\times 10^4$ m³, 年均淤积量 597 $\times 10^4$ m³, 其中松滋河淤积 348 $\times 10^4$ m³, 虎渡河淤积 1317 $\times 10^4$ m³, 藕池河淤积 3106 $\times 10^4$ m³。与 1952—1995 年年均淤积量数据对比, 三口洪道的年均淤积速率明显加快。松滋河淤积沙量占同期总输沙量比例分别为 3.5% 和 1.6%(泥沙干容重取 1.3t/m³); 虎渡河淤积沙量占弥陀

寺同期输沙总量比例为 5.6% 和 16.8%; 藕池河淤积量约占同期总输沙量比例为 7.0% 和 22.2%。可见, 荆江三口淤积速率呈明显上升趋势, 藕池河淤积最为严重, 其次是虎渡河。

1990 年以来, 长江上游输沙量就明显减少, 宜昌站 2010 年比 1990 年输沙量较少了 92.84%, 而 1990 年比 1950 年输沙量增加了 13.37%。三峡水库 2003 年 6 月 1 日蓄水后, 总入库泥沙量为 15.801 $\times 10^8$ t, 总出库(黄陵庙站)泥沙量为 4.115 $\times 10^8$ t, 平均排沙比为 25%, 即三峡水库拦截了入库泥沙总量的 75%。这就导致了三峡坝下清水下泄, 下游河段河流含沙量减小, 河流处于非饱和状态, 使下游河道冲刷进一步加剧。据资料统计, 三峡蓄水前 1966—1998 年宜昌至城陵矶总冲淤量为 49222 $\times 10^4$ m³, 年均冲刷量 1490 $\times 10^4$ m³; 而 2002—2008 年总冲刷量 46727 $\times 10^4$ m³, 年均冲刷量达到 7790 $\times 10^4$ m³, 年冲刷量增加了 422.82%。

三峡水库蓄水运行, 长江中下游将出现长距离的冲刷(Dai *et al.*, 2013), 河床下切, 河流含沙量减小。根据长江科学院研究预测的分析成果, 当三峡蓄水运行 40a 后, 宜昌—松滋口泥沙将冲刷 9800 $\times 10^4$ t,

松滋口—太平口泥沙冲刷量将达到 $19300 \times 10^4 \text{t}$, 太平口—藕池口泥沙冲刷量为 $51800 \times 10^4 \text{t}$, 藕池口—城陵矶泥沙冲刷量达 $170100 \times 10^4 \text{t}$; 并预测虎渡河、藕池河洪道内还将分别淤积泥沙 $2020 \times 10^4 \text{t}$ 和 $4550 \times 10^4 \text{t}$, 将导致河道通流面积进一步缩小, 这样, 藕池河、虎渡河将很快走向衰亡的境地(李景保等, 2009)。



3.3 洞庭湖径流量和输沙量变化预测

依据洞庭湖(1956—2011年)荆江三口入湖和城陵矶出湖径流泥沙数据资料的长期变化特征, 利用 Matlab 工具箱对洞庭湖出湖径流量和输沙量进行训练和仿真, 建立了年径流量和年输沙量预测的 BP 神经网络预测模型, 模拟结果如图 5。

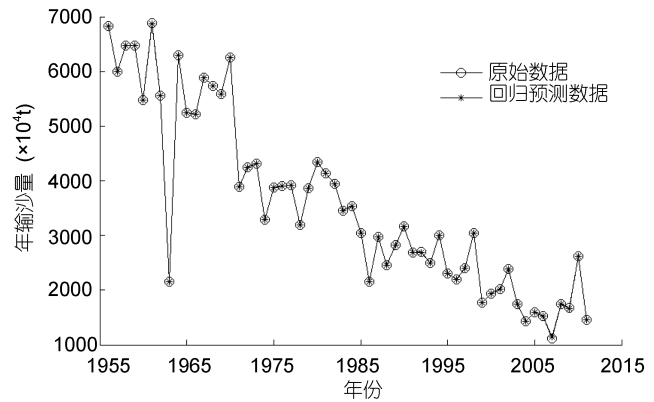


图 5 年径流量和年输沙量神经网络拟合结果

Fig.5 Results of BP network fitting on annual amounts of runoff and sediment

根据模型的计算结果, 年径流量和年输沙量的平均误差百分比分别为 0.014%和 0.026%, 最大误差比分别为 0.0896%和 0.1771%, 误差百分比控制在 0.2%以内。

