

鄱阳湖水动力模型的遥感验证研究

齐亨达¹, 陆建忠¹, 陈晓玲^{1,2}, 张鹏³, 陈莉琼¹

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

3. 水利部中科院水工程生态研究所 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要:应用湖泊水动力模型 EFDC 模拟了鄱阳湖 2009–2011 年的水动力过程。结果表明:模拟日平均水位及流量与水文站观测结果基本一致,相关系数达到 0.94 以上。针对现场观测数据单一匮乏的问题,借助遥感手段较为全面地验证分析了模型的实用性。通过雷达高度计 ENVISAT RA-2 和 MODIS 影像获取的水位、水体面积及淹水范围与模拟结果相关性较好,相关系数均达到 0.83 以上,证明该模型能够有效地揭示鄱阳湖高动态变化的水动力特征。此外,遥感手段也为模型的多角度长期验证提供了技术依据。

关键词: EFDC 水动力模型; 水位; 淹水范围; 遥感; 鄱阳湖

中图分类号: TV12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0018-06

Study on hydrodynamic model validation by remote sensing in Poyang Lake

QI Hengda¹, LU Jianzhong¹, CHEN Xiaoling^{1,2}, ZHANG Peng³, CHEN Liqiong¹

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,

Wuhan 430079, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education,

Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 3. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and

Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, MWR & CAS, Wuhan 430079, China)

Abstract: Hydrodynamic process in Poyang Lake from 2009 to 2011 was simulated by using the lake hydrodynamic model, EFDC. Results showed that simulated daily average water elevation and discharges consisted with hydrologic station observations and the correlation coefficients are all above 0.94. Remote sensing data were employed to validate and analyze the model practicability more comprehensively in order to solve the problem of data deficiencies. The water surface height and inundation area measured by Radar altimeter ENVISAT RA-2 and MODIS images correlated with numerical simulation results with a correlation coefficient higher than 0.83, which indicated that the frequently changing water dynamic characteristics in Poyang Lake could be effectively revealed by using EFDC model. Furthermore, remote sensing techniques also provided theory for long-term validation from different perspectives.

Key words: EFDC hydrodynamic model; water elevation; inundation area; remote sensing; Poyang Lake

数值模型作为研究水体内部变化过程的重要工具,具有时间分辨率高、水体运动物理过程明确等特点;遥感作为大范围监测水体整体趋势的手段,可以获取大尺度的空间信息,从而弥补野外观测数据不足的问题,因此将水动力模型和遥感手段结合已经成为一种全面分析水域的必要手段。如利用数值模拟与遥感反演数据监测泥沙的长时间输移过

程^[1-3];借助多源遥感数据结合数值模拟进行淹水情况预估、评价和分析^[4-5]。不仅如此,遥感还可以依靠其空间分布广的优势对模型中参数率定和初始化过程起到关键作用^[6-7]。针对水动力条件更加复杂的高动态内陆湖泊,急需开展基于遥感观测的数值模型验证。

鄱阳湖作为我国目前第一大淡水湖,其水位和

收稿日期:2014-06-11; 修回日期:2014-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41101415、41331174);国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA12A304、2012AA12A306);国家科技重大专项“水体污染控制与治理”(2013ZX07105-005);国家科技支撑计划课题(2012BAC06B04)

作者简介:齐亨达(1990-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事水环境遥感和数值模拟相结合的研究。

通讯作者:陆建忠(1982-),男,湖北武汉人,博士后,讲师,主要从事水环境数值模型研究与地理信息系统开发。

水体覆盖范围的变化会对动植物等生态系统产生巨大影响^[8]。近些年出现了一些在此区域的数值模拟应用,但是在大多数研究中对于模拟结果的验证都是依靠水文站数据或短期野外观测,无法全面评估数值模拟的准确性^[9-11]。为了从多角度验证模型在鄱阳湖的可用性,本文发挥遥感和现场观测的各自优势,采用湖泊水动力模型 EFDC 对鄱阳湖进行 2009-2011 年水动力模拟,对比分析模拟水位与水文站观测的时序水位和雷达高度计 ENVISAT RA-2 测高数据获取的空间分布水位,并借助中分辨率卫星 MODIS 影像数据提取鄱阳湖淹水范围及面积,更为全面的验证 EFDC 模型在鄱阳湖区域的有效性,并揭示湖泊季节性高动态变化的特点。

