

基于水边线方法的辽河口鸳鸯岛形成与演变模拟

凡姚申¹, 陈沈良^{1*}, 孙永光², 袁 蕾², 蒋 超¹, 姬泓宇¹, 陈 晴¹

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘 要:针对河口泥沙岛淤泥质潮滩坡度和潮汐变化对水边线的影响,提出一种利用两期遥感水边线模拟海岛岸线及潮滩数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的方法,研究辽河口鸳鸯岛的形成与演变过程。结合遥感影像、实测地形和潮位数据分析表明:1)模拟潮滩 DEM 与实测 DEM 之间的误差集中在-40~55 cm 的范围内,平均误差 14.24 cm,表明遥感模拟作为一种手段对实测资料的欠缺是一种有效的补充。2)从 20 世纪 80 年代初至今,鸳鸯岛的发育经历了萌生、生长和动态稳定三个时期;入海径流量的增加是鸳鸯岛萌生的诱因,涨落潮流路分歧及其形成的缓流区促进鸳鸯岛的持续生长。3)在鸳鸯岛生长过程中,南沙处在次生缓流区中,在相同时段内其潮滩淤积量大于北沙;在鸳鸯岛演变稳定期,就岸线和面积变化而言,东北部潮滩侵蚀程度小于南部潮滩淤积程度,但从体积变化来看,东北部潮滩侵蚀量略大于南部潮滩淤积量。

关键词:水边线方法;潮位校正;河口泥沙岛;冲淤演变

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2017)01-0579-14

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.014

河口泥沙岛由水下阴沙或汉河分隔三角洲发育而来,是河口发育及三角洲演化的缩影^[1]。其地质年龄轻,冲淤变化快,是一种动态不稳定的新生土地资源,受全球气候变化、海平面上升及人类活动的影响,具有复杂性、敏感性和多变性,是环境监测重点关注的区域之一。尤其是在近 50 a 来中国主要河流入海泥沙减少^[2-3]、滨海湿地资源面临侵蚀威胁的背景下^[3-4],加强对河口泥沙岛动态监测研究十分必要。

相对整个河口泥沙岛形成与冲淤演变而言,学者们对淤泥质潮滩的冲淤变化研究较多。淤泥质潮滩水浅滩平、滩面泥泞、冲淤多变,地面调查和地形测绘困难较大,往往是现场测绘的盲区,于是学者多采用遥感影像提取水边线的方法进行潮滩演变分析^[5],主要有 3 种方式:第 1 种是从不同时期相近潮位的影像中获取特征水边线或植被线,通过分析水边线或植被线水平位移来分析潮滩的进退^[6-9];第 2 种是基于水边线潮汐模型,对水边线进行潮位校正得到特定高程线,进而分析潮滩的平面冲淤变化^[10-12];第 3 种是利用短时期内不同潮位下多时相遥感影像获得的水边线,生成一系列已知高程信息的等高线,空间插值后生成潮滩的数字高程模型(DEM),进而分析潮滩冲淤变化^[13-16]。第 2 种方法将水边线修正到同一高程基面上,与第 1 种方法相比,提高了分析的准确性和科学性。第 3 种方法较前 2 种可以分析潮滩冲淤变化的空间分布情况,但是对地观测卫星过境时间基本固定,在短时期内可能难以捕捉到大潮高潮线或低潮线,使高程反演范围受限,且短时期内多时相遥感数据的要求使成本较高^[17]。如果拓展第 2 种方法,即对遥感水边线进行不同基准面上的潮位校正,就可以得到不同高程的等高线,从而提取出泥沙岛岸线及潮滩高程。

本研究以遥感数据和潮位信息为基础,利用 2 期遥感水边线,经潮位校正提取潮滩高程线,进而模拟典型新生河口沙岛——辽河口鸳鸯岛的岸线及潮滩 DEM,研究其形成与演变过程,以期优化遥感水边线方法在潮滩冲淤变化中的应用、丰富对河口泥沙岛发育规律的认识。

收稿日期:2016-09-24

资助项目:海洋公益性行业科研专项——典型海岛生态脆弱性评估及综合调控技术研究与示范(201505012)

作者简介:凡姚申(1989-),男,河南项城人,博士研究生,主要从事海岸动力地貌与遥感应用方面研究。E-mail: faysmyself@126.com

*** 通讯作者:**陈沈良(1964-),男,浙江盐海人,教授,博士,主要从事海岸动力地貌及其工程应用研究。E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

(陈 靖 编辑)

1 研究区概况

辽河口 2 000 a 以前位于今辽宁海城以南,大约在金辽时期,辽河口西移至牛庄,清末辽河口又南迁至营口。1851 年辽河东冷家口溃决,河水倾注双台子潮沟入海,1896 年为分洪河道,人工开挖双台子潮沟,辽河水分两股,即双台子河和大辽河入海。1958 年,为使辽河干流和浑河、太子河洪水能分别畅排入海,也为满足三岔河地区的排洪要求,在辽中县六间房堵截外辽河,将辽河干流来水全部引向双台子河从盘山入海。至此,辽河又完成一次大的西迁,原辽河流域分成两个独立的入海水系,即辽河水汇同绕阳河全部由双台子河注入辽东湾,浑河、太子河、海城河等经大辽河在营口入海。2011-11 辽宁省政府将双台子河正式更名为辽河,至此,“双台子河口”地名弃用,“辽河口”地名正式使用,解决了辽河上下游名称不一致的问题。

辽河自从盘锦入海后,受河流来沙和沿岸输沙的影响,河口沉积地貌发育明显。辽河口目前整体处于淤积的趋势,河口拦门沙、江心洲、潮滩不断淤积发育^[18],典型的有盖州滩、鸳鸯岛等。鸳鸯岛位于辽河口小道子至三道沟渔港海域(图 1),2013 年被国家海洋局列入海岛名录。目前该岛面积约为 4.65 km²,最高潮时南部被海水浸没,北部露出。岛上植物丰富,有海蘼草、翅碱蓬等,鸟类种类繁多,有丹顶鹤、黑嘴鸥、灰鹤等数十种。鸳鸯岛所在的辽河口平均高潮位为 1.81 m,平均低潮位为 -1.12 m^[19]。因此,按平均高潮线与平均低潮线之间的地带是潮间带的定义,将高程 -1.0~1.5 m 的地带规定为鸳鸯岛的潮滩。

