

Bathymetry Mapping of Alternately Filled Lake Using Multi-Temporal Satellite Images*

—A Case Study of Poyang Lake, Jiangxi Province, China

Siyu Zhang, Jinyuan Wang, Yaping Meng, Chuanwei Liu, Yongxue Liu

Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing
Email: baoryimi@163.com, wangjinyuannju@163.com, yongxue@nju.edu.cn

Received: Apr. 10th, 2013; revised: Apr. 30th, 2013; accepted: May 8th, 2013

Copyright © 2013 Siyu Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Alternately filled lake is known for its rapid change terrain and complex hydrodynamic environment. More accurate and rapid access to its topographic map is of great significance to relative research, management, protection and development of its lake beach. This paper tries to derive the bottom topography of Poyang Lake (a typical alternately filled lake) in 2010 based on multi-temporal satellite images. To build the lake beach DEM, waterlines were detected using 33 satellite images acquired at continuous elevations in 2010, and then discretized to point to interpolate with water levels at corresponding moment. Both relative and absolute validation results show that the average height error of DEM derived using this method is 25.1 cm, which is within the precision requirement. All of these findings proved the feasibility of this method to construct the topographic map for alternately filled lake.

Keywords: Alternately Filled Lake; Waterline Detection Method (WDM); Multi-Temporal Satellite Images; Poyang Lake

吞吐型湖泊湖滩的地形遥感反演方法*

—以中国江西省鄱阳湖为例

张思宇, 王金元, 蒙亚平, 刘传卫, 刘永学

南京大学地理与海洋科学学院, 南京
Email: baoryimi@163.com, wangjinyuannju@163.com, yongxue@nju.edu.cn

收稿日期: 2013年4月10日; 修回日期: 2013年4月30日; 录用日期: 2013年5月8日

摘要: 吞吐型湖泊局部地貌变化快速, 水动力环境复杂, 较为准确、快速地获取吞吐型湖泊湖滩地形信息对于相关湖滩研究、湖滩管理保护与发展具有重大意义。研究基于多时相遥感影像, 反演鄱阳湖(典型吞吐型湖泊) 2010年湖滩地形。研究从2010年33幅具有相对连续水位信息的遥感影像中获取水边线; 将水边线离散成点后与相应时刻的水位信息内插, 进而构建湖滩DEM。通过相对比较与绝对比较的方法进行验证, 结果表明: 采用该方法构建的鄱阳湖湖滩DEM垂直误差为25.1 cm, 精度满足要求。因此, 该方法对于构建吞吐型湖泊湖滩地形具有一定适用性。

关键词: 吞吐型湖泊; 水边线检测方法; 多时相遥感影像; 鄱阳湖

*本研究得到国家自然科学基金(NO. 41171325 和 NO. J1103408), 国家大学生创新创业训练计划(G1210284005)支持。

1. 引言

吞吐型湖泊是洪水期与枯水期湖泊面积变化显著、湖体水量差异悬殊的湖泊。湖泊滩地是环湖陆地和湖泊开敞水域间水陆相互作用的相对平坦地带，即介于湖泊最高水位线与最低水位线之间的特殊区域，属于湖泊湖底的一部分^[1,2]。湖滩地形是湖区水文特征分析，水体动态监测以及湖盆演化和湖区生态系统分析等相关研究的基础数据。

吞吐型湖泊湖滩高程测量是地形测量的困难领域，一般对于湖底地形的测量，以往常用的方法包括野外地面测量、声呐测量和激光雷达测量(Light Detection And Ranging, LiDAR)^[3]等。但在吞吐型湖泊的湖滩区域，由于水位较浅、水动力环境复杂、动态观测困难，用以上方法人力物力成本投入高且数据的时间延续性差，难以实现地形信息的便利提取及快速、周期性更新；而如想获取过去数十年湖滩高程的信息，则更是困难。自1972年以来已累积的海量卫星遥感影像数据为构建历史湖滩高程模型带来了曙光，研究拟针对吞吐型湖泊湖滩这一地形测量难点区域，通过探索复合多时相、中等空间分辨率影像数据的湖滩地形遥感反演方法，识别遥感影像中的湖滩“隐性高程信息”，试图找到一条快捷、实用的吞吐型湖泊湖滩高程模型的构建途径。