1 研究区域及数据

1.1 研究区域概况

鄱阳湖(115°50'E ~ 116°44'E, 28°25'N ~ 29°45'N)位于江西省中北部,长江中下游分界处的南部,其水系主要由赣江、抚河、信江、饶河、修水 5 个河流构成。5 河之水汇流入湖,经湖水调蓄后进入长江。鄱阳湖是一个高动态的过水性、季节性内陆湖泊,在每年 5-8 月丰水期时可以达到 3 000 km²,而枯水期湖泊呈河流状,水面积小于 1 000 km²。在长江水位高于湖面水位时期,可能发生江水倒灌的现象,影响湖内的水动力特征。湖盆自东、西向中,由南向北倾斜,共有 1 个湖泊出口和 9 个河流支流入口,入口分别为修水、赣江北支、赣江中支和赣江南支、抚河东支、抚河西支、信江、乐安河、昌江,出口为湖口。图 1 显示了鄱阳湖周边河流以及水位站的具体地理位置。

1.2 数据资料

本文共涉及两方面数据:①实测数据。主要收集了 2009-2011 年鄱阳湖及其流域水文数据、空间分辨率为 30m 的湖底高程数据以及鄱阳湖主湖区边界矢量数据。其中水文数据包括星子、都昌、康山、吴城 4 个水文站点的日平均水位数据、5 大流域对应水文站的日平均流量数据以及湖口站的日平均水位数据。②遥感数据,包括 2009-2011 年鄱阳湖区域无云的 102 幅 MODIS 8 d 地表反射率产品 MOD09Q1、6 幅每年中最大/最小淹水面积时对应的日地表反射率产品 MOD09GQ 以及卫星高度计 ENVISAT RA-2 65 组地球物理数据(GDR)产品。MODIS 数据具有时间分辨率高的特点,可以确保获取影像数量的充足;RA-2 的运行轨道覆盖鄱阳湖

区域,平均 35 d 可以获取 2 组测高数据,可以满足模型精度验证需求。利用遥感数据处理软件 Brat 和 MRT(MODIS Reprojection Tool)对 RA-2 和 MODIS 数据进行处理,其中包括 GDR 产品的各项测量参数提取以及 MODIS 影像几何校正、去除“Bowtie Effect”效应等。



图 1 鄱阳湖水系及水文站分布

2 研究方法

2.1 EFDC 水动力模型

环境流体动力学模型 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 是由美国弗吉尼亚州海洋研究所根据水动力数学物理过程开发研制的模型,其中包括水动力模块、泥沙输运模块、有毒物质输移和水质模块等,用以对大部分河流、湖泊以及海岸带进行一、二、三维数值模拟。本文采用 EFDC 模型对鄱阳湖湖区进行水动力模拟获取模拟时间段的湖泊水位,并且通过模型中自带的干湿判据模块对区域网格进行干湿判断,若网格水深大于临界水深则判定为湿网格,反之则为干网格,进而根据每个网格大小推算水体面积。模型具体设置如下:

(1) 模型网格:利用 1998 年鄱阳湖洪水时期遥

感影像提取的湖泊边界矢量提取湖泊主要轮廓,并进行水平网格划分,共计 20 769 个矩形网格,分辨率范围在 180 ~ 560 m 之间,在保证计算精度的前提下,可以与 250 m 分辨率的遥感影像进行较好尺度的匹配。在垂向分层方面,敏感性分析显示,垂向分层分别为 3、5、10 层时对水动力模拟结果影响极小,固本文采用二维模拟,忽略垂向变化。

(2) 边界及初始条件:模拟时间段为 2009-01-01 - 2011-12-31,以修水、赣江、抚河、信江和饶河入湖口处水文站实测的日平均径流量数据作为水动力模型的边界条件,其中赣江北、中、南支流量以 2: 1: 1 份额分配,抚河东、西支流量以 1: 1 份额分配。开边界由鄱阳湖入江处的湖口水文站的实测日平均水位驱动。湖面初始水位由模拟时段各水文站当日实测水位进行空间反距离加权插值给定,初始流速设为 0 m/s。为确保模型对初始条件的影响不致过大,以五河恒定流量输入对模型进行 30 d 的热启动。

