

文章编号: 1001-1595(2008)01-0102-06

中图分类号: P217

文献标识码: A

淤泥质潮滩水边线提取的遥感研究及 DEM 构建

——以长江口九段沙为例

沈芳¹, 郜昂¹, 吴建平², 周云轩¹, 张杰¹

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学资源与环境学院, 上海 200062

A Remotely Sensed Approach on Waterline Extraction of Silty Tidal Flat for DEM Construction, a Case Study in Jiuduansha Shoal of Yangtze River

SHEN Fang¹, GAO Ang¹, WU Jian-ping², ZHOU Yun-xuan¹, ZHANG Jie¹

1. State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. School of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: Tidal flat as geographically terrestrial and oceanic transition area is generally not mapped, also called "mapping blank area". However, it has paramount significance due to containing rich land and biological resources. For this reason, this paper discussed an approach that was how digital elevation model (DEM) of tidal flat was established by a series of waterlines extracted from multi-temporal Landsat Thermal Mapper (TM) data. It was found that each TM spectral band has distinct sensitivity to waterline extraction, and short-wave infrared band is optimistic for waterline extraction based on sand-flat type, but not on silty-flat type. The attribute of sets of waterline from multi-temporal satellite data were assigned into tidal level value by the estimation from tidal station record while the satellite was passing through the studied area. Then, DEM from waterline extraction was built with GIS. Compared with the results of in situ mapping, relative error was less than 0.5 m in most regions, and mean error was 0.18 m.

Key words: waterline extraction; satellite data; silty tidal flat; Digital Elevation Model (DEM)

摘要: 淤泥质潮滩通常是测绘“盲区”。本文讨论采用多时相陆地卫星提取潮滩水边线以此构建潮滩数字高程模型 (DEM) 的方法。探讨在不同潮情条件下, 各光谱波段对淤泥质潮滩水边线判断的敏感性, 分析表明沙质海岸与淤泥质海岸水边线的确定方法有较大差别。采用了 GIS 技术对提取的水边线赋予相应的高程值, 该值采用研究区附近潮位站理论潮位推算卫星过境的瞬时潮位值, 以此构建潮滩 DEM, 与近期实测资料进行对比: 在 106.2 cm ~ 358.6 cm 高程范围内, 二者相对误差 < 0.5 m 的区域占总面积约 70%, 0.5 ~ 1.0 m 为 20%, > 1.0 m 占 10%。遥感构建 DEM 作为一种手段对实测资料的欠缺是一种补充, 随着遥感技术的发展精度有望提高。

关键词: 遥感方法; 淤泥质潮滩; 水边线; 数字高程模型

1 引言

淤泥质潮滩通常指平均大潮高潮线和平均大潮低潮线之间的地带, 也称潮间带^[1,2]。我国目前从地域上分陆地和海洋地形测量与测绘, 陆地测绘时间更新尺度相对大 (10 年以上), 除个别局部地区大比例尺测图更新较快 (2 ~ 3 年) 外, 一

般更新很慢; 海洋测绘由于航海、航运的需求, 相对更新周期较短, 尤其为了配合航运工程建设年内可能会测量多次, 如长江口北槽深水航道工程的季节性测绘。而在海陆交互作用的潮间带, 涨、落潮流往复于滩坡上, 使潮滩出现周期性的淹漫和出露水面的交替性变化^[1], 尤其在 0 m (海图理论深度基面) 线以上平坦宽阔的潮滩上, 地

收稿日期: 2006-04-18; 修回日期: 2007-02-05

基金项目: 上海市科技攻关计划项目 (04DZ19305); 上海市滩涂资源可持续利用研究项目 (04DZ12049); 教育部科学技术研究重点项目 (105076)

作者简介: 沈芳 (1964-), 女, 江苏无锡人, 博士, 副教授, 研究方向为河口海岸遥感技术与方法。E-mail: fshen@sklec.ecnu.edu.cn

