

三峡工程调节作用对洞庭湖水面面积(2000—2010年)的影响*

袁敏^{1,2}, 李忠武^{1,2**}, 谢更新^{1,2}, 梁捷^{1,2}, 赵新娜^{1,2}, 姜燕松^{1,2}, 彭也茹^{1,2}, 张艳^{1,2}

(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)

摘要: 以洞庭湖为研究对象, 以 11 年(2000—2010 年) Terra/MODIS 16 d 最大值合成的植被指数数据产品集 MOD13Q1 和同期城陵矶水文监测站的水位数据为主要数据源, 通过对 *NDVI* 和 *NIR* 分别设定阈值的方法, 实现了洞庭湖水面面积的综合提取, 分析了三峡工程建设背景下, 洞庭湖水面面积的年际变化特征和年内变化规律, 再结合城陵矶水位数据, 对水位与水面面积之间的定量关系进行了深入分析。研究结果表明: 三峡工程的运行, 很大程度上控制着洞庭湖的入湖水量, 对洞庭湖防汛工作有利; 在气候变化、三峡水库的共同影响下, 洞庭湖区水面面积整体上呈减少趋势; 水面面积与水位的拟合结果显示两者具有良好的相关性, 其中 2000—2003 年两者的确定性系数达到 0.975。

关键词: MODIS; 水面面积; 三峡工程; 洞庭湖

Effects of the Three Gorges Project on the water surface area of Lake Dongting, 2000—2010

YUAN Min^{1,2}, LI Zhongwu^{1,2}, XIE Gengxin^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}, ZHAO Xinna^{1,2}, JIANG Yansong^{1,2}, PENG Yeru^{1,2} & ZHANG Yan^{1,2}

(1: *College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China*)

(2: *Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, P. R. China*)

Abstract: Taking MOD13Q1 (vegetation indices 16-day L3 globe 250 m) dataset, which is a data production composited by Terra/MODIS of 11 years as a main data source of Lake Dongting, the water surface area of Lake Dongting were extracted by setting threshold values on *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) and *NIR* (Near InfraRed). Under the background of the Three Gorges Project, combined with the data of water area and water level, the paper analyzed the interannual variation features and the variation rule within a year of water area in Lake Dongting, and deeply explored the quantitative relationship between water level and water surface area by integrating with water level data of Chenglingji hydrological station. The result indicated that the Three Gorges Project largely controls the water yield from the Yangtze River into Lake Dongting; Under the effects of climate change and the operation of Three Gorges Project, Lake Dongting area has a decreasing trend on the whole; The fitting result indicates that water surface area has good correlation with water level and the deterministic coefficient of the fitting curves was 0.975 from 2000 to 2003.

Keywords: MODIS; water surface area; Three Gorges Project; Lake Dongting

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程, 其建设对生态及环境影响的利弊问题, 从建设之初到建成后一直是国内外学术界研究的热点和争议点^[1]。三峡工程于 1994 年开工建设, 2003 年 6 月下闸, 到 2006 年汛后已蓄水至 156 m, 2009 年建设完成, 正常蓄水位 175 m。随着三峡工程阶段性蓄水的运行, 长江中下游的江

* 国家自然科学基金重点项目(51039001)、国务院三峡办洞庭湖湿地保护试点示范工程项目(SX2010-026)和教育部新世纪人才资助项目(NCET-09-330)联合资助。2013-01-25 收稿; 2013-05-08 收修改稿。袁敏(1988~), 女, 硕士研究生; E-mail: yingyu150@126.com。

** 通信作者; E-mail: lizw@hnu.edu.cn。

湖关系更加复杂,包括水文、泥沙、生态以及环境等方面在内的大量科学问题有待进一步探讨.

郭小虎等^[2]从分流分沙方面分析了三峡工程运行后对长江中下游江湖关系造成的影响;李倩^[3]开展了三峡工程背景下洞庭湖水质评价、健康风险评价及其对湿地植物生长等生态环境研究.洞庭湖是长江中下游地区不可替代的防洪屏障,湖泊水面作为重要的水情信息,其在三峡工程建成前后的变化特征研究,对于湖泊的可持续发展和长江中下游水量平衡有着重要意义^[4].赖锡军等^[5]运用耦合水动力模型证明了三峡蓄水对洞庭湖水情产生重要影响,利用BP神经网络和河流动力学 Saint Venant 方程组模拟和预测,区分出三峡的影响分量,并认为三峡蓄水对洞庭湖水位产生了较大影响.彭定志等^[4,6]分别提取洞庭湖、鄱阳湖的水面面积,并结合实测水位建立二者的定量关系,从而实现了水面面积的动态监测.这些研究成果为三峡工程建设对洞庭湖水位、水面的影响研究奠定了基础,但以上研究没有综合考虑三峡工程建设导致的上游来水来沙变化对下游河道和湖泊演变的长期效应,同时在进行水面面积和水位的统计分析中,样本数量偏少使其代表性并不十分充足,精确性有待提高.因此,在三峡工程建设及气候变化等因素的共同作用下,洞庭湖水域面积的变化规律情况及其与水位变化的关系有待进一步开展研究.

