

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.03.20

遥感技术在曹妃甸海岸带地质环境调查中的应用

方 成¹, 孙晓明², 康 慧¹, 葛大庆³, 王小丹¹, 谢海澜¹

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 在曹妃甸野外调查与研究中, 通过综合使用 8 种卫星 10 种类型的遥感数据源, 分析不同类型数据的图像特征, 结合野外验证, 对地表环境现状及变化、海洋悬浮泥沙分布与变化、地面沉降变化速率、潮间带特征等展开研究, 取得了预期成果。研究发现, Landsat 卫星数据良好的历史延续性和光谱特性使其可以有效应用于地表环境变化、海岸线变迁、悬浮泥沙和潮间带特征等多项研究中; 综合使用多源数据可以填补监测周期, 提高地面沉降、海岸线特征等调查的精度; 加强利用遥感技术开展潮间带特征的应用研究对开展潮间带调查工作具有积极意义。该项研究为利用遥感技术开展海岸带地质环境综合调查评价提供了重要技术支撑。

关键词: 曹妃甸; 海岸带; 遥感; 地质环境

中图分类号: P748; X141

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)03-0119-09

Application of remote sensing technology to geological environment investigation in the Caofeidain coastal zone

FANG Cheng¹, SUN Xiaoming², KANG Hui¹, GE Daqing³, WANG Xiaodan¹, XIE Hailan¹

(1. Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China;
3. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the field survey and research in Caofeidian, 8 kinds of 10 types of satellite remote sensing data were used in Caofeidian Project. By analyzing the characteristics of different images, status and changes in the surface environment, suspended sediment distribution, land subsidence characteristics and intertidal zone characteristics were examined by combing field confirmation, and the expected results were achieved. The research results show that the historical continuity and spectral features of the Landsat satellite data can be effectively used for the studies surface environment changes, shoreline changes, suspended sediment and intertidal zone characteristics. Combination of multi-sources data can complement the monitoring period, improve the precision of subsidence and shoreline characteristics. Improvement of the techniques of using remote sensing to study tidal flat is of significance for the investigation of tidal flat. The study provides technical support for using remote sensing technologies to carry out geological environment survey in coastal zone.

Keywords: Caofeidian; coastal zone; remote sensing; geological environment

遥感技术与常规地面调查手段相比,可以减少人员、资金和时间投入,及时获取系列动态资料;在解释结果已经取得预期效果的工作内容中,野外测绘工作

量可减少 30% ~ 50%^[1];与钻探、物探等技术方法的结合,可以填充地质调查内容,其成本低、效率高、实用性等特点突出。

收稿日期: 2014-07-04; 修订日期: 2014-09-29

基金项目: 中国地质调查局“河北曹妃甸滨海地区海岸带环境地质调查评价(1212011120086)”

第一作者: 方成(1982-),男,工程师,硕士,主要从事海岸带水文地质环境地质研究。E-mail: tjfangcheng@126.com

在海岸带地质环境综合调查中,遥感技术应用较为广泛,但受研究内容、调查精度、监测周期以及研究经费等要求的限制^[2],众多学者大多选用单一类型的遥感数据开展专向研究^[3~6],多类型数据开展多项研究一般应用在综合课题中^[7~8]。在综合应用中,环境地质的调查研究对图像光谱分辨率要求较高,大比例尺的城市地质调查和海岸线变化对图像的几何分辨率要求较高,而监测研究则对图像的重复周期有具体要求,虽然有同时具备高光谱分辨率和高几何分辨率特点的遥感图像,但价格十分昂贵。因此在工作经费有限情况下,需要综合利用不同数据源特点,通过多种数据组合使用等方法达到预期研究效果,提高海岸带地质调查工作的遥感技术应用能力。

在曹妃甸海岸带地质环境调查中,综合使用多类型遥感数据,研究海岸带地表环境现状及变化、海洋悬浮泥沙分布及变化、地面沉降特征及变化、潮间带特征及变化等内容,取得了良好效果。本文通过分析不同

遥感数据特点和适用的研究内容,探索在地质环境调查中遥感技术方法的综合应用,为利用遥感技术开展海岸带地质环境综合调查评价提供示范。

1 数据特点分析

研究中使用了 8 种卫星 10 种类型的遥感数据(表 1),数据各有特点,但均存在一个缺陷,即达不到图像同时具有高几何分辨率和高光谱分辨率的研究要求。

Landsat 卫星数据,价格低廉,图像具有较高的光谱分辨率,其优势在于可以获取系列的历史数据;ALOS 与 SPOT 卫星的数据特征相似,优势在于具有较高几何分辨率,虽然价格都相对较贵,但 ALOS 数据与 SPOT 数据相比,价格便宜了近一半;中巴卫星、北京一号小卫星和中国环境卫星数据分辨率较低,其优势在于可免费获取,且后两种重访周期短;TerraSAR-X 和 ENVISAT 卫星数据利用微波获取地物特征,其优势是不受天气影响,可以全天候、全天时工作,且重访性高。