面调查与地形测绘困难较大,往往在潮滩上形成测绘的“空白区”。

作为我国第一、世界第三大河的长江河口,其前缘广阔的淤泥质潮滩,水浅滩平,面积广大,蕴含着丰富的生物、土地和港口资源。事实上,上海市大部分土地都曾是在历史时期内由长江泥沙淤积的滩涂圈围而成的^[3]。但是,这一过渡地带水动力复杂多变,潮滩冲淤变化频繁,在成陆之前尚属于动态不稳定的潜在资源。此外,潮滩的高程变化对湿地生态系统的影响非常大,尤其目前崇明东滩已列为国家湿地保护区,九段沙列为上海市湿地保护区。因此,潮滩的测绘无疑显得非常重要。

陆地卫星系列在轨多年,重复稳定,探测周期短,成本相对较低的特点成为本研究较为理想的数据源。本研究采用多时相遥感提取动态潮滩水边线的方法,结合卫星过境瞬时刻的潮位,基于地理信息系统技术构建潮滩DEM,以此反演淤泥质潮滩地形。

2 研究区概况

长江口拥有 $9.08 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的多年平均径流量(1950年~2003年), $4.22 \times 10^8 \text{ t}$ 多年平均(1951年~2003年)入海泥沙(居世界第四位)^[4],毗邻宽缓的东海大陆架^[3],在口门地区形成了多区域面积广大的淤泥质潮滩,尽管受人类不断围垦,仍有大片潮滩分布,如崇明东滩、九段沙、横沙边滩、南汇边滩等地。

本研究选择九段沙为研究区域。九段沙位于北纬 $31^{\circ}06'20'' \sim 31^{\circ}14'00''$, 东经 $121^{\circ}53'06'' \sim 122^{\circ}04'33''$ (图1),形成于1945年至1958年间,由长江径流携带大量的泥沙淤积而成,是长江河口一块重要的河口新生潮滩湿地。它由上沙、中沙、下沙三部分组成,至今几十年的历史演变,上、下沙形态及面积发生了很大改变,呈快速淤涨态势,0 m(海图理论深度基面)以上的面积由1988年的 72.35 km^2 扩大至2004年的 146.6 km^2 ,是一块不可多得的湿地生态资源和土地资源^[5]。

3 淤泥质潮滩水边线提取

遥感影像上提取的水边线,是水体与陆地之间的分界线^[6]。潮滩水边线是一个瞬态变化的动态边界。随着潮涨潮落水位周期性的变化,水边线

时刻发生摆动,人工追踪水边线测量较为困难。卫星遥感稳定的平台,捕捉不同潮情条件下的水边界,非常有效。卫星遥感方法提取潮滩环境条件下的水边线或岸线是目前惟一有效的途径^[7]。

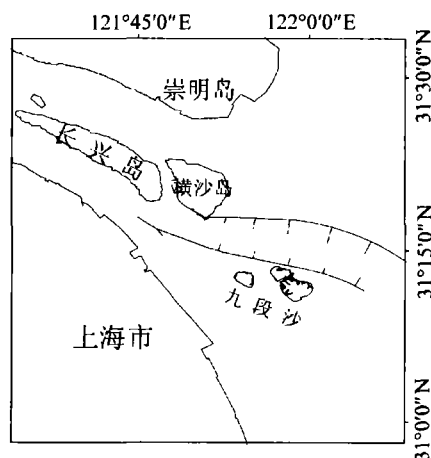


图1 长江口及九段沙位置示意图

Fig. 1 Yangtze River estuary and Jiuduansha shoal location map

国内外学者曾利用 Landsat TM 对湖泊、河流、海岸等水域进行水边线的提取研究^[8-11],一般采用单波段的近红外 TM4 波段或短波红外 TM5 或 TM7 波段提取水边线。对于清澈水体及沙质海岸的水边线,采用短波红外波段更为有效^[11-13],原因为清水体在600 nm以后呈现强吸收特征,在近红外、短波红外波段几乎吸收全部入射能量,反射能量很小。淤泥质海岸情况有所不同,Ryu 等研究韩国 Gomso 海湾水边线的提取时,认为不同潮情下水边线提取的最佳波段顺序应不同,在涨潮情形下,最佳波段顺序依次为近红外或可见光、短波红外、远红外;在退潮情形下,上述波段顺序可能效果不会理想,应采用远红外、近红外、短波红外的波段顺序^[7]。

本研究选取研究区两景不同潮情的遥感影像,观察地形自高至低(从草滩向水体),各波段灰度-空间剖面的变化情况(图2、图3),并分别采用不同波段灰度密度分割的方法提取水边线(图4、图5)。