常规的湖泊监测不仅受到人力财力的限制,在时间和空间上亦很难实现对湖泊水体全面、动态的监测.遥感技术广阔的空间范围及获取的高质量影像数据使得其在大尺度研究上具有无可比拟的优势.在众多的遥感数据源中,中分辨率成像光谱仪(MODIS)具有高时间分辨率的优点,每1~2d获取全球观测资料1次,拥有Terra和Aqua两颗卫星在数据采集时间上形成互补.在MODIS影像中,在可见光红光范围(0.62~0.67 μm)水体相对其它地物反射率较高,而在近红外波段范围(0.841~0.876 μm)水体反射率远远低于植被、土壤等.研究表明,MODIS影像数据产品可有效地用于湖区植被监测、水文遥测等,也可用于描述湖区表面生物物理性质和过程^[4,6-7].本研究利用2000—2010年洞庭湖MODIS影像数据,分别提取11年同时期遥感影像水面面积数据,将水面面积与城陵矶水位数据结合,寻求三峡工程建设背景下洞庭湖水面面积的年内变化规律及年际变化规律.研究结果可为进一步探讨长江中下游复杂的水文情势和洞庭湖流域生态安全提供参考.

1 研究区域和方法

1.1 研究区域概况

洞庭湖(28°30'~30°20'N,110°40'~113°10'E)是我国五大淡水湖之一,位于长江荆江南岸,跨湘、鄂两省,主要由东洞庭湖、西洞庭湖、南洞庭湖组成.北有松滋、太平、藕池、调弦(1958年已堵塞)四口(以下简称“三口”)引长江水来汇,南面和西面有湘江、资水、沅江、澧水(以下简称“四水”)注入,湖水经城陵矶排入长江,因此洞庭湖成为长江中下游既能够容纳四水也可以吞吐长江的通江湖泊.洞庭湖对长江中下游地区缓解洪涝灾害、维系水沙平衡等具有不可替代的作用,既是长江中下游水域生态平衡的重要功能区,同时也是具有国际意义的珍稀候鸟越冬栖息地.丰水时期湖泊蓄水量约为 $85 \times 10^8 \text{ m}^3$,但枯水期仅为 $7 \times 10^8 \text{ m}^3$,不到丰水期的1/10,且近年来有连续减少的趋势.

1.2 MODIS 数据预处理

本研究中的数据预处理分为3个步骤:

1) 运用遥感软件ENVI 4.4和MRT(MODIS Reproject Tools)对MODIS数据进行研究区域裁剪、投影转换等预处理,使影像数据成为集中反映研究区概况和具有坐标统一、范围一致的完整性的研究数据集.MOD13Q1数据产品主要提供16d的植被指数影像数据,包含归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI),空间分辨率为250m,均来源于美国国家航空航天局(NASA)的GSFC卫星网站(<http://modis.gsfc.nasa.gov>).

2) 采用最大合成法(maximum value composite, MVC)预处理NDVI数据,时间范围为2000—2010年,每年共有23期影像.

3) 基于经过MVC处理后的数据集仍然存在较大的噪声影响和残差,在TIMESAT 3.1软件^[8-9]支持下,采用Savitzky-Golay滤波法进一步对NDVI影像数据分析和重构,经对比可以有效地解决噪声影响和突变部分,提高时序数据的滤波效果及质量.

1.3 洞庭湖水面的提取

目前利用遥感信息提取水体信息的方法通常有单波段法和多波段法,另外还有基于神经网络模型的算法及基于地理信息系统(GIS)及水力演进模型法^[10].在对目前解译水体遥感信息方法进行综合分析的基础上,本研究采用李景刚等提出的单波段阈值法和多源信息相结合的方法,该方法很好地消除了山体 and 云的阴影,也能够把水体和水生植物及其它地物区分开来,获得的水体提取效果最佳(图1).

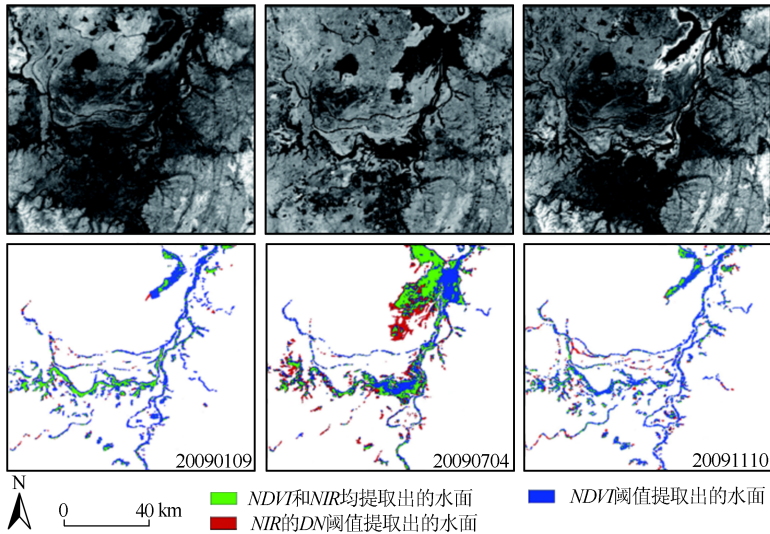


图1 基于 MOD13Q1 提取的洞庭湖各季节水面面积对比

Fig. 1 Comparison of the surface water area in different seasons by MOD13Q1 in Lake Dongting

