

典型电厂区多源遥感定量反演的适宜性评价*

Evaluation of Various Satellite Sensors for Quantitative Retrieval of Different Elements in Diverse Power Plant

王春阳¹,刘艳霞^{2**},毕京佳^{2,3},董慧君⁴

WANG Chunyang¹,LIU Yanxia²,BI Jingjia^{2,3},DONG Huijun⁴

(1. 山东电力工程咨询院有限公司,山东济南 250013;2. 中国科学院海洋研究所,海洋地质与环境重点实验室,山东青岛 266071;3. 青岛恒天翼信息科技有限公司,山东青岛 266061;4. 山东省东营市勘察测绘院,山东东营 257091)

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 3. Qingdao Heng Tian Yi Information Technology Co., Ltd, Qingdao, Shandong, 266061, China; 4. Dongying Surveying and Mapping Institute of Shandong Province, Dongying, Shandong, 257091, China)

摘要:【目的】探讨典型电厂厂址区各种地质要素在多源遥感监测的影像及方法选取方面的适宜性。【方法】以寿光火电厂和西北典型洪灾区(有4个电站)为例,从海岸线变化监测和洪水痕迹范围识别方面,开展适宜性评价研究。【结果】对电厂厂址尺度范围内的海岸线变化监测,在传感器类型和反演方法选取时,不同潮滩坡降分别受到影像空间分辨率、水边线高程误差和改正时的内插误差、坡度改正误差的影响,而需要选择相应合适的影像数据。在进行洪水淹没范围的提取时,遥感反演、现场调访和模拟结果对比显示,基于 Landsat 数据的土壤含水量法提取的洪痕及洪水淹没范围更加准确。【结论】本研究结果可为电厂选址及后期监测选取适宜的遥感数据源和相应技术方法提供参考,为工程厂址环境监测提供可靠的遥感反演理论依据。

关键词:多源遥感技术 电厂选址 岸线变化监测 洪痕识别

中图分类号:X145,X87 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)06-0528-10

Abstract:【Objective】The impacts of spatiotemporal resolution of remote sensing satellite sensors were explored on the accuracy of quantitative retrieval of different elements in diverse regions. 【Methods】An ability of various satellite sensors for waterline extraction and inundated area identification was evaluated in Shouguang coal-fired power plant and the northwest typical flood area. 【Results】The result of shoreline change monitoring shows that tidal variations and terrain change can affect the use of remote sensing techniques for delineating coastline. In different beach slope scales, waterline heightens error, interpolation inaccuracy, inadequate sensor resolution and slope correcting error will separately play a major role. In the extraction of flood inundated area by remote sensing inversion, the soil moisture content method using Landsat data is considered more accurate in extracting of flood-mark and inundated area based on the comparative verification of the results of

different beach slope scales, waterline heightens error, interpolation inaccuracy, inadequate sensor resolution and slope correcting error will separately play a major role. In the extraction of flood inundated area by remote sensing inversion, the soil moisture content method using Landsat data is considered more accurate in extracting of flood-mark and inundated area based on the comparative verification of the results of

收稿日期:2016-11-12

作者简介:王春阳(1984—),男,工程师,主要从事流域水文模拟与预报方向研究。

* 海洋公益性行业科研专项经费项目“典型海岛生态脆弱性评估及综合调控技术研究与示范”子课题“高强度开发海岛生态脆弱性评估及调控技术应用示范”项目和国家自然科学基金项目(41306190)资助。

** 通信作者:刘艳霞(1979—),女,副研究员,主要从事海洋地质遥感方向研究,E-mail:liuyanxia@qdio.ac.cn.

the field survey and simulation. **【Conclusion】**This study can provide reasonable remote sensing data source and the corresponding technical methods for the location selection and post monitoring of power plant, and also service the reliable theory basis of remote sensing interpretation on the environmental monitoring of engineering site.

Key words: multi-source satellite technique, power plant site selection, coastline extraction, flood-mark identification

0 引言

【研究意义】遥感技术具有宏观、综合、多尺度、多层次的特点^[1],不仅在大尺度的全球环境监测、大气监测(全球气候变化、臭氧层与温室气体监测等)中有重要应用,在局域和小范围的环境监测(森林火灾、洪水、赤潮等)中,例如对重大工程的环境调查以及防灾减灾,也有广泛应用^[2-5]。遥感资料结合GIS技术与其它多元信息,可为大型工程区域及周围自然资源清查、环境质量评价等提供客观可靠的决策依据^[6]。

【前人研究进展】随着社会发展的需要和卫星遥感技术的快速发展,各类型对地观测卫星成功升空,新型传感器不断推出,多平台、多尺度、多层次观测系统逐渐形成,不仅极大地提高了遥感的观测尺度,其地物识别能力和精度也显著增加。相应遥感技术的应用,已从早期的遥感数据分析转向多种数据综合分析,从静态到动态,从定性到定量,从目视解译到计算机自动识别,研究方法趋向系统化^[7]。**【本研究切入点】**从多源、多平台、多尺度的遥感数据源中选择合适的影像,以及评价各数据源的适宜性,逐渐成为当前遥感应用研究的突破口。**【拟解决的关键问题】**以寿光火电厂选址中的海岸线变化和西北典型洪灾区(有4个电站)的洪痕识别为监测要素,探讨不同时空分辨率的卫星影像在监测不同区域地质要素的适宜性。