分析得出:由于水、陆热辐射特征差异显著, TM6(10.4~12.5 μm)热红外辐射影像上水边线清晰易辨(图4、图5)。Ryu 等对比了现场水边线追踪与同步卫星水边线提取的结果,证实了不同潮情下远红外波段均能有效地提取水边线^[7],不足的是 Landsat TM6 的地面分辨率为60 m(其他波段为

30 m)。图2、图3 影像剖面反映出 TM3 与 TM6 水边界线(I 或 II)的位置接近,图4、图5 显示了 TM3 与 TM6 波段的水边界线接近重合,由此表明 TM3 可有效地提取水边界。对于九段沙无论是涨潮还是落潮,凹凸不平的光滩洼地上常有积水,而短波红外 TM5 波段对于滩面暴露但滩面上仍有残余水体的存在非常敏感,图4、图5 中显示 TM5 水边界与实际水边界误差很大,故 TM5 水边界提取的效果不理想,其他 TM 波段信息层次复杂。

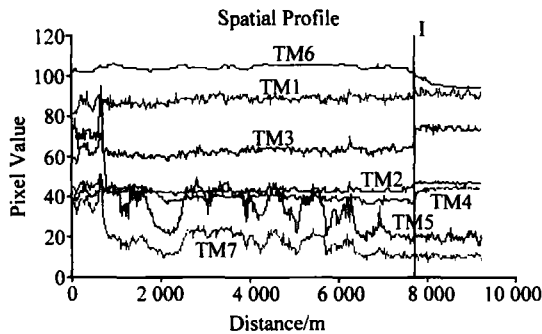


图2 2004年2月26日涨潮时LANDSAT TM影像草滩→水体不同波段灰度-空间剖面

Fig. 2 LANDSAT TM greyscale-spatial profile from terrain to water under flood tide on 2004-02-26

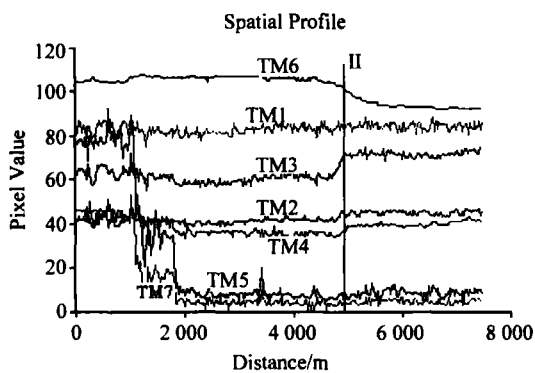


图3 2003年3月11日落潮时LANDSAT TM影像草滩→水体不同波段灰度-空间剖面

Fig. 3 LANDSAT TM greyscale-spatial profile from terrain to water under ebb tide on 2003-03-11

分析表明:可见光 TM3、远红外 TM6 是长江口淤泥质潮滩水边界提取的最佳波段顺序,该顺序与潮情条件关系不大,但需要注意的是可见光波段易受大气散射,及滩槽水体悬浮物浓度的影响,有时会影响水边线的提取质量,因此当 TM3 受到大气散射及悬浮物影响强烈时采用地面分辨率较低的 TM6。

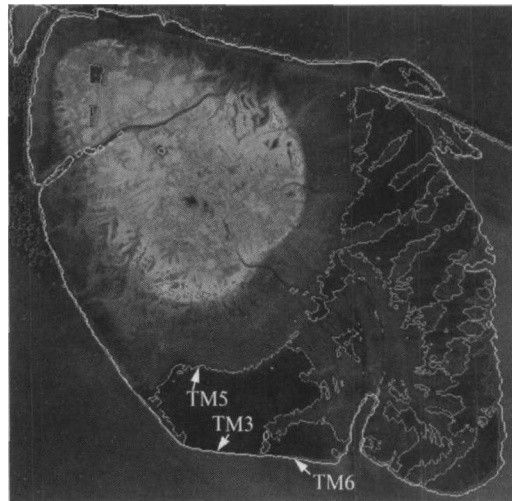


图4 2004年2月26日10时涨潮时TM影像及水边界(九段沙中、下沙)