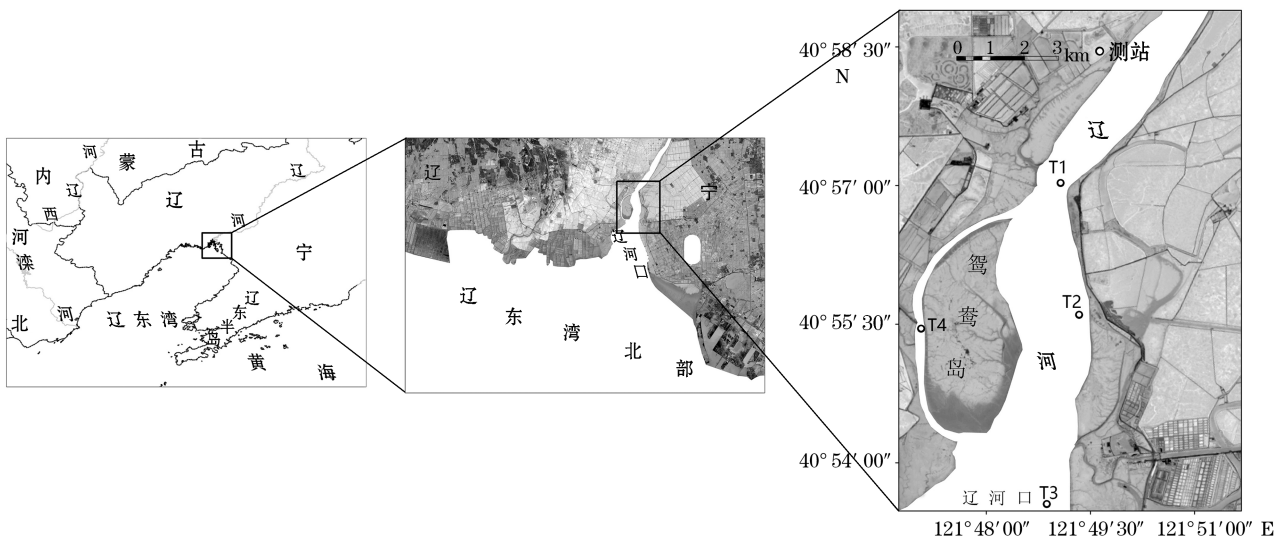


图 1 辽河口鸳鸯岛地图位置

Fig.1 The location of Yuanyang Island, Liaohu Estuary

2 材料和方法

2.1 遥感影像及处理

选用 1975—2015 年 31 景 Landsat-MSS/TM/ETM/OIL 卫星影像用于模拟鸳鸯岛的形成和演变过程(表 1)。依据辽河水沙量变化和已有研究成果,影像选取包括 1985 年、2000 年、2010 年前后等几个重要的辽河径入海水沙变化的时间结点。

首先使用 ENVI 5.1 提供的 FLAASH 大气校正模块,对所有影像做大气校正处理。从美国地质勘探

局网站(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)下载的 Landsat 影像通常已经做过几何粗校正,为了更好地减小几何畸变对水边线提取结果的影响,统一以 2013-08-11 Landsat8-OLI 影像为基准,利用 ENVI 5.1 提供的 Image to Image 几何校正模块对其他年份的影像进行几何精校正处理,最后对几何精校正后的影像做边缘增强处理。

2.2 水边线提取

对遥感影像进行二值化,将水体与其它地物区分开。图像二值化的方法有多种,运用波谱间关系(SPM)来将水体和非水体区分开实现图像的二值化效果最佳^[20]。波谱间关系的方法也有多种^[21],如: $TM_2 + TM_3 > TM_4 + TM_5$, $KT_3 + TM_4 > TM_2 + TM_7$, $KT_3 + TM_2 > TM_4 + TM_3$ (TM_i 代表 Landsat-5 卫星的第 i 个波段影像经大气校正后的 DN 值)。缨帽变换(tasseled cap transform, K-T 变换)的 KT_3 分量,是可见光和近红外与较长红外的差值,对土壤湿度最为敏感,反映了地物的湿度信息,是较好的水体信息识别的特征波段。因此,使用 $KT_3 + TM_2 > TM_4 + TM_3$ 这种波谱关系模型,提取水体效果更好^[22-23]。对二值化的图像进行边缘检测,可提取出水边线。

2.3 潮位标定

为获取准确的岸线位置,并进行岸线变化分析,需对瞬时水边线进行潮位标定。使用国家海洋环境监测中心于 2012-05-19T8:00—08-03T10:00 开展的共计 75 d 在鸳鸯沟验潮站观测的潮位资料,采用最小二乘法进行调和与分析,得到鸳鸯岛区域 38 个主要分潮的调和常数。卫星过境时的瞬时潮高计算采用万国洪等的主港潮汐预报调和方法^[24]:

$$\zeta = A_0 + \sum_i \{f_i H_i \cos[\sigma_i t + (v_{0i} + u_i) - g_i]\}, \quad (1)$$

式中, A_0 是多年平均海平面在潮高基准面上的高度,如果从潮高基准面起算,则将其值取为 0; H 和 g 分别为振幅和迟角,是分潮的调和常数; σ 是分潮的角速率; v_0 是分潮的格林威治天文初相角; f 和 u 是分潮的交点因子和交点订正角; i 是分潮数。各参数的具体计算方法参见万国洪等的研究^[24]。此外,还收集了本区内老北河口验潮站($121^{\circ}50'E$, $48^{\circ}58'N$)实测的高低潮位(1990—2016 年)作为参照。

2.4 潮位校正

首先假设粉砂淤泥质潮滩的潮间带同一断面(垂直于岸线)的坡度大致均一,通过在同一年中相近时间的 2 期遥感图像中提取出的水边线,将调和常数代入式(1),可算出卫星过境时的瞬时潮高(表 1)。辽河口老北河口验潮站的潮高基准面低于当地平均海平面 2.09 m,当地平均海平面与“1985 年国家高程基准”的差值为 -0.050 m,因此,瞬时潮高可看作是以 -2.14 m 高程面为基准面的高程值。由图 2 可知,如果以等高面 H 为基准面,那么水边线的相应高程为

$$h_{ni} = -2.14 + \zeta_{ni} - H_n \quad (i = 1, 2)。 \quad (2)$$

式中, h_{ni} 为第 i 条水边线相对于高程为 n 的等高线的高程, ζ_{ni} 是其潮位高。

潮位校正采用 ArcGIS 扩展模块功能和 DSAS 软件来实现。运用 DSAS 软件包中的 Transect Layer 模块生成一组间隔为 10 m 且垂直于基线的垂线。图 3 说明了相邻 3 条垂线所处的海岸地形。图中 A_1, A_2, A_3 和 B_1, B_2, B_3 分别为 3 条相邻垂线与第 1 条第 2 条水边线的交点,这些水边线在基准面上的投影为 A'_1, A'_2, A'_3 和 B'_1, B'_2, B'_3 。图中 C_1, C_2, C_3 为 3 条垂线与基准面的交点,依次将 C_1, C_2, C_3 连成线,即所需等高线。因此确定等高线位置的问题转化为如何确定各垂线与基准面交点坐标的问题。下面以 C_1 点为例,说明计算过程。由相似三角形的关系可知:

$$\frac{C_1 B'_1}{C_1 A'_1} = \frac{B_1 B'_1}{A_1 A'_1} = \frac{C_1 B'_1}{C_1 B'_1 + A'_1 B'_1}, \quad (3)$$

由式(2)可算出 2 条水边线相对于基面的高程 h_1, h_2 , 即 $A_1A'_1=h_1, B_1B'_1=h_2$; 据上述各点的定义, 可知 $A'_1B'_1$ 的长度可以计算出来, 设其长度为 l , 则公式(3)可表示为

$$\frac{C_1B'_1}{C_1B'_1+l}=\frac{h_1}{h_2} \rightarrow C_1B'_1=\frac{h_1}{h_2-h_1} \times l, \tag{4}$$