2. 研究区和数据

2.1. 研究区

鄱阳湖位于长江中下游、江西省北部，是我国最大的淡水湖泊(图1)。鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五大江河及清丰山溪、博阳河等区间来水，经调蓄后由湖口注入长江；同时，在长江干流洪水期承纳长江洪水倒灌入湖，对长江洪水起调蓄作用^[4]。鄱阳湖是一个典型的季节性、吞吐型、过水性湖泊。

受热带暖湿季风气候的影响，鄱阳湖湖区夏季(7月)高水位与冬季(1月)低水位多年平均水位差约为12 m；在高水位时以湖泊为主体，在低水位时以沼泽为主体，呈水陆相互交替的生态景观。鄱阳湖水系流域面积为 $1.622 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，湖泊水量年际变化巨大，在高水位时期，湖泊面积可达 4070 km^2 (水位 22.59 m, 1998 年，湖口水文观测站，吴淞高程)；在极枯水位时期湖泊面积仅为 146 km^2 (水位 5.9 m, 1963 年，湖口水文观测站，吴淞高程)，湖滩面积近 3900 km^2 ^[5]。由于湖区内分布有大量的滩地、沼泽和沙洲，故鄱阳湖是我国重要的湿地生态系统，亦是我国最大的越冬珍禽栖息地。因此，快速构建并更新湖滩高程信息，为湖泊演化、库容计算、水利设施建设、湿地保护与资源开发等提供基础数据具有重要意义^[6]。

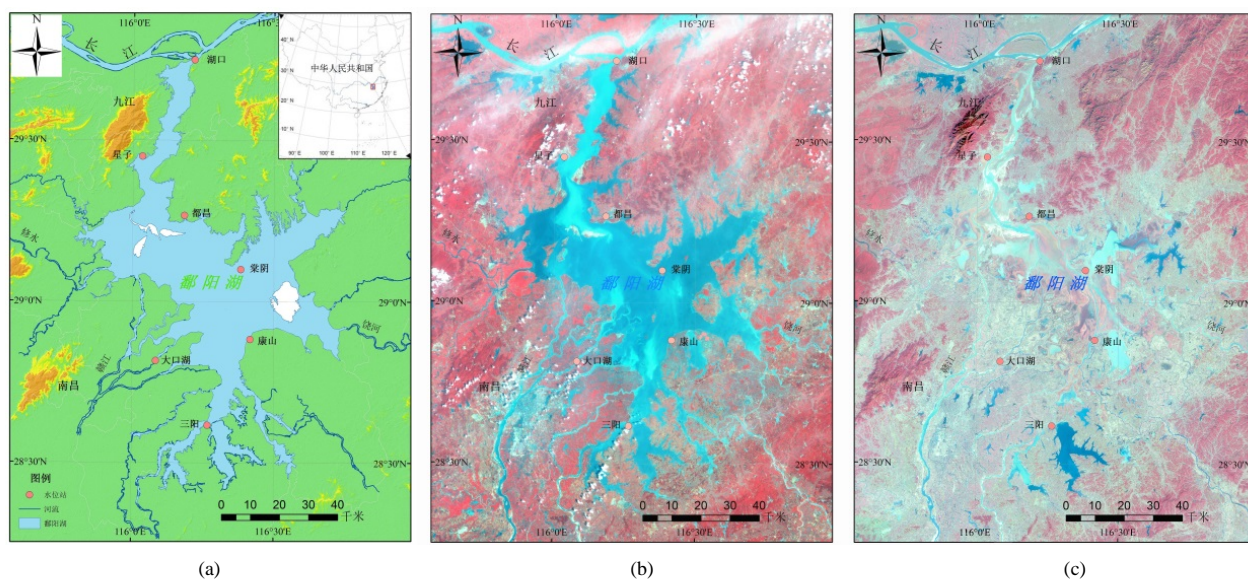


Figure 1. Location map of the research area, China. (a) The Poyang Lake in Jiangxi province, (b) HJ-1 CCD image of the Poyang Lake in wet season acquired on August 14th, 2010, and (c) HJ-1 CCD image of the Poyang Lake in dry season acquired on January 14th, 2010

