

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.005

遥感与水动力模型相结合的宽大潮滩历史地形反演

康彦彦¹, 丁贤荣², 葛小平²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 潮滩作为陆海交互区, 面积宽广, 测量困难, 历史地形资料缺失, 已经严重影响到潮滩的开发利用。以辐射沙脊群潮滩为实验区, 利用 1987 年前后的 TM、MSS 影像提取不同潮情下的系列水边线, 运用 Mike21 水动力模型模拟遥感图像对应时刻下的瞬时海面高度, 为水边线赋值, 进而通过地形反复迭代得到数字高程模型。结果表明, 在辐射沙脊群潮滩区, 水边线法获取的地形结果与海图上测点的相关性较高, 决定系数 R^2 达 0.864, 绝对平均误差 0.37 m, 均方根误差 0.41 m, 地形结果可用于进一步的潮滩地貌演变分析。

关键词: 辐射沙脊群; 潮滩; 数字高程模型; 遥感; 水动力模型

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)06-0531-06

Historical topographic reconstruction of large-scale tidal flats based on remote sensing and hydrodynamic model

KANG Yanyan¹, DING Xianrong², GE Xiaoping²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Tidal flats, which represent a wide land-sea interaction zone, are difficult to measure. The lack of historical topographic data has seriously affected the development and utilization of tidal flats. Using a tidal flat of radial sand ridges as an example, waterlines under different tide conditions were extracted from TM and MSS remote sensing images from around 1987, and sea surface heights were simulated with a Mike21 hydrodynamic model. Elevations were assigned to the waterlines. The digital elevation model was obtained through the terrain iteration process. The results show that, in the tidal flat of radial sand ridges, there is a strong correlation between the topographic results obtained from the waterline method and the measured data from the nautical chart, with a coefficient of determination (R^2) of 0.864, a mean absolute error of 0.37 m, and a root mean square error of 0.41 m, indicating that the topographic results can be further used to analyze the morphologic evolution of the tidal flats.

Key words: radial sand ridges; tidal flat; digital elevation model; remote sensing; hydrodynamic model

辐射沙脊群海域分布有超过 2 000 km² 的淤泥质潮滩, 自然资源十分丰富, 一直以来都是滩涂围垦开发的重点区域^[1]。2010 年《江苏沿海滩涂围垦规划纲要》出炉, 全省 18 万 hm² 滩涂即将被围垦, 且主要集中于辐射沙脊群海域^[2]。在这一大背景下, 潮滩的基础研究尤其是近年来的地形演变研究就显得十分重要, 而历史地形资料是研究地形演变的基础, 但是这一大面积潮滩区域长期处于缺测状态。另外, 由于辐射沙脊群海域复杂的水动力特征、恶劣的自然环境及大量人力物力投入的不足, 造成了该海域尤其是潮滩区域的地形资料测量困难, 十分不利于进一步的科学研究, 阻碍了大面积潮滩的合理开发利用进程, 因此十分有必要开展辐射沙脊群海域大面积潮滩尤其是缺测区域的历史地形模拟研究。

由于受潮滩水动力环境复杂、地貌演变迅速、地形平缓、涨落潮影响、人力物力消耗等因素制约, 导致获

收稿日期: 2015-01-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B01); 江苏省自然科学基金(BK2012414); 中央高校基本科研业务费专项(2013B15020111)