Fig. 4 TM image and waterlines under flood tide

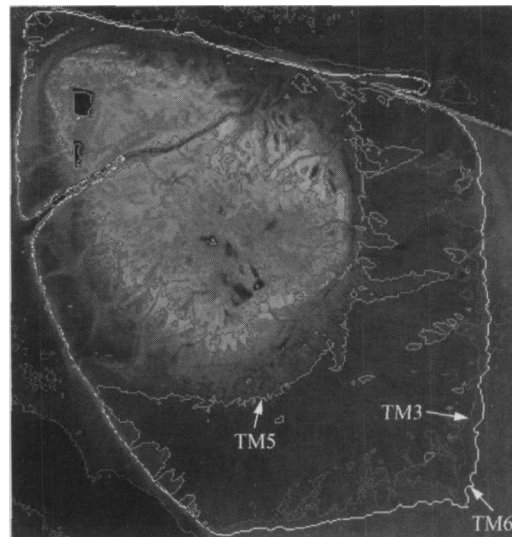


图5 2003年3月11日10时落潮时TM影像及水边界(九段沙中、下沙)

Fig. 5 TM image and waterlines under ebb tide

4 潮滩数字高程模型构建

卫星数据提取的潮滩水边界反映了某一潮位时刻下的状态,假定此时水边界是一条等高线,那么根据附近潮位站的理论潮位或实测潮位值,可推断出水边界的高程值。一系列不同潮位条件下获得的遥感水边界即可形成一系列等高线,由此可生成潮滩 DEM。

考虑到九段沙1997年实施了人工生态促淤工程及2000年在其北部实施的北槽深水航道工程,研究调查表明,九段沙淤积速度加快,滩涂面积和

高程均有所扩大,为减少潮滩地形受淤积的影响,应选择短期内的多景数据建立潮滩 DEM。受卫星数据周期及天气条件的限制,本研究选择一年内的 6 景卫星数据(2003 ~ 2004 年)开展试验。

4.1 潮位数据

验潮站的潮汐预报资料,通常是以平衡潮理论为基础,借助实际潮汐观测资料,采用调和分析方法推算未来时刻的潮高变化。潮汐表预报潮位只是整点潮位,而卫星过境的瞬时时刻一般不是整点时间,且每一景卫星扫描成像过程仅历时十几秒,仅依靠整点潮汐预报资料,会影响卫星瞬时过境时对潮位的推算及对潮情的准确判断。若要精确获取该时刻的潮位数据,一种方法是已知预报时采用潮汐调和常数,内插任意时刻的潮位数据,这种方法需要了解潮汐预报部门的实测资料以及所采用的调和和分析模式,否则预报结果不准确;另一种方法是通过理论整点的潮位数据建立多项式,采用插值运算方法获取任意时刻的潮位,这种方法简单,不需要了解诸多细节便可达到目标。本文采用后者,即采用上海港潮汐表 2003 年 ~ 2004 年中浚验潮站的预报潮位(潮高基面起算),经插值运算获得卫星过境时刻的瞬时潮位(见表 1)。上海港各验潮站潮高基面与海图深度基面一致,在正常天气情况下,预报与实际较符合,潮高误差约 $\pm 15 \text{ cm}^{[14]}$ 。此外,由于缺乏卫星过境时刻的风浪数据,故文中水边线的高程采用风平浪静状态时验潮站的潮高数据。

表 1 卫星成像时的潮情

Tab. 1 Tidal conditions at satellite imaging

卫星成像日期 (过境时刻)	潮位 /cm	卫星成像时刻	
		涨落潮 阶段	距涨、落初 的时间/h
2004-07-19 (10:07)	255.743 6	涨潮	2.53
2004-06-01 (10:06)	358.696 5	落潮	0.68
2004-02-26 (10:04)	106.166 8	涨潮	0.80
2003-10-21 (10:03)	259.830 2	落潮	1.88
2003-08-02 (10:02)	120.234 1	涨潮	0.95
2003-03-11 (09:59)	142.260 9	落潮	6.42