式中, h_1, h_2, l 均已知, 因此 C_1 的坐标也可求出。用同样的方法求出其它交点的坐标, 按顺序连接交点, 即可得到各等高线的位置。

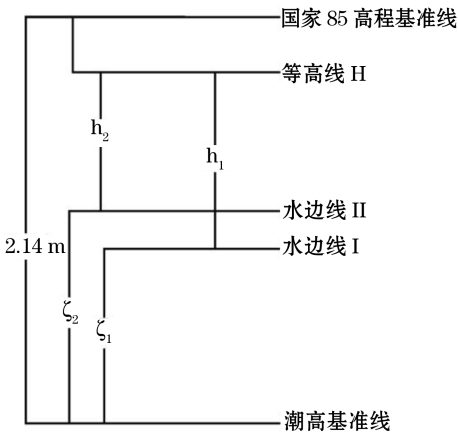


图 2 高程推算示意图

Fig.2 Sketch of elevation calculation

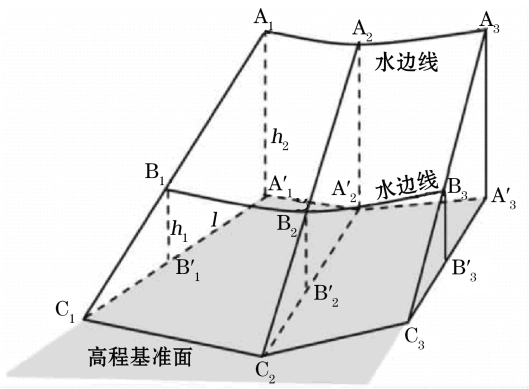


图 3 海岸地形示意图

Fig.3 Diagram of coastal topography

表 1 遥感影像资料及潮情

Table 1 Remote sensing image data and tidal conditions

卫星/传感器	成像日期	成像时间	潮位/cm	涨落潮阶段	距 85 高程基面/cm
Landsat8/OIL	2015-08-18	02:29:25	202.68	落	-6.32
Landsat8/OIL	2015-07-16	02:34:29	145.21	涨	-63.79
Landsat8/OIL	2014-06-28	02:28:34	162.98	涨	-66.64
Landsat8/OIL	2014-06-15	02:31:34	312.26	落	62.68
Landsat8/OIL	2013-05-22	02:30:41	269.21	涨	60.21
Landsat8/OIL	2013-04-28	02:36:57	68.23	落	-140.77
Landsat7/ETM	2012-06-25	02:30:15	142.36	落	-46.02
Landsat7/ETM	2012-06-02	02:30:15	271.68	涨	103.26
Landsat7/ETM	2011-07-20	02:28:48	89.25	落	-119.75
Landsat7/ETM	2011-06-18	02:29:45	126.52	涨	-82.48
Landsat5/TM	2009-08-29	02:26:58	296.57	落	87.57
Landsat5/TM	2009-08-14	02:24:57	350.95	落	141.95
Landsat5/TM	2008-07-10	02:21:24	245.35	落	36.35
Landsat5/TM	2008-06-07	02:20:56	142.52	落	-66.48
Landsat5/TM	2006-08-18	02:25:41	342.58	落	133.58
Landsat5/TM	2006-08-02	02:15:56	284.29	落	75.29

续表

卫星/传感器	成像日期	成像时间	潮位/cm	涨落潮阶段	距 85 高程基面/cm
Landsat5/TM	2005-09-27	02:29:18	304.12	落	95.12
Landsat5/TM	2005-06-14	02:22:10	245.32	落	36.32
Landsat5/TM	2002-09-24	02:30:03	92.02	涨	-116.98
Landsat5/TM	2002-08-02	02:10:33	315.21	落	106.21
Landsat5/TM	2000-07-23	02:16:43	263.18	落	54.18
Landsat5/TM	2000-06-28	02:29:32	241.53	涨	32.53
Landsat5/TM	1999-07-28	02:22:54	175.36	涨	-33.64
Landsat5/TM	1999-07-13	02:12:46	134.56	涨	-74.44
Landsat5/TM	1995-06-15	01:55:09	91.23	涨	-117.77
Landsat5/TM	1995-05-12	01:37:07	271.56	涨	62.56
Landsat5/TM	1993-05-06	01:21:46	360.23	落	151.23
Landsat5/TM	1993-04-22	01:57:23	298.12	涨	89.12
Landsat5/TM	1988-10-09	02:05:34	—	—	—
Landsat5/TM	1985-10-17	02:03:55	—	—	—
Landsat4/ MSS	1975-05-20	01:55:08	—	—	—

注：“—”表示无数据

2.5 高程提取及岸线定义

按上述方法,分别以-1.0,-0.5,0,0.5,1.0和1.5 m等高面作为基准面,分别提取出来相应的等高线,在 ArcGIS 支持下,以平面 5 m×5 m 的间隔将这些等高线生成 DEM,即遥感水边线法模拟的鸳鸯岛潮滩数字高程模型 DEM_m。不同学者在利用遥感图像提取岸线时,对岸线的定义标准不一,比较常见的岸线解译标识包括水边线、干湿线、植被线、大潮高潮线、平均高潮线等^[25-28]。等高线或等深线也能反应潮滩的冲淤变化,本文将 DEM 中 0 m 等高线等效为海岛岸线,分析其时空变化,进而研究鸳鸯岛形成和演变过程。河道岸线不是本文研究的重点,可不考虑潮位对其水边线的影像,因此将水边线作为河道岸线。

2.6 实测数据

本研究于 2014-03 对鸳鸯岛及其邻近海域进行了地形测量。鸳鸯岛地形测量采用 THALES 公司生产的 Z-MAX 超级 RTK 测量系统,其水平定位精度为 5 mm+0.5×10⁻⁶,垂直定位精度为 5 mm+1×10⁻⁶,邻近海域地形测量采用单波束测深仪,其测深精度为 1 cm±0.1% D。岸滩(RTK)测点布设按 1:2 000 比例尺设置,点间隔 20 m,水域(单波束)测线布设按 1:3 000 比例尺设置,线间隔 30 m,测量过程满足按《海洋调查规范》^[29]的相关规定。测量数量获取后,在 ArcGIS 支持下,同样以平面 5 m×5 m 的间隔将其生成潮滩数字高程模型 DEM_r。

海流和悬沙数据来自国家海洋局海洋信息中心于 2016 年观测的资料。在大潮期间(2012-06-05—06)和小潮期间(2012-06-24—25)的 T1~T4 测站(位置见图 1)进行同步海流周日连续定点观测。悬沙采样、站位、时间与海流观测同步进行。分为大潮、小潮二个航次,每航次连续进行 25 h 分层取样,各层次每小时取样 1 次。海流和悬沙数据分析结果分别见图 4 和图 5。