图 1. 研究区区位图(a) 江西省鄱阳湖地区; (b) 鄱阳湖丰水期 HJ-1 CCD 影像(2010 年 8 月 14 日); (c) 鄱阳湖枯水期 HJ-1 CCD 影像(2010 年 1 月 14 日)

2.2. 研究资料

研究使用的数据包括多时相、中等空间分辨率遥感影像, 2010年逐日水文站水位高程数据, 辅助数据三类。1) 遥感影像数据。覆盖研究区的2010年HJ-1 A/B CCD遥感影像33幅(空间分辨率为 30×30 m), 影像成像质量良好, 水边线清晰, 数据来源为中国资源卫星应用中心(CRESDA, <http://www.cresda.com/>)。2) 水文站实测水位数据。鄱阳湖内都昌、湖口、棠阴、康山、星子等5个水文观测站的逐日观测水位数据, 并将其统一转换至上海吴淞高程基准(图2)。3) 辅助地形数据。鄱阳湖区域1:2.5万地形图, 用于多时相遥感影像的几何精纠正。

3. 方法

Mason 等^[8]提出了基于水边线的海岸带高程模型构建方法: 即将卫星成像时刻海平面视为测量高度计, 卫星成像时刻的水边线(遥感影像中水陆边界)反映了卫星成像时刻水陆的瞬时状态, 假定水陆交接线为一条等高程线(其高程值由邻近验潮站的潮位资料确定), 如有多时相遥感影像, 则可得到在时相上连续反映不同水位的等高程水边线, 据此可建立海岸带水陆交界区域的高程模型^[9-19]。与海岸带潮汐动力过程类似, 吞吐型湖泊的水位亦具有周期性、大范围变化特点, 故多时相、多源遥感影像数据应可用于吞吐型湖泊湖滩地形反演(原理如图3)。研究提出的基于多时相遥感影像的水边线检测方法构建鄱阳湖湖滩高程可分为: 1) 水边线提取; 2) 水边线离散化与高程赋值; 3) 水边线离散点融合数据集中值滤波; 4) 湖滩

DEM 构建; 5) 精度检验。

第一步: 水边线提取。利用ERDAS IMAGE 9.2软件将遥感影像投影转换至WGS_1984_UTM_Zone_50N坐标系统, 并利用地形图选择适当控制点进行几何精纠正, 几何精纠正误差控制在0.5个像元内。采用最大类间方差(OTSU)影像阈值分割方法从各遥感影像中提取水边线。由于在湖区周围存在草滩、湿地、人工水利设施等, OTSU方法提取结果会有一定距离的偏移或误差。为了提高水边线提取的精度, 研究采用屏幕数字化与人工目视解译相结合的方法, 精化水边线提取结果(纠正错误的水边线、补全丢失的水边线, 连接断裂的水边线等), 保证各水边线的可靠性、准确性。经目视检验, 所提取各水边线平均误差不超过1个像元。

第二步: 水边线离散化与高程赋值。由于鄱阳湖水域宽广, 遥感影像成像时刻湖面并非平面, 研究收集湖区南北5个水文观测站逐日水位数据空间内插出卫星成像时刻湖面水位, 为便于水边线高程赋值, 研究将每幅影像提取的水边线离散成30 m间隔的离散点(与遥感影像空间分辨率相匹配), 并将离散点的位置信息、水文站坐标信息以及五站逐日水位观测信息进行复合水文分析, 采用双线性内插值方法为每个离散点赋水位高程值。

第三步: 水边线离散点融合数据集中值滤波。合并2010年多时相影像中的水边线离散点, 用于构建湖滩高程模型。然而, 从多时相影像中提取的水边线可能相互交叉, 该现象在枯水期时提取的水边线尤为明显, 水边线数量越多, 出现交叉的情形越多。这可能