4.2 几何精校正及 DEM 构建

选择长江口沿岸地区 2004 年修测的 1:10 000 的 18 幅地形图为配准底图,地形图统一采用 1985 年国家高程基准和 1980 西安坐标系。长江口 TM 影像上在江苏、上海沿岸及崇明岛选取了 36 个地物标志点,采用二次多项式拟合、重采样完成几何校正,经误差分析累积 RMSE < 15 m(0.5 pixel)。投影转换及校正过程误差分析均在 ERDAS Imagine 软件下完成。配准校正后的影像按上述方法提取水边线,然后矢量化,生成 SHP 文件。在 ArcGIS 支持下,对每条水边线附加潮高值(海图理论深度基面起算)。采用不规则三角网插值生成潮滩数字高程模型(图 6)。由于潮滩上狭长潮沟的存在,影像上提取的多时相水边线容易交叉或叠合,给数学模拟带来困难,易出现地形奇异。为了尽量消除数学模拟的异常,适当进行人工编辑以减轻潮沟的影响。

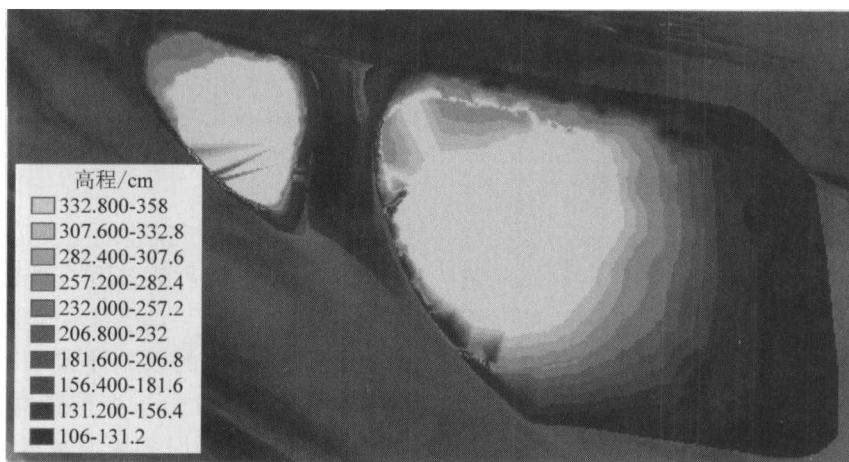


图 6 2003 年 ~ 2004 年九段沙的数字高程模型

Fig. 6 Digital elevation model of Jiuduansha shoal from 2003 to 2004

4.3 与实测资料的验证

课题组 2004 年 9 月、2005 年 6 月进行两次

九段沙地形测量,采用了 THALES 公司的 Z-MAX 超级 RTK 测量系统,水平定位精度 10 mm + 1.0

$\times 10^{-6}$, 垂直定位精度 $20\text{ mm} + 1.0 \times 10^{-6}$ 。首次对九段沙进行大规模潮滩地形的精确测量, 在湿地界定范围 -6 m (海图理论深度基面起算) 以上的区域内完成了高密度的定位及高程量测。最低测量值为 -6 m , 最高测量值为 $+5\text{ m}$ 。在 Arc-

GIS 支持下, 将获取的测量数据生成潮滩数字高程模型 $DEM_{\text{实}}$ 。遥感水边线构建的 $DEM_{\text{遥}}$ 与实测数据构建的 $DEM_{\text{实}}$ 相减所生成的结果见图 7, 二者相对误差统计见图 8。