1 遥感海岸线变化监测

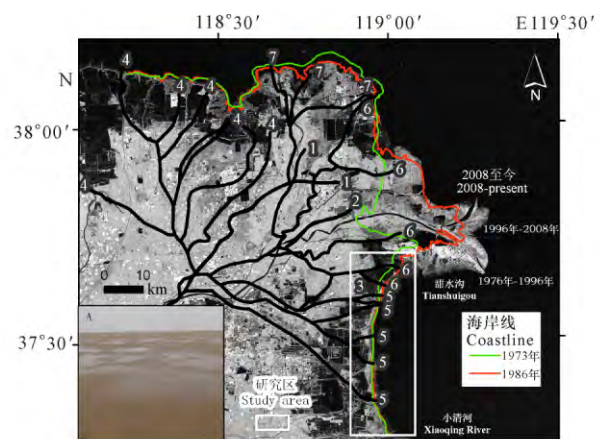
1.1 海岸线变迁

遥感监测海岸线变迁的方法,已由基于海岸特征并结合图像处理技术对海岸线进行直接判读的定性解译^[8-9](包括平均高潮线和一般高潮线等),发展到以特定基准面为标识定量提取指示岸线位置的阶段。而在确定指示岸线位置特征时,有许多潜在的影响因素,包括影像获取时的潮位、坡降、波能、地下水位、沉积物粒径、太阳高度角和传感器观测几何等^[10-11]。这些因素引起的海岸线变化可能是长期的、周期性的和随机性的。而主要由潮位引起的周期性海岸线变化对海岸线的位置确定起到非常重要的作用,且潮位的影响又因为海岸地貌的变化造成海岸线位置的很大

不同^[12]。本节以小清河口附近寿光火电厂址岸线变迁监测为例,探讨特定厂址区域遥感提取海岸线的影像选取、影响因素及评价方法。

1.2 研究区概况

研究区位于现代黄河三角洲地区。黄河平均每年输送 $208.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $5.07 \times 10^8 \text{ t}$ 的水沙入海^[9],大约 63%~79% 的泥沙沉积在河口三角洲区域^[12],使得潮间带面积迅速增加,特别是在现行河口地区,例如 1976 年—2008 年,清水沟河口区潮间带面积增加了 136 km^2 。然而,在废弃的河口区域,海岸冲刷也异常剧烈。该研究区属于黄河 1929 年—1938 年形成的叶瓣(图 1)。近年来,受多种因素综合影响,黄河三角洲海岸冲淤变化异常复杂,而准确定量的监测海岸线变化是正确评价海岸冲淤变迁的关键^[13]。该研究区属不正规半日潮海区,落潮历时大于涨潮历时,平均潮差 1.25 m,最大潮差自黄河口 0.5 m 向南增至小清河口,可达 2 m,而潮流速则递减到小清河口,为 30~40 cm/s。该区滩面为黄河泥沙多年堆积而成,潮滩平坦宽广,宽 7~9 km,平均坡度为 0.45‰,组成物质主要为极细砂和粉砂,粒径介于 0.125~0.016 mm,为三角洲内近年来比较稳定的区域。



1:1855 年—1889 年;2:1889 年—1897 年;3:1897 年—1904 年;4:1904 年—1929 年;5:1929 年—1934 年;6:1934 年—1938 年;1947 年—1964 年;7:1964 年—1976 年;A:研究区位置的潮滩照片 The intertidal flat photo of study area

图 1 黄河改道历史及研究区位置

Fig. 1 Location of study area and historical migration of deltaic channels of the modern Huanghe River delta

1.3 遥感影像数据及处理

已有报道:定量提取水边线时,在一个 1:500 坡降的潮滩,水边线的高度误差和内插间隔是主要的误差源^[14],影像获取时位于高潮或低潮都会对低坡降的瞬时水边线位置产生几十米的影响^[8]。在坡降增加至 1:30 时,影像的分辨率就成为误差的主要影响因素。当潮汐变化引起的误差大于影像的空间分辨率时,潮位变化必须考虑^[11]。虽然也可通过选取低分辨率影像以忽略潮汐变化的影响,或选取高分辨率的影响减少误差的影响^[15],但是在电厂这种小尺度的范围内,低分辨率影像有时很难满足要求,而高分辨率的影像存在时间序列短的限制性。

由于研究区为黄河历史上泥沙堆积形成的,自表 1 黄河三角洲地区卫星影像数据列表

Table 1 Summary of the satellite data used in Huanghe River delta from 1973 to 2009

基础影像* Master image					校正影像** Slave image				
日期 Date	时间 Time	传感器 Sensor	分辨率(m) Resolution	潮位 (cm) Tidal level	日期 Date	时间 Time	传感器 Sensor	分辨率 (m) Resolution	潮位 (cm) Tidal level
1973-10-31	10:11:42	MSS	80	4.416	1973-12-06	10:11:28	MSS	80	50.000
1980-09-24	09:50:40	MSS	80	-4.160	1973-12-24	10:11:10	MSS	80	-85.000
1984-10-05	10:07:25	MSS	80	-36.972	1980-07-14	09:53:30	MSS	80	-37.412
1989-02-13	10:14:45	TM	30	13.672	1980-06-08	09:54:55	MSS	80	75.594
1992-08-24	10:04:22	TM	30	29.790	1984-09-03	10:12:01	MSS	80	12.192
2004-09-18	10:30:27	ETM+	30	-24.078	1989-01-28	10:14:28	TM	30	-96.976
2007-06-15	10:36:01	TM	30	-14.137	1988-12-03	10:12:30	TM	30	2.336
2009-06-12	10:32:23	ETM+	30	-23.640	1992-04-02	10:06:01	TM	30	-40.768
					2004-09-10	10:25:39	TM	30	31.023
					2007-04-28	10:36:38	TM	30	71.913
					2007-05-14	10:36:28	TM	30	69.990
					2009-06-20	10:30:21	TM	30	48.760

注:潮高基准面为 1985 国家高程基准,*基础影像用于岸线提取,**校正影像用于坡度计算和精度评估

Note: The 1985 national tidal height datum was as the local tidal datum, the master images (*) used to detect coastline variations, and the slave images (**) used for calculation of the tidal flat gradient and evaluation of accuracy and errors

