

基于 MODIS 遥感影像的 洞庭湖面积与水位关系研究

宋求明¹, 熊立华¹, 肖义², 陈旋³, 刘良明³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 长沙 410007; 3. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430072)

摘要:以湖南省洞庭湖区为研究对象,应用 MODIS 遥感数据计算出洞庭湖水面面积。结合洞庭湖地区水文站的水位数据,建立 2003-2006 年的洞庭湖面积~水位关系曲线,为洞庭湖地区的水面面积实时监测提供了技术支持。通过对各水文站点的比较分析,得出城陵矶、岳阳、鹿角站等靠近洞庭湖入江口的水文站点,其面积~水位曲线的拟合相关性较高。在 2003-2006 年间,依据城陵矶站每年的面积~水位关系曲线推算的洞庭湖面积随水位变化的规律不一致,存在波动。在一定的时间、水位限制条件下,水位相同时,由城陵矶站面积~水位关系曲线推算的洞庭湖面积有减小的趋势。

关键词:MODIS; 面积; 水位; 趋势拟合; 洞庭湖

中图分类号:T V213.4 **文献标识码:**A

Study on Relationship between Lake Area and Water Level of Dongting Lake Based on MODIS Images

SONG Qiu-ming¹, XIONG Li-hua¹, XIAO Yi², CHEN Xuan³, LIU Liang-ming³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Dongting Lake Water Resources Administration Bureau of Hunan Province Changsha 410007, China;

3. Remote Sensing Information Engineering College, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, MODIS data is used to calculate the water surface areas of the Dongting Lake, which, together with the hydrological stations' water level data from 2003 to 2006, are then employed to derive the area-water level curves of the Dongting Lake. It is found that the fitted area-water level curves for three stations (Chenglingji, Yueyang, Lujiiao stations) have the highest accuracy than those fitted curves for the other water level stations. From 2003 to 2006, the variation of the Dongting Lake area with the water level had been inconsistent, according to the derived relationships of the lake area to the water level at Chenglingji station for each year. Given the same water level, the Dongting Lake's area calculated by the derived relationship of the lake area to the water level at Chenglingji station tends to decrease.

Key words: MODIS; lake area; water level; trend fitting; Dongting Lake

0 引言

中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS)是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的一个重要的传感器,是卫星上唯一将实时观测数据通过 x 波段向全世界直接广播,并可以免费接收数据并无偿使用的星载仪器。两颗卫星过境时间互补,单星数据全球覆盖时间为 1~2 d,双星数据使覆盖时间缩小一半,全球许多国家和地区都在接收和使用

MODIS 数据^[1]。

MODIS 拥有数据免费、较高时间分辨率等特点^[2],因此众多研究者选择利用 MODIS 数据提取湖泊水体的特征信息,实现洪涝灾害易发区域的遥感监测评估。如彭定志等^[3]、李辉等^[4]先后利用 MODIS 影像数据分别提取了洞庭湖和鄱阳湖的水体面积,并结合实测水位数据分别建立了洞庭湖 2002 年、鄱阳湖 2001 年的面积~水位关系曲线,为实时水位监测湖面水面面积提供了依据。龟山哲等人^[5]、龚伟等^[6]利用 MODIS

收稿日期: 2011-01-11

基金项目: 湖南省水利厅科技项目(DGJKY-2010-006)资助。

作者简介: 宋求明(1984),男,硕士研究生,主要从事水文学水资源研究。E-mail: sqq1017@163.com。

传感器上 16 d 合成的 NDVI 产品数据测算洞庭湖水面面积, 龟山哲还结合洞庭湖区的 DEM 数据估算了洞庭湖 2002 年的蓄水量, 龚伟分别用年尺度和月尺度对估算的 2002-2007 年的洞庭湖面积变化趋势进行分析。李景刚等人^[7]利用 2005 年 MODIS 8 d 合成的数据对洞庭湖地区水域面积变化进行了动态监测, 提出了全年最大淹没时间指数的概念。