表 1 研究中应用的卫星数据一览表
Table 1 Satellite data used in this research

卫星名称	数据类型	几何分辨率/m	光谱分辨率	时间周期/d	应用特点	接收时间
美国 Landsat 卫星	MSS(多光谱)	79	4 个波段	18/16	大区域宏观,20 世纪 70 年代历史记录	1972—1992
	TM(多光谱)	30	7 个波段	16	光谱分辨率高,图像质量好,传感器稳定	1982 至今
	ETM + (多光谱 + 全色)	15/30	8 个波段	16	光谱分辨率高,图像质量好,传感器稳定	1999—2005
日本 ALOS 卫星	ALOS (多光谱 + 全色)	2.5/10	5 个波段	46	几何分辨率高,光谱分辨率较低(可见光 - 近红外)	2006—2011
法国 SPOT 卫星	SPOT5 (多光谱 + 全色)	2.5/10	5 波段	26	几何分辨率高,数据质量高,但光谱分辨率较低(可见光 - 近红外)	2002 至今
德国 TerraSAR-X 卫星	TerraSAR-X (微波 x 波段)	3		11	微波遥感,主要应用 ASAR 的 X 波段,波长 3.2 cm,多种成像方式,多极化	2007 至今
欧空局 ENVISAT	ENVISAT	20/30		35	微波遥感,主要应用 ASAR 的 C 波段,波长 5.6 cm,多极化	2002—2012
中巴卫星 CBERS	CBERS (多光谱 + 全色)	2.5/19.5	6 个波段	26	光谱分辨率较低,数据条带重	1999 至今
中国北京一号小卫星	北京一号(多光谱)	4/32	4 个波段	3~5	覆盖区域大,光谱分辨率较低,重复周期短	2005 至今
中国环境减灾卫星	环境减灾(多光谱)	30	4 个波段	2~4	覆盖区域大,重复周期短	2008 至今

2 图像选择分析

为达到预期解译效果,选择遥感数据应遵循两个基本原则:一是根据研究内容和精度要求,选择合适的几何分辨率和光谱分辨率图像;二是在监测工作中,应选择图像分辨率以及获取时间相同(或相近)的系列图像,增强解译结果的可比性。

(1)地表环境现状调查和海岸线变化监测中,选择使用 ALOS 或 SPOT 数据,利用其具有较高几何分辨率的特征,可以获得较高的解译精度;但在小于 1:10 万比例尺的地表环境变化与海岸线变化调查监测研究

中,使用中等分辨率的 Landsat 卫星数据,利用其 TM 或 ETM 较适中的光谱分辨率来识别不同地物类型,弥补几何分辨率不足,并且利用 Landsat 卫星数据的历史延续性,选择相同日期或季节的图像来获取地表环境的历史记录,增强可对比性,实现监测目的。

(2)在可见光中,0.58 ~ 0.68 μm 波段对水中物质的反应最敏感。因此,在海洋悬浮泥沙的遥感信息提取与反演研究中,可以利用 Landsat 卫星系列的光谱特性和历史延续性,使用红波段进行悬浮泥沙遥感信息提取,增强提取效果的可比性。

(3)使用不同分辨率的影像满足不同精度研究的

需求。在利用合成孔径雷达干涉测量技术开展地面沉降研究中,采用中等分辨率的 ENVISAT 雷达数据,研究区域地表形变特征;采用高分辨率的 TerraSAR-X 雷达数据,研究局部地表精细变化。

(4)利用中巴卫星、北京一号小卫星及环境卫星获取方便、成本低和周期短等特点,弥补其他数据在特定时间等方面的不足,增加监测频率,提高监测研究的持续性。

3 应用实例

在曹妃甸地质环境调查中综合使用了数据处理、信息提取、标志分析、人机交互解译、野外验证、综合分析、数学反演等多种技术手段,研究工作范围见图 1,技术流程见图 2。

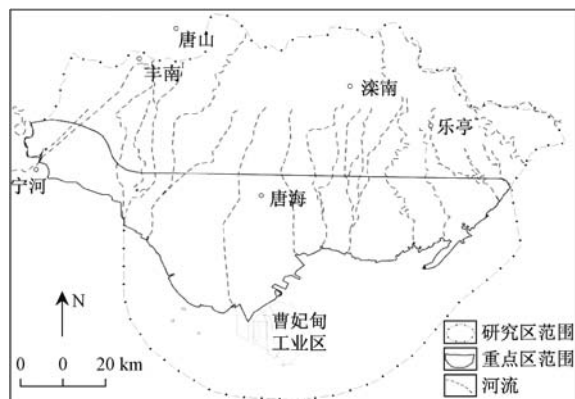


图 1 曹妃甸海岸带地质环境调查研究范围图

Fig.1 Research range of geological environment survey in the Caofeidain coastal zone