作者简介: 康彦彦(1984—), 女, 河北石家庄人, 博士, 主要从事海洋环境遥感研究。E-mail: kangyanyan@hhu.edu.cn

取现状的潮滩高程信息困难,而获取近几十年来能够反映潮滩演化的历史潮滩高程信息则更为困难,因此辐射沙脊群区域没有进行过大范围的潮滩地形野外测量。近年来快速发展起来的机载激光雷达测距(Light Detection And Ranging, LiDAR)技术在现状潮滩地形监测上得到了很好的应用。杜国庆等^[3]采用该技术生成了江苏沿海潮滩数字高程模型。然而由于 LiDAR 历史数据积累少,成本高,在一定程度上制约了用于潮滩历史动态演变规律分析中的应用研究。自 1972 年美国地球资源卫星(Landsat)发射以来,遥感数据(主要集中在光学遥感数据)在空间、时间、光谱、辐射分辨率等方面不断改善,已累积了大量时空可比性很强的海岸区域观测数据,为开展潮滩历史高程信息反演研究提供了数据支撑^[4]。近十多年来,遥感数据越来越多地被应用于潮滩高程反演。其中一种为基于光学遥感影像的高程反演方法,主要依据辐射传输理论方程、半理论半经验的水深遥感模型、实测水深信息与像元辐射值相关分析模型等从遥感影像中反演地形信息^[5]。但是由于受到天气状况、能否覆盖整个潮间带等因素制约,其平面分辨率和垂直分辨率都较低,不利于大面积的潮滩历史地形反演。另外一种被认为最有效的方法就是水边线法,其原理是将水边线作为测量潮滩高程的高度计^[6],潮滩遥感水边线反映了卫星成像时刻水陆的瞬时状态,水陆交界线的水平位置由水边线决定,而垂直高度信息则来自成像时刻的潮高。若能够获取足够数量处于不同潮位高度的潮滩遥感影像,提取出水边线,并结合多期瞬时海面高度,即可构建潮滩数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)^[6-8]。该方法在历史潮滩高程反演、成本和测量环境要求方面有独特的优势,且能够覆盖整个潮间带区域,虽然在垂直精度和水平精度上无法与地面调查、航空 LiDAR 等技术相媲美,但较为适合进行大范围的潮滩历史地形反演。本文将遥感影像与水动力学模型相结合,以 1987 年为基准,采用不同潮情下的系列水边线遥感提取与潮位赋值方法,构建潮滩历史地形,地形结果可为进一步的潮滩地貌演变奠定数据基础,为滩涂围垦开发利用提供科学支撑。

1 研究区及数据

南黄海辐射沙脊群位于江苏岸外、黄海南部陆架海域,其范围大体上自射阳河口向南至长江口北部的蒿枝港;南北范围界于 32°00'N~33°48'N,长约 200 km;东西范围界于 120°40'E~122°10'E,宽约 140 km(图 1)。大体上以琼港为顶点,自岸至海呈展开的褶皱状向海辐射,由多条沙脊与分隔沙脊的潮流通道组成^[9]。琼港以北海域水深浅、坡度缓,沙脊规模大且分布较密,沟槽较浅;以南海域水较深,沙脊规模小,分布零散,沟槽较深。整个海域脊槽相间,水深大部分界于 0~25 m,个别深槽最深可达 38 m^[1]。辐射沙脊群海域主要受 2 个潮波系统控制,以无潮点为中心的旋转潮波控制着的北部海区,而南部海区仍受东海进入的前进潮波制约。这 2 个潮波系统波峰线在琼港岸外辐合并具有向琼港岸边推进的特征,因此称为移动性驻潮波^[10]。潮波辐合区由于潮波能量集中,振幅增大,其中心部位(琼港岸外)条渔港深槽潮差可达 9.39 m。^[11]辐射沙脊群区域潮滩资源丰富,根据“江苏近海海洋综合调查与评价”专项(江苏 908 专项)调查结果,理论最低潮面 0 m 以上的滩涂面积可达 2 047 km²。^[1]

研究数据主要包括遥感影像与历史海图资料。收集了 1986—1988 年天气状况良好的不同潮情下的 Landsat-4, 5 TM、MSS 遥感影像(表 1)空间分辨率分别是 30 m、79 m。对所有遥感影像进行了几何精度纠正,纠正精度在一个象元以内,进而对遥感图像进行增强预处理后待用。1979 年海图和 1992 年部分实测海域海图数据进行数字化后,为水动力学模型的建立提供基础水深数据。模型范围如图 1 所示。另外,选取江苏 908 专项调查的 4 个临时潮位站点的实测潮位资料(图 1)作为水动力学模型的潮位验证依据,率定模型参数。选取 20 世纪 80 年代出版的新洋港、琼港地区的 20 万地形图^[12],数字化潮滩上高程实测点作为 DEM 结果的精度验证依据。