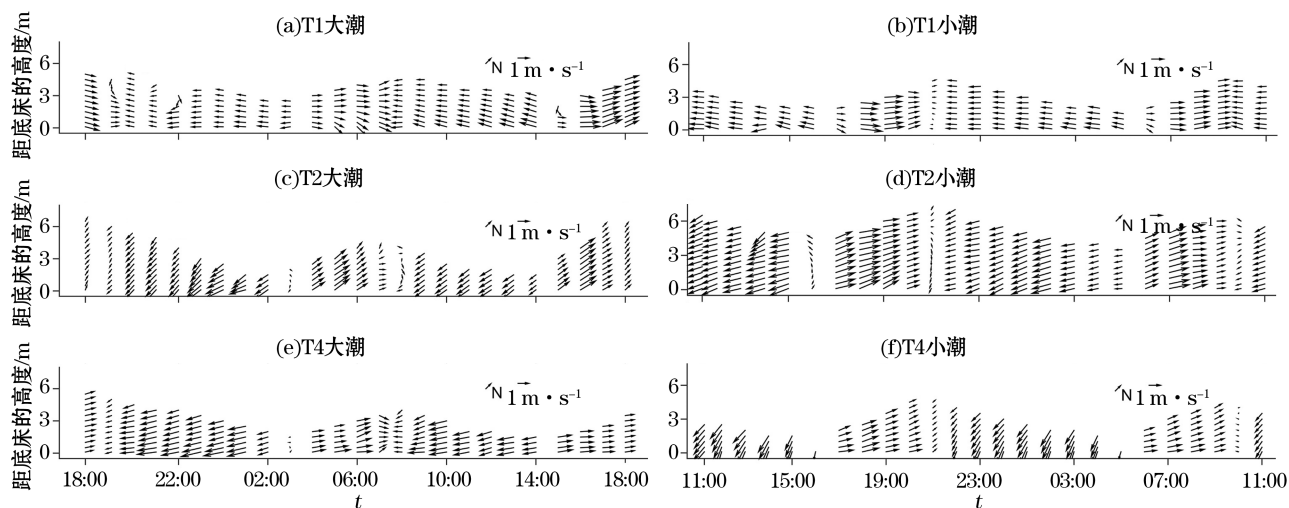


图4 测站海流矢量图

Fig.4 The current vector map at stations

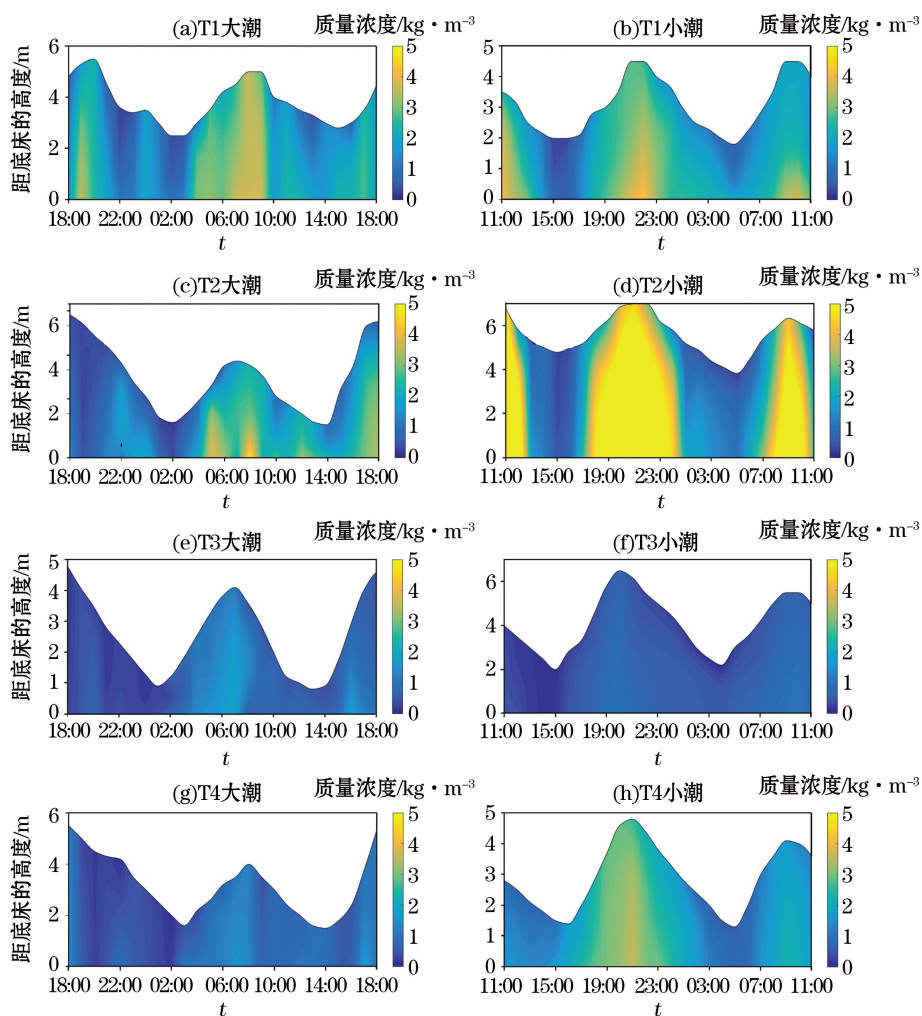


图5 各测站悬沙浓度图

Fig.5 The sediment concentration diagram for each station

3 结果与讨论

3.1 模拟 DEM 精度检验

用 2014 年的 2 期遥感影像水边线方法模拟的 DEM_m 与用实测数据构建的 DEM_r 相减所生成的结果见图 6, 二者误差统计见图 7。图 7 表明, 遥感与实测高程模型的相对误差基本呈正态分布, 误差集中于 $-40 \sim 55$ cm 范围内的区域占总潮滩面积约 82.36%, 平均误差 14.24 cm。由此可知, 遥感模拟的潮滩 DEM 与实测潮滩地形存在较小的误差, 作为一种手段对实测资料的欠缺是一种有效的补充。

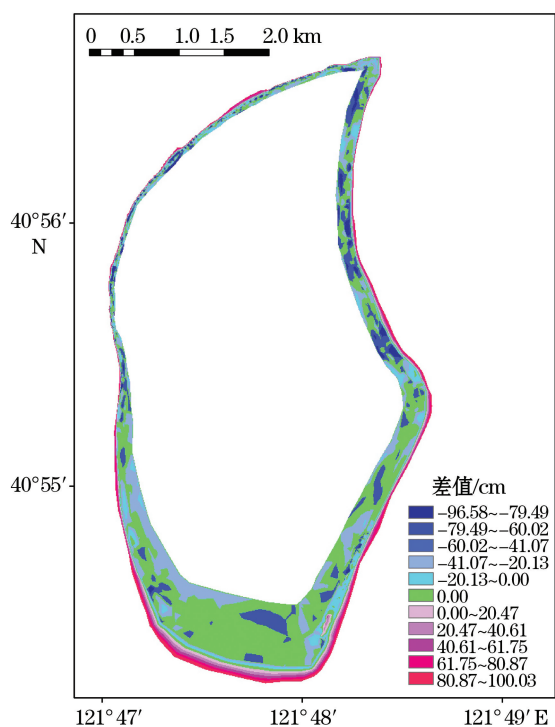


图 6 $DEM_m - DEM_r$ 的结果

Fig.6 The result of $DEM_m - DEM_r$

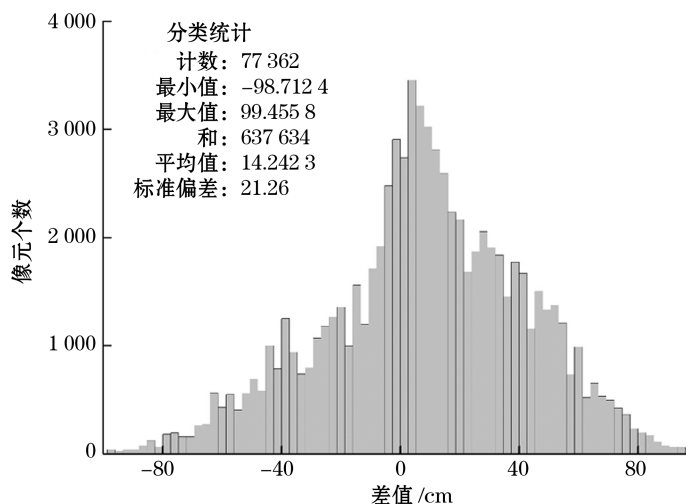


图 7 遥感模拟与实测高程模型的误差统计

Fig.7 Error statistics of remote sensing model and measured elevation

3.2 鸳鸯岛形成过程

1) 萌生期

20 世纪 80 年代中期到 1999 年间是鸳鸯岛发育的萌生期。由图 8a 可知, 1975—1985 年间小台子节点 (节点①) 以上河道整体向西北偏移, 节点位置也向西北移动; 1985—1988 年小台子节点以下河道, 河口右岸边滩受侵蚀, 逐渐被切出 1 个节点 (节点③), 与上游左岸的小台子节点左右交错分布。由图 8b 可知, 辽河口门附近出现 -0.5 m 以浅的阴沙, 1995 年阴沙扩大到东西两块, 面积达 2.28 km^2 ; 1999 年 2 块阴沙西移, 以 NE 向对峙分布, 面积达 1.56 km^2 。