面积~水位关系曲线是描述水体(比如洞庭湖)的水力学特征和兴利功能最重要的指标之一。利用 MODIS 遥感数据研究洞庭湖面积~水位关系曲线, 能够为由实时水位推算洞庭湖水面面积提供可靠的参考, 对洞庭湖区域的抗洪防险是非常有意义的。为了进一步深入探讨洞庭湖水面面积随水位变化的关系, 本文在彭定志等^[3]研究的基础上, 利用 2003-2006 年的 MODIS 遥感影像提取洞庭湖水面面积, 结合洞庭湖地区城陵矶、安乡、北景港、鹿角、南咀、石龟山、小河咀、杨柳潭、营田、岳阳等 10 个水文站点的对应水位数据, 构建了 2003-2006 年洞庭湖各水文站点的面积~水位关系曲线。通过比较各水文站拟合曲线的相关性, 得出 2003-2006 年最佳面积~水位曲线, 并对曲线的变化趋势进行了讨论。

1 研究区域概况

洞庭湖位于中国湖南省北部, 长江荆江河段以南, 是中国第二大淡水湖。洞庭湖南纳湘、资、沅、澧四水汇入, 北与长江相连, 通过松滋、太平、藕池三口吞纳长江洪水, 湖水由东面的城陵矶附近注入长江, 为长江的重要调蓄湖泊^[8]。

洞庭湖承担了长江汛期巨大超额的调蓄任务, 在长江中下游防洪中起到了不可替代的作用, 但同时洞庭湖也是全国洪涝灾害频繁、严重的地区^[9]。近年来, 由于泥沙淤塞、围垦造田, 洞庭湖水域面积和容积持续萎缩, 极大的削弱了其调节径流和蓄泄洪水的功能, 湖区洪涝灾害时有发生。

本文的洞庭湖面积研究区域依照洞庭湖水利管理局提供的《防洪治涝工作手册》划定。手册中指出: 洞庭湖水面面积仅指洞庭湖湖区的 4 个天然湖泊的面积总和, 这 4 个天然湖泊分别是东洞庭湖、南洞庭湖、目平湖和七里湖。洞庭湖区 2003-2006 年 10 个水文站点的日平均水位数据由洞庭湖水利管理局提供, 安乡、北景港、城陵矶、鹿角、南咀、石龟山、小河咀、杨柳潭、营田、岳阳等 10 个水文站点的地理分布如图 1 所示, 图 1 由 2003 年 7 月 28 日 MODIS 图像处理而成, 三角标记的即为水文站点, 深色为洞庭湖区域水体。

2 基于遥感 MODIS 影像数据的水体特征提取

MODIS 可以同时获得可见光到近红外(0.405~14.385 μm)的 36 个波段, 空间分辨率分为 1 km、500 m、250 m 的 3 种分辨率数据。本文研究所用的 MODIS 遥感数据由武汉大学 MODIS 空间卫星接收站提供, 空间分辨率为 250 m, 含 2 个波段(CH1、CH2)。其中波长 620~670 nm, 属近红外波段; 波长 841~876 nm, 属红波段^[10]。经过定标、投影、拼接等处理, 将接收站接收的 2003-2006 年 MODIS 250m 分辨率影像, 合成以 1 d 为时间单位涵盖洞庭湖地区的 MODIS 影像数据。

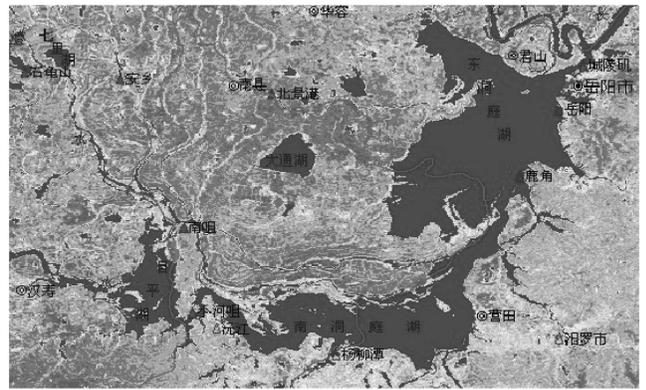


图 1 2003 年 7 月 28 日洞庭湖区水体提取效果及水文站点分布
Fig. 1 The result of water body extraction in Dongting Lake on 2003 July 28 and the location of hydrologic stations