1.4 潮位标定

为实现岸线变化对比分析,对提取的水边线作不同潮位的标定。采用丘仲锋等^[16]建立的渤海海二维潮汐伴随同化数据模型,得到研究区域 12 个主要分潮(Sa, K₁, O₁, P₁, Q₁, M₂, S₂, N₂, K₂, M₄, M_{S4}, M₆)的调和常数。卫星过境时各像元的瞬时潮高采用万国洪等^[17]的主港潮汐预报调和的方法:

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

式中 A₀ 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,则可将其值取为 0; H 和 g 是分潮的调和常数,分别为振幅和迟角; σ 是分潮的角速率; v₀ 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。

1976 年黄河改道清水沟流路以来,该区潮滩受其影响始终处于不断的冲淤变化中。因此,选用 1973—2009 年 Landsat-MSS/-TM/-ETM+ 卫星影像 8 景,用于分析海岸冲淤演化特征(表 1)。所有影像校正到统一的 WGS84 坐标系 UTM50N 投影, RSM 小于 0.5 个像元。大气校正采用暗目标法(DOS2)。用单波段密度分割提取影像瞬时水边线,又基于潮滩光谱特征,且研究区为粉砂淤泥质海岸,滩面广阔,落潮后潮滩上有大面积海水残留(图 1, A),近岸海水在有风天气浊度较高等原因,选用 NIR 波段(TM/ETM+ 选 4 波段, MSS 选 7 波段)提取水边线;而对于近岸海水浊度较高的年份采用 NIR 波段与可见光波段的差值消除浊流水的影响。

将调和常数代入式(1),即可算出卫星过境时的瞬时潮高。此外,还收集本区内羊角沟水文站实测的逐时潮位(1976 年—1998 年)和高低潮位(1999 年—2010 年)作为参照。

1.5 坡度校正

遥感水边线的坡度校正通常采用构建区域 DEM 来实现,也可以基于一线或岸线变化模型(OSM)进行坡度校正,但前一种方法对区域影像的时间跨度和潮位差异有较高的要求。本文假设粉砂淤泥质潮滩的潮间带内滩面坡度大致均一,故选取两景过境时间尽量相距短的影像,按照 1.3 节中方法提取水边线,分别设为 l₁ 和 l₂,再利用 1.4 节中获得的潮位数据确定两景影像的瞬时潮高,分别设为 h₁ 和 h₂,那么滩面坡度 p 可以确定为

$$p = \frac{l_2 - l_1}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

还要计算多年平均海面、理论深度基准面或1985年国家高程基准(中国通用高程基准)等各基准面之间的关系。例如,取1985年国家高程基准为 h ,则水边线 l_2 向陆或向海的移动距离为 l ,如式(3),即可得到校正至某一基准面的海岸线的位置。

$$l = \frac{h - h_2}{p} = \frac{(h - h_2)(h_2 - h_1)}{l_2 - l_1} \quad (3)$$

为便于计算改正和对比岸线变化,将研究区内的海岸线每隔100 m取一垂直海岸的断面,两个年份水边线间的距离量算和水边线向陆或向海的距离改正都沿各断面进行,具体操作通过ArcGIS扩展模块功能和DSAS软件实现。

1.6 精度评价

采用相对误差分析和绝对误差分析两种定量评估方式进行精度评价。文中影像处理和水边线的提取主要是采用已成熟的方法,尽可能考虑各种因素的影响。这里不做具体定量精度估算,主要考虑坡度在岸线改正过程中的关键作用,将坡度值作为精度评价的指标。

1.6.1 相对误差评价

相对误差评价主要是基于计算结果内部的相互对比验证,分别在1973年、1980年、1989年和2007

年各增选一个时相的影像数据作实验验证,采用3组数据进行分析,各组内数据间最长时间间隔为3个月。依据各影像的潮位状况,选定1973-12-24、1980-06-08、1989-01-28和2007-06-15等4个时相影像分别作为3组验证数据的基准(表2),并采用上文提到的方法计算,各组内其余两个时相数据分别计算,得到478个断面的坡降值,从而算出研究区段的平均坡降值。

1.6.2 绝对误差评价

绝对误差分析主要是坡度估算值与实测值之间的对比验证。1976年以来,为监测黄河三角洲海岸变迁,水利部黄河水利委员会(黄委会)沿三角洲海岸共布设了36条固定断面进行长期变化监测。选取与研究区海岸线基本垂直的10条断面用于验证,编号为从27至36。断面水深数据从潮滩向深海,测量一次的时间周期约为1个月,此期间的潮滩坡度变化对本文结果影响可忽略。由于粉砂淤泥质潮滩从陆向或海向均较难进行现场测量,因此,选取潮间带测量数据较全的1984年、1992年、2004年和2009年用于计算潮滩真实坡降。各断面实测坡降主要通过选取与影像提取的海岸线重叠或相近的水深值和水平距离计算得到(图2)。

表2 相对误差评价结果

Table 2 Error and RMSE of consistency check in study area

卫星影像 Date	潮位 Tidal level (cm)	潮差 Tidal range (cm)	潮差之差 Difference of tidal range(cm)	平均坡降 Average gradient(‰)	最大坡降 Max gradient (‰)	最小坡降 Min gradient (‰)	均方根 误差 RMSE(‰)	误差 Error (%)
1973-12-06	50	135		0.641	0.963	0.407	0.008 97	
1973-12-24	-85		45.584					2.4
1973-10-31	4.416	89.416		0.665	1.032	0.415	0.009 45	
1980-09-24	-4.16	79.754		0.566	0.794	0.403	0.009 78	
1980-06-08	75.594		33.252					
1980-07-14	-37.412	113.006		0.578	0.727	0.442	0.007 74	1.2
1989-02-13	13.672	110.648		0.453	0.623	0.379	0.005 09	
1989-01-28	-96.976		11.336					
1988-12-03	2.336	99.312		0.447	0.617	0.375	0.004 82	0.6
2007-04-28	71.913	86.050		0.763	0.957	0.322	0.003 29	
2007-06-15	-14.137		1.923					
2007-05-14	69.99	84.128		0.761	0.949	0.331	0.003 23	0.2