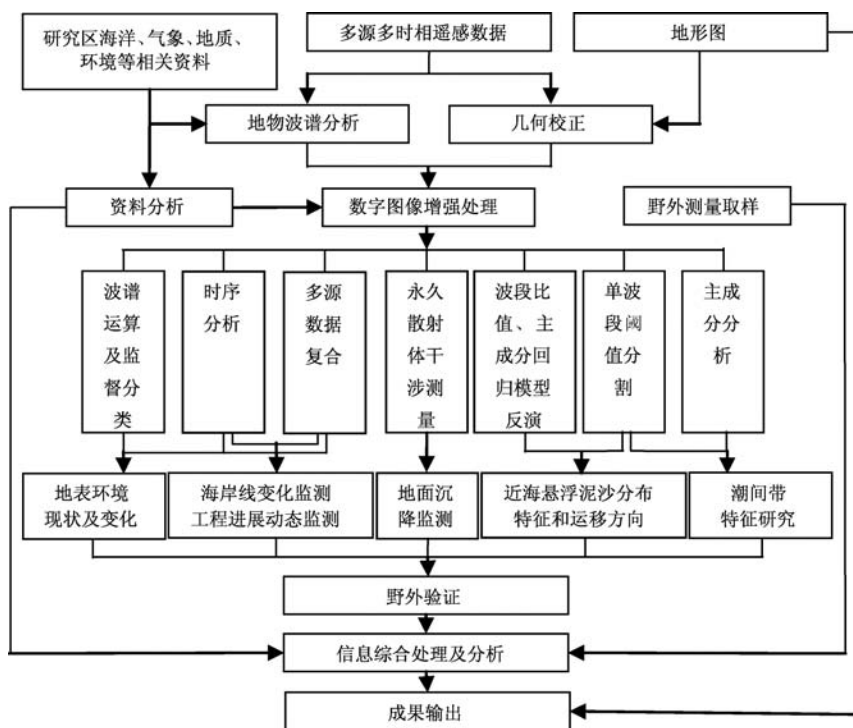


图 2 遥感技术综合应用研究流程图

Fig.2 Flow chart of the comprehensive application of remote sensing technology

3.1 地表环境现状及变化研究

区域上,范素英等使用 1993 年的 TM 数据和 2007 年的 ALOS 数据,局部选择 2005 年的 SPOT-5 和 2007 年的 CBERS-2 数据为补充信息 $4.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,减幅为 14.3%^[9]。在重点调查区,选择使用 TM 图像(1987 年 4 月 27 日、2007 年 4 月 3 日、2009 年 4 月 8 日)和 ETM 图像(2000 年 3 月 6 日)进行地表环境现状及变化研究,为增强其对比性,选择的数据接收日期均为春季。以 2009 年作为现状年,同时使用 ALOS 多光谱数

据(分辨率 10 m)与 TM 数据解译结果相互验证(图 3)。重点区遥感解译结果见表 2。

3.2 海岸线变化研究

使用 MSS(1979 年 9 月 4 日)、TM(1991 年 9 月 23 日和 2009 年 4 月 8 日)、ETM(2000 年 3 月 6 日)和环境卫星(2012 年 9 月 29 日)数据开展五期海岸线变化研究,结果表明 1979~2012 年间唐山市海岸线长度共增加了 81.8 km,其中,自然岸线长度基本保持不变,人工岸线中港口岸线长度增加了 81.3 km(表 3);海