洞庭湖区存在较大面积的杨树林、芦苇,水生植物和水体泥沙含量也将影响研究区水域范围的提取,本研究在李景刚等^[11]研究的基础上,采用通过确定 $NDVI$ (公式(1))和红外波段 DN 值两个阈值的方法提取水面.根据目视判读变换阈值,若 $0 < NDVI \leq 0.1$,则为水体;若红外波段的 $DN < 1000$,则同样也判定其为水体.将提取的水体信息结合 ArcGIS 9.2 软件进行栅格数据空间分析,进而通过计算得出水面面积.

$NDVI$ 采用非线性拉伸的方式增强了 NIR 和 R 的反射率对比度.一般情况下, $NDVI$ 为负值表示地面覆盖为云、水、雪等;为 0 表示有岩石或裸土等;为正值表示植被覆盖,且覆盖度越大比值越高.在近红外区,水体的反射率远远低于植被、土壤等,根据这个特点可用来区分水陆边界.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中, $NDVI$ 为归一化植被指数; NIR 为近红外波段地表反射值; R 为红光波段地表反射值.

2 结果与分析

2.1 三峡工程建成前后洞庭湖水面面积变化特征

总的来说,近年来洞庭湖水面面积总体上表现出一定程度的下降趋势(图2),其中在 2000—2010 年间,水面面积的变化在 $376.89 \sim 2557.94 \text{ km}^2$ 之间.考虑到三峡工程于 2003 年 6 月 1 日下闸蓄水,因此本文将研究时间分为 2000—2003(6 月前)年、2003(6 月后)至 2010 年两个时间段.

图 2 表明洞庭湖水面面积以每 23 期(即 1 年)遥感影像图为一个变化周期,其中 2000—2003 年周期的振幅明显高于 2004—2010 年周期,并且尤其高于 2004—2007 年周期,且波谷值相近.近年来洞庭湖水面面积的峰值大约出现在 2002、2003 年的 7、8 月份,达到 2557.94 km^2 ,而在枯水期,最小面积甚至不足 500 km^2 .在第二个时间段的 7 年(2004—2010 年)间,水面面积最大值正常情况下均不超过 2000 km^2 .彭佩钦等^[12]从洞庭湖滩地出露天数和面积的角度,认为三峡工程建成后所有高程的滩地出露天数总体上将逐渐增加,滩地出露

天数的增加将使得洞庭湖低水位面积天数相应增加,这与本研究的结果一致。

2000—2010年洞庭湖城陵矶水位与水面面积曲线趋势整体上保持一致,但又并非严格一致,说明两者之间具有一定的相关性,但也存在影响两者关系的因子。水面面积曲线在2008年末出现一个波峰,高于近年同时期的面积,水位也处于异常极端的状态。从气候的角度来看,影响湖泊水面面积变化的主要气候因素是降水,流域内的极端降水在一定程度上影响入湖水量,从而导致极端水面面积的情况;洞庭湖近10年来春季和秋季降水量较以往有所减少,而夏季和冬季有所增加^[13]。三峡水库多年来阶段性蓄水时期处于降雨量减少的9月,二者相互作用使洞庭湖区水量补给减少,水面缩减。自2003年以来,“三口”平均径流量减少约 $126.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,补给水量的减少使入湖水量锐减,从而加剧了洞庭湖水面面积近年来的缩减。

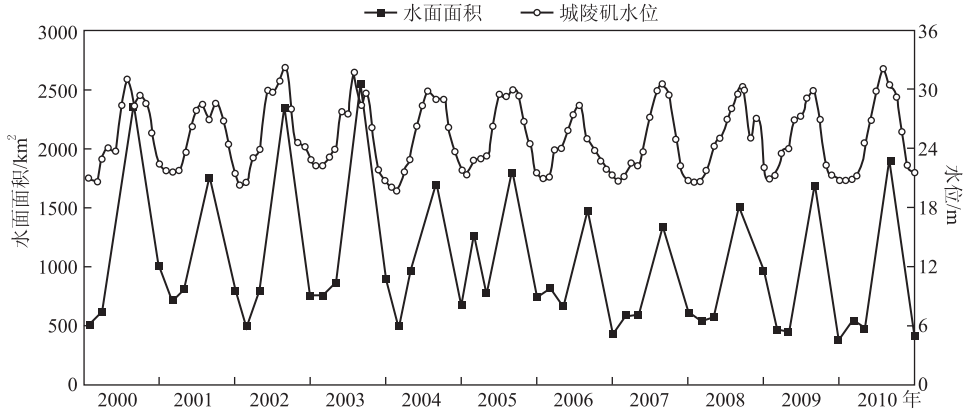


图2 2000—2010年洞庭湖水面面积和城陵矶水文站水位变化

Fig. 2 Variation of the surface water area of Lake Dongting and water level of Chenglingji hydrological station from 2000 to 2010