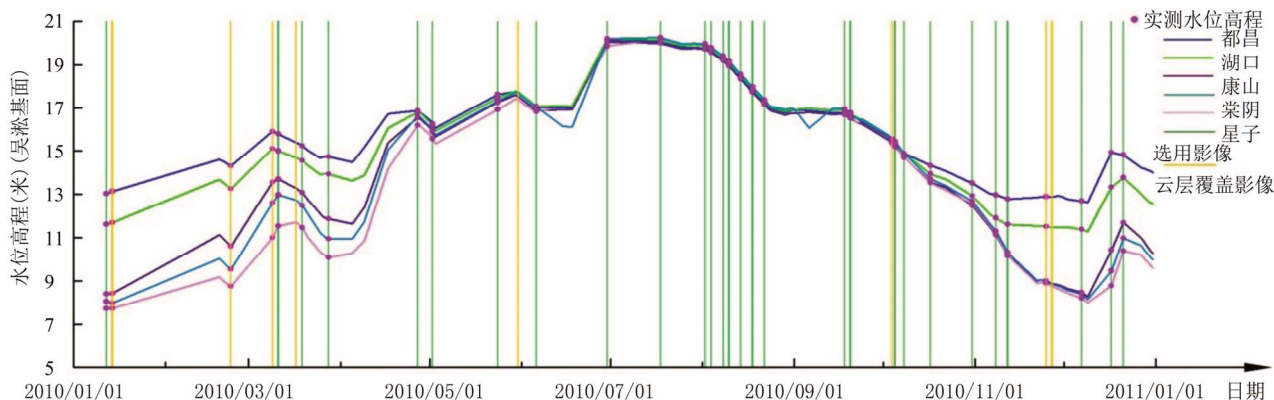


Figure 2. Usability and water level changes analysis result of satellite images acquired in 2010 [7] (datum: Wusong datum)

图2. 研究区2010年遥感影像可用性以及水位际年变化示意图^[7](水位基准: 吴淞基准面)

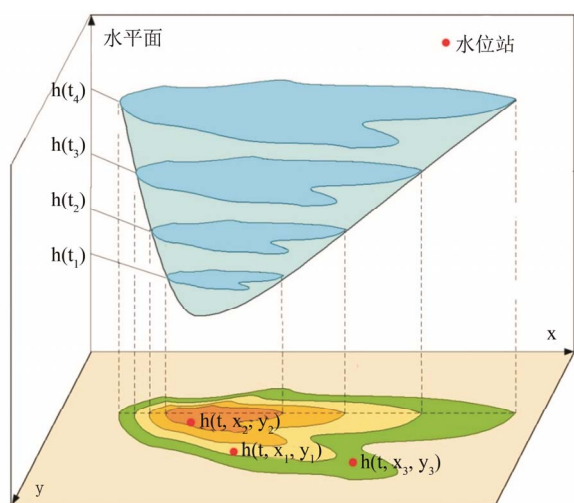


Figure 3. Schematic diagram of waterline detection method (revised form Reference [17])

图3. 吞吐型湖泊湖滩高程构建示意图(据文献[17]改)

是由成像时段内鄱阳湖区域小范围地形变化、气候等情况动态改变，几何纠正和水边线提取过程中引入的误差所造成的。水边线的相互交叉可能会对湖滩高程模型的精度造成影响，故采用一种改进的基于离散点数据的中值滤波方法^[20]消除该影响。

第四步：湖滩高程模型构建。采用普通克里金插值方法对滤波后的离散点融合数据集进行空间内插，构建2010年鄱阳湖湖滩高程模型。需要说明的是，所构建的湖滩高程模型的高度范围受其所选用遥感影像的最高与最低水位观测高程值的限制。

第五步：精度检验。为评估水边线提取与水位空间插值过程中高程模型构建的准确性，研究采用相对一致性检验和绝对检验两种方法进行精度评价。相对一致性检验用于检测从数据预处理到高程模型构建过程中的误差传递；绝对检验用于检测从数据预处理到高程模型构建过程中的总误差，即高程模型构建的准确性。相对一致性检验过程如下：首先，选择用于构建高程模型水边线数据的一景影像，用其水边线作为验证数据；然后在构建好的 DEM 中追踪与所选验证水边线对应的等值线^[21]；最后，比较提取的水边线与追踪出的等值线的差异得到检验结果。检验数据为2010年8月14日对应遥感影像。由于测试数据是参与构建湖滩高程模型的水边线数据之一，故称为“相对一致性检验”，其误差指数定义如下：

$$EI = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

EI 是误差指数， V_1 是检验数据水边线的长度， V_2 是由湖滩高程模型追踪得出的等值线的长度。绝对检验方法与相对一致性检验方法基本相同，唯一区别是选用的检验数据为不参与湖滩高程模型构建，并且通过检验水边线离散成点后与所构建的高程模型作差，检验其垂直精度。检验数据为2010年10月31日对应遥感影像。