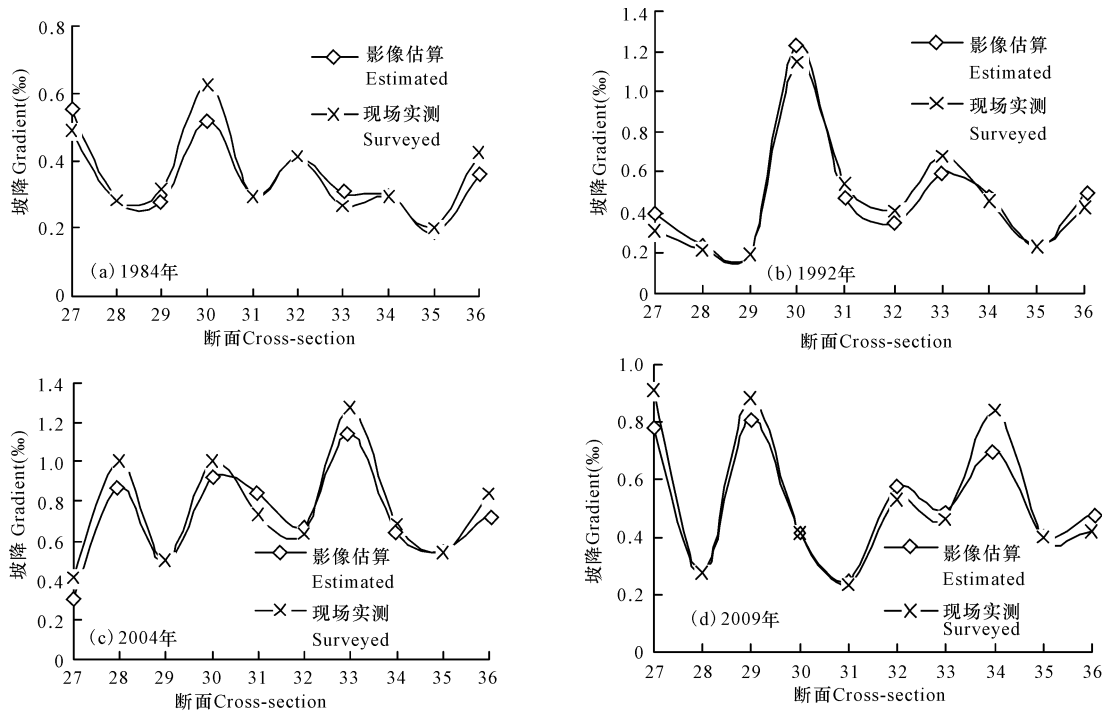


图2 基于卫星影像估算潮滩坡降值与实测断面坡降值对比

Fig. 2 Verification of absolute check for transects from 27 to 36 in 1984, 1992, 2004 and 2009

1.7 结果分析

由表2可知,4个检验年份的平均坡降分别为0.654‰、0.572‰、0.450‰、0.762‰。再通过对DSAS方法划分的478个断面进行均方根误差计算,得到其变化范围为0.00323‰~0.00978‰,低于坡降值两个数量级,表明利用不同时相遥感数据计算的各断面坡降值偏离程度较小,同时也显示该区坡降在短期内发生了较大的变化。平均坡降估算误差(表2最后一列)受各年份相互验证的两景影像间的潮差之差(表2第4列)影响,两组影像间的潮差之差越小,二者估算的平均坡降值越接近,说明利用影像进行坡降估算具有可行性。该方法不同于构建DEM模型获得海岸线位置,其参与运算的影像数量较少,对于短期内坡度变化较大的海岸段更加适用。

为验证本文方法估算潮滩坡降值的准确度,假定黄委会在黄河三角洲沿岸设立的36个固定断面的长期监测结果是合理可靠的,则由影像估算的潮滩坡降值和实测值的对比和误差分析结果(图2和表3)看出,对4个年份的坡降值,采用10个实测断面计算的均方根误差为0.038‰~0.076‰,低于实测坡降值一个数量级。利用公式(1)将误差算至潮滩坡面上,估算的距离误差在20.34~171.35 m。

由上述分析可知,潮滩的坡降计算在整个海岸线定位和变化监测中具有重要的作用,坡降计算的误差是影响计算结果的关键,而引起坡降估算的主要误差包括水边线的高度配置、影像分辨率和内插计算精

表3 绝对误差评价结果统计表

Table 3 RMSE between the shoreline surveyed and those estimated by the proposed tidal and slope correction

年份 Year	潮差 Tidal range (cm)	最大距离 Max distance (m)	最小距离 Min distance (m)	均方根 误差 RMSE(‰)
1984	49.16	154.39	20.34	0.038
1992	70.56	158.28	76.39	0.049
2004	55.10	84.80	45.92	0.076
2009	72.40	171.35	28.45	0.054

度^[14],其中水边线的高度确定主要由潮汐模型决定;对于平均坡降0.45‰(本研究计算值0.33‰~1.09‰)的潮滩,采用30 m或80 m分辨率的MSS/TM影像计算高度的评价误差,分别为2 cm或4 cm(最大为9 cm),可见影像分辨率不是主要的误差来源;而对于由分段计算的间距大小带来的误差也与潮滩坡降有关,根据文献^[14]的讨论结果:对于12.5 m分辨率的影像,1:100和1:30坡降差值像素为10 m×10 m,1:500坡降差值像素为60 m×60 m时为合理。而本研究选用30 m或80 m分辨率影像,潮滩坡降平均为1:2000,对于给定的两条岸线,岸线分段间距随着潮滩坡度越小距离越大,因此本研究100 m的分段间隔足以满足需要。对估算结果的相对误差分析也显示,不同影像估算坡降值的均方根误差低于坡降值两个数量级(表2),表明利用不同时相遥感数据计算的各断面坡降值偏离程度较小,结果具有可靠性,同时也显示该区坡降在短期内发生了较大