2 研究方法

本文基于水边线法基本原理,采用遥感和水动力学模型相结合的方法,通过不同潮位情况下的水边线构建辐射沙脊群大面积历史时期 DEM。地形构建数据流程如图 2 所示:(a) 收集历史年份(1987 年)前后的辐射沙脊群核心区域的遥感影像 MSS(79 m)、TM(30 m)影像,进而基于 1:50 000 地形图对遥感影像进行几何纠正,确保配准精度在 1 个象元以内。(b) 基于遥感影像,采用面向对象提取方法来提取对应的水边线,提取精度在 1 个象元内,进而将水边线离散成水边点,生成水边点集。(c) 构建该区域的二维水动力学模型,

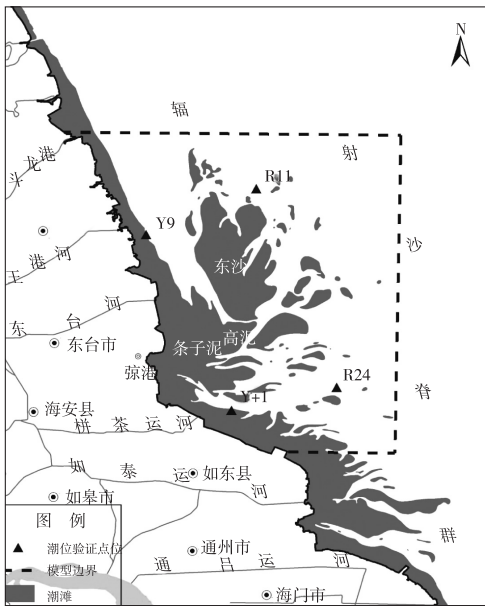


图 1 研究区, 潮位测点及水动力学模型范围

Fig. 1 Study area, tide stations, and hydrodynamic model scope

表 1 遥感影像数据

Table 1 Details of remote sensing images

采集日期	时间	传感器	潮情
1986-02-15	9:53	TM	低潮
1986-03-03	9:50	TM	低潮
1986-05-06	9:55	TM	高潮
1986-05-14	9:49	MSS	低潮
1986-05-22	9:55	TM	高潮
1986-07-01	9:49	MSS	中高潮
1986-08-18	9:50	MSS	中高潮
1986-09-03	9:50	MSS	中高潮
1987-01-17	9:50	TM	低潮
1987-02-02	9:50	TM	低潮
1987-04-23	9:53	TM	中潮
1987-05-25	9:54	TM	中高潮
1987-06-10	9:54	TM	高潮
1987-09-14	9:57	TM	低潮
1987-12-19	9:59	TM	中潮
1988-01-20	9:59	MSS	中低潮
1988-04-25	10:00	MSS	中低潮
1988-07-14	10:01	TM	中潮
1988-08-15	10:00	TM	中低潮