从年度内变化来看,洞庭湖水面呈现规律性的涨落,具有明显的季节性特征,一年中的不同时期(平水期、丰水期、枯水期)湖泊水面的轮廓形态各异(图1)。通过对洞庭湖多年水面面积和水位数据的研究发现,一般每年4月上旬水位开始上涨,水面面积也随着扩大,5—6月进入汛期,7—9月出现年最高水位,10月中旬湖水逐渐退落,到次年1—2月出现年最低水位,同时湖泊水面面积达到最小。

各年洞庭湖丰水期水面面积与枯水期水面面积的比值越大,说明水面面积在一年中变化的范围和跨度越大,可对比反映出湖面年际变化的稳定性(图3)。可以看出,2002年丰水期和枯水期的水面面积相差近5倍,

最能体现“涨水是湖、落水为洲”的特点,整体趋势线的走向朝下。三峡水库蓄水的前几年(2004—2006年)枯水期的水面面积略高于近几年(2007—2010年),2005年长江上游泄洪和洞庭湖流域普降暴雨使得枯水期出现短暂的极端高值,造成比值偏低;三峡水库蓄水前(2000—2003年)和蓄水后的近几年(2007—2010年),枯水期水面面积趋于相对稳定,比值变小,由此可见丰水期面积在逐渐减小。

在长江与洞庭湖复杂的“江湖关系”系统中,“三口”作为连接长江与洞庭湖的纽带,由于三峡水库的调节作用而带来的长江中下游水沙变化,必然引起洞庭湖区水位、水面面积作出响应。据统计数据显示,1999—2002年“三口”年

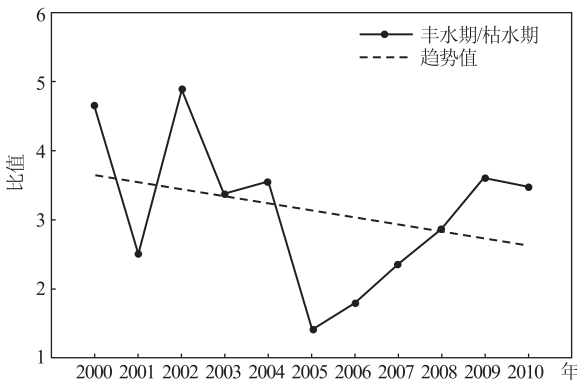


图3 洞庭湖丰水期/枯水期水面面积比值

Fig. 3 The ratio of high water season to low water season of water surface area in Lake Dongting

平均径流量为 $625.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1), 自 2003 年三峡工程初运行后, 其年平均径流量整体上有下降, 其中, 2006 年特枯年减少到 $182.5 \times 10^8 \text{ m}^3$; 同时期内, 三峡水库蓄水前 (2000—2002 年) 洞庭湖年均水面面积为 935.84 km^2 , 蓄水后 (2003—2005 年) 年均水面面积减少至 880.11 km^2 , “三口” 年均径流量最小的 2006 年, 水面面积也达到多年平均值的最小值, 仅为 619.61 km^2 , 蓄水后的近几年 (2007—2010 年) 年均水面面积略有增加, 与 “三口” 年均径流量小幅度增量表现出一致性, 2010 年已增加至 862.66 km^2 . 由此可见, 三峡水库运行期间对 “三口” 的年均径流量的控制, 直接影响入湖水量而成为年际水面面积波动的重要因素.

表 1 荆江三口多年平均径流量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) 变化^[17]
Tab. 1 Variation of annual runoff amount in three outlets

统计时段	枝城站	松滋口		太平口 弥陀寺	藕池口		三口 合计
		新江口	沙道观		康家岗	管家铺	
1951—1958 年	4667.3	342.3	147.7	208.4	30.3	728.7	1457.4
1959—1966 年	4574.2	334.2	155.8	215.3	27.6	602.4	1335.3
1967—1972 年	4302.0	321.5	123.9	185.8	21.4	368.8	1021.4
1973—1980 年	4441.6	322.7	104.8	159.9	11.3	235.6	834.6
1981—1998 年	4438.3	294.9	81.7	133.4	10.3	178.3	698.6
1999—2002 年	4454.2	277.7	67.2	125.6	8.7	146.1	625.3
2003 年	4232.4	256.9	69.31	105.7	7.2	129.6	568.7
2004 年	4218.2	253.2	57.68	103.7	4.6	105.1	524.3
2005 年	4545.1	300.8	76.17	122.8	7.1	136.5	643.3
2006 年	3083.2	108.7	10.4	34.3	0.47	28.7	182.5
2007 年	4238.9	256.7	61.0	99.7	3.9	120.0	541.3
2008 年	4368.7	257.0	56.1	98.7	5.9	112.9	530.6
2003—2008 年	4147.8	238.9	55.11	94.15	4.9	105.5	498.5