的变化。而利用实测坡降对估算坡降进行误差分析可知,均方根误差低于实测坡降值一个数量级。从验证结果可知,平均坡降估算误差(表2最后一列)受到各年份相互验证的两景影像间的潮差之差(表2第四列)的影响,两组影像间的潮差之差越小,二者估算的平均坡降值越接近,说明利用影像进行坡降估算具有可行性。

关于坡降估算的精度方面,文献[18]认为,在当时的技术下处理遥感资料,合成卫星影像误差为1个像元(MSS为 $80\text{ m}^2 \times 80\text{ m}^2$,TM为 $30\text{ m}^2 \times 30\text{ m}^2$),一般情况下为1.5个像元,水平方向误差为120 m(MSS)和45 m(TM),用不同时相卫片解译的岸线叠加时,误差为0.1~0.5 mm,实际误差为50~250 m(所用卫片资料及解译底图均为 $1:50 \times 10^4$),用卫片解译水边线、以及岸滩坡度的测定、高程的推算等,其综合误差100 m左右,这样实际计算误差估计为195~470 m,然而用单波段卫片解译时,可以消除卫片合成误差。这样,实际误差(150~350 m)比上述估计要小些。而本文采用多个样本进行误差分析(表1),结果介于20.34~171.35 m,符合估算精度。均方根误差为53.98~217.72 m,对采用分段估算(实际100 m间距)和厘米级潮位模拟标定等处理手段,在不涉及岸线叠加分析的条件下,该误差范围理论上是合理的。文献[13]研究显示,针对坡降大于 $1:500$ 的区域,选用12.5 m分辨率的Spot影像数据并采用不同方法进行海岸线提取的潮位校正后,均方根误差为43.09~193.58 m。本文针对坡降约 $1:2000$ 的区域,选用30 m或80 m分辨率的影像得到估算的均方根误差范围是53.98~217.72 m,也显示在坡降较小的区域,潮汐变化和内插间隔等引起的误差大于影像空间分辨率引起的误差^[14]。而从误差精度上看,本文方法较适应两年及以上时间跨度的岸线变化,对于岸线变化更剧烈的区域可进行逐年计算。

由已有的研究及本文结果可知,对于不同坡降及潮差的潮滩来说,潮汐的周期性变化是准确估算海岸线位置的基础,由海岸地形造成的潮位变化对海岸线位置确定至关重要。我们将潮滩坡降分为3个等级,当坡降大于 $1:30$ 时,影响海岸线提取精度的主要因素为影像自身的空间分辨率,此时影像分辨率越高则提取的海岸线位置越精确;当坡降为 $1:500$ 时,确定的水边线高程误差和改正时的内插误差便成为影响精度的主要误差来源,影像分辨率不是主要的误差来源;当潮滩坡降小于 $1:500$,达到 $1:2000$ 时,则潮滩的坡度改正误差更加重要。

2 遥感洪水痕迹识别

2.1 研究区概况

2006年7月22日,大通河上游(青海省境内)突降暴雨,致使下游的永登县连城、河桥两镇大通河水位上涨,发生了自1952年以来最大的洪水。洪水造成沿岸4个水电站(在修建的铁城、天王沟、泰明和已建成的连城水电站)上下围堰、厂房机坑、建筑材料被毁。另外,洪水毁坏农田、林地60多公顷,造成经济损失1300多万元。大通河永登县段属于大通河下游,位于甘肃省兰州市永登县境内,有连城和享堂两个水文观测站。流域主要是峡谷区,河道狭窄,植被条件不好,多为裸露的岩石。山区性河段是大通河洪水的主要来源区之一。据此选取洪水发生前(2006年7月12日)与洪水发生后(2006年8月5日)覆盖该区域的Landsat ETM、TM和SPOT影像开展洪水淹没范围的提取。高程数据选用SRTM数据,分辨率为90 m的DEM数据。使用ENVI的FLAASH模块对遥感影像进行大气校正,并裁剪出研究区域,进行地形校正。采用植被指数法和土壤含水量两种方法提取洪水痕迹,再利用八方向种子淹没算法估算洪水淹没范围,并利用模拟结果对比不同方法及影像适宜性。模拟算法与估测算法相似,但是除了考虑连通性,模拟算法还需考虑水的流动方向。依据自然地表水流规律,判断DEM区域内某一点的水流方向时,只需计算八方向内的最大高程落差,得知水流方向即从种子点流向高程落差最大的点。

2.2 植被指数法提取洪水痕迹

分别计算研究区洪水发生前后两幅影像的RVI、NDVI和MSAVI指数,公式^[19]如下:

$$RVI = NIR / RED,$$

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

$$MSAVI = 0.5 * (2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - RED)}).$$

然后计算两幅影像的差值,差值绝对值越大,说明洪水前后此地的植被覆盖变化或植物生长状况变化越大,越有可能被洪水淹没或冲刷。设定阈值后提取洪水痕迹斑块(图3)。

2.3 土壤含水量法提取洪水痕迹

根据范文义等^[20]提出的荒漠化地区土壤含水量的提取模型,使用Landsat TM影像计算洪水前后土壤光谱反射率,从而反映出土壤含水量的变化。从图4可以看出洪水过后整个区域的土壤含水量都有所上升,这是由于区域的降水造成的。土壤含水量越高,被洪水淹没或冲刷的可能性越大。设定阈值并从洪水后影像中提取洪水淹没痕迹斑块。