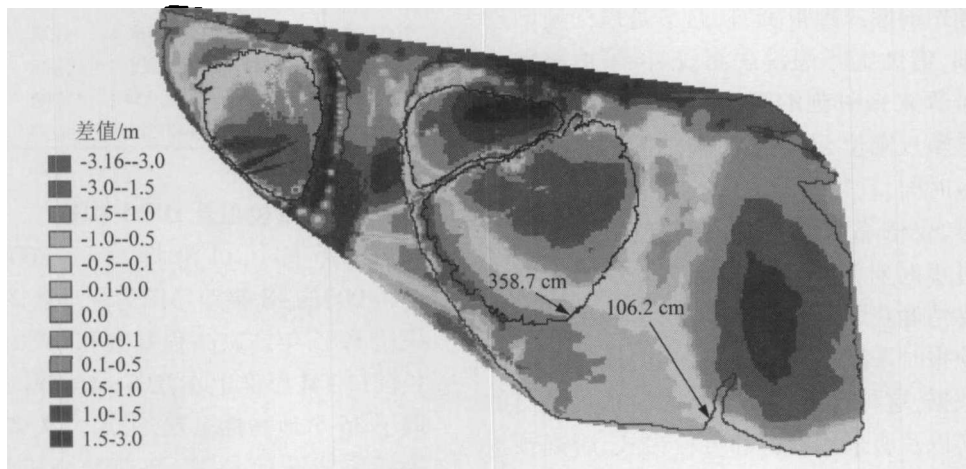


图7 $DEM_{\text{实}} - DEM_{\text{遥}}$ 的结果

Fig. 7 The difference between $DEM_{\text{实}}$ and $DEM_{\text{遥}}$

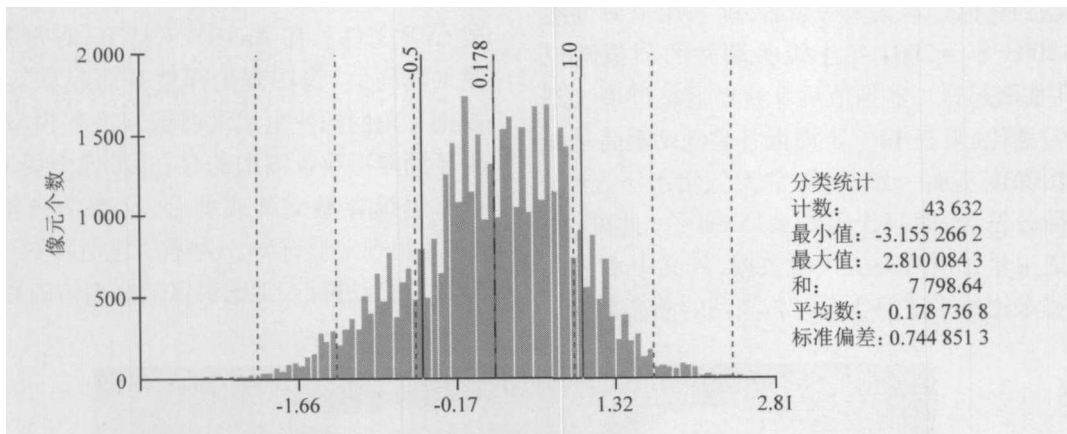


图8 遥感相对于实测高程模型的误差统计

Fig. 8 Statistic analysis from relative error on $DEM_{\text{遥}}$ and $DEM_{\text{实}}$

图 7, 图 8 表明, 遥感与实测高程模型的相对误差呈正态分布, 误差集中于 $-1.5\text{ m} \sim 1.5\text{ m}$ 范围之内, 平均误差为 0.18 m 。从表 1 可知最高瞬时潮位为 358.7 cm (2004 年 6 月 1 日), 最低为 106.2 cm (2004 年 2 月 26 日), 即水边线大于 358.6 cm 或小于 106.2 cm 的地区为遥感数据空白区, 故该区域的统计结果不可靠。在 $106.2\text{ cm} \sim 358.6\text{ cm}$ 高程范围内, 二者相对误差 $< 0.5\text{ m}$ 的区域占总面积约 70% , $0.5\text{ m} \sim 1.0\text{ m}$ 为 20% , $> 1.0\text{ m}$ 占 10% , 而局部区域 (下沙前缘误差 $> 1.0\text{ m}$ 的深色区域) 的高误差对下次现场实测

将给予启示。分析误差的主要原因可能有: 遥感构建 $DEM_{\text{遥}}$ 的高程值采用了理论预报潮位, 实测模型的高程值采用了验潮站的实测潮位, 而理论潮位与实测潮位的误差导致二者高程模型的误差; 遥感影像地面分辨率的精度, 会影响水边线的漂移; 卫星过境时刻风浪对水边线平面位置和高程的影响, 也会导致一定的误差; 此外, 水边线遥感提取水边线的时间尺度与实测高程时间尺度的差异, 尤其在遥感时间尺度下潮滩本身整体或局部淤涨或冲刷造成地形的变化也会影响精度。