目前利用 MODIS 影像数据提取水体的方法很多, 主要有单指数阈值法和谱间分析法两类^[11], 本文选择应用较为广泛的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)模型算法^[3-7], 属于基于 250 m 分辨率数据 2 波段的单指数阈值法。光线照在植物上时, 近红外波段的光大部分被植物反射, 而可见光波段的光则大部分被植物吸收, 通过对近红外和红波段反射率的线性或非线性组合, 可以消除地物光谱产生的影响, 分辨出水体。归一化植被指数的计算公式如下式所示:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

式中: IR 为遥感多波段图像中的近红外波段; R 为红波段。在 MODIS 传感器中, CH1 对应 IR , CH2 对应 R 。

经式(1)计算后, 水体的 $NDVI$ 值为负数, 而植被土壤的值比较大, 直方图表现为典型的双峰分布型^[3]。根据计算的 $NDVI$ 值, 设定一定的阈值来提取水体。通常情况下, 时判断该区域为水体, 但受到云、水生植被、岩石、裸土的影响, 需要对阈值进行调整^[11]。参照李景刚等^[7]的研究结论, 对照原始洞庭湖 MODIS 影像, 本文采取当 $NDVI \leq 0.10$ 时, 即判定该区域为水体。根据阈值判别的结果, 统计水体像元个数, 再将像元个数乘以单位像元覆盖的面积即为研究区域内的水体面积。由于采用的 MODIS 数据分辨率为 250 m, 故单位像元面积为 0.0625 km^2 ($250 \text{ m} \times 250 \text{ m} = 0.0625 \text{ km}^2$)。用 $NDVI$ 算法提取的洞庭湖区水体效果见图 1。

在实际地面水体的遥感监测应用中, 经常会受到云的干扰, 给水体信息识别及水面面积计算带来较大影响^[12]。在 2003-2006 年以 1 d 为时间单位的 MODIS 影像数据中, 结合各日期影像的成像质量和水体提取的效果, 选择部分受到云干扰较少日期的遥感影像数据来测算洞庭湖的水面面积。选取数据为 2003 年 29 d, 2004 年 40 d, 2005 年 25 d, 2006 年 17 d, 共计 111 d。天数日期按月分布情况见表 1。

3 洞庭湖区各水文站点的面积~水位关系曲线建立

根据已测算面积数据的日期, 找到洞庭湖区 10 个水文站点对应日期的平均水位, 即可应用 EXCEL 中的添加趋势线功能,

表 1 选用面积数据日期数按月布情况

Tab. 1 The temporal distribution of the chosen MODIS images

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计
2003	0	0	0	1	2	4	7	3	6	1	2	3	29
2004	0	4	4	2	4	4	5	5	5	4	0	3	40
2005	0	0	2	3	0	2	4	4	5	3	1	1	25
2006	0	0	0	1	3	3	3	1	5	0	1	0	17
合计	0	4	6	7	9	13	19	13	21	8	4	7	111

表 2 各水文站点面积~ 水位关系曲线拟合相关性评价

Tab. 2 The fitting of area water level curve about every hydrologic stations

年份	城陵矶	安乡	北景港	鹿角	南咀	石龟山	小河咀	杨柳潭	营田	岳阳	均值
2003	95.05	85.20	76.72	95.61	91.04	81.04	88.82	75.92	96.16	95.05	88.06
2004	94.85	91.56	95.06	93.73	88.67	84.25	82.33	81.99	90.52	94.81	89.78
2005	85.06	79.82	82.16	84.74	78.57	76.60	68.49	66.81	80.00	85.14	78.74
2006	96.96	89.85	85.30	97.01	89.42	72.81	86.90	94.16	95.60	96.95	90.50
总曲线 R ²	91.32	87.17	86.43	90.97	87.38	82.22	81.36	70.47	88.09	91.31	85.67

建立洞庭湖 10 水文站点 2003- 2006 年的遥测面积~ 水位关系曲线, 趋势拟合格式选用二次多项式。用确定性系数 R² (%) 和来评价趋势拟合的相关性, 它的定义表达式为:

$$R^2 = \left[1 - \frac{\sum_i (A_i - A_i)^2}{\sum_i (A_i - \bar{A}_e)^2} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_i, A_i 分别为遥测和曲线拟合的洞庭湖面积; A_e 为平均遥测面积。