此阶段, 入海径流侵蚀右岸边滩是鸳鸯岛萌生的直接诱因。1985 年, 受连续多次台风登陆, 辽河流域出现多次暴雨, 辽河六间房径流量达 59.84 亿 m^3 , 是之前年份 (1969—1984 年) 的 23.28 亿 m^3 平均入海径流量的两倍多, 并且此后连续 3 a 都在 40 亿 m^3 以上。阴沙的形成和发育与涨落潮流流路分歧有关。由实测海流资料可知, 辽河口存在涨落潮流流路分歧。如图 4 所示, T1 测站涨潮过程中水流流速大于落潮时, 而 T2

测站相反,说明涨潮流偏向左岸,落潮流偏向右岸。分歧的涨落潮流路之间出现缓流区,水流挟带来的泥沙易在这里淤积,形成阴沙。受潮波传播方向的影响,涨落潮流路分歧的河口两岸往往会出现一岸先涨先落,一岸则迟涨迟落,加之科氏力的作用^[30-31],河口地区极易产生水面横比降,在水位差、密度重力流的作用下,形成横向切滩流^[31]。因此,我们推测阴沙间的水道由横向切滩流冲刷而来。

2) 生长期

张落潮流路分歧,缓流区持续存在,阴沙进一步堆高,高潮时出漏水面,形成明沙。由图 8c 可知,2002 年已出现 0 m 等深线以上的南北两个沙体,面积达 1.05 km²,随后沙体以北部(沙头)淤积快的规律持续发育。

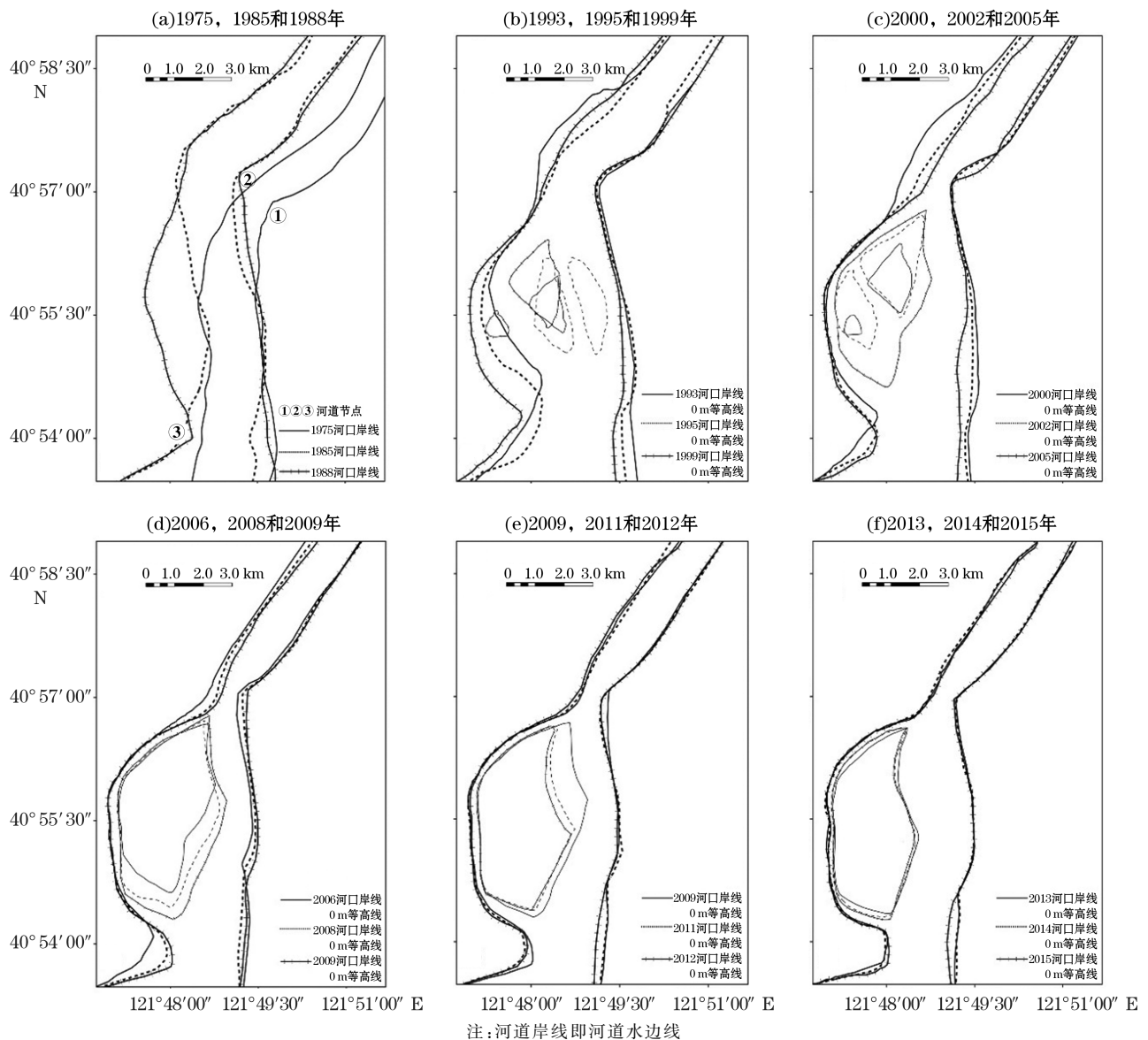


图 8 水边线方法模拟的鸳鸯岛形成过程

Fig. 8 Waterline approach modeling the formation process of Yuanyang Island

受余流影响^[32],辽东湾顶部悬浮泥沙整体自西往东输送,至盖州滩南端悬沙往北东方向输送,辽河口淤积的沉积物主要是河口以东的大、小凌河等入海泥沙随沿岸流、潮流输运而来。由于大、小凌河上游地处黄土丘陵、沙丘草原以及沙地区域,河流含沙量远大于辽河,入海泥沙量也较大(表 2)^[33]。由实测悬沙资料可知(图 5),水体含沙量涨潮时大于落潮时,T1,T2 测站涨潮平均流速大于落潮平均流速(图 4)。因此,可推

测潮流流路分歧后,水流以涨潮槽为主汊。

横向切滩流发生在以涨潮槽为主汊的情况时,其流向是从涨潮槽主汊流向落潮槽支汊的。横向切滩流与涨潮流方向一致,与落潮流方向相反,称为涨潮切滩流,它与落潮流之前形成的缓流区可称为次生缓流区。南沙处在次生缓流区中,泥沙更易落淤,因此,南沙较北沙面积增长快。图 9 所示面积增长率 k 值南沙大于北沙。南沙东北部位在涨潮切滩流的边缘,北沙北部位在涨潮流槽的边缘,涨潮流从口门外带来的泥沙在缓流区边缘淤积,促使该段岸线向海前进迅速。2006 年南北两沙合并,鸳鸯岛左右两侧,潮流流路分歧的现象愈来愈不明显,横向切滩流也随之消失。此后,如图 8d,鸳鸯岛南部岸线前进快速,鸳鸯岛面积继续扩大,到 2009 年面积达到 7.12 km^2 ,较 2000 年面积扩大近 7 倍。因此,将 2000—2009 年间沙体快速淤积期,称为鸳鸯岛的生长期。