(3) 气象驱动:采用距鄱阳湖主湖区较近的波阳气象站的日平均风速、风向、降雨量、蒸发量、温度、相对湿度以及大气压强数据作为模型的气象条件输入。

(4) 水动力参数:在考虑 CFL 收敛条件以及模型计算效率的前提下,时间步长设为 30 s。将模拟水位与各水文站实测水位对比进行参数率定,最终确定湖底糙率高度为 0.02 m,水平涡粘系数为 0.1 m²/s,干湿判断临界水深为 0.05 m。

2.2 遥感数据获取鄱阳湖水面高度及面积

雷达高度计向水面发射脉冲并接收返回信号,其中返回的脉冲中包含有水面高度分布和变化信息,ENVISAT RA-2 基本计算水深原理如公式(1)所示:

$$h_d = H - h - C_p \quad (1)$$

式中: h_d 为水深的计算结果; H 为卫星相对于椭球面的高度; h 为高度计 1 Hz 的距离测量值; C_p 为一系列消除大气及其它环境要素对测量精度的影响的改正项。针对本文的研究区域,采用适用于内陆水体的改正项,计算公式为:

$$C_p = I_d + W_{mod} + D_t + P_t + E_t + G \quad (2)$$

式中: I_d 为 DORIS 电离层改正项; W_{mod} 为模型湿对流层改正项; D_t 为干对流层改正项; P_t 为极地潮改正项; E_t 为固体潮改正; G 为由 EGM96 推导出的大地水准高。

对于鄱阳湖水体面积的获取,本文利用 MODIS 250m 分辨率的红光、近红外波段,采用归一化植被指数 (NDVI) 阈值法来进行水体的提取^[12]。考虑到自然水体的光学特性,若 $NDVI < 0$,则认为该像元为水体,否则为陆地。通过 NDVI 影像统计鄱阳湖水体的像元数以及各像元面积,计算湖泊覆盖面积。