10 个水文站点的拟合曲线相关性评价结果如表 2 所示。从表 2 可知: 由营田站水位数据拟合的 2003 年遥测面积~ 水位关系曲线最好; 2004- 2006 年分别为北景港、岳阳、鹿角站。将 2003- 2006 年合计 111 d 的水面面积整理成一个系列, 对各水文站点做面积~ 水位关系做趋势线拟合, 得到一个总的面积~ 水位关系曲线。表 2 最后一栏即为各站点总曲线趋势拟合的确定性系数 R² 值, 比较结果可知城陵矶站总体趋势拟合最好。

由各年份趋势拟合最优站点的遥测面积~ 水位关系曲线, 可得到该年洞庭湖水面面积 A 随水位 z 变化的面积~ 水位公式。2003- 2006 年洞庭湖最优面积~ 水位关系曲线及趋势拟合公式依次见图 2~ 图 6。

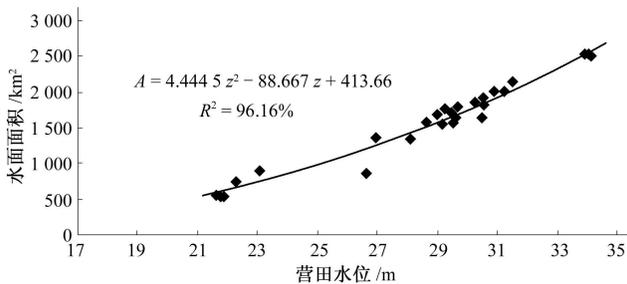


图 2 2003 年洞庭湖遥测面积~ 水位关系曲线及公式(营田站)

Fig. 2 Area water level curve and equation of Dongting Lake in 2003(Yingtian station)

本文采用遥测和曲线拟合的面积均方根误差 RMSE

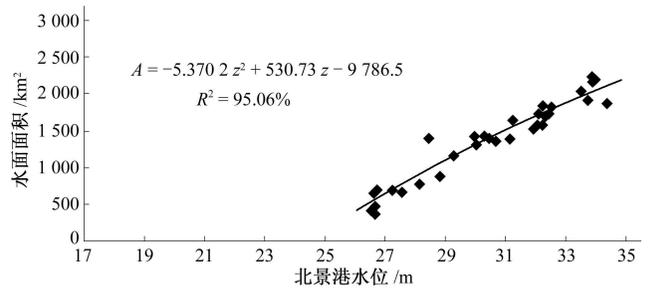


图 3 2004 年洞庭湖遥测面积~ 水位关系曲线及公式(北景港站)

Fig. 3 Area water level curve and equation of Dongting Lake in 2003(Beijianggang station)

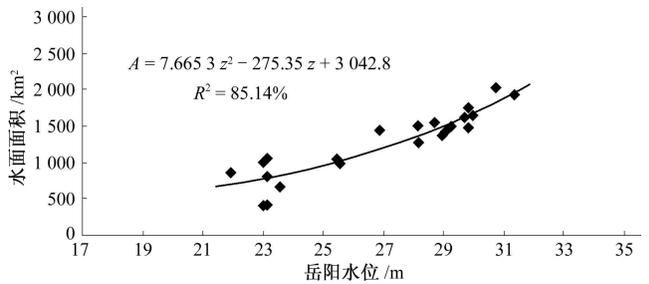


图 4 2005 年洞庭湖遥测面积~ 水位关系曲线及公式(岳阳站)

Fig. 4 Area water level curve and equation of Dongting Lake in 2003(Yueyang station)

(km²), 来进一步分析图 2~ 图 6 中的最优面积~ 水位关系曲线的拟合效果, 它的定义表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (A_i - A_i)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