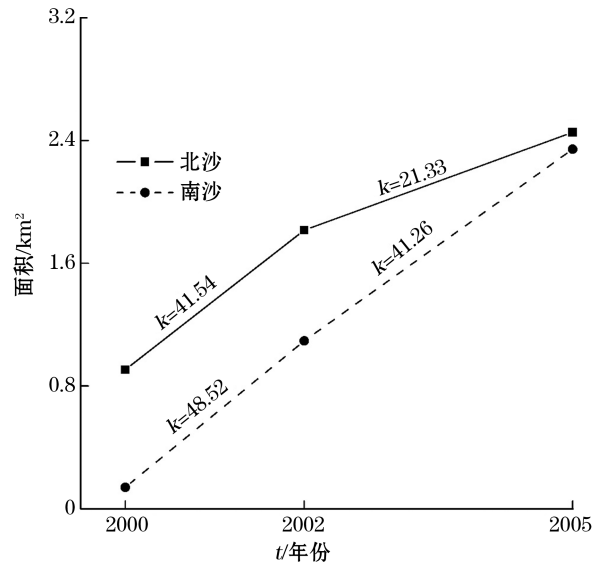


图 9 南沙和北沙面积增长速率
Fig.9 The growth rate of the South Bar and North Bar

表 2 辽东湾主要入海河流泥沙通量^[33]

Table 2 Sediment flux of major river flowing into the Liaodong Bay^[33]

河流名称	流域面积/km ²	多年入海泥沙量/ $\times 10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$			平均含沙量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
		平均	最大	最小	
小凌河	5 475	364	1 630	1.64	6.40
大凌河	23 549	2 740	9 750	529	13.3
辽 河	219 014	899	1 490	4.14	3.21
饶阳河	9 946		60.40	0.022	0.41

注:空白表示无数据

3)动态稳定期

2009 年后鸳鸯岛进入动态稳定期,受该岛西侧狭窄水道和南侧堆积体的影响,涨落潮流路分歧现象已移至岛东侧宽阔水道。鸳鸯岛遇大径流鸳鸯岛东部侵蚀,尤以东北部侵蚀最多。2010 年夏,辽河干流径流受到 4 次强降水过程的影响,铁岭站和六间房站 2010 年实测径流量与多年平均值比较,分别偏大 89%和 142%。大的入海径流导致 2010 年鸳鸯岛潮滩侵蚀。2011 年秋鸳鸯岛面积 5.86 km^2 ,较 2009 年面积减少了 17.63%,如图 8e。2012 年东北部继续侵蚀,面积较 2011 年减少了 0.47 km^2 。2013 年后受稳定入海径流量的影响,东北部潮滩稍有侵蚀,西北部、南部淤积,岛面积基本保持稳定,如图 8f 所示。

以一年为时间间隔,分析 2011—2015 年间东北部和南部典型冲淤区的岸线变化(图 10),发现东北部岸

线侵蚀速率四个时段分别为 75.61, 62.31, 48.82 和 22.28 m/a, 后退速率减慢, 年平均后退 52.25 m, 南部岸线淤积速率分别为 25.40, 85.66, 89.33 和 35.43 m/a, 淤进速率较为波动, 年平均淤进 68.95 m。由此可知, 从岸线变化来看, 南部淤积程度大于东北部侵蚀程度。

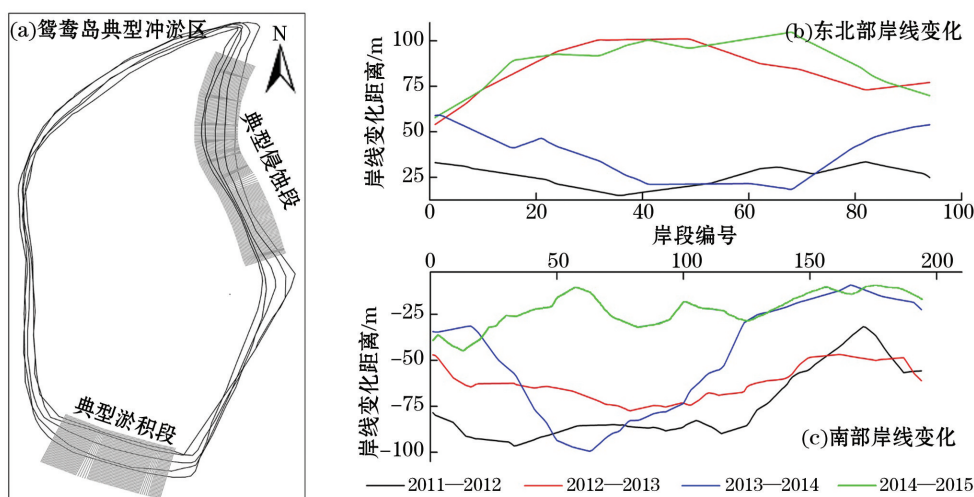


图 10 2011—2015 年鸳鸯岛典型冲淤段岸线变化

Fig.10 Coastline change in typical part of erosion and deposition in the Yuanyang Island, during the period of 2011 to 2015

3.3 鸳鸯岛潮滩冲淤演变

3.3.1 生长期潮滩冲淤演变

南北两沙合并前是鸳鸯岛生长的典型时期。根据边线的潮情和水位特点, 模拟构建鸳鸯岛 2002 和 2005 年南北沙潮滩高程如图 11a 和图 11b, 发现北沙东部和南沙东南部潮滩 0 m 以下高程的位置向海域方向移动, 说明潮滩在该位置是淤涨的。

将两期地形进行代数运算, 可得到该时段内潮滩的空间冲淤变化情况, 如图 11c 和表 3, 除北沙南部、南沙西部潮滩稍有侵蚀外, 两沙潮滩大部分处于淤积状态, 其中北沙淤积高度在 1 m 以上的区域占 56.18%, 南沙淤积高度在 1 m 以上的区域占 78.13%, 南沙潮滩淤积面积大于北沙。对两期地形代数运算后的 DEM 栅格图层在 ArcGIS 中的直方图进行积分, 可得到冲淤体积, 从冲淤体积来看, 北沙淤积 $17\,034\text{ m}^3$, 南沙淤积 $34\,363\text{ m}^3$, 南沙淤积泥沙量是北沙的两倍多, 这再次证实了泥沙在次生缓流区更易落淤, 南沙发育比北沙快。

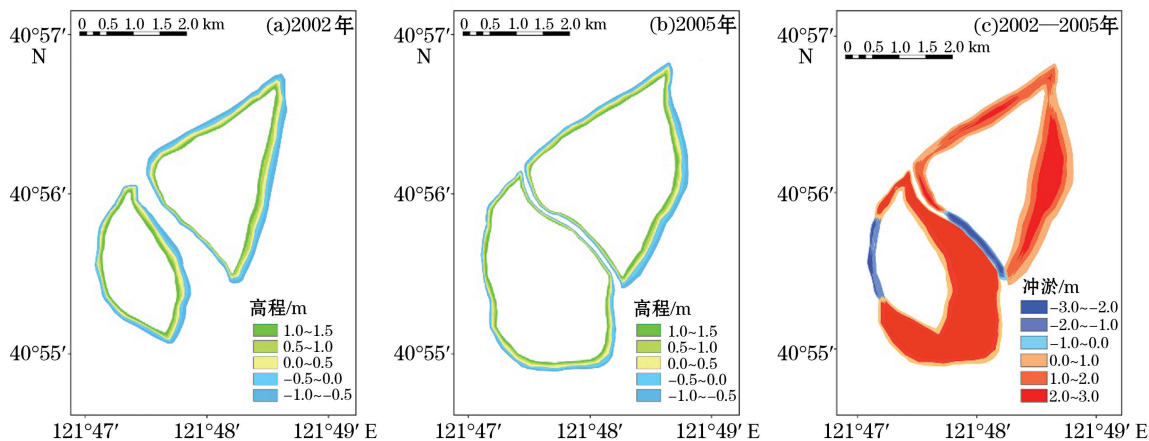


图 11 生长期典型年份潮滩冲淤变化

Fig.11 Erosion and deposition change of tidal flat in typical year of growing period