据三峡水库的调度运行方式, 每年的 5—6 月为汛前腾空库容时期, 需要下泄水量以达到汛限水位. 从 2003—2010 年监测数据来看, 这一时期洞庭湖水面面积均有不同程度的增加, 其中以 2006 年增加最多^[7], 达 698.45 km^2 , 同时 “三口” 入湖径流增加 $3.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[14]. 在容易发生较大洪水的 7—8 月, 三峡水库通过拦蓄洪水、稳定泄洪、错开洪峰, 从而发挥防洪效益. 2010 年发生的特大洪水期间, 三峡水库实行调洪调度, 总拦洪超过 $230 \times 10^8 \text{ m}^3$, 减少了入湖洪量, 水面面积约为 1800 km^2 , 相比往年同期稍有增加, 由此可见, 洞庭湖水面面积对三峡水库拦洪蓄峰过程存在一定程度的响应. 水面面积监测结果显示, 三峡水库运行后的几年, 夏末秋初时节水面面积均有下降或提前缩小的趋势, 而根据三峡水库调度方案, 9—11 月适逢三峡水库蓄水阶段, 这一时期水库水位将升至 175 m , 下泄流量减少, “三口” 入湖径流减少. 每年的 12 月至次年 4 月, 三峡水库实行补水调度, 即降低水位、增泄流量从而调节长江中下游河道的水量. 李景保等^[14] 的研究表明, 在此期间, “三口” 入湖径流量在平水年、枯水年和丰水年有不同程度的增加, 但影响期内城陵矶径流量在平水年和丰水年均减少而枯水年略有增加. 根据水面面积的监测数据, 2006 年水面面积达 811.58 km^2 , 而同期 2004 年 (平水年) 和 2010 年 (丰水年) 水面面积分别为 426.96 km^2 和 498.38 km^2 , 相比三峡工程蓄水前的水面面积, 表明三峡补水调度对于枯水年的洞庭湖面积调节作用相对明显. 由此可见, 三峡水库调度在一年中的预泄、调洪、蓄水、补水 4 个时段对洞庭湖水面面积的影响, 是其水面面积年内变化的重要因素之一.

综上所述, 三峡工程自 2003 年 6 月运行后, 平均水位 (图 4) 和水面面积均有不同程度的下降, 表明三峡工程对进入洞庭湖的下泄水具有一定控制性作用, 这对于洞庭湖防汛减灾工作和洞庭湖区农作物生长具有显著影响^[15]; 2003—2010 年秋季降水的减少和三峡工程试运行期间阶段性蓄水的共同作用下, 洞庭湖区夏秋季连旱的程度加重, 洲滩出露天数增加, 将影响洞庭湖生态系统的稳定性, 并对区域生态环境质量造成一定的影响^[7].

2.2 三峡工程建设前后水面面积变化的影响因素分析

2.2.1 降水 流域内降水是湖泊水量补给的主要途径之一, 某个时间段内的强降雨可能使湖泊水面面积突

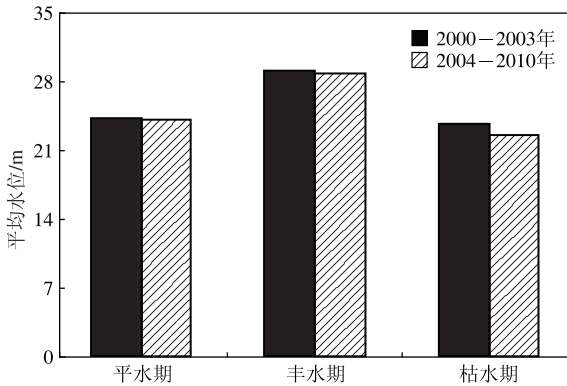


图4 平水期、丰水期和枯水期的平均水位

Fig. 4 The average water level in the tap water season, high water season and low water season

表2 洞庭湖流域季节降水量均值^[11]

Tab. 2 The average seasonal precipitation in Lake Dongting

季节	降水量均值/mm		
	1960—2008年	1971—2000年	1999—2008年
春季	470.5	466.9	460.6
夏季	507.8	513.0	527.6
秋季	244.8	247.6	219.3
冬季	158.6	159.6	164.5
全年	1381.7	1387.1	1372.1