三峡建库后大量泥沙拦截在库内, 大坝下游河床发生了明显的冲刷。根据方春明等(2007)的计算结果, 建库后 10a, 长江干流河床大幅度冲刷, 水位下降, 三口分流分沙持续减少。松滋—太平口河段累积冲刷量为 $2.14 \times 10^8 \text{t}$, 河床冲刷深度为 1.67m; 太平—藕池口河段累积冲刷量为 $1.95 \times 10^8 \text{t}$, 河床冲刷深度为 1.06m; 藕池—城陵矶河段累积冲刷 $3.15 \times 10^8 \text{t}$, 河床冲刷深度为 1.22m。可以看出, 三峡建库后对洞庭湖入湖泥沙的拦截作用非常明显。

表 4 给出了三峡建库后 19a 的预测数据, 从表中可以看出, 三峡水库的拦沙作用明显, 由于荆江三口入湖沙量的明显衰减, 洞庭湖出湖的沙量也减少较为明显, 预测到 2021 年城陵矶出湖沙量仅为 $1211.43 \times 10^4 \text{t}$ 。而出湖径流量相对减少的较为平缓, 至 2021 年出湖水量保持在 $1377.1 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右。

4 结论与展望

依据洞庭湖区现有水文泥沙等最新观测资料, 分析了洞庭湖区水沙变异特征和江湖水沙交互关系,

讨论了三峡水库蓄水对洞庭湖与荆江三口关系的影响, 得出以下主要结论: (1)从年际和年代际尺度上看, 长江上游降水量减少和三峡工程建设等人类活动是影响洞庭湖水沙变异的主要因素; (2)洞庭湖流域外界环境的变化导致了三口分流分沙的锐减, 并呈现三口口门趋于淤积的状态, 藕池河和虎渡河逐渐走向衰亡; (3)从洞庭湖泥沙沉积量过程线来看, 2003—2011 年洞庭湖的累计泥沙淤积量仅为 $2300.6 \times 10^4 \text{t}$, 比多年平均值减少 95.6%; (4)运用 BP 神经网络对洞庭湖出湖水量和沙量进行模拟, 结果显示模拟精度满足洞庭湖出湖水沙预测的需要。

三峡水库的投入运行对洞庭湖水沙影响的研究是一项长期的系统工程, 由于缺少三峡水库历年水沙过程数据和洞庭湖湖底地形图资料, 而且涉及江湖关系的泥沙问题相当复杂, 对三峡运行和洞庭湖水沙变异的耦合研究以及洞庭湖的冲淤变化的研究只涉及数量方面的统计, 三峡水库蓄水对荆江三口与洞庭湖的关系影响研究也还处在初级阶段, 需要更多的观测资料的检验来支持相关统计成果。下一步将在资料完整的情况下开展空间的耦合研究, 同时密切监视荆江三口的来水来沙变化对洞庭湖的水沙演变的影响, 及时调整水库与洞庭湖的联合调度和相关防洪疏淤措施, 确保洞庭湖区的长治久安。

表 4 三峡蓄水后洞庭湖出湖水沙的变化
Tab.4 Changes in runoff and sediment out of the Dongting Lake after the Three-Gorges Reservoir operation