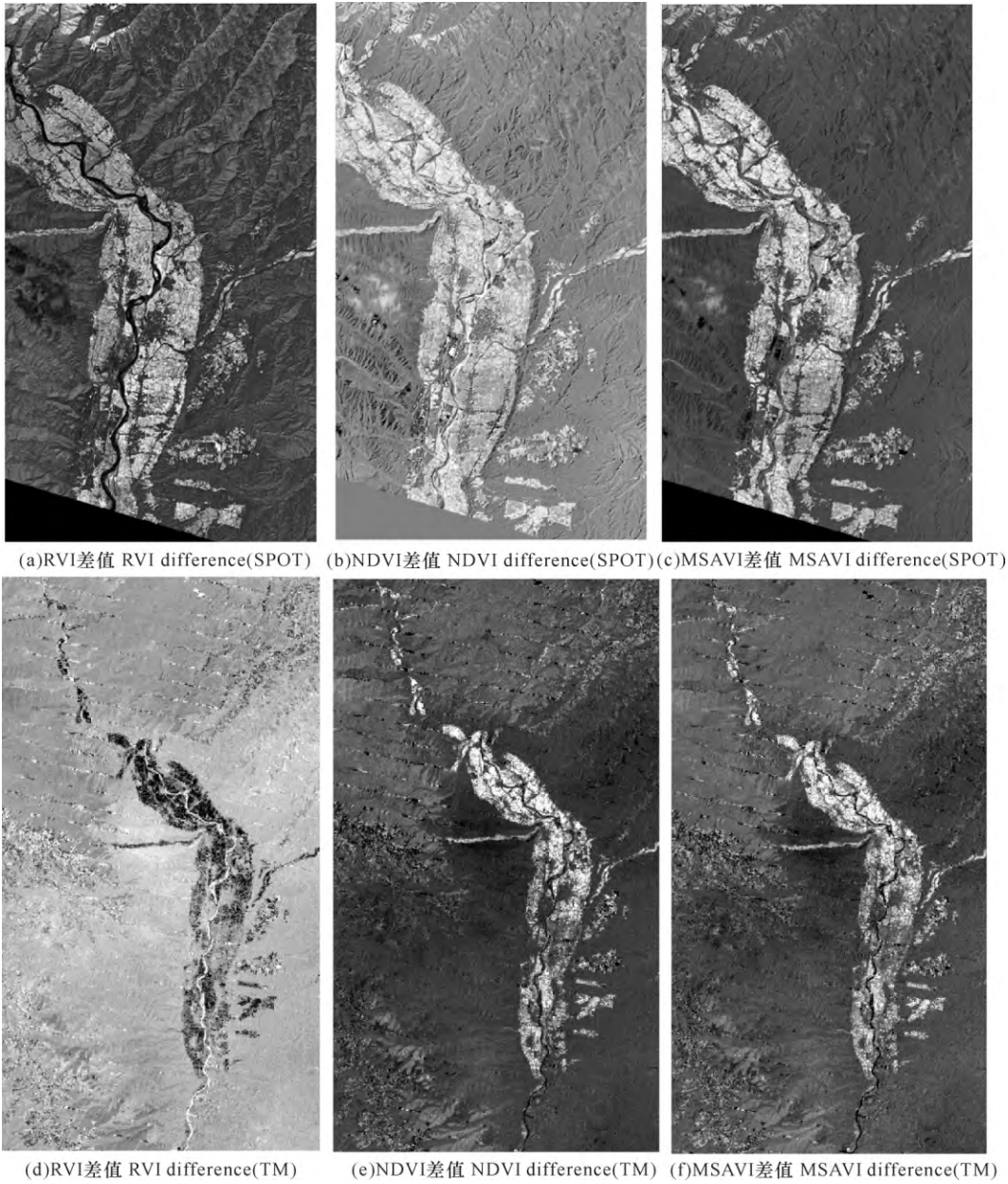


图3 Landsat TM 和 SPOT 数据不同指数估算结果

Fig. 3 The estimated results of different index from Landsat TM and SPOT images

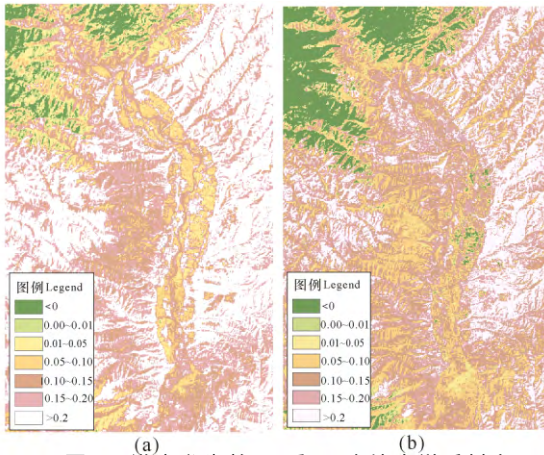


图4 洪水发生前(a)后(b)土壤光谱反射率

Fig. 4 Spectral reflectance of soil prior to (a) and following (b) the flood

2.4 淹没范围估测

使用 C# 语言与 ArcEngine 编程实现八方向种子淹没估测;利用 ArcEngine 的栅格数据接口打开和保存洪水痕迹提取结果和淹没算法生成的估测结果;利用 ArcEngine 的地图显示接口及图形界面接口显示数据结果;利用 C# 语言编写种子淹没算法。

2.5 结果对比与讨论

图 5a 中的点数据是实地考察的采样点,是否曾被淹没是通过当地居民的访问得到。从图 3a、3b、3c 可以看出,使用 Landsat TM 影像的 3 种不同植被指数估测出的洪水淹没范围相互之间的吻合度较高,但是洪水淹没区域主要集中在上游地区,这与实地考察的结果(图 5)出入较大。

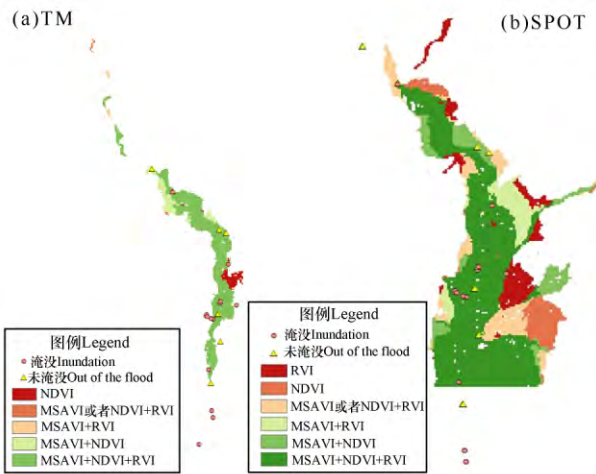


图5 植被指数估测淹没范围对比

Fig. 5 The inundated area estimated from different vegetation index of TM image(a) and SPOT image (b)