增而带来水位升高、洪水等生态风险,降水少的季节也可能引起入湖河道干涸、洲滩出露天数延长等现象.三峡工程建成对气候的影响受到国内外学者广泛关注.普遍认为,在全球气候变化的背景下,三峡工程对气候的影响微不足道,自1990s以来,整个西南地区、长江流域的降水都呈减少趋势^[16],三峡工程建成之前降雨就已经偏少.洞庭湖流域属典型的亚热带季风气候,是长江流域气候变化极为显著的区域,根据2000—2010年间的气象观测数据,洞庭湖流域最大年降水量是2002年,达到1836.6 mm,其余年份稳定在1300 mm左右.从季节上看,冬季年平均降水量最少而夏季最多,春、秋季降水量处于二者之间,与洞庭湖区枯水期、丰水期以及平水期的划分较为一致,由此可见,降水对洞庭湖水面面积的影响是显而易见的;当前的研究普遍将一年的5—9月划分为洞庭湖的丰水期,12月至次年2月划为枯水期,春季(3—5月)和秋季(9—11月)同为洞庭湖平水期.从总体上看,春季多年平均降水量略高于秋季(表2)^[11],并且自2003年开始三峡水库夏末秋初的蓄水,入湖水量减少,降水、三峡水库的双重作用造成平水期水位的波动,与遥感监测的洞庭湖水面面积结果一致(图2),表明洞庭湖流域降水可能是影响湖水面积的主要气候要素.

面积的主要气候要素.

2.2.2 径流 洞庭湖主要接受来自“三口”、“四水”的水源补给,从三峡水库蓄水前与蓄水后年平均径流量比较来看(表1),三口由 $625.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $498.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,降幅为20.3%;四水的年平均入湖水量由 $1815 \times 10^8 \text{ m}^3$ 缩减到 $1516 \times 10^8 \text{ m}^3$,降幅为16.5%^[17].1999—2002年,“三口”和“四水”全年入湖总水量约为 $2813 \times 10^8 \text{ m}^3$,而三峡工程运行初期(即2003—2008年),全年入湖水量减少了约20%,为 $2304 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[17].作为洞庭湖主要的来水通道,“三口”、“四水”发挥了重要的补给作用,径流会由于自然或外力的原因减小,湖水再经由城陵矶流入长江.在城陵矶出口流量基本稳定的情况下,入湖水量的减少必然引起湖面面积缩减,这使得江河径流成为水面面积变化的动力因素之一.

2.2.3 人类活动 特定的自然环境和剧烈的人类活动,使洞庭湖成为我国洪涝灾害最严重的地区之一.1950s—1970s的人工围垦,使得湖面面积明显缩小,到21世纪初(2003年)洞庭湖共减少了近1700 km²的面积,这严重影响了洞庭湖的调蓄能力;“98洪灾”后的退田还湖工程,在展开综合治理的3年内,湖面面积扩大554 km²;2004年完成的河湖疏浚工程,对四水以及洞庭湖的洪道进行疏挖,增加湖泊容积 $3.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占洞庭湖总容积的2%^[18],部分湖区湖泊敞水区域加大.

三峡工程对洞庭湖水位的影 响,首先是通过改变长江水情而产生作用的.洞庭湖城陵矶的水位分别在2003年6月、2006年10月和2009年11月达到同时期水位的波谷期(图2),这主要与三峡工程2003年开始的阶段性蓄水有关.三峡工程从开始蓄水时135 m的水位到2009年已成功蓄水至175 m,在蓄水期内城陵矶水位平均下降1.32 m^[5].洞庭湖接纳的长江三口分流来水减少,断流时间延长,加之2006和2009年出现罕见的旱灾,加剧了洞庭湖水位的下降.三峡水库蓄水初期,泥沙沉积汇集,库区泥沙淤积显著增加^[19],由于库区对泥

沙的拦截,入湖泥沙明显较蓄水前少,从根本上延缓了洞庭湖区泥沙淤积的速率,但湖区原本含沙量很大,因此在短时间内仍处于淤积状态,湖底缓慢地抬高,洲滩淤积增长,将使得洞庭湖的水面面积仍在逐渐缩小。

2.3 三峡工程建设前后洞庭湖水面面积与城陵矶水位的相关性研究

考虑到城陵矶水文监测站处于洞庭湖出口附近,且与长江连接,更能实时反映洞庭湖水位的变化,因而面积-水位的对应关系更加明显.因此,本研究主要以城陵矶水文监测站为典型断面,来探讨洞庭湖水面面积和水位之间的相关性。

洞庭湖水面面积同水位的趋势线具有较为紧密的联系(图2).为进一步研究二者间的相关性,将2000—2010年间的水位数据与水面面积数据进行拟合,同时考虑到三峡工程于2003年开始运行,因此将研究数据分成2000—2003年、2003—2010年(以下简称时间段a和时间段b)两个时间段分别拟合.图5反映了二次曲线、对数模型和指数模型3种模型的拟合结果(表3).

根据拟合结果,二次曲线能较好地描述时间段a内洞庭湖水面面积与水位的相互关系,确定性系数最高,达到0.975(公式(2)),对数拟合和指数拟合次之,并且在同一种拟合模型中,时间段a的确定性系数高于时间段b.

$$Y = 16.142x^2 - 664.504x + 7482.751 \quad (2)$$

式中, Y 为湖面面积; x 为城陵矶水位.