建库后时间(a)	径流量($\times 10^8\text{m}^3$)			输沙量($\times 10^4\text{t}$)		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
1	2685	2685.81	0.81	1750	1750.17	0.17
2	2329	2329.42	0.42	1430	1427.52	-2.48
3	2415	2413.63	-1.37	1590	1588.99	-1.01
4	1990	1991.55	1.55	1520	1519.61	-0.39
5	2094	2095.05	1.05	1120	1122.10	2.10
6	2256	2256.80	0.80	1740	1740.52	0.52
7	2018	2018.65	0.65	1670	1667.04	-2.96
8	2799	2799.06	0.06	2620	2619.93	-0.07
9	1475	1475.20	0.20	1460	1462.34	2.34
10		1663.20			1191.95	
11		1906.30			1070.24	
12		1701.90			1222.25	
13		1475.30			1537.44	
14		1476.50			1126.15	
15		1869.50			1117.89	
16		2020.30			1513.32	
17		1528.20			1100.74	
18		1546.60			993.83	
19		1377.10			1211.43	

参 考 文 献

王崇浩, 1997. 三峡水库建成后荆南三口洪道及洞庭湖淤积概算. 水利水电技术, 28(11): 16—20

方春明, 毛继新, 陈绪坚, 2007. 三峡工程蓄水运用后荆江三口分流河道冲淤变化模拟. 中国水利水电科学研究院学报, 5(3): 181—185

卢宏伟, 曾光明, 张硕辅, 2004. 三峡工程的运行对洞庭湖水环境的影响. 环境工程, 22(1): 61—64

卢金友, 1996. 荆江三口分流分沙变化规律研究. 泥沙研究, (4): 54—61

卢金友, 罗恒凯, 1999. 长江与洞庭湖关系变化初步分析. 人民长江, 30(4): 24—26

卢金友, 黄悦, 宫平, 2006. 三峡工程运用后长江中下游冲淤变化. 人民长江, 37(9): 55—57, 87

卢承志, 2001. 洞庭湖治理与江湖关系. 湖南水利水电, (1): 13—15

卢承志, 2005. 江湖关系的现状与问题. 湖南水利水电, 6: 22—25

刘红, 何青, 徐俊杰等, 2008. 特枯水情对长江中下游悬浮泥沙的影响. 地理学报, 63(1): 50—64

李义天, 郭小虎, 唐金武等, 2009. 三峡建库后荆江三口分流的变化. 应用基础与工程科学学报, 17(1): 21—31

李学山, 王翠平, 1997. 荆江与洞庭湖水沙关系演变及对城螺河段水情影响分析. 人民长江, 28(8): 6—8

李景保, 刘晓清, 1993. 荆江裁弯与葛洲坝兴建对洞庭湖水情

的影响. 湖南师范大学自然科学学报, 16(4), 362—368

李景保, 常疆, 吕殿青等, 2009. 三峡水库运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应. 地理学报, 64(11): 1342—1352