从图 3d、3e、3f 可以看出,使用 SPOT 影像的 3 种不同植被指数估测出的洪水淹没范围相互之间的吻合度较低。通过 RVI 和 NDVI 指数估测的淹没范围偏大,根据 MSAVI 指数的提取结果更加符合实地调访结果。这一点在 TM 影像的提取结果中也成立。

从图 5 看,SPOT 影像的估测范围要大于 TM 影像,这是因为 SPOT 影像的分辨率较高,能够反映更多植被指数变化的细节,许多区域在 TM 影像中属于混合像元,难以提取植被变化痕迹,而在 SPOT 影像中能很好地提取出来。

从图 6 可以看出,使用土壤含水量法估测出的洪水淹没范围主要集中在下游地区,估测结果与实地考察结果较为相符。实验的结果表明,土壤含水量变化

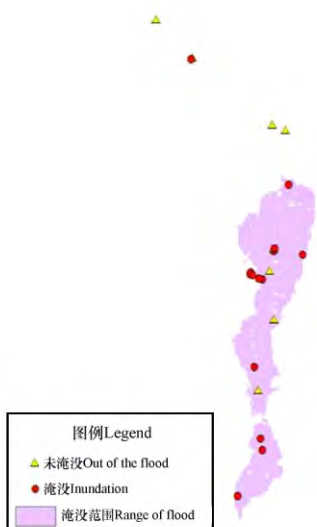


图6 土壤含水量估测淹没范围

Fig. 6 The inundate area estimated from the index of soil moisture content

比植被变化更能正确反映洪水淹没的痕迹,原因可能是研究区地表植被多为农作物,在剧烈的天气变化中,农作物受到的破坏并不仅仅来自洪水淹没。还有可能来自暴风对枝叶、茎秆的损伤或者雨水贮积造成的淹涝^[21]。洪水发生时,研究区的农作物以玉米为主,正处于拔节期,积水对拔节期玉米的密度和死株率都有影响。拔节期积水淹没 3 d,死株率可以达到 17%以上,5 d 则上升到 50%,7 d 能上升到 70% (文献[22])。但积水的原因有很多种,洪水淹没只是其中一种,还有可能是降水造成的积水,山坡上的沟渠排水造成的积水。调访过程中得知,在河流水位上涨造成洪水时,同时发生了局部暴雨而导致山洪。在水位上涨、暴雨和山洪的多重影响下,植被的变化是多种因素共同作用的结果。与植被指数法不同的是,使用土壤含水量指标并不是寻找洪水前后变化较大的区域,而是寻找洪水后含水量同比较大的区域。这是因为整个研究区的土壤含水量都因为降水而升高,原来距离河流较远的地区含水量较低,变化也就较大,但这些地方并不是被洪水淹没的区域。另外,由于 DEM 数据分辨率的限制,许多小的田坎、土堆对洪水淹没范围的影响并不能如实地反映出来。

取至少两个植被指数估测范围重叠的区域作为植被指数的最终估测范围,与模拟范围(图 7)做叠加分析,结果如图 8 所示。可以看出,TM 影响估测的范围集中在上游地区,可能是由于分辨率较低,下游植被的变化较分散,没有大片连续,因而无法提取出来。这一点从 SPOT 数据的估测结果可以得到验证。但是 SPOT 数据的分辨率高,提取出的植被变化细节较多,下游地区估测范围明显比模拟范围要

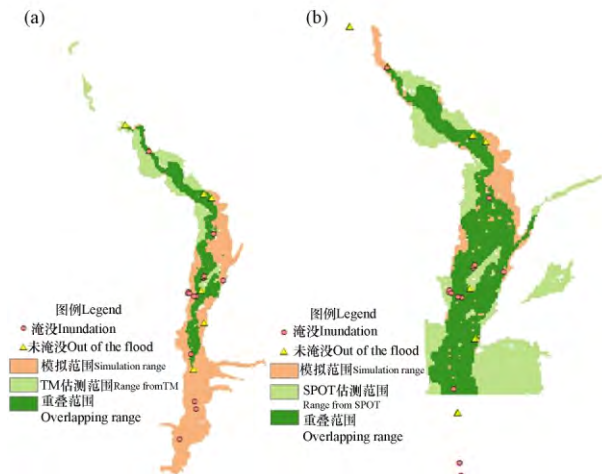


图7 淹没范围模拟结果

Fig. 7 The inundate area estimated form simulation result

大,与调访中了解到的暴雨、山洪对植被造成的破坏一致。

通过上述对比可以看出,土壤含水量估测出的淹没范围与模拟淹没范围十分吻合,在一些区域甚至更加精确。



(a)TM 估测与模拟对比;(b)SPOT 估测与模拟对比

(a)Comparison of estimation and simulation under TM;

(b)Comparison of estimation and simulation under SPOT

图 8 TM 与 SPOT 植被指数估测结果与模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of results between the simulated and the estimated from vegetation index of TM image (a) and SPOT image (b)

3 结论

本研究选取山东小清河口寿光电厂和甘肃省永登县大通河段的典型电厂厂址区,通过遥感监测海岸线变迁和洪痕及洪水淹没范围,探讨不同厂址各地质要素在遥感影像及方法选取方面的适宜性,所选影像类型主要依据厂址区范围特征、时间尺度等。结合已有研究和本文结果,在海岸线变化定量监测中,对于潮滩坡降较大($>1:30$)的区域,影像空间分辨率越高则解译精度越高;当坡降减小到 $1:500$ 时,确定的水边线高程误差和改正时的内插误差是影像选取和方法选择的主要依据;当坡降达到 $1:2000$ 时,潮滩的坡度改正误差则为考虑的重点。对于洪水淹没范围的提取,考虑到范围尺度较小,主要选取 Landsat 和 SPOT 较高空间分辨率的数据做对比分析,发现基于 Landsat TM 数据的土壤含水量法提取的洪水痕迹与模拟结果和实际调访情况更符合。

参考文献:

[1] 王润生,熊盛青,聂洪峰,等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报,2011,85(11):1699-1743.
WANG R S,XIONG S Q,NIE H F,et al. Remote sens-

ing technology and its application in geological exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85 (11): 1699-1743.