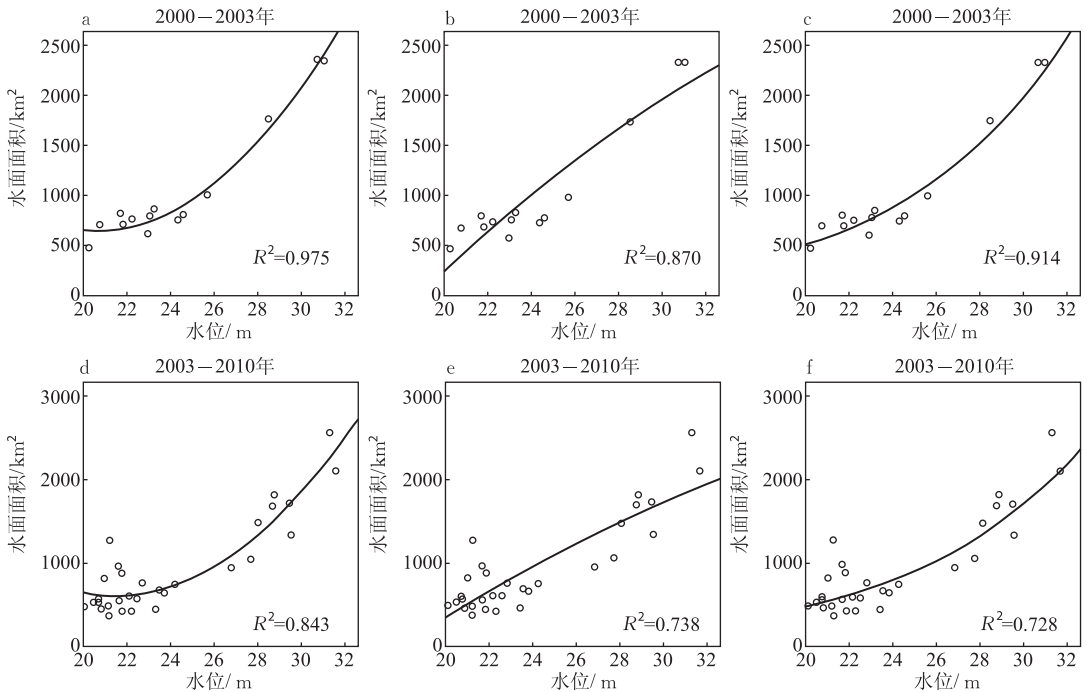


图5 水面面积-水位的二次多项式拟合(a,d)、对数拟合(b,e)、指数拟合曲线(c,f)

Fig. 5 The two polynomial fitting(a,d), logarithmic function fitting(b,e) and exponential fitting curve(c,f) between surface water area and water level

城陵矶水位与水面面积有着良好的二次曲线关系(图5),可通过监测水位实现对洞庭湖洪涝期水面面积的预测,以弥补天气状况差时遥感监测的不足^[4].洞庭湖多年平均水位为25.07 m,最高水位为2012年7月23日的33.08 m(城陵矶),原因是受强降雨影响,沅江出现洪峰,加上三峡水库不断加大泄洪量,造成洞庭湖水位全面上涨.一般情况下,洞庭湖流域进入汛期的时间是4月份,湖泊水位开始抬升,到7、8月份水位达到最高,此时洞庭湖也达到一年中的丰水期,随后由于长江汛期和三峡水库蓄水的影响,水位开始在9、10月提前或者正常稳定下降,直到次年1、2月水位降至最低.这个变化过程长期而相对缓慢,因而能保持水位

与水面面积较好的对应关系,而强降雨、三峡泄水等突发性事件引起的洞庭湖水位上升,导致水陆界限模糊,是影响遥感水体解译精度下降的重要原因,因此,水位高度突变可能是影响拟合效果的一个因素.

此外,水位和水面面积的拟合系数受湖底高程的影响,西洞庭湖湖底高程大于南洞庭湖,东洞庭湖相对平缓(图6),因此西洞庭湖区水位下降得最快,南洞庭湖次之,湖底高程差异必然影响两者间的定量关系^[20].相关研究认为,在水沙进入湖区导致湖底淤高的历史时期,洞庭湖区一直处于缓慢的沉降之中,构造沉降导致高程降低、水位与地面高差增大,且沉降运动具有东强西弱、南强北弱的规律^[21-22].

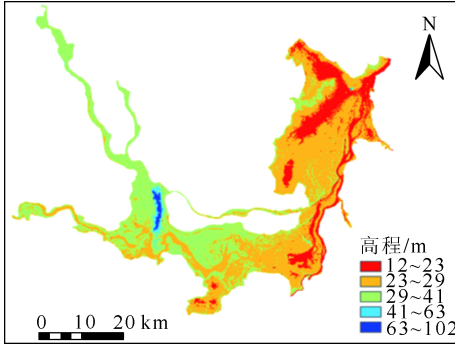


图6 洞庭湖湖底高程

Fig. 6 The elevation of Lake Dongting

3 结论

本文通过对MODIS 16 d最大值合成的植被指数影像数据产品集MOD13Q1滤波、裁剪、投影等处理,提取了2000年1月至2010年12月期间洞庭湖水面面积,结合同时期城陵矶水位观测数据,在三峡工程建设背景下对其进行了监测研究.研究结果表明:

1) 在三峡工程建设背景下,洞庭湖水面面积在2003年三峡工程开始蓄水后整体上呈现缩小趋势,三峡工程2003、2008、2009年夏末秋初的蓄水行为对洞庭湖水面面积的变化起到直接影响,是加剧夏秋连旱的重要因素之一.