3 结果与讨论

3.1 EFDC 模型水位验证及分析

将模拟得到的每日平均水位与 4 个水文站的日水位数据行对比(星子、都昌、康山、吴城),结果如图 2。

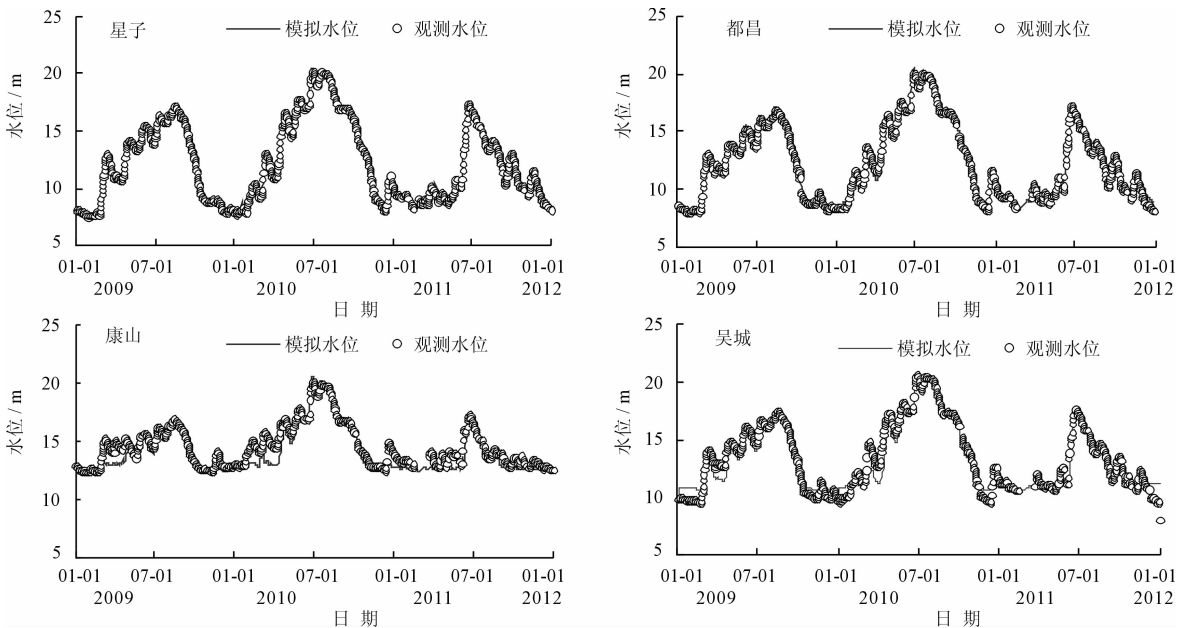


图 2 2009 - 2011 年 4 个水文站观测与模拟水位对比

结合模拟和观测结果可以看到,鄱阳湖每年经历枯水期 - 丰水期 - 枯水期的过程,在 2009 和 2010 年的 4 月份进入丰水期,而 2011 年鄱阳湖经历了近几十年中最严重的旱灾,导致 4、5 月份湖泊持续低水位状态,直至 6 月份才进入丰水期;从湖口径流量过程中也可以看出,2011 年流量较 2010 年全年显著降低,而丰水期期间下降程度尤为严重(图 3)。从模拟效果来看,4 个水文站点模拟水位和湖口径流量与实测结果的变化趋势和整体变化范围都基本相符,相关系数均达到 0.94 以上(表 1)。另外,当鄱阳湖处于高水位时期时,模拟结果较为准确,证明模型对于鄱阳湖丰水期水位的模拟具有很好的适应性。但在枯水期时湖面整体水位相对较低,大部分水域退化为沙洲和泥滩,湖泊近似河流状态,模型中大量网格水深小于临界水深,无水淹没,因此给定的边界条件及水动力参数无法很好适应当前状态,从而导致模拟结果误差较大。

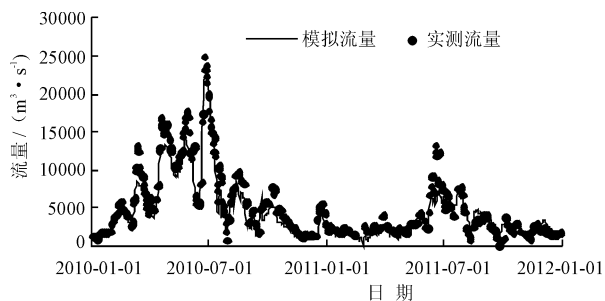


图 3 2010 - 2011 年湖口径实测与模拟径流量对比

表 1 5 个水文站模拟与观测水位、流量相关系数及平均相对误差

水文站	相关系数	平均相对误差/%
星子(水位)	0.998	1.7
都昌(水位)	0.991	2.9
康山(水位)	0.946	4.2
吴城(水位)	0.969	5.0
湖口(流量)	0.950	11.0

3.2 遥感数据与模拟结果的验证与分析

通过对 RA - 2 数据的质量控制与筛选,共在研究时间段内选取了 175 个有效测高点,数据主要集中在鄱阳湖丰水期期间(4 - 9 月),图 4 显示了测量数据在鄱阳湖上的地理位置。在这些测高点附近并未设有水文站,因此可以将 RA - 2 的测量数据作为鄱阳湖的“虚拟水文站”来对模拟水位进行比较验证。在鄱阳湖上松门山岛附近,距都昌水文站较近的位置选取 2009 和 2010 年 RA - 2 的 13 个有效测

量点,将其与观测水位进行对比,可以看到二者具有良好的-一致性,相关系数达到 0.984,从而表明 RA - 2 数据的有效性(图 5),但也可以明显的看出在低水位时期测量水位略小于观测水位,原因是雷达高度计对湖底反射信息十分敏感,而鄱阳湖在枯、洪水时期底质类型有所不同,从而带来误差。图 6 显示了 RA - 2 测量水位值和模拟水位的散点分布,二者相关系数达到 0.832,此基础上建立 RA - 2 测量值与模拟值的线性关系,表达式为:

$$y = 0.625x + 5.475 \quad (3)$$

式中: y 为 RA - 2 测量水面高度值; x 为模拟水位值。对于某些散点偏离拟合线过大的原因主要有两方面:一是通过上述模拟与实测水位对比结果中分析可知,在鄱阳湖枯水期的水位模拟结果与实际测量结果相比会出现较大偏差;二是由于在模型中湖底高程的生成是由 30m 分辨率的高程数据在较低分辨率的网格内加权平均得到,与真实情况存在一定差异。