吴作平, 2003. 荆江—洞庭湖水沙数学模型研究. 水利学报, (7): 96—100

吴作平, 杨国录, 甘明辉, 2002. 荆江—洞庭湖水沙关系及调整. 武汉大学学报(工学版), 35(3): 5—8

张细兵, 卢金友, 王敏等, 2010. 三峡工程运用后洞庭湖水沙情势变化及其影响初步分析. 长江流域资源与环境, 19(6): 640—643

陈绍金, 2004. 浅析三峡工程建成后对洞庭湖水环境的影响. 水资源保护, 20(5): 33—37

林承坤, 高锡珍, 1994. 水利工程修建后洞庭湖径流与泥沙的变化. 湖泊科学, 6(1): 33—39

罗敏逊, 卢金友, 1998. 荆江与洞庭湖汇流区演变分析. 长江科学院院报, 15(3): 11—16

姜加虎, 黄群, 1996. 三峡工程对洞庭湖水位影响研究. 长江流域资源与环境, 5(4): 367—374

洪林, 董磊华, 李文哲, 2007. 三峡工程建库后对洞庭湖水位、泥沙和水质的影响分析. 中国水利, (6): 13—14

宫平, 杨文俊, 2009. 三峡水库建成后对长江中下游江湖水沙关系变化趋势初探. 江湖关系及槽蓄影响初步研究. 水力发电学报, 28(6): 120—125

秦文凯, 府仁寿, 王崇浩等, 1998. 三峡建坝前后洞庭湖的淤积. 清华大学学报(自然科学版), 38(1): 67—84

- 郭小虎, 韩向东, 朱勇辉等, 2010. 三峡水库的调蓄作用对荆江三口分流的影响. 水电能源科学, 28(11): 48—51
- 黄群, 孙占东, 姜加虎, 2011. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析. 湖泊科学, 23(3): 424—428
- 渠 庚, 唐 峰, 刘小斌, 2007. 荆江三口与洞庭湖水沙变化及影响. 水资源与水工程学报, 18(3): 94—97
- 彭玉明, 段文忠, 陈永华, 2007. 荆江三口变化及治理设想. 泥沙研究, (6): 59—65
- 谢永宏, 陈心胜, 2008. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究, 29(6): 684—687
- 穆锦斌, 张小峰, 许全喜, 2008. 荆江三口分流分沙变化研究. 水利水运工程学报, (3): 22—28
- 戴志军, 李为华, 李九发等, 2008. 特枯水文年长江河口汛期盐水入侵观测分析. 水科学进展, 19(6): 100—105
- Dai J Z, Liu J T, 2013. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: an example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). Journal of Hydrology, 480: 10—18
- Dai, Z J, Du, J Z, Li, J F *et al*, 2008. Runoff characteristics of the Changjiang River during 2006: effect of extreme drought and the impounding of the Three Gorges Dam. Geophys Res Lett, 35(7), <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL033456>
- Dai, Z J, Du, J Z, Zhang, X L *et al*, 2011. Variation of riverine material loads and environmental consequences on the Changjiang estuary in recent decades. Environ Sci Technol, 45: 223—227
- Karunanithi N, Grenney W J, Whitley D *et al*, 1994. Neural Network for River Flow Prediction. J Computer Civil Engineering, 8(2): 201—220

THE IMPACT ANALYSIS OF THE RELATIONS BETWEEN DONGTING LAKE AND THE THREE OUTLETS OF JINGJIANG RIVER AFTER THE THREE GORGES PROJECT OPERATION

HU Guang-Wei^{1,3}, MAO De-Hua¹, LI Zheng-Zui², TIAN Zhao-Hui³

(1. Institute of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. Hunan Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changsha 4100073, China;

3. Hunan Provincial Institute of Land-and-Resource Planning, Changsha 410007, China)

Abstract Since impoundment on June 1, 2003, the Three Gorges Reservoir (TGR) began to play comprehensive roles in flood control, power generation, and navigation, etc. In order to study the changes of erosion, hydrological response, relationship between river and lake, variations in the condition of water and sediment movements in the Dongting Lake area since the operation of TGR. Hydrological and sediment observation data were analyzed systematically to understand the water and sediment in-and-out of the TGR. In addition, by applying the BP Neural network, variation coefficient and accumulation curve of water and sediment were calculated or depicted, to study the material transportation from the Dongting Lake to the Changjiang (Yangtze) River, and the variation of water and sediment within the lake. Results show that: (1) in inter-annual and inter-decadal scales, reduction of precipitation in the upper reaches of Changjiang River and the construction activities of TGR are the main factors causing variation of materials in the lake; (2) the sharp decrease of flow-in water and sediment downstream the TGR has caused siltation at the Sankou Section (the three outlets of Jingjiang River) and the demise of other two tributaries who are no longer function as a normal river; and (3) the accumulated amount of sediment in Dongting Lake in 2003—2011 is merely 2301×10^4 t, a 95.6% reduction of that in 1994—2002. In addition, using BP neural network could simulate precisely the amount the runoff and sediment in Dongting Lake, providing a tool for effective utilization and scientific management over the complicated river-basin system.

Key words the Three Gorges Reservoir; Dongting Lake; three outlets of the Jingjiang River; water and sediment variation