4. 结果与讨论

4.1. 2010年湖滩 DEM 结果与精度分析

图4为基于水边线检测方法的湖滩高程模型构建过程，图5为基于2010年33幅具有不同水位高程信息的遥感影像，经由上述方法构建的湖滩高程模型；采用彩色晕渲法，以不同颜色代表不同的水位高程；得到的湖滩高程模型的高程范围为7.71~19.81 m，由对应年份所使用遥感影像水边线高程范围决定。

误差和精度评价表明，自我一致性检测中2010年鄱阳湖湖滩高程模型的误差指数为3.01%，绝对检验中的误差指数为5.22%，平均垂直高差为25.1 cm，精度令人满意。这证明了使用中等空间分辨率、多时相遥感影像，采用水边线提取方法反演的湖滩高程模型的精度在可接受范围内，即该方法适于鄱阳湖湖滩高程的快速构建。

4.2. 讨论

4.2.1. 误差来源

以上方法构建湖滩高程模型误差主要来源包括：水边线位置精度、研究区域地形复杂度。

水边线的位置精度是最大的误差来源，其精度可能受到两方面因素的影响：1) 遥感影像的空间分辨率与几何精纠正误差；2) 水边线提取与选取误差。研究将几何精纠正位置精度控制在0.5个像元之内，选用的遥感影像空间分辨率均为 30×30 m，鄱阳湖内的平均梯度是1.2%，则根据高差公式，水边线几何精纠正精度所产生的高程误差最大不超过19 cm。本文在水边线的提取过程中选用了阈值分割与人工目视解译、屏幕数字化相结合的方法，直接并且有效地克服了阈值分割带来的水边线断裂以及局部破碎交叉等缺点。这对于从遥感影像中检测水陆边界，目视识别相对于其他检测模型仍然具有相对较高的精度。