表 3 2002—2005 年南沙和北沙潮滩冲淤对比

Table 3 Comparison in erosion and deposition of the tidal flats between South Bar and North Bar,during the period of 2002 to 2005

冲淤/m	北沙岛潮滩			南沙岛潮滩		
	面积/m ²	占比/%	体积/m ³	面积/m ²	占比/%	体积/m ³
−3.0~−2.0	336.30	2.59	856.23	0	0	0
−2.0~−1.0	426.11	3.08	647.69	183.92	1.09	268.52
−1.0~0.0	274.66	1.94	167.54	687.55	4.07	446.91
0.0~1.0	5 128.53	36.22	2 700.08	2 824.77	16.71	1 949.09
1.0~2.0	4 776.57	33.73	7 148.14	3 080.02	18.22	5 174.43
2.0~3.0	3 179.03	22.45	7 185.79	10 126.21	59.91	27 239.50

3.3.2 动态稳定期潮滩冲淤演变

模拟构建的 2011 年和 2014 年潮滩高程如图 12a 和图 12b,由此可知鸳鸯岛北部潮滩窄而南部宽平。比较 2011 年和 2014 年两期潮滩地形,发现岛西南部潮滩 0 m 以下高程的位置绝大部分是向海域方向移动,说明潮滩在该位置是淤涨的,东北部潮滩向岛陆方向移动,说明此处的潮滩是侵退的。将两期地形进行代数运算,可得到该时段内潮滩的空间冲淤变化情况,如图 12c,由此可知该时段鸳鸯岛西部、南部潮滩淤积,而东北部潮滩侵蚀,与前文分析一致。

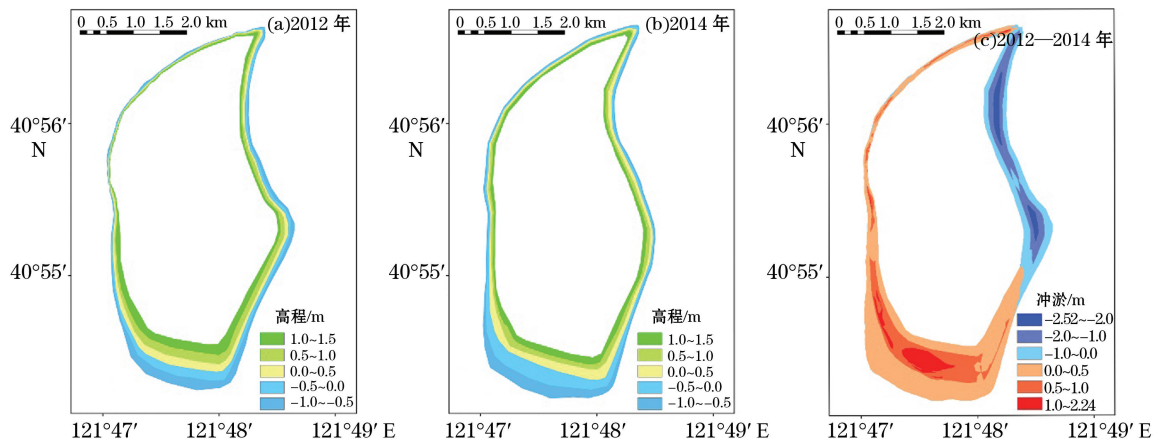


图 12 稳定期典型年份潮滩冲淤变化

Fig.12 Erosion and deposition change of tidal flat in typical year of stable period

表 4 2011—2014 年鸳鸯岛南部和东北部典型冲淤段潮滩冲淤对比

Table 4 Comparison in erosion and deposition between south and northeast tidal flat of Yuanyang Island,during the period of 2011 to 2014

冲淤/m	东北部典型侵蚀段潮滩			南部典型淤积段潮滩		
	面积/km ²	占比/%	体积/km ³	面积/km ²	占比/%	体积/km ³
−2.52~−2.0	0.06	12.16	0.14	0	0	0
−2.0~−1.0	0.18	40.13	0.32	0	0	0
−1.0~0.0	0.22	47.71	0.17	0	0	0
0.0~0.5	0	0	0	0.16	21.79	0.03
0.5~1.0	0	0	0	0.39	52.21	0.22
1.0~2.24	0	0	0	0.19	26.00	0.29

将图 10 中所示的鸳鸯岛东北部和南部的典型冲淤段潮滩不同冲淤程度的面积和体积分别进行对比分析(表 4),发现 2011—2014 年:从冲淤面积来看,东北部典型侵蚀段潮滩总侵蚀面积达 0.42 km^2 ,南部典型淤积段潮滩冲淤面积达 0.74 km^2 ,南部淤积大于东北部侵蚀,与前文岸线变化距离分析的结果一致;从冲淤体积来看,东北部典型侵蚀段潮滩总侵蚀体积达 0.63 km^3 ,南部典型淤积段潮滩总淤积体积达 0.54 km^3 ,南部淤积小于东北部侵蚀,与前文岸线变化距离分析的结果不一致。由此可见,基于岸线距离和面积变化的平面冲淤分析,可能掩盖了冲淤体的空间分布,出现了与基于体积变化的空间冲淤分析截然相反的结果。因此,基于模拟潮滩 DEM 分析冲淤的空间三维变化更科学、准确。

4 结 论

水边线方法是目前利用遥感技术模拟河口泥沙岛冲淤变化的有效手段。本研究以辽河口鸳鸯岛为研究区,利用遥感水边线方法模拟了近 30 a 来该岛岸线、潮滩高程及冲淤空间分布,得出结论:

1) 冲淤变化快的新生河口泥沙岛往往是测绘的盲区,利用两期遥感水边线潮位校正提取潮滩高程线,进而模拟出的鸳鸯岛潮滩地形与实测地形比较,平均误差为 14.24 cm ,获得了一定的精度的结果。

2) 从 20 世纪 80 年代始,鸳鸯岛发育演变可分 3 个时期:1985—1999 年是鸳鸯岛的萌生期,2000—2009 年是鸳鸯岛的生长期,2010 年后鸳鸯岛进入动态稳定期。入海径流量的增加是鸳鸯岛萌生的诱因,涨落潮流路分歧及其形成的缓流区促进鸳鸯岛的持续生长。

3) 在鸳鸯岛生长过程中,南沙处在次生缓流区中,与北沙相比在相同时段内其潮滩淤积量大于北沙;在鸳鸯岛演变稳定期,就岸线和面积变化而言,东北部潮滩侵蚀程度小于南部潮滩淤积程度,但从体积变化来看,东北部潮滩侵蚀略大于南部潮滩淤积,这主要是因为基于模拟 DEM 建立的潮滩体积冲淤变化考虑到了冲淤的空间分布,较分析岸线或面积变化更科学、准确。

参考文献(References):