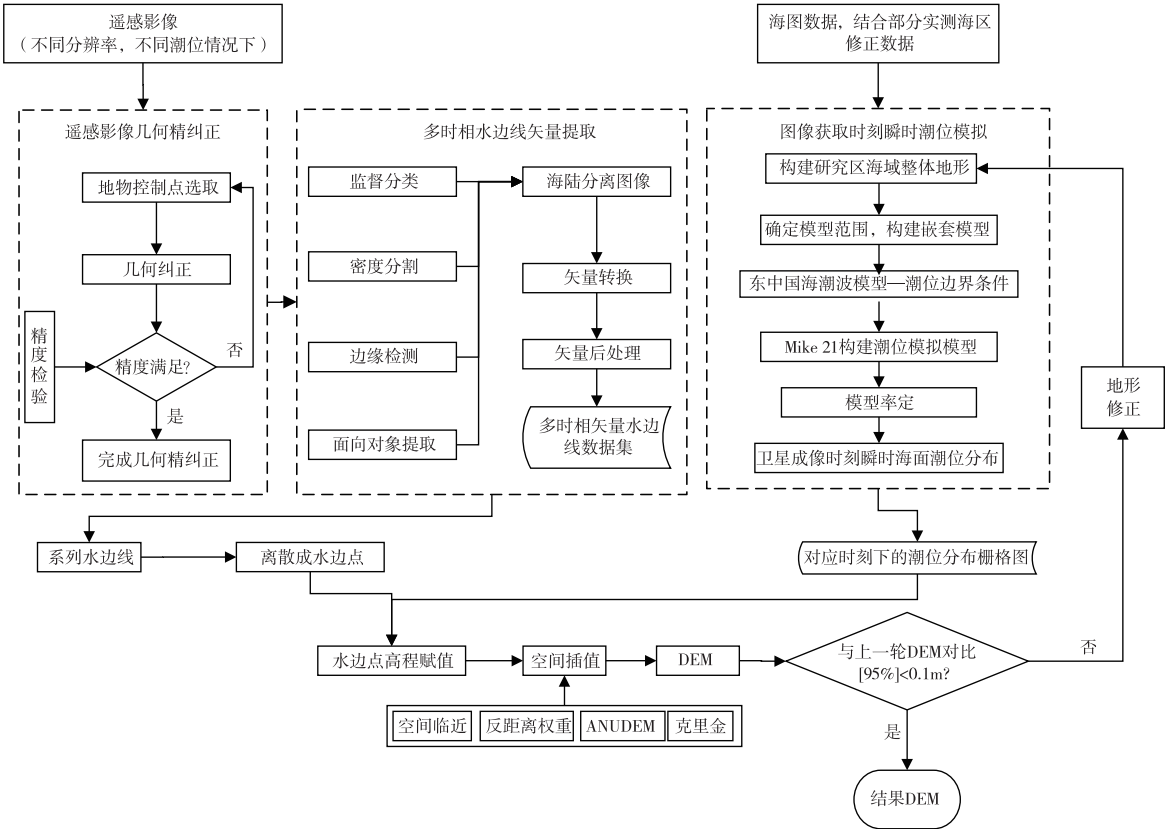


图 2 潮滩历史地形构建流程

Fig. 2 Flow chart of historical DEM construction in tidal flats

模拟遥感影像获取时刻下的整个辐射沙脊群海域的瞬时海面高度, 将对应水边点位置的潮位值作为高程值赋值给水边点。(d) 基于具备高程信息的水边点集合, 采用空间插值的方法生成 DEM。(e) 生成的 DEM 将作为初始地形数据重新用于构建二维潮位模拟模型; 运行模型, 对所有水边点重新进行高程赋值, 生成 DEM; 将 DEM 与上一轮 DEM 相减, 判断 95% 差值能否在 $\pm 0.1\text{ m}$ 之间, 如果满足则输出 DEM 结果, 反之则继续迭代。

2.1 水边线遥感提取

潮滩水边线是海水与潮滩出露岸滩的分界线,两者在遥感影像上呈现为不同的色调和纹理特性。近年来,在水边线提取方面已发展出多种方法,如监督分类法、密度分割法、边缘检测法、面向对象法等^[13-14],分别适用于不同类型的遥感影像数据。由于本文所使用遥感影像空间分辨率、成像质量各不相同,无法采用统一有效的方法进行水边线自动提取,因此,水边线提取采用半自动方式,即首先针对遥感影像本身的特点使用相应的提取方法得到初始提取结果,在此基础上通过目视解译发现其中存在的问题并予以手动更正。为保证水边线提取精度,人工检查及解译比例尺大于1:20 000。

2.2 基于 Mike21 的二维潮位模拟模型

Mike21 水动力模块适用于河流、湖泊、海洋及河口海岸地区的水动力模拟,被广泛运用于潮流、波浪、风暴潮等水动力现象的研究^[15]。