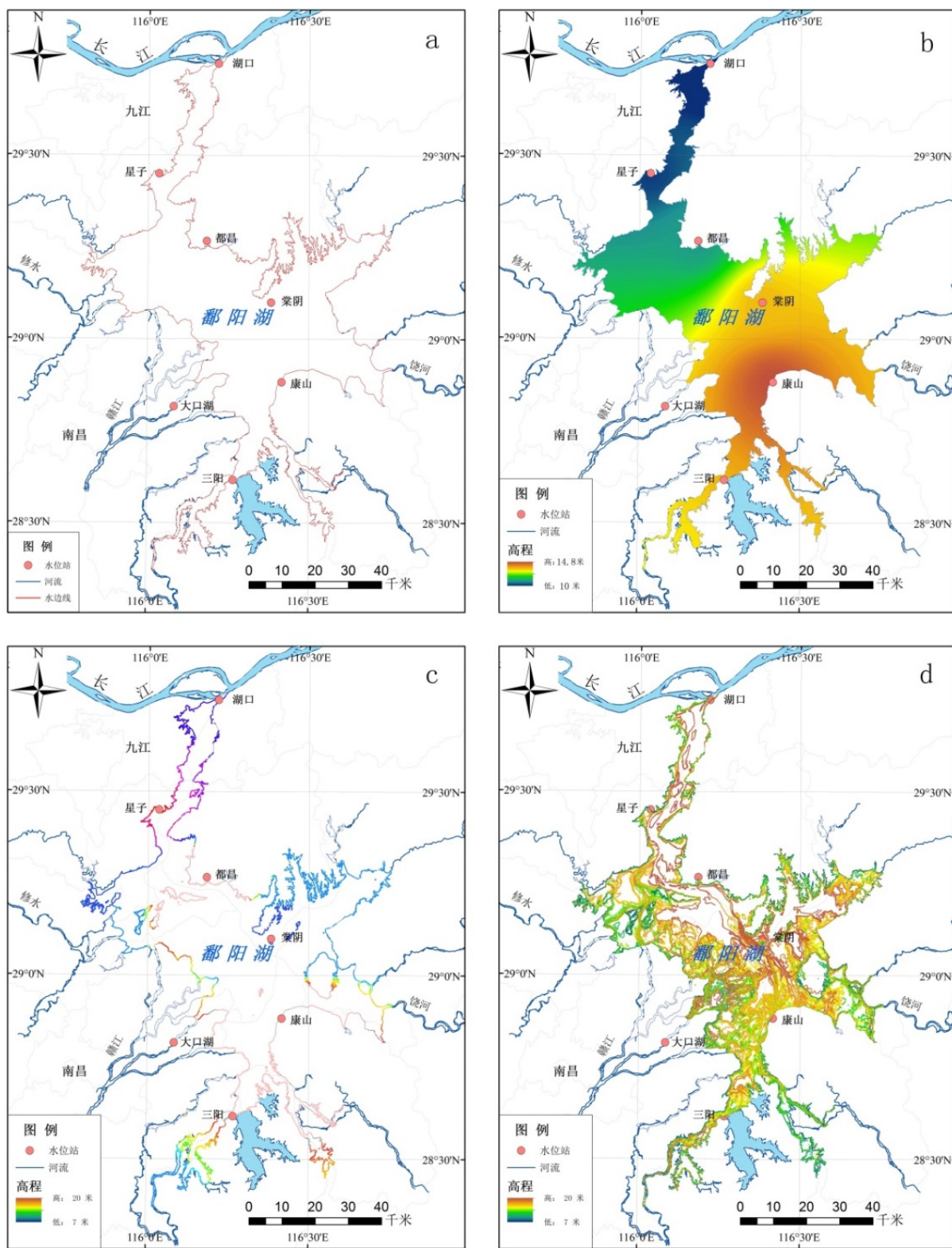


Figure 4. The DEM based on the WDM. (a) The waterline extracted from the satellites image on August 10, 2010; (b) The water level at satellites overpass moments on August 10, 2010; (c) Heighted discrete points of the Poyang Lake from the satellite images on August 10, 2010; (d) Heighted discrete points of the Poyang Lake from multi-temporal satellite images in 2010

图4. 基于水边线检测方法的湖滩DEM构建过程。(a) HJ-1 CCD 2010/08/10影像水边线; (b) HJ-1 CCD 2010/08/10鄱阳湖水位面; (c) HJ-1 CCD 2010/08/10单幅水边线离散高程点; (d) HJ-1 CCD 2010年多时相水边线离散高程点

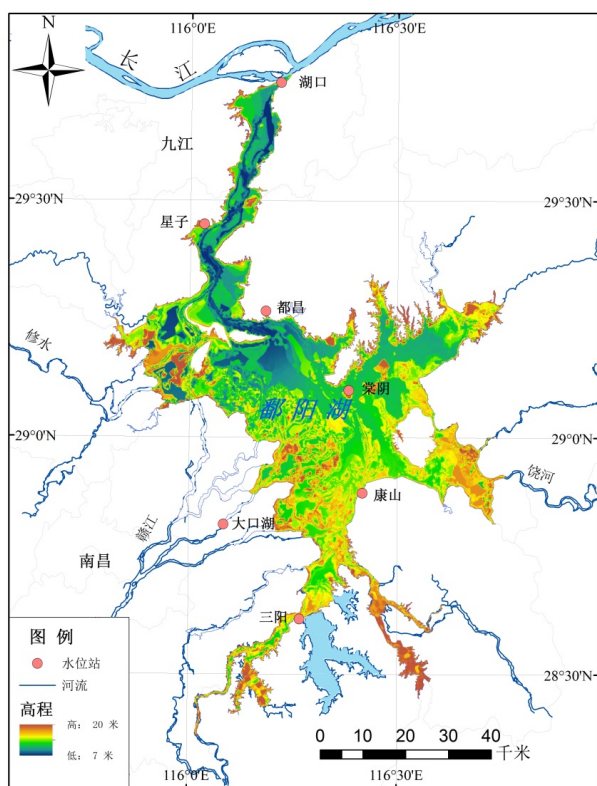


Figure 5. The height map of the Poyang Lake based on the WDM in 2010
 图5. 2010年鄱阳湖湖滩数字高程模型