式中: A_i, A_i 分别为遥测和曲线拟合的洞庭湖面积。

表 3 2003- 2006 年最优面积~ 水位关系曲线均方根误差

Tab. 3 RMSE value of best area water level curve in 2003- 2006

年份	2003	2004	2005	2006	总曲线
RMSE	110.2	128.6	166.9	58.3	162.14

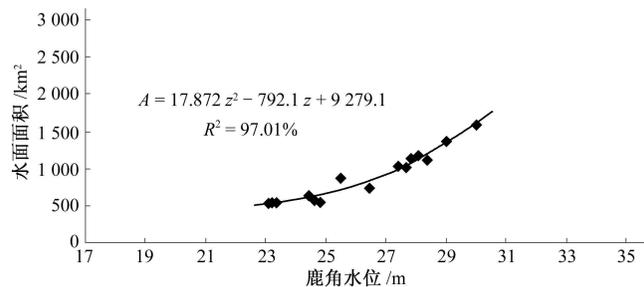


图5 2006年洞庭湖遥测面积~水位关系曲线及公式(鹿角站)

Fig. 5 Area water level curve and equation of Dongting Lake in 2003(Lujiiao station)

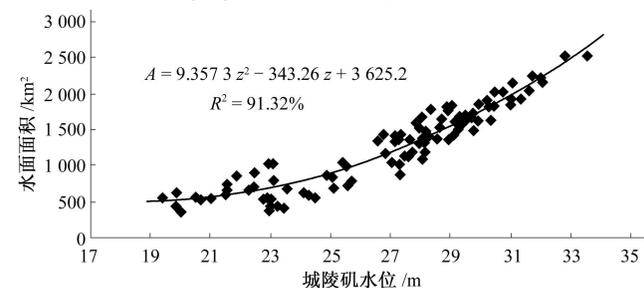


图6 2003-2006年洞庭湖遥测面积~水位总关系曲线及公式(城陵矶站)

Fig. 6 The total area water level curve and equation of Dongting Lake in 2003-2006(Chenglingji station)

最优曲线的均方根误差计算结果如表3所示。由表3可知,2005年关系曲线、2003-2006年总关系曲线的均方根误差较大,均达到了160 km²;2006年关系曲线均方根误差最小,不到60 km²。分析原因,从图6可以看到,在23~29 m水位之间

的大部分点都偏离关系曲线;在图4中,明显可看出23 m水位附近的点偏离关系曲线较远;而在图5中,数据点基本上与关系曲线重合。2003、2004年误差接近,均超过了100 km²。图2、图3中可以看见个别点偏离关系曲线较远。

4 洞庭湖面积~水位关系曲线讨论

对比2003、2004、2005、2006年遥测面积~水位关系曲线趋势拟合确定性系数值,可以看出:2005年是4年中拟合相关性最低的,2006年的拟合相关性最高,2003、2004年的拟合相关性也比较高。对比2003-2006年的各水文站点的面积~水位总关系曲线趋势拟合确定性系数R²值,可以得出:10个水位站点中,城陵矶、岳阳、鹿角3个站点的拟合结果较好,确定性系数均超过了90%,而其他站点的拟合确定性系数都在90%以下。结合图1中水文站点的地理分布分析得出:洞庭湖在城陵矶站附近与长江接合,越靠近洞庭湖入长江口的城陵矶站,面积~水位对应关系越明显。

由于同一日期的各个水文站日平均水位并不相同,为了便于比较相同水位下2003-2006年洞庭湖面积~水位关系的相对误差及变化趋势,本文选定对总关系曲线拟合最优的城陵矶站进行面积~水位分析。具体做法为:以1 m或2 m为间隔,在21~32 m水位中选择10个水位值,利用城陵矶站的面积~水位公式分别拟合出在这10个水位值时洞庭湖的面积。再根据拟合面积和遥测面积计算该水位下面积相对误差系数RE(%) ,计算公式为:

$$RE = \left[\frac{A_i}{A_i} - 1 \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中:A_i, A_i 分别为遥测和曲线拟合的洞庭湖面积。

表4 2003-2006年城陵矶站面积~水位关系曲线相对误差分析
Tab. 4 The analysis of Chenglingji station's area- water level in 2003-2006