利用 Mike21 的 HD 模块模拟在遥感影像获取时间段内潮位变化情况,基于 Navier-stokes 方程组建立模型。在模拟计算时并没有初始计算结果,固采用冷启动方式,即初始水位及流速均为零。模型采用东中国海嵌套模型,小模型范围主要包含南黄海辐射沙脊群核心海域(图1)。计算网格采用三角网格,自岸向海按照自小到100~2 000 m进行网格构建。时间步长取30 s。图1 坐标为高斯投影下的大地坐标,中央经度为120°,3°分带。模型计算采用的基础地形资料为1979年结合1992年补测海图数据空间插值生成。边界条件:模型南边界、东边界和北边界为水边界,需要给定水边界处网格的潮位过程,模型的边界条件由东中国海潮波数学模型提供^[10,16-17]。糙率系数反映了水流与河床之间的相互作用,模型中取糙率值45~65。涡黏系数即水流紊动黏性系数,是 boussinesq 假定中类比层流黏性应力计算紊动附加应力时引入的参数,对于二维模型,涡黏系数并不敏感,在模型中根据 Smagorinsky 公式确定^[18]。笔者采用江苏近海海洋环境调查与评价(JS908)2006年8月24日和25日实测6个临时潮位站的潮位数据对二维水动力学模型模拟结果进行比较验证(图3)。结果表明,模拟结果与实测值之间吻合较好,潮位平均误差0.2 m,潮时在0.15 h之内,说明本文二维水动力学潮位模拟模型能够较好地模拟辐射沙脊群区域内潮位变化,进而能够比较准确地计算遥感影像获取时刻下的辐射沙脊群海域各点的潮位值,利用该模型能够为遥感图像的水边线实施高程赋值。