研究区复杂的地形是影响水边线可覆盖范围以及水边线与高程信息准确复合的重要因素，其对鄱阳湖湖滩 DEM 高程模型构建的影响可以归结为以下三个方面：

1) 湖滩植被的影响。由于鄱阳湖是我国重要的湿地生态系统，其周边分布大量的草滩(高程多在 14~17 m)。尤其是在枯水期形成的暴露在鄱阳湖水面的湿地植被(平均出水高度可达 0.5 m)，会使湿地植被茂盛的湖滩附近，水边线随时相的变化很难反映在遥感影像中，不同时相的水边线可能出现在同一位置，造成水边线提取过程中的误差，进而影响构建的湖滩高程模型细节变化信息，将这种误差称为“伪水边线”误差。

2) 湖底地形的影响。鄱阳湖西北部的“鄱阳湖国家自然保护区”包括 9 个湿地湖泊，其丰水期时与鄱阳湖主湖区连成一片，水位呈同步一致变化，然而在枯水期水位下降到一定高度后，沿岸湖泊与主湖区被天然堤完全分隔，形成多个封闭的蓄水洼地。以西北部的蚌湖为例：蚌湖泄水口狭窄，出入流量极小，当鄱阳湖水位低于 13.83 m，两者被天然堤完全分隔，

蚌湖成了一个封闭洼地。因此在枯水期，无论鄱阳湖主湖区水位如何变动，蚌湖水位始终在 13.7~14.5 m 间波动，并且绝大多数时候稳定于 13.90 m^[22]。因此非干旱年份枯水期时，蚌湖约 13.90 m 以下的湖滩区域难以反映在相应时刻的遥感影像中，其不同时相的水边线基本保持不变。所以，采用水边线提取方法构建的鄱阳湖湖滩高程模型缺少蚌湖等天然低水位封闭洼地的湖滩细节地形信息。

3) 人类活动的影响。鄱阳湖湖区周围已建成大量的水利设施，其反映在遥感影像上多为与湖区难以区分的水域，强烈干扰了利用光谱特征的水边线提取与目视解译选取水边线过程，在这些区域极易造成水边线位置误差，影响高程模型的准确度。下一步，研究将通过采用更精确的水边线提取方法和获取更加详细的水利设施位置形态等措施，重新提取水边线，改善湖滩高程模型精度。此外，鄱阳湖区航道整治和湖底采砂等人类活动也剧烈改变着湖盆的局部地貌，使得湖滩/湖底地形快速变化，可能造成多幅水边线融合后的水边线交叉，影响小区域内的湖滩地形精度，导致高程模型细节信息的缺失。因此，采用水边线提取方法快速构建与更新具有更高空间与时间分辨率的吞吐型湖泊湖滩高程模型显得尤为重要。

4.2.2. 应用局限性

通过多时相遥感影像水边线提取方法构建鄱阳湖湖滩高程模型具有一定的应用局限。由于鄱阳湖是季节性、过水性、吞吐型湖泊，最低水位可达 5.9 m，湖面面积约 146 km²，故存在常年被水覆盖、从未出露的湖底部分(水位 5.9 m 以下区域)，研究提出的湖滩高程模型反演方法不能够获取这些极枯水位以下的湖底地形(图 5 中深蓝色部分)。此外，鄱阳湖区内还有 41 个大小不同的湖心岛屿，其中松门山与吉山东西相连，将鄱阳湖分成南北两湖，南宽北窄，形似巨大的葫芦。松门山海拔 90.9 m，面积约 17.5 km²，常年出露水面。以上常年出露部分地形也不能通过本文采用方法构建(图 5 中用白色部分)。以上这些区域的地形信息可结合声呐测量、地形测量的方法补充完善。