5 结论与展望

以长江口淤泥质潮滩九段沙为研究区,分别观察了涨、落潮条件下,不同波段如可见光、近红外、短波红外、远红外波段对淤泥质潮滩水、陆分界的敏感性。结果表明:①淤泥质潮滩水边线的提取,各波段其水、陆分界敏感性不同;②淤泥质潮滩与沙质海岸水边线提取的最佳波段有所差别;③无论是涨潮还是落潮条件下,可见光、远红外波段是淤泥质潮滩水边线提取的最佳波段顺序;④短波红外波段对于滩面暴露但滩面上仍有残余水体的存在非常敏感,往往不能有效地提取淤泥质潮滩水边线。

九段沙0 m线以上、4 m线以下的潮滩长期以来为测绘“盲区”,特别在下沙前缘,滩宽平缓,风浪较大,测量条件困难。因此,采用多时相陆地卫星快速地提取潮滩水边线,利用研究区附近验潮站的理论潮位推算卫星过境的瞬时潮位值,构建潮滩DEM不失为一条有效的捷径,与实测值比较后,也获得了一定精度的结果。

目前商用高空间分辨率遥感卫星如SPOT5, IKONOS, QuickBird等的应用可提高水边线的提取精度,但高程反演要求多时相的重复过境使数据成本很高。此外,对地观测卫星大多为上午10时左右过境,这一时间难以捕捉到大潮高潮线或低潮线,使得高程反演范围受限。相信随着高空间、高光谱、高时间分辨率卫星遥感技术的发展,精度及潮滩高程反演范围将大大改善和拓展,本项研究的意义将会更大。

参考文献:

- [1] WANG Bao-can, HUANG Yang-song. Coastal Dynamic Geomorphology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1989. 217-236. (王宝灿, 黄仰松. 海岸动力地貌[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989. 217-236.)
- [2] YANG Shi-lun. Coastal Environment and Geomorphology Processes [M]. Beijing: Ocean Press, 2003. 240. (杨世伦. 海岸环境和地貌过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. 240.)
- [3] CHEN Ji-yu, WANG Bao-can, YU Zhi-ying, et al. Developments and Evolution of China's Coast [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Press, 1989. 501. (陈吉余, 王宝灿, 虞志英, 等. 中国海岸发育过程和演变规律[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989. 501.)
- [4] YANG S L, SHI Z, ZHAO H, LI P, DAI S, GAO A. Effects of Human Activities on the Yangtze River Suspended Sediment Flux into the Estuary in the Last Century [J]. Hydrology of Earth System Sciences, 2004, 8(6): 1 210-1 216.
- [5] CHEN Jia-kuan. Overview of Shanghai Jiuduansha Wetland Nature Reserve [M]. Beijing: Science Press, 2003. 3-10. (陈家宽. 上海九段沙湿地自然保护区科学考察集[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 3-10.)
- [6] MASON D, HILL D, DAVENPORT I, FLATHER R, ROBINSON G. Improving Inter-Tidal Digital Elevation Models Constructed by the Waterline Technique [A]. Proceedings Third ERS Symposium [C]. Florence: ESA Publications Division, 1997. 1 079-1 082.
- [7] RYU J H, WON J S, MIN K D. Waterline Extraction from Landsat TM Data in a Tidal Flat [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 442-456.
- [8] KEVIN W, EL ASMAR H M. Monitoring Changing Position of Coastlines Using Thematic Mapper Imagery—an Example from the Nile Delta [J]. Geomorphology, 1999, 29: 93-105.
- [9] SHEN Fang, KUANG Ding-bo. Remote Sensing Investigation and Survey of Qinghai Lake in the Past 25 Years [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(4): 289-296. (沈芳, 匡定波. 青海湖最近25年变化的遥感调查与研究[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 289-296.)
- [10] MANAVALAN P, SATHYANATH P, RAJEGOWDA G L. Digital Image Analysis Techniques to Estimate Waterspread for Capacity Evaluations of Reservoirs [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59(9): 1 389-1 395.
- [11] FROUIN R, SCHWINDLING M, DESCHAMPS P Y. Spectral Reflectance of Sea Foam in the Visible and Near-Infrared: in Situ Measurements Waterline and Remote Sensing Implications [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101, 14 361-14 371.
- [12] FRAZIER P S, PAGE K J. Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(12): 1 461-1 467.
- [13] LOHANI B, MASON D C. Construction of a Digital Elevation Model of the Holderness Coast Using the Waterline Method and Airborne Thematic Mapper Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(3): 593-607.

(责任编辑:丛树平)