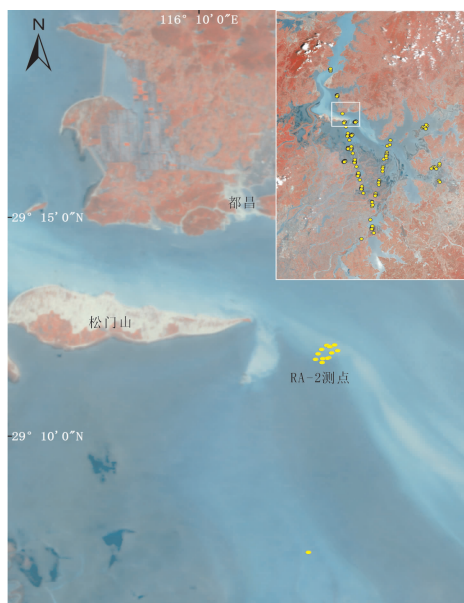


图 4 2009 - 2011 年鄱阳湖及都昌附近 RA - 2 有效测量数据的地理位置

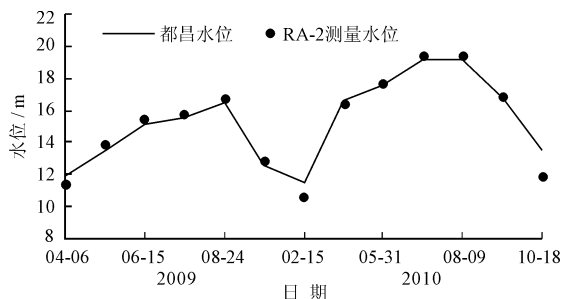


图 5 2009 - 2010 年 RA - 2 测量水位与都昌水位对比

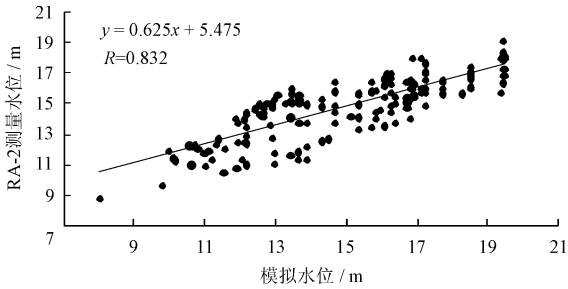


图6 2009 - 2011年 RA - 2 测量水位与模拟水位的散点分布

对于 MODIS 数据,选取 2009 - 2011 年鄱阳湖地区 102 幅地表反射率产品提取水体面积,并与模拟结果进行对比,3 a 内变化过程如图 7 所示。二者变化趋势基本吻合,相关系数达到 0.925。3 a 内鄱阳湖水体面积在 500 ~ 3 500 km² 范围内波动,枯水期和丰水期水面