岸线向海推进距离最远达到 11.1 km;向陆地后退距离最远为 1.1 km(图 4、表 4)^[10]。

3.3 填海造陆工程进展动态监测

为持续跟踪曹妃甸工业区填海造陆工程进展,选

择以 TM、ETM 数据为主,利用中巴卫星、北京一号小卫星等数据来填补缺失的时间间隙,实现动态监测的连续性和完整性(表 5、图 5)。

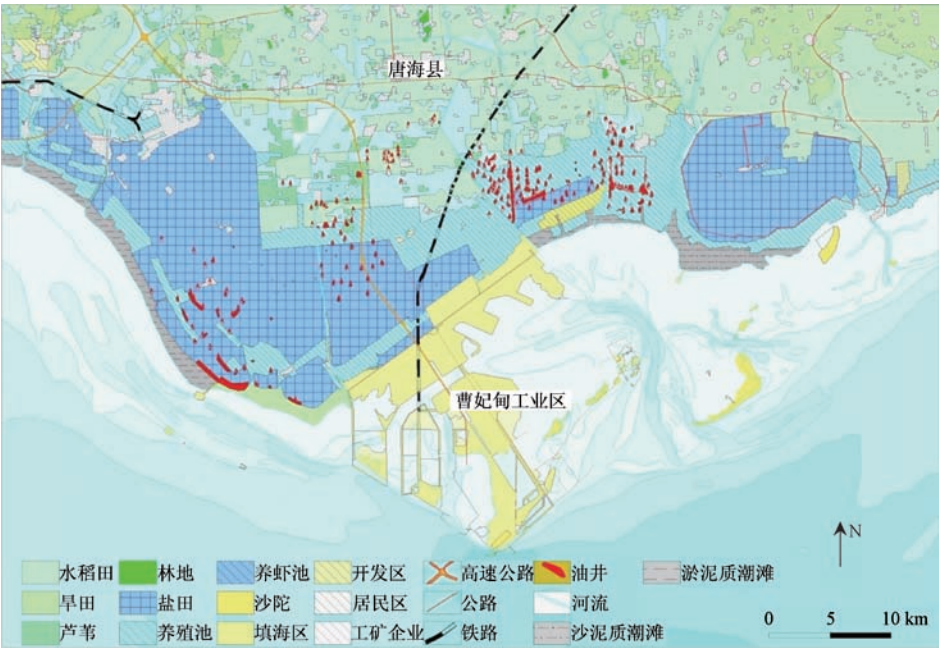


图 3 重点地区 2009 年地表环境遥感解译图

Fig. 3 Surface environment interpretation of the key region in 2009

表 2 曹妃甸重点地区地表环境变化遥感解译结果表

Table 2 Remote sensing interpretation results of surface environment change in the key regions at Caofeidian									/km ²
年代	农田	荒芜盐碱地	居民区	养殖业	盐田	油井	生态城	填海区	新园区
1987 年	819	38	64	204	417	1.2			
2000 年	781	12	71	339	438	2.5			
与 1987 年对比	-38	-26	+7	+135	+21	+1.3			
2007 年	636		94	463	454	5		132	7
与 2000 年对比	-145		+23	+124	+16	+2.5			
2009 年	636		94	435	453	9.6	7	154	7
与 2007 年对比	0		0	-28	-1	4.6	7	22	
1987~2009 年变化	-183	-38	+30	+231	+36	+8.6	+7	+154	7

注: + 为增加, - 为减少。

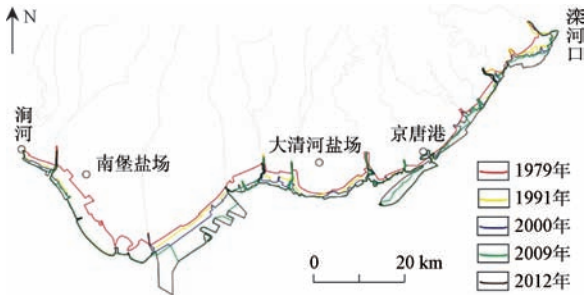


图 4 1979~2012 年海岸线变化遥感解译图

Fig. 4 Remote sensing interpretation of shoreline changes from 1979 to 2012

表 3 不同类型岸线长度变化解译结果^[10]

Table 3 Interpretation results of length changes of various types of shoreline						/km
海岸类型	1979 年	1991 年 (1993)	2000 年	2009 年	2012 年	1979—2012 年变化
海滩岸线(自然)	13.8	0	0	25.8	12.1	-1.7
河口岸线(自然)	8.2	12.8	10.1	12.1	10.0	+1.8
河口岸线(人工)	21.2	23.6	23.1	19.3	5.8	-15.4
堤坝岸线(人工)	155.8	217.6	224.0	188.2	171.6	+15.8
港口岸线(人工)	0	4.8	8.4	57.7	81.3	+81.3
合计	199.0	258.8	265.6	303.3	280.8	+81.8

注: + 为增加, - 为减少。

表 4 唐山市海岸线向海推进距离^[10]

Table 4 Shoreline advanced distance in Tangshan /km

时间段	涧河—双龙河	曹妃甸工业区	青龙河—浅水湾	浅水湾	京唐港	京唐港—滦河口
1979—1991	0.3~4.3	0.3~1.1	0~2.5		0~1	0~2.8
1991—2000	0~0.3	0.7~1.4	0~1.2		-1.1~0.2	0~1.1
2000—2009	0~0.7	0~3.5	0~0.9		0~1.4	0~1.2
2009—2012	-1~0.5	0~8.5	-0.1~0.1	新形成岸线	0~1.3	0~2.1
1979—2012	1.1~4.3	2.2~11.1	0.4~3.2	新形成岸线	-1.1~2.3	0~3.8

注：- 为岸线向陆地后退。

表 5 曹妃甸工业区填海造陆工程进展遥感解译成果

Table 5 Remote sensing interpretation of the reclamation project progress in the Caofeidian industrial district

数据类型	几何分辨率/m	接收时间/年-月-日	年度填海面积/km ²	累积填海面积/km ²
ETM	30/15	2003-05-18	0.39	0.39
TM	30	2004-02-04	0.66	1.05
ETM	30/15	2005-04-13	3.29	4.34
中巴卫星	19.5	2006-06-30	21.31	25.65
TM	30	2007-04-03	27.99	53.64
北京小卫星	30	2007-10-19	24.09	77.73
TM	30	2008-09-12	65.68	143.41
TM	30	2009-04-08	9.41	152.82
ALOS	10	2010-07-03	49.59	202.41
中国环境减灾卫星	30	2011-04-11	5.72	208.13