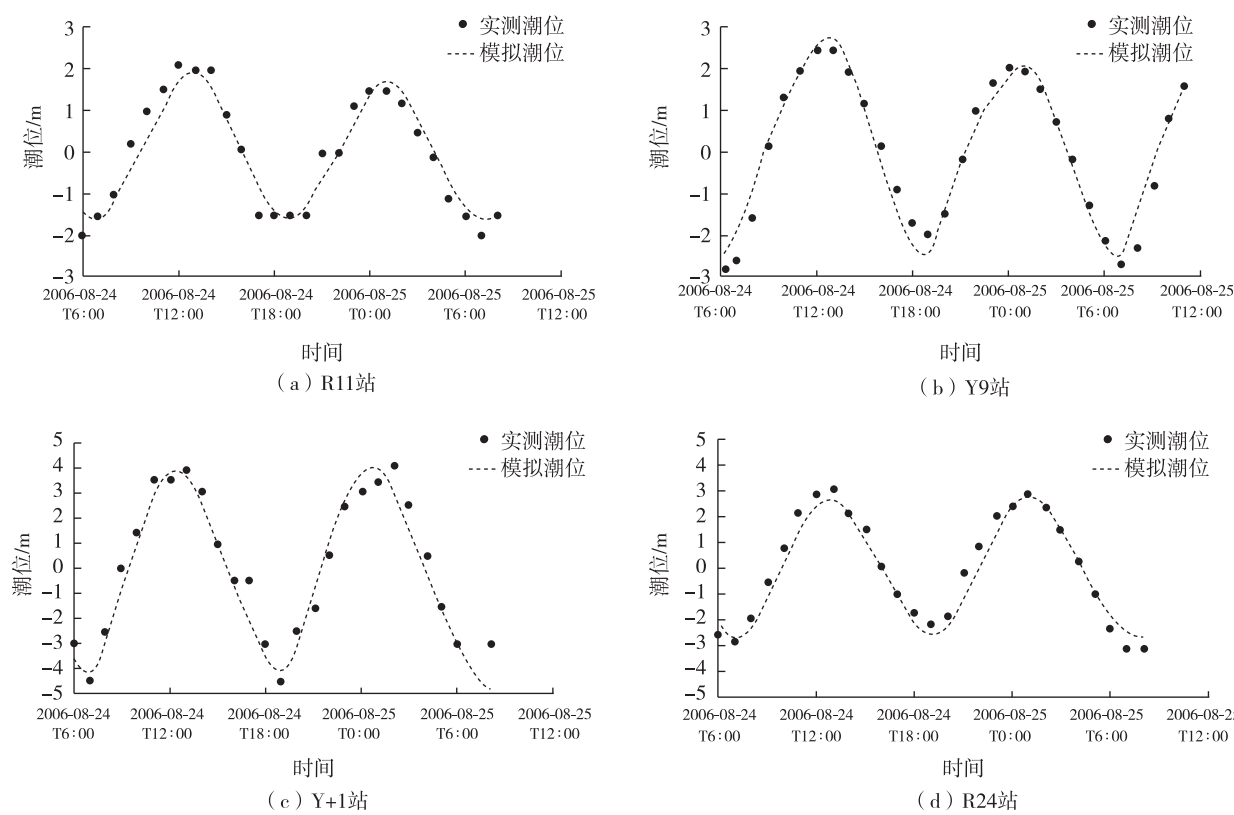


图3 4个潮位监测站潮位验证

Fig. 3 Comparison of simulated and measured tidal levels at four tide stations

2.3 水边线高程赋值

基于 Mike21 的潮位模拟模型,对处于不同潮情下的系列水边线进行高程赋值。运行潮位数值模型,模拟遥感影像对应时刻下的瞬时潮位分布。将瞬时潮位分布图与对应时刻的水边点进行叠置分析,利用 ArcGIS 中的 Extract Values to Points 工具,将水边点位置所对应的潮位作为高程值存储在属性表中,完成同一条水边线上每点的高程赋值。如此反复,完成对所有水边线的高程赋值。水边线的赋值过程中,同一条水边线上,小范围内的水边点潮位值差别不大。然而,由于本身输入地形存在一定误差,水边点位置下获取的潮位值与附近的点的值进行中值滤波,排除小范围的地形误差带来的潮位赋值误差。

3 DEM 结果

基于一系列高程赋值后的不同潮位情况下的水边点组,通过空间插值生成潮滩地形 DEM。空间插值的方法主要有反距离权重、自然邻近、高斯克里格、ANUDEM 等方法,本文基于 ANUDEM 方法空间插值获取 DEM。该方法能够最大限度地保留地形特征,尤其在潮水沟区。此时生成的潮滩地形将作为初始地形重新输入二维水动力学模型重新进行潮位模拟,反复迭代,直到前后 DEM 结果 95% 的差值范围控制在 $\pm 0.1\text{ m}$ 之间。利用 19 条不同潮位水边线数据,采用水动力模型模拟为水边点高程赋值后,生成了 1987 年前后的辐射沙脊群区近 $2\,000\text{ km}^2$ 的潮滩 DEM (图 4)。高程分布于 $-3.25\sim 3.05\text{ m}$ 之间,自岸向海高程逐步减小。通过与 1987 年 2 月 2 日的遥感影像进行对照表明,DEM 结果能够反映当时潮滩的整体地貌规律,能够将滩面细节呈现出来,与遥感图像在形态上吻合。另外,提取了 20 世纪 80 年代出版的该地区的 20 万地形图^[12] 测点作为验证数据,对比实测值与 DEM 值的差值 (图 5(a)),分析两者之间的相关性 (图 5(b))。结果表明,两者之间的相关性较好,决定系数 R^2 为 0.864。74 组数据的差值范围在 $\pm 1\text{ m}$ 之间,平均值为 -0.006 m ,绝对平均误差为 0.37 m ,均方根误差为 0.41 m 。