5. 结论

吞吐型湖泊的湖滩地形随着时间和空间发生快

速变化, 遥感反演方法已经被证明是构建快速变化地形的有效手段。本文研究显示, 在研究区地形复杂和水环境快速动态变化的情况下, 基于多时相遥感影像的水边线提取方法构建的高程模型平均垂直误差 25.1 cm, 具有较高的空间分辨率, 表明该方法对于构建吞吐型湖泊湖滩地区的高程模型是可行的。从应用途径上看, 本文的研究为鄱阳湖湖滩地形的定期更新制图提供了一种快速、有效、性价比高的技术手段, 这将为鄱阳湖湖滩及其周边地区的研究、保护与可持续发展提供重要的科学依据与辅助决策支持。此外, 本文的研究对其他吞吐型湖泊湖滩高程模型的构建同样具有参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 施成熙等. 中国湖泊概论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 30-31.
- [2] 王苏民, 窦鸿身等. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 2-3, 171-174.
- [3] 杨永崇, 范玖国. 三维空间数据采集方法的分析与比较研究[J]. 测绘科学, 2009, 34(S1): 7103-7105.
- [4] 李仁东, 刘纪远. 应用 Landsat ETM 数据估算鄱阳湖湿生植被生物量[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 532-539.
- [5] 马定国, 刘影, 陈洁等. 鄱阳湖区洪灾风险与农户脆弱性分析[J]. 地理学报, 2007, 62(3): 321-332.
- [6] 孙鹏, 张强, 陈晓宏等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 828-840.
- [7] Y. X. Liu, M. C. Li, L. Cheng, F. X. Li and Y. M. Shu. A DEM inversion method for inter-tidal zone based on MODIS dataset: A case study in the dongsha sandbank of Jiangsu radial tidal sand-ridges, China. *China Ocean Engineering*, 2010, 24(4): 735-748.
- [8] D. C. Mason, I. J. Davenport, G. J. Robinson, R. A. Flather and B. S. McCartney. Construction of an intertidal digital elevation model by the "water-line" method. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(23): 3187-3190.
- [9] A. Niedermeier, D. Hoja and S. Lehner. Topography and morphodynamics in the German Bight using SAR and optical remote sensing data. *Ocean Dynamics*, 2005, 55(2): 100-109.
- [10] D. C. Mason, M. Amin, I. J. Davenport, R. A. Flather, G. J. Robinson and J. A. Smith. Measurement of recent intertidal sediment transport in Morecambe Bay using the waterline method. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1999, 49(3): 427-456.
- [11] D. C. Mason, I. J. Davenport, R. A. Flather and C. Gurney. A digital elevation model of the inter-tidal areas of the Wash, England, produced by the waterline method. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1455-1460.
- [12] D. C. Mason, I. J. Davenport, R. A. Flather, C. Gurney, G. J. Robinson and J. A. Smith. A sensitivity analysis of the waterline method of constructing a digital elevation model for intertidal areas in ERS SAR scene of eastern England. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2001, 53(6): 759-778.
- [13] D. C. Mason, P. K. Garg. Morphodynamic modelling of intertidal sediment transport in Morecambe Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2001, 53(1): 79-92.
- [14] D. C. Mason, C. Gurney and M. Kennett. Beach topography mapping: A comparison of techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 2000 6(1): 113-124.
- [15] T. R. Scott, D. C. Mason. Data assimilation for a coastal area morphodynamic model: Morecambe Bay. *Coastal Engineering*, 2007, 54(2): 91-109.
- [16] B. Zhao, H. Guo, Y. Yan, Q. Wang and B. Li. A simple waterline approach for tidelands using multi-temporal satellite images: A case study in the Yangtze Delta. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(1): 134-142.
- [17] Y. X. Liu, R.-S. Zhang and M.-C. Li. Approach on the dynamic change in the radial sand ridges offshore the coast of the Jiangsu Province: A case study in Dongsha sandbank. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 199-204.
- [18] L. Feng, C. M. Hu, X. L. Chen, et al. MODIS observations of the bottom topography and its inter-annual variability of Poyang Lake. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 27292741.
- [19] Y. X. Liu, M. C. Li, L. Cheng, F. X. LI and K. F. Chen. Topographic mapping of offshore sandbank tidal flats using the waterline detection method: A case study on the Dongsha Sandbank of Jiangsu radial tidal sand ridges, China. *Marine Geodesy*, 2012, 35: 362-378.
- [20] Y. Liu, M. Li, L. Mao, L. Cheng and F. Li. Toward a method of constructing tidal flat digital elevation models with MODIS and medium-resolution satellite images. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29(2): 438-448.
- [21] L. C. Chen. Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(17): 3383-3397.
- [22] 胡春华, 姜加虎, 朱海虹. 蚌湖与鄱阳湖水位关系与滩地淹露关系[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(6): 617-623.