2) 在降水、径流以及人类活动的共同驱动下,洞庭湖水面面积变化呈现季节性特征,年际变化特点与降水、径流均表现出一致相关性.

3) 洞庭湖水面面积与水位在变化趋势上表现出一定相关性,拟合结果显示,二次曲线拟合能较好地描述水面面积与城陵矶水位的关系,拟合方程为 $Y = 16.142x^2 - 664.504x + 7482.751$.根据拟合方程,采用水位监测数据来估算洞庭湖水面面积,能弥补天气状况不佳时遥感监测的不足.但是由于洞庭湖面积较大,单个水位监测站的数据对水面面积的描述可能不尽完善,这是后续工作中需要重视的方面.

三峡工程的运行加剧了长江中下游水文情势的复杂性,对洞庭湖水域面积的影响不容忽视,加上近年来全球气候的剧烈变化、河流改道等人类活动影响,使得互相作用的因子更为繁多和复杂,因此,洞庭湖水面面积变化的研究需要进一步加强对诸多影响因子的关注.

4 参考文献

- [1] Fearnside PM. China's Three Gorges Dam: "Fatal" project or step toward modernization. *World Development*, 1988, **16**: 615-630.
- [2] 郭小虎,朱勇辉,渠庚等.三峡水库蓄水后江湖关系的研究. *水电能源科学*, 2010, **28**(12): 33-35, 132.
- [3] 李倩.三峡工程对洞庭湖生态环境的影响[学位论文].长沙:湖南大学,2005.
- [4] 李辉,李长安,张利华等.基于MODIS影像的鄱阳湖湖面积与水位关系研究. *第四纪研究*, 2008, **28**(2): 332-337.
- [5] 赖锡军,姜加虎,黄群等.三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 178-184.
- [6] 彭定志,徐高洪,胡彩虹等.基于MODIS的洞庭湖面积变化对洪水位的影响. *人民长江*, 2004, **35**(4): 14-16.

- [7] 蔡 青,黄 璐,梁 婕等.基于 MODIS 遥感影像数据的洞庭湖需水量估算. 湖南大学学报:自然科学版,2012,**39**(4):64-69.
- [8] Chen J, Jonsson P, Tamura M *et al.* A simple method for reconstructing a high quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**: 332-344.
- [9] Bradley BA, Jacob RW, Hermance JF *et al.* A curve fitting procedure to derive inter-annual phonologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **106**: 137-145.
- [10] 葛小平,许有鹏,张 琪等. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟. 水科学进展,2002,**13**(4):456-460.
- [11] 李景刚,李纪人,黄诗峰等. Terra/MODIS 时间序列数据在湖泊水域面积动态监测中的应用研究——以洞庭湖地区为例. 自然资源学报,2009,**24**(5):923-933.
- [12] 彭佩钦,童成立,仇少君. 洞庭湖洲滩地年淹水天数和面积变化. 长江流域资源与环境,2007,**16**(5):685-689.
- [13] 蒋卫国,侯 鹏,朱晓华等. 洞庭湖植被对降水的响应. 地理学报,2011,**21**(1):135-149.
- [14] 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.
- [15] 梁忠民,郭 彦,胡义明等. 基于 copula 函数的三峡水库预泄对鄱阳湖防洪影响分析. 水科学进展,2012,**23**(4):485-492.
- [16] 唐晶晶. 1952—2007 年间长江流域降水时空分布变化[学位论文]. 上海:华东师范大学,2010.
- [17] 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.
- [18] 安贞煜,曾光明,张硕辅等. 疏浚对洞庭湖水环境容量的影响分析. 湖泊科学,2006,**18**(5):509-514.
- [19] 假冬冬,邵学军,张幸农等. 三峡水库蓄水初期近坝区淤积形态成因初步分析. 水科学进展,2011,**22**(4):539-545.
- [20] 刘延锋,靳孟贵,曹英兰等. 基于 DEM 的博斯腾湖水面面积和库容变化特征. 中国科技论文在线, [http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/200511-473](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200511-473).
- [21] 陈国金. 江汉—洞庭湖平原区洪灾形成与防治的环境地质研究. 中国水利,2008,(15):27-31.
- [22] 黄第藩,杨世倬,刘中庆等. 长江下游三大淡水湖的湖泊地质及其形成与发展. 海洋与湖沼,1965,**7**(4):409-413.