3.4 近岸海域悬浮泥沙分布特征及反演

3.4.1 分布特征和运移方向

研究选用 1976—2007 年间的 13 个时相的 TM、ETM 数据,为增强其可比性,使用的大部分图像接收季节为春季(仅 2001 年和 2008 年是秋季)。选用红波段(第 3 波段,波长 0.6~0.7 μm)进行悬浮泥沙信息提取,采用阈值分割处理方法将悬浮泥沙浓度分为 9 级(图 6)。

3.4.2 海水悬浮泥沙遥感反演

为研究近海海水悬浮泥沙分布特征,2008—2010 年在曹妃甸近海海域均布设了 4 条海水离水光谱反射率和辐射率测试剖面。光谱测量使用美国产 ASD 双通道地物光谱仪,同步采集表层、中层、底层的海水样品进行实测。

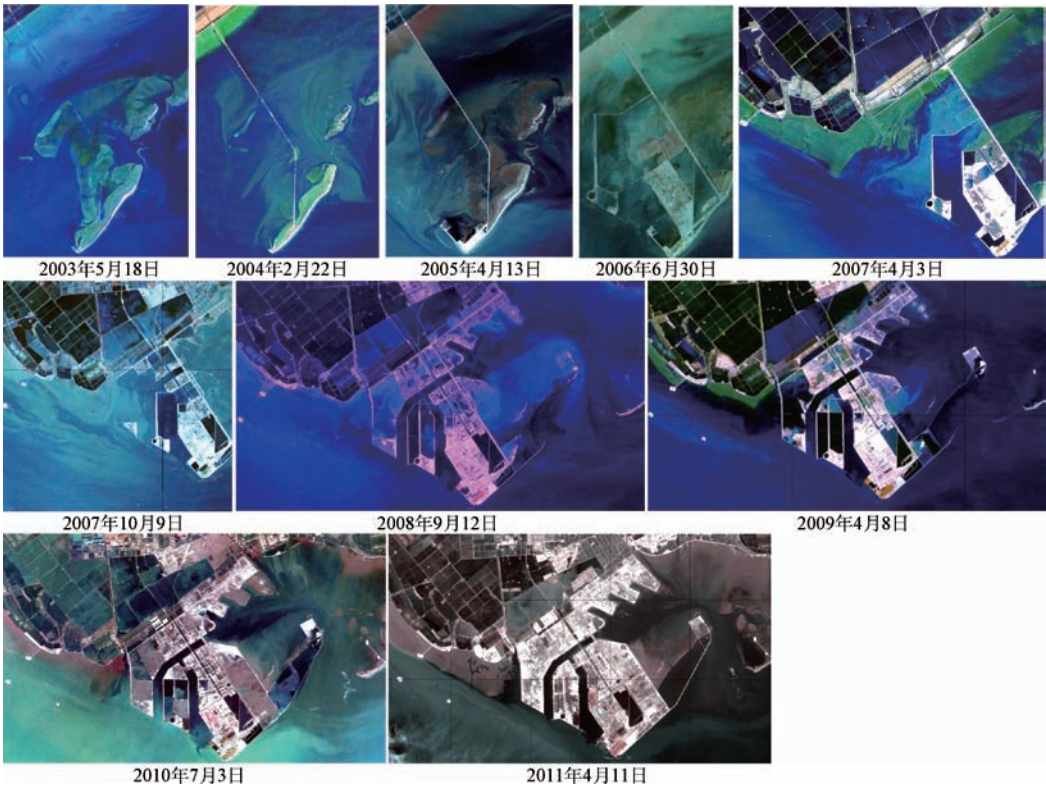


图 5 曹妃甸工业区填海造陆工程进展遥感解译图

Fig.5 Remote sensing interpretation of the reclamation project progress in the Caofeidian industrial district