- [1] LIU X Q, LIU H B. A study on the origin and classification of ocean islands[J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 119-127. 刘锡清, 刘洪滨. 关于海洋岛屿成因分类的新意见[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 119-127.
- [2] DAI S B, YANG S L, GAO A, et al. Trend of sediment flux of main rivers in China in the past 50 years[J]. Journal of Sediment Research, 2007, (2): 49-58. 戴仕宝, 杨世伦, 邵昂, 等. 近 50 年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. 泥沙研究, 2007(2): 49-58.
- [3] CHEN J Y, CHEN S L. Estuarine and coastal challenges in China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2002, 20(2): 174-181.
- [4] JIANG T T, PAN J F, PU X M, et al. Current status of coastal wetlands in China: Degradation, restoration, and future management. Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2015, 164: 265-275.
- [5] GENS R. Remote sensing of coastlines: Detection, extraction and monitoring[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(7): 1819-1836.
- [6] BOAK E H, TURNER I L. Shoreline definition and detection: A review[J]. Journal Coast of Research, 2005, 21(4): 688-703.
- [7] TIAN B, ZHOU Y X, ZHENG C S, et al. Object-oriented image analysis method for estuarine tidal flat accretion and erosion study[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 419-423. 田波, 周云轩, 郑宗生, 等. 面向对象的河口滩涂冲淤变化遥感分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 419-423.
- [8] CUI B L, LI X Y. Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976—2005)[J]. Geomorphology, 2011, 127: 32-40.
- [9] EMRAN A, ROBI M A, KABIR M H, et al. Modeling spatio-temporal shoreline and areal dynamics of coastal island using geospatial technique[J]. Model Earth System Environment, 2016, 2(1-4): 1-11.
- [10] MA X F, ZHAO D Z, XING X G, et al. Means of withdrawing coastline by remote sensing[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(2): 185-189. 马小峰, 赵冬至, 邢小罡, 等. 海岸线卫星遥感提取方法研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 185-189.
- [11] LIU Y X, HUANG H J, QIU Z F, et al. Monitoring change and position of coastlines from satellite images using slope correction in a

- tidal flat: a case study in the yellow river delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 377-387. 刘艳霞, 黄海军, 丘仲锋, 等. 基于影像间潮滩地形修正的海岸线监测研究——以黄河三角洲为例[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 377-387.
- [12] ZHANG X K, ZHANG X, YANG B H, et al. Coastal extraction using remote sensing based on coastal type and tidal correction[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(4): 91-97. 张旭凯, 张霞, 杨邦会, 等. 结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(4): 91-97.
- [13] CHEN L C, RAU J Y. Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(17): 3383-3397.
- [14] 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: 593-607.
- [15] ZHENG Z S, ZHOU Y X, JIANG X Z, et al. Waterline extraction and DEM reconstruction in Chongming Dongtan[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(1): 35-38, 94. 郑宗生, 周云轩, 蒋雪中, 等. 崇明东滩水边线信息提取与潮滩 DEM 的建立[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(1): 35-38, 94.
- [16] ZHAO B, GUO H Q, YAN Y E, et al. A simple waterline approach for tidelands using multi-temporal satellite images: A case study in the Yangtze Delta[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77: 134-142.
- [17] SHEN F, GAO A, WU J P, et al. A remotely sensed approach on waterline extraction of silty tidal flat for DEM construction, a case study in Jiuduansha Shoal of Yangtze River[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(1): 102-107. 沈芳, 郜昂, 吴健平, 等. 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[J]. *测绘学报*, 2008, 37(1): 102-107.
- [18] ZHU L H, WU J Z, HU R J, et al. Geomorphological evolution of the Liaohe River delta in recent 20 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 357-367. 朱龙海, 吴建政, 胡日军, 等. 近 20 年辽河三角洲地貌演化[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 357-367.
- [19] WANG L Q. The study of flow and sediment transport and evolution law on the estuary of Liaohe River[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. 王立强. 辽河口水沙运动及演变规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [20] LI X M, LIU X B, LIU L N, et al. Comparative study of water-body information extraction methods based on electronic sensing image[J]. *Advances in Mechanical and Electronic Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 178: 331-336.
- [21] ZHOU C H, LUO J C, YANG X M, et al. Geoscientific interpretation and analysis of electronic sensing images[M]. Beijing: The Science Press, 1999: 75-78. 周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 等. 遥感影像地学理解与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 75-78.
- [22] WANG Y N, HUANG F, WEI Y C. Water body extraction from landsat ETM+ image using MNDWI and K-T transformation[C]// *Proceedings of the 21st International Conference on Geoinformatics*, 2013: 6.
- [23] GAUTAM V K, GAURAV P K, MURUGAN P, et al. Assessment of surface water dynamics in bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation[J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 739-746.
- [24] FANG G H, ZHENG W Z, CHEN Z Y, et al. Analysis and forecasting of tides[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986: 319-323. 方国红, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 319-323.
- [25] BOAKE H, TURNER I L. Shoreline definition and detection: a review[J]. *Journal Coastal Research*, 2005, 21(4): 688-703.
- [26] CHU Z X, SUN X G, ZHAI S K, et al. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: based on remote sensing images[J]. *Marine Geology*, 2006, 227(1-2): 13-30.
- [27] PAJAK M J, LEATHERMAN S. The high water line as shoreline indicator[J]. *Journal Coastal Research*, 2002, 18(2): 329-337.
- [28] LI X, ZHOU Y X, ZHANG L P, et al. Shoreline change of Chongming Dongtan and response to river sediment load: A remote sensing assessment[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 432-442.
- [29] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification of Qceanographic Survey: Part 2 Marine Hydrographic Survey; GB/T 13736.2—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范: 第 2 部分 海洋水文观测: GB/T 13736.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [30] LI M T, CHEN Z Y, YIN D W, et al. Morphodynamic characteristics of the dextral diversion of the Yangtze River mouth, China: tidal and the Coriolis Force controls[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2011, 36: 641-650.
- [31] LI G Y. Effects of Criolis Force on morphology evolution of Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(12): 1409-1420. 李国英. 黄河河势演变中的科氏力作用[J]. *水利学报*, 2007, 38(12): 1409-1420.
- [32] LIU A J, WU J Z, JIANG S H, et al. Distribution and transport characteristics of suspended sediment in Shuangtaizi Estuary[J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(8): 12-16. 刘爱江, 吴建政, 姜胜辉, 等. 双台子河口区悬沙分布和运移特征[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(8): 12-16.
- [33] LIU W. Recent evolutionary character of coastal landform in Liaodong Bay[J]. *Liaoning Geology*, 1989(1): 46-56. 刘炜. 辽东湾海岸地貌近代演化特征[J]. *辽宁地质*, 1989(1): 46-56.

Modeling Formation and Evolution of Yuanyang Island in the Liaohe Estuary Using Waterline Approach

FAN Yao-shen¹, CHEN Shen-liang¹, SUN Yong-guang², YUAN Lei²,
JIANG Chao¹, JI Hong-yu¹, CHEN Qing¹

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*

2. *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China*)

Abstract: Tidal and landform variations have a significant impact on detection of coastline changes for a tidal flat of estuary island dominated by sediment deposits. In this study, we presented a methodology that simulate the shoreline of island and the Digital Elevation Model (DEM) of tidal flat, and studied the formation and evolution of Yuanyang Island in Liaohe Estuary. Combined with remote sensing images, the measured topography and tidal data analysis show that, 1) The error between DEM and practical tidal flat varies from -40 cm to 55 cm, with the average value of 14.24 cm, which imply that remote sensing modeling can be an effective supplementary way under the case of the scarcity of the measured data. 2) From the 1980s to present, the development of Yuanyang Island can be divided into the following three periods, initiating, growth and dynamic stable stages. The increase of river discharge led to the initiation of the formation of Yuanyang Island. The different routines of flood flow and ebb flow, together with the slow water area between these two channels, promote the growth of this island. 3) During the growing period of Yuanyang Island, South Bar is in the second slow water area and its tidal flat sedimentation rate is greater relative to North Bar. During the stable period of Yuanyang Island, in terms of the variations of coastline and area changing, the erosion degree of tidal flat in the northeast tidal flat is less than the deposition degree of the tidal flat in the southern tidal flat. However, from the point of view of volume variations, the erosion amount of the northeast tidal flat is slightly larger than the deposition amount of the southern tidal flat.

Key words: waterline approach; tide correction; estuary sediment island; evolution of erosion and deposition

Received: September 24, 2016