图 4 1987 年 DEM 结果
Fig. 4 DEM results in 1987

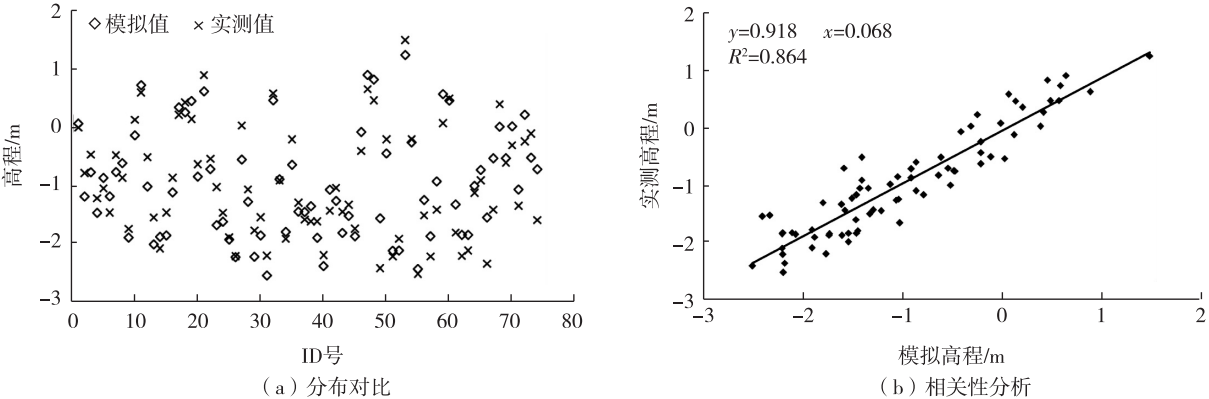


图 5 DEM 结果验证分析
Fig. 5 Validation of DEM results

4 结 语

基于遥感与水动力学模型相结合的水边线法,构建辐射沙脊群区大面积潮滩历史地形,以1987年为时间节点,其DEM模拟结果符合地貌规律,经相同时间段的地形图高程数据验证,其均方根误差为0.41 m。结果表明,该方法能够用于辐射沙脊群大面积的潮滩地形反演,该DEM结果可信,是能够反映地貌形态的重要数据,能够为进一步的岸滩演变、泥沙输运机制等研究提供基础数据,为滩涂合理开发利用提供信息服务。

参考文献:

- [1] 张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状[M].北京:海洋出版社,2013.
- [2] 张长宽,陈君,林康,等.江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):206-212. (ZHANG Changkuan, CHEN Jun, LIN Kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2): 206-212. (in Chinese))
- [3] 杜国庆,史照良,龚越新,等. LIDAR 技术在江苏沿海滩涂测绘中应用研究[J].城市勘测,2007,(5):23-26. (DU Guoqing, SHI Zhaoliang, GONG Yuxin, et al. Research on application of LIDAR in mapping of Jiangsu tidal zone[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2007, (5): 23-26. (in Chinese))
- [4] CRACKNELL A P. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zone an update[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 19(3): 485-496.
- [5] 张鹰,张芸,张东,等.南黄海辐射沙脊群海域的水深遥感[J].海洋学报,2009,31(3):39-44. (ZHANG Ying, ZHANG Yun, ZHANG Dong, et al. An underwater bathymetry reversion in the radial sand ridge group region of the southern Huanghai Sea using the remote sensing technology[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(3): 39-44. (in Chinese))
- [6] MASON D C, DAVENPORT I J, FLATHER R A, et al. Construction of an intertidal digital elevation model by the 'waterline' method[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22: 3187-3190.
- [7] RYU J H, KIM C H, LEE Y K, et al. Detecting the intertidal morphologic change using satellite data[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 78: 623-632.
- [8] 韩震,恽才兴,戴志军,等.淤泥质潮滩高程及冲淤变化遥感定量反演方法研究:以长江口崇明东滩为例[J].海洋湖沼通报,2009,(1):12-18. (HAN Zhen, YUN Caixing, DAI Zhijun, et al. Remote sensing quantitative inversion research of the silt tidal flat elevation and deposition and erosion: Chongming Dongtan as the example [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009, (1): 12-18. (in Chinese))
- [9] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 张东生,张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 M_2 潮波[J]. 河海大学学报:自然科学版,1996,24(5):35-40. (ZHANG Dongsheng, ZHANG Junlun. M_2 Tidal Wave in the Yellow Sea Radiate Shoal Region[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1996, 24(5): 35-40. (in Chinese))
- [11] 丁贤荣,康彦彦,茅志兵,等.南黄海辐射沙脊群特大潮差分析[J].海洋学报,2014,36(11):12-20. (DING Xianrong, KANG Yanyan, MAO Zhibin, et al. Analysis of largest tidal range in radial sand ridges southern Yellow Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 12-20. (in Chinese))
- [12] 江苏省科学技术委员会. 中国海岸带与海涂资源综合调查图集江苏省分册[M].北京:测绘出版社,1986.
- [13] RYU J H, WON J S, MIN K D. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: a case study in Gomso Bay, Korea [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 442-456.
- [14] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [15] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21: A modeling system for rivers and channels reference manual[R].Denmark; DHI Water& Environment, 2007.
- [16] ZHANG C K, ZHANG D S, ZHANG J L, et al. Tidal current-induced formation—storm-induced change—tidal current-induced recovery: interpretation of depositional dynamics of formation and evolution of radial sand ridges on the Yellow Sea seafloor[J]. Science in China (Ser. D), 1999, 42(1): 1-12.
- [17] 陶建峰,张长宽. 黄海辐射沙脊群海域水环境数值模拟研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):472-475. (TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan. Numerical simulation of water environment for radial sandy ridge area of the Yellow Sea [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(4): 472-475. (in Chinese))
- [18] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations I: the basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.