水 位/ m		21	23	25	27	28	29	30	31	32
2003	拟合	605.4	828.7	1 083.7	1370.2	1 525.3	1 688.3	1 859.2	2 038.0	2 224.7
	遥测	545.3	900.8	848.7	*	1 673.1	1 765.8	1 852.0	2 153.0	*
	相对误差/ %	11.01	- 8.00	27.69	*	- 8.83	- 4.39	0.39	- 5.34	*
2004	拟合	534.1	668.4	880.2	1 169.5	1 343.2	1 536.3	1 748.7	1 980.6	2 231.8
	遥测	*	*	679.2	1 323.0	1 216.1	1 601.4	1 850.6	1 892.2	2 192.3
	相对误差/ %	*	*	29.59	- 11.60	10.45	- 4.07	- 5.50	4.67	1.80
2005	拟合	644.0	767.1	952.3	1 199.6	1 346.6	1 509.1	1 687.2	1 880.8	2 089.9
	遥测	*	793.8	*	1 440.2	1 395.7	1 390.4	1 628.1	1 926.7	*
	相对误差/ %	*	- 3.37	*	- 16.71	- 3.52	8.54	3.63	- 2.38	*
2006	拟合	498.2	526.8	692.4	994.7	1 197.3	1 434.0	1 705.0	2 010.2	2 349.6
	遥测	*	533.8	844.9	1 039.7	1 114.2	*	*	*	*
	相对误差/ %	*	- 1.31	- 18.06	- 4.32	7.45	*	*	*	*

注: * 表示在该水位下没有遥测值。

城陵矶站关系曲线相对误差系数 计算结果见表4。从表4中可以看出,2003、2004、2006年在25 m水位时相对误差一致最大。其中2003、2004年预测值偏大25%以上,2006年则是偏小18%。2005年的最大误差水位则在27 m处,预测值偏小了16%。表中其他水位处的相对误差较小,基本上都在10%

以内。可见根据城陵矶站的面积~水位公式拟合的洞庭湖面积值总体上相对误差较小,拟合效果良好。

从表4中每年的拟合面积值可以发现:2003年洞庭湖的面积,在21 m水位时,比2004年和2006年的要大;在21~31 m水位区间,是4年中最大的;在32 m水位时, (下转第26页)

3.5 玉米灌溉的适宜土壤水分控制指标分析

从上述分析结果,结合不同供水条件下玉米各生育阶段的水分状况、玉米耗水量和最终产量的观测结果,可以确定玉米各生育阶段的适宜土壤水分上、下限控制指标和适宜计划湿润层深度,提出适合当地情况的节水灌水定额指标。从今年的试验结果看,无疑是全生育期控制土壤水分下限在田持的70%是理想的,但是,这要求有充足的水分供应,如果水源不是十分充足,全生育期也可控制田持的60%。控制土壤层次是,玉米生长前期(拔节前)60 cm,生长后期(拔节以后)100 cm。

4 结 语

(1) 玉米需水规律是发芽出苗期和苗期耗水量比较小,从拔节期开始到抽雄吐丝期,玉米耗水量增大,达到耗水的顶峰,到灌浆成熟期,耗水量又逐渐回落减小。拔节和抽雄吐丝期是玉米生长需水关键期,抽雄吐丝期是灌水关键期。

(2) 随着玉米灌水次数的增多,灌溉定额越大,则其株高相对较高,穗长较长,穗粒数增多,百粒重加重,最后产量也高,是成正相关关系的。

(3) 在处理耗水量范围内,玉米耗水量与产量呈直线相关关系。关系式是:

$$y = 0.0887x^{1.4872} \quad R^2 = 0.7717$$

(4) 玉米最佳灌溉制度是灌4水:播前1水、拔节期到抽雄期灌2水、抽雄吐丝期再补充1水,灌溉定额 $4590 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。参考灌溉制度:播前、拔节期和抽雄吐丝期各1水,灌溉定额 $3000\sim 3600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

(5) 玉米灌溉的适宜土壤水分控制指标是:全生育期控制土壤水分下限在田持的70%是理想的,如果水源不是十分充足,全生育期可控制在田持的60%。控制土壤层次是,玉米生长前期(拔节前)60 cm,生长后期(拔节以后)100 cm。

参考文献:

- [1] 武朝宝. 冬小麦不同土壤水分控制下限灌溉试验研究[J]. 山西水利科技, 2009, (2).
- [2] 刘战东, 牛豪震, 贾云茂, 等. 不同地下水埋深下冬小麦和春玉米非充分灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2010, (6).
- [3] 牛豪震. 地下水埋深对春玉米需水量及需水系数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, (8).