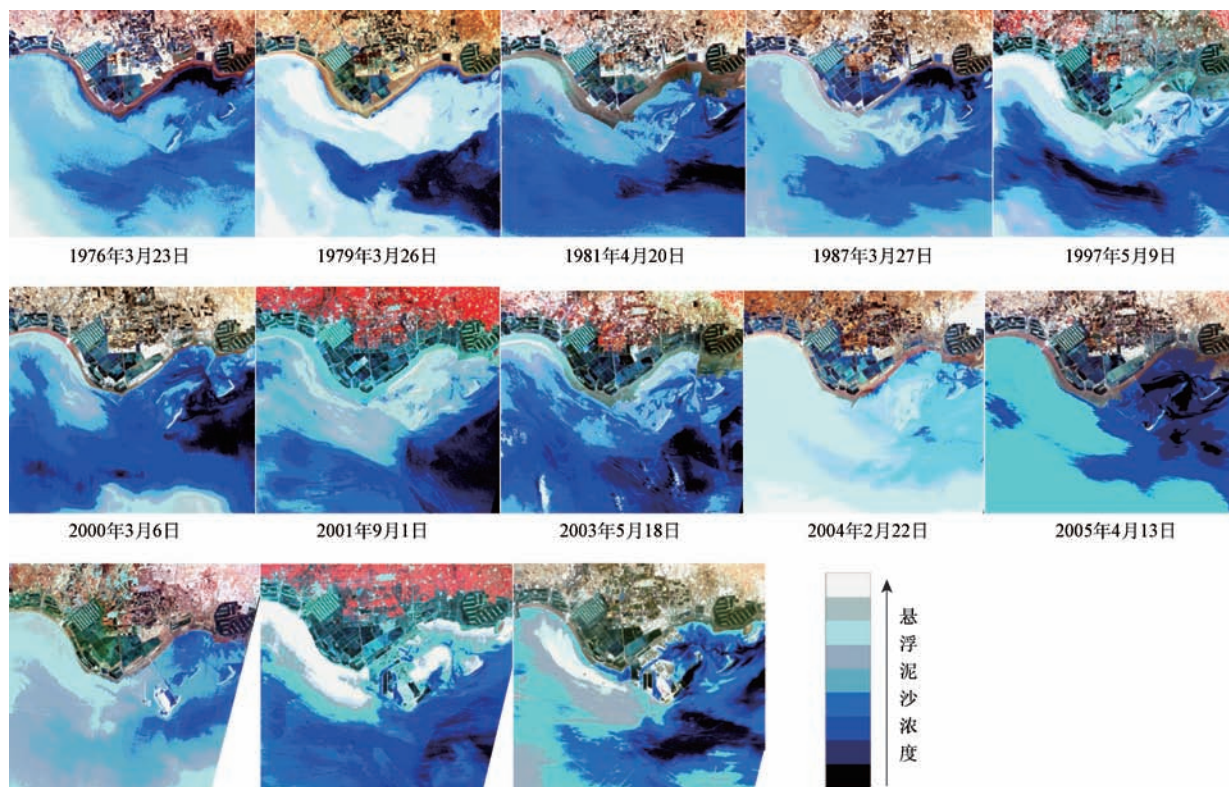


图 6 曹妃甸地区海水含沙量遥感信息提取图(1976—2009 年)

Fig. 6 Remote sensing information extraction of the sediment concentration in seawater at the Cao Feidian area(1976 – 2009)

2008 年,奥勇等使用 TM 数据对泥沙浓度值和遥感反射率进行相关性分析,选取相关性较高的波段作为敏感因子建立悬浮泥沙遥感反演模型,计算结果显示 TM3 与泥沙浓度的二次多项式模型、TM3/TM1 与泥沙浓度的二次多项式模型以及主成分前三分量线性方程模型的泥沙反演模型均可作为研究区的悬浮泥沙反演模型^[11]。在此基础上,2009 年孔金玲等人使用 TM 和 ALOS 数据,选取相

关性大于 0.8 的波段作为敏感因子,建立统计回归方程,验证对比发现,两种数据的反演结果均显示出近岸浓度高于内海、西部浓度高于东部的相同趋势,但 TM 数据的反演精度优于 ALOS 数据,选择相关性最高($R^2 = 0.947$)的 TM3/TM2 波段二次多项式 $y = 320.549x^2 - 321.741x + 87.786$ (y 为浓度, x 为 TM3 与 TM2 波段比值)作为反演模型^[12],2009 年反演结果见图 7。

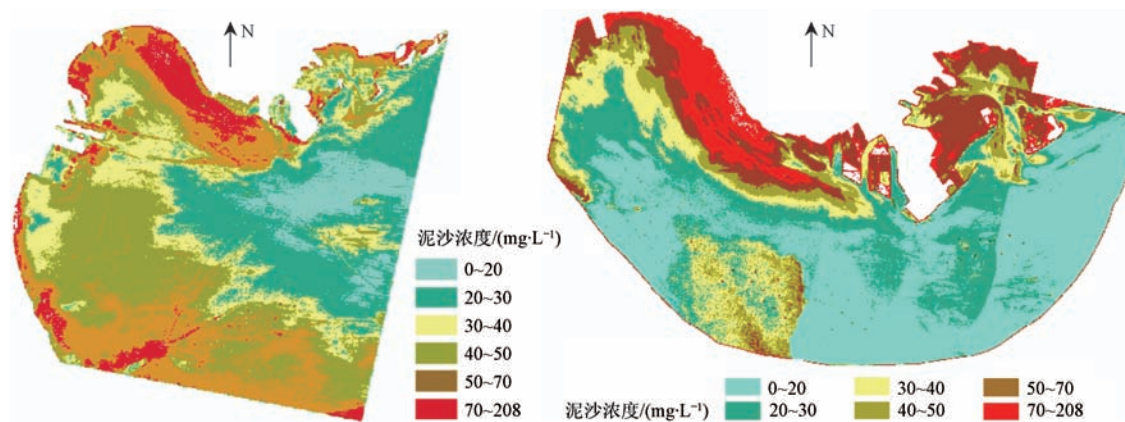


图 7 TM 和 ALOS band3/band2 二次多项式模型反演结果(左 TM,右 ALOS)^[12]