[2] 姜晟,李俊龙,李旭文,等. 核电站温排水遥感监测方法研究——以田湾核电站为例[J]. 中国环境监测,2013,29(6):212-216.

JIANG S,LI J L,LI X W, et al. A research on the remote sensing monitoring method with the thermal discharge of Tianwan nuclear power station[J]. Environmental Monitoring in China,2013,29(6):212-216.

[3] 李磊,李志龙,席占生,等. 电力工程中遥感提取侵蚀沟参数的方法探讨[J]. 中国水土保持,2014(6):46-49.

LI L,LI Z L,XI Z S, et al. Discussion on the method of remote sensing to extract the parameters of erosion ditch in power engineering[J]. Soil and Water Conservation in China,2014(6):46-49.

[4] 许静,朱利,姜建,等. 基于 HJ-1B 与 TM 热红外数据的大亚湾核电基地温排水遥感监测[J]. 中国环境科学,2014,34(5):1181-1186.

XU J,ZHU L,JIANG J, et al. Monitoring thermal discharge in Daya Bay plant based on thermal infrared band of HJ-1B and TM remote sensing[J]. China Environmental Science,2014,34(5):1181-1186.

[5] 张爱玲,朱利,陈晓秋,等. 核电站温排水卫星遥感监测应用研究[J]. 环境监测管理与技术,2014,26(6):12-16.

ZHANG A L,ZHU L,CHEN X Q, et al. Research on application of satellite remote sensing techniques for monitoring thermal discharge from nuclear power plant [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2014,26(6):12-16.

[6] 冯筠,黄新宇. 遥感技术在资源环境监测中的作用及发展趋势[J]. 遥感技术与应用,1999,14(4):59-70.

FENG Y,HUANG X Y. Roles of remote sensing technology on monitoring resources and environment and its trends[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1999,14(4):59-70.

[7] 陈爱群. 国内外遥感最新技术及其发展趋势[J]. 测绘科技情报,2008(1):12-15.

CHEN A Q. Remote sensing technology and its latest development trend[J]. Surveying and Mapping Science and Technology Information,2008(1):12-15.

[8] BOAK E H,TURNER I L. Shoreline definition and detection: A review[J]. Journal Coast of Research, 2005, 21(4):688-703.

[9] 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(1/2):32-40.

[10] GENS R. Remote sensing of coastlines: Detection, ex- Guangxi Sciences, Vol 23 No 6, December 2016

- traction and monitoring[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7):1819-1836.
- [11] GUARIGLIA A, BUONAMASSA A, LOSURDO A, et al. A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes[J]. *Annals of Geophysics*, 2006, 49(1):295-304.
- [12] FAN H, HUANG H J, ZENG T Q, et al. River mouth bar formation, riverbed aggradation and channel migration in the modern Huanghe (Yellow) River delta, China[J]. *Geomorphology*, 2006, 74(1/2/3/4):124-136.
- [13] CHEN W W, CHANG H K. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 84(1):54-60.
- [14] MASON D C, DAVENPORT I J, FLATHER R A, et al. A sensitivity analysis of the waterline method of constructing a digital elevation model for intertidal areas in ERS SAR scene of eastern England[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 53(6):759-778.
- [15] LOHANI B. 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.
- [16] 丘仲锋, 何宜军, 吕咸青. 黄海、渤海 TOPEX/Poseidon 高度计资料潮汐伴随同化[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4):10-18.
- QIU Z F, HE Y J, LV X Q. Tidal adjoint assimilation with the TOPEX/Poseidon altimetry data in the Huanghai and Bohai Seas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4):10-18.
- [17] 方国洪, 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.
- FANG G H, ZHENG W Z, CHEN Z Y, et al. Analysis and Forecasting of Tides and Tidal Streams[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [18] 黄海军, 李成治, 郭建军. 卫星影像在黄河三角洲岸线变化研究中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994(2):29-37.
- HUANG H J, LI C Z, GUO J J. Application of Landsat images to the studies of the shoreline changes of the Huanghe River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994(2):29-37.
- [19] 苗乃哲. 基于 Landsat TM 数据的冬小麦不同生育期叶面积指数反演方法精度比较[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- MIAO N Z. Accuracy Comparison of the Leaf Area Index Inversion Method of Winter Wheat at Different Growth Stages Based on Landsat TM Data[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [20] 范文义, 李明泽, 应天玉. 荒漠化地区土壤含水量的遥感定量反演[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5):1046-1051.
- FAN W Y, LI M Z, YING T Y. Remote sensing quantitative retrieval of soil water content in desertification region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5):1046-1051.
- [21] 张官雄, 张慧, 邢大鹏. 灾害性天气条件对农作物的影响分析及应对[J]. *北京农业*, 2015(9):176-177.
- ZHANG G X, ZHANG H, XING D P. Analysis of the impact of disastrous weather conditions on crops and its countermeasures[J]. *Agriculture in Beijing*, 2015(9):176-177.
- [22] 李香颜. 洪水灾害风险分析及其对农作物的影响评估技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- LI X Y. Flood disaster risk analysis and impact on crop assessment technology research[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.

(责任编辑: 尹 闯)