积差异极大,基本反映了其季节性高动态变化的特点。

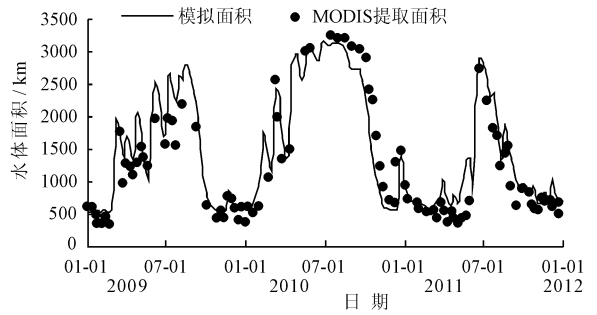
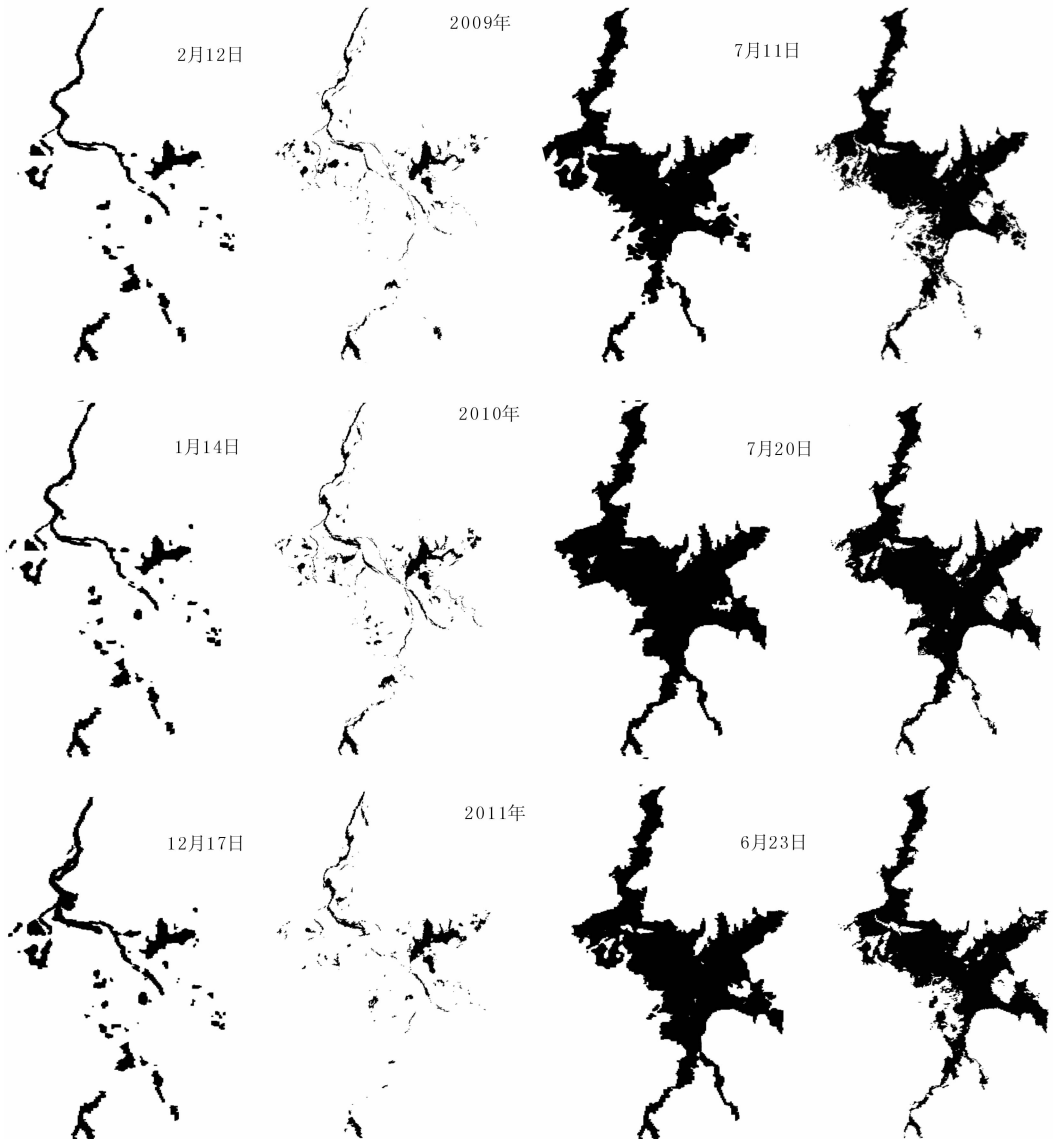


图7 2009 - 2011年 MODIS 提取及模拟水体面积对比

借助鄱阳湖水体面积模拟结果以及水文站测得水位可以获得每年最大和最小淹水范围的时间,利用距两个时间最近的 MODIS 无云每日地表反射率产品 MOD09GQ 提取水体,并与模拟结果进行比较(图 8)。



(a) 模拟最小淹水面积 (b) 遥感提取最小淹水面积 (c) 模拟最大淹水面积 (d) 遥感提取最大淹水面积
图8 2009 - 2011年最小/最大淹水面积时间及模拟与 MODIS 提取淹水区域对比