Fig. 7 Inversion results of TM and ALOS band3/band2 quadratic polynomial model (left TM, right ALOS)

3.5 地面沉降动态监测研究

利用 InSAR 技术开展地面沉降动态监测,可弥补分层标和水准测量监测范围小的局限,采用 PSI 方法测量技术能够降低时间、空间去相干影响以及减弱大气延迟引起的误差组分^[13],可以获取年度形变率精度达到毫米级的动态监测数据^[14]。

通过野外调查发现,区内地表相干目标数量较少,且由于施工建设、吹沙造地等人为活动的干扰,在曹妃甸地区不适宜开展常规的 InSAR 技术。为实现对唐海县和曹妃甸工业区两个重点区的监测,研究选用 TerraSAR-X 雷达数据,编程获取 2009 年 9 月—2010 年 7 月的雷达数据 12 景,每景图像获取时间间隔大于 30 d。利用多时相雷达数据结合 PSI 处理进行连续监

测,获取研究区地面变形动态过程。区域上,研究使用 2008 年 3 月—2010 年 10 月之间接收的 13 景 ENVISAT 雷达数据获取地面沉降速率,并检验高分辨率数据在处理局部地区产生的残余干涉相位,实现局部地区的精细干涉测量处理,准确提取地表形变相位。

监测结果显示:宁河—唐海地下水漏斗区地面沉降仍处于较快发展阶段,曹妃甸工业区受人为地表扰动、工程建设等影响,地面沉降呈现离散非均匀变化特征(图 8)。对比显示,两种数据获取的沉降速率特征基本一致,但 TerraSAR-X 数据获取的最大沉降量略大于 ENVISAT 雷达数据,TerraSAR-X 数据对地面沉降中心最大值更为准确,对地面沉降的细节分析更细致^[15]。

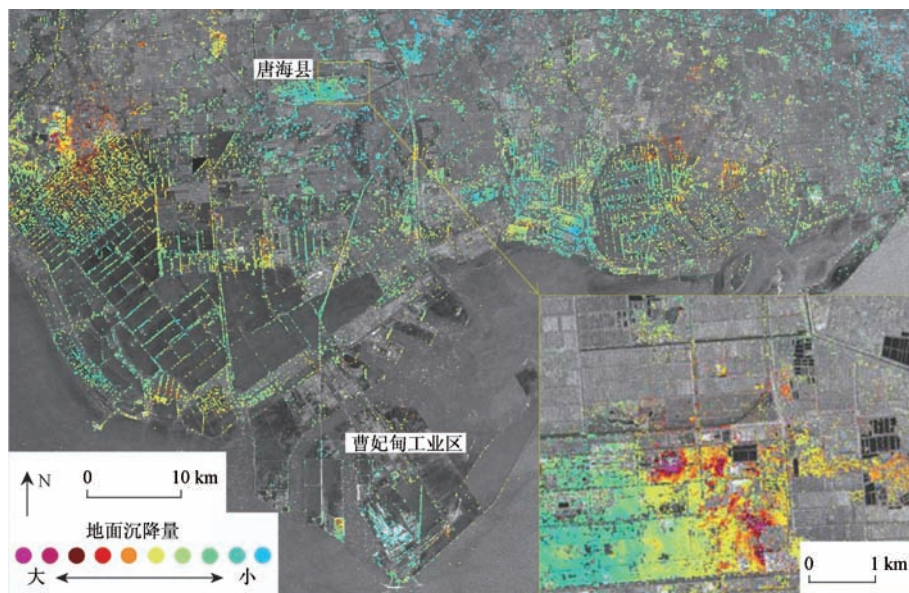


图 8 2009—2010 年曹妃甸地区地面沉降速率遥感解译图(大图数据 ENVISAT,小图 TerraSAR-X 数据)

Fig. 8 Remote sensing interpretation of the subsidence rate in the Caofeidian area from 2009 to 2010 (big: ENVISAT data, small: TerraSAR-X data)

3.6 潮间带特征及变化研究

使用 TM 和中国环境减灾卫星数据,采用主成分分析、分段线性拉伸等方法对涧河口—大清河盐场岸段的潮间带变化和潮间带物质组分进行分析。

3.6.1 潮间带宽度确定

涧河口—大清河盐场岸段属淤泥质岸段,实时测量潮间带宽度的野外作业十分困难,采用遥感技术可以获得较好的结果。调查结合布设的六条潮间带 RTK 测量剖面,使用 2008 年和 2011 年两个大潮低潮位时的 TM 遥感数据,根据潮汐表计算出潮位站年平均大潮、低潮的潮高以及遥感数据接收时间的瞬时潮位潮高,量算出图像上瞬时潮间带宽度;利用剖面测量