(上接第23页) 面积仍然大于2005年。2005年洞庭湖的面积,在水位为21 m时是最大的,在水位超过30 m以后却是最小的。2006年洞庭湖的面积,在29 m水位以下是最小的;但是当水位超过32 m时,又是最大的。比较2003年和2006年的面积,在水位低于30 m时,2003年的较大,且差距比较明显;在31 m水位时,两年的面积几乎是相等的;在32 m水位时,2006年的较大。比较2004年和2005年的面积,在水位为21~25 m时,2005年的偏大;在27~29 m时,两年几乎是相等的;在30 m以上则2004年偏大。

进一步对2003-2006年城陵矶站面积~水位关系进行分析,可以发现:不考虑2006年,从2003-2005年,当水位高于29 m时,在相同水位,按面积~水位公式计算的洞庭湖面积是逐年递减的。不考虑2005年,从2003-2006年,当水位低于31 m时,按面积~水位公式计算的洞庭湖面积也是逐年递减的。

5 结 语

本文利用了MODIS遥感数据时间周期短的特点,利用2003-2006年的MODIS遥感影像数据,计算出洞庭湖的水面面积。结合洞庭湖地区水文站点的日均水位数据,得到了2003-2006年的最优遥测面积~水位关系曲线,为由水文站的水位数据实时推算监测洞庭湖的水面面积提供了有力保证,对于洞庭湖地区的防洪减灾具有重要的实际意义。通过湖区内各站点的遥测面积~水位关系拟合结果的对比分析,指出地理位置接近洞庭湖入江口的水文站点,其面积~水位关系拟合曲线比其他站点更具有代表性。例如城陵矶、岳阳、鹿角三站的面积~水位拟合相关性在10个站点中最高。由城陵矶站2003-2006年每年的面积~水位关系曲线可以得知:洞庭湖水面积随水位变化的规律并不一致,存在波动,在一定时间范围内,一

定的水位控制条件下,由城陵矶站面积~水位公式推算的洞庭湖面积有减小的趋势。例如在小于30 m的水位范围之内,相同水位下2003年的洞庭湖面积明显要比2006年大。

参考文献:

- [1] 刘荣高, 刘洋, 刘纪远. MODIS科学数据处理研究进展[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 141-146.
- [2] 彭立志, 熊立华, 郭生练, 等. MODIS在水文水资源中的应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 683-688.
- [3] 彭立志, 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[J]. 人民长江, 2004, 35(4): 14-16.
- [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[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 332-337.
- [5] 龟山哲, 张继群, 王勤学, 等. 应用Terra/MODIS卫星数据估算洞庭湖蓄水量的变化[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 87-92.
- [6] 龚伟, 杨大文, 钱群. 基于MODIS数据的洞庭湖水面积估算方法[J]. 人民长江, 2009, 40(14): 40-44.
- [7] 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[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 923-933.
- [8] 易博琳, 李晓斌, 梅金华. 洞庭湖面积容积与水位关系及调蓄能力评估[J]. 湖南地质, 2000, 19(4): 267-270.
- [9] 刘世奇, 锻炼中, 余元君. 洞庭湖水患灾害分析及其治理策略[J]. 人民长江, 2009, 40(14): 76-78.
- [10] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-4.
- [11] 丁莉东, 吴昊, 王长建, 等. MODIS图像湖泊水体信息的快速识别与制图[J]. 海洋测绘, 2006, 26(6): 31-34.
- [12] 范伟, 荀尚培, 吴文玉. 应用气象卫星MODIS识别薄云覆盖下的水体[J]. 大气与环境光学报, 2007, 2(1): 73-77.
- [13] 郭玉川, 何英, 董新光. 基于MODIS数据的区域蒸散发估算研究[J]. 节水灌溉, 2008, (1): 44-47.