总体来看,模型与遥感手段都可以很好的反映鄱阳湖枯、洪水时期之间面积以及水域分布的巨大差异,最大与最小面积比为3~5,且两种手段获取的数据具有很好的一致性。在每年湖面水位较高时期面积可达3 000 km²,在个别地区(如赣江各支流汇合入湖处)存在模拟结果有水覆盖而遥感提取结果无水覆盖的现象,是由于该地区水深较浅,大部分呈现泥滩状态,其光谱特性与天然水体存在差异,导致遥感手段未能提取;在水位较低时期面积均在1 000 km²以下,且水域分布比较分散,入江洪道与湖上其他湖底高程较小的小面积洼地呈现互相隔离的状态。虽然此时模型网格的整体边界已经不符合鄱阳湖枯水期实际情况,但依然能够将基本湖泊形态呈现出来。

4 结 语

运用环境流体动力学模型 EFDC 构建了鄱阳湖地区 2009 - 2011 年水动力模型,借助鄱阳湖水文站日观测数据、中分辨率卫星 MODIS 影像数据及雷达高度计 ENVISAT RA - 2 测量数据辅助模型验证,从而弥补了单纯依靠现场观测无法全面评估模型准确性的问题。验证结果表明,模拟水位与水文站观测数据以及雷达高度计获取的水面高度数据都具有较好的一致性;模拟淹水范围可以很好的吻合遥感卫星影像提取的水体区域并且能够反映鄱阳湖水面在枯、丰水期大幅度波动的高动态特点,由此证明了 EFDC 模型对于鄱阳湖水动力模拟具有一定实用性,并且丰水期的模拟效果优于枯水期。由于鄱阳湖湖底不同底质类型(如泥、沙、草等)对水动力过程产生较大影响,所以设置空间非一致的底部糙率系数需要进一步考虑。另一方面,本文旨在将不同领域中获取的数据进行比较分析,并未对遥感数据自身精度进行很好的评估,因此在水动力模型构建基础上,亟需对湖泊各类水质要素采用数据同化的方法将该模型与遥感信息综合运用,考虑各自不确定性,使其更具有应用价值。

参考文献:

[1] Puls W, Doerffer R. Numerical simulation and satellite observations of suspended matter in the North Sea[J]. IEEE

- Journal of Oceanic Engineering, 1994,19(1):3 - 9.
- [2] Fettweis M, Nechad B, Van den E D. An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in situ measurements and numerical model results [J]. Continental Shelf Research, 2007,27(10 - 11):1568 - 1583.
- [3] Sipelgas L, Raudsepp U, Kõuts T. Operational monitoring of suspended matter distribution using MODIS images and numerical modelling [J]. Advances in Space Research, 2006,38(10):2182 - 2188.
- [4] Patro S, Chatterjee C, Mohanty S, et al. Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2009,37(1):107 - 118.
- [5] Karim F, Petheram C, Marvanek S, et al. The use of hydrodynamic modelling and remote sensing to estimate floodplain inundation and flood discharge in a large tropical catchment [C]//. 19th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM), Australia, Perth, 2011.
- [6] Pahlevan N, Gerace A D, Schott J R. Using thermal remote sensing as a tool for calibrating a hydrodynamic model in inland waters [C]//. In SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, Orlando, USA, 2011.
- [7] Chen Xiaoling, Lu Jianzhong, Cui Tingwei, et al. Coupling remote sensing retrieval with numerical simulation for SPM study - Taking Bohai Sea in China as a case [J]. International Journal of applied earth observation and geoinformation, 2010,12: S203 - S211.
- [8] 周文斌,王金保,姜加虎. 鄱阳湖江湖水位变化对其生态系统影响 [M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [9] 赖锡军,姜加虎,黄群,等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟 [J]. 湖泊科学, 2011,23(6):893 - 902.
- [10] 张鹏,陆建忠,陈晓玲,等. MODIS 遥感数据辅助的鄱阳湖水体范围变化数值模拟 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012,45(9):1087 - 1091.
- [11] 李云良,张奇,姚静,等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟 [J]. 湖泊科学, 2013,25(2):227 - 235.
- [12] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote sensing of environment, 2002, 83(1):195 - 213.