数据计算出潮间带坡度并统计出年平均低潮位,计算图像解译出的潮间带宽度修正值,得出各剖面潮间带的计算宽度;再在各点间插值计算,连线得出年平均大潮低潮线,试算出 2008 年和 2011 年涧河口—大清河盐场的潮间带宽度。其中,2008 年计算结果见表 6。

3.6.2 潮间带宽度变化研究

使用准相同潮位比较法,即选择准相同潮位的遥感数据。通过计算卫星接收数据时间的潮高以及查询潮汐表和潮汐实测数据,选择潮期(大潮期)、潮情(落潮)都相同、且潮高非常接近的 1981 年与 2008 年以及 2003 年与 2007 年两个时间组段,进行潮间带的变化对比分析。研究中使用 TM 数据的近红外和热红外波

表 6 2008 年涧河—大清河盐场潮间带宽度计算结果					
Table 6 Result of tidal flat width from Jianhe to Daqinghe Saltern in 2008					
位置	平均坡度/‰	图像潮位/cm	图像量算宽度/m	年平均大潮低潮位/cm	计算宽度/m
北堡 1	1.27		2235	39	2564
北堡 03	1.27	80.78	2943	(南堡站)	3272
南堡 02	0.51		2692		3511
生态城 01	0.48		5551	38.8	6555
生态城 02	0.23	87	1588	(京唐港站)	3683
大清河盐场	0.66		1767		2497

段提取瞬时水边线信息,作为潮间带下限,分析对比两组数据获取的潮间带变化情况。2003—2007 年潮间带变化解译结果见图 9。

3.6.3 潮间带物质成分研究

研究中还尝试利用反射光谱特征判读物质成分的方法进行潮间带物质成分的研究。使用中国环境减灾卫星数据(2011 年 6 月 5 日)的近红外波段进行数据处理,在信息提取中,由于水的吸收谱带严重干扰和影响了信息提取的准确度,故对水体因素进行人工干预去除伪信息,获取潮间带物质成分特征。

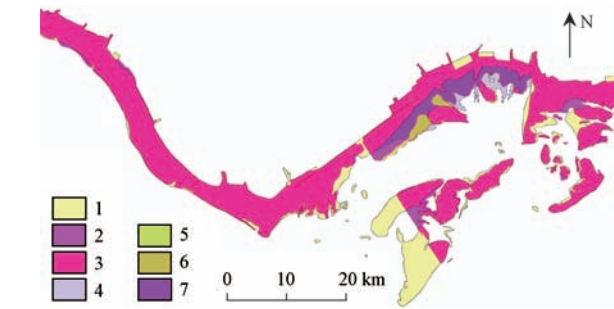


图 9 2003—2007 年潮间带宽度变化遥感解译图
Fig. 9 Remote sensing interpretation of tidal flat change from 2003 to 2007
1—2003 年潮滩;2—2007 年潮滩;3—2003 年与 2007 年重合潮滩;
4—2003 年浅滩;5—2007 年浅滩;6—2003 年与 2007 年重合浅滩;
7—2007 年潮滩与 2003 年浅滩重合部分。

提取结果显示:涧河口至北堡岸段潮间带物质成分以泥质为主;自一号岛向东粒度渐粗,物质成分为含泥粉砂—粉砂;至南堡段颗粒更粗;曹妃甸工业区东侧近岸潮间带呈现粉砂—粉细砂的变化,向海浅滩物质成分为粉砂—粉细砂;沙坨的物质成分为粉细砂—细砂,研究结果与潮间带人工浅钻揭露的结果吻合度较高(图 10)。

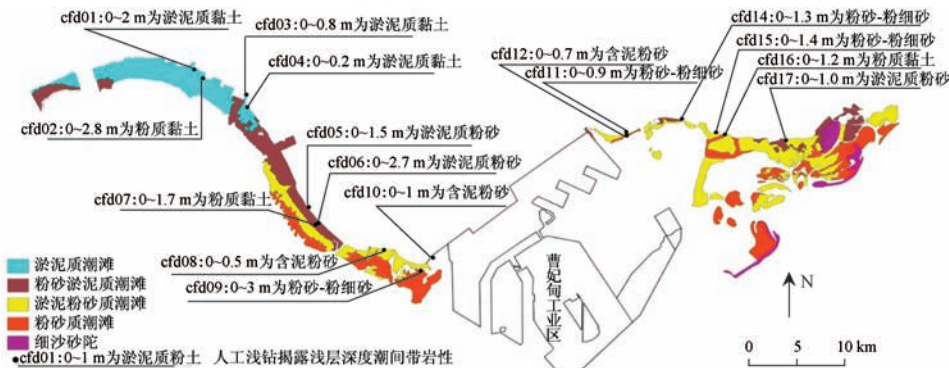


图 10 潮间带物质成分遥感信息提取与人工浅钻揭露结果对比图
Fig. 10 Comparative of tidal flat material composition between remote sensing information extraction and shallow holes section

4 结论及建议

- (1) Landsat 卫星数据在研究区域性地表环境变化、海岸线变化、海水悬浮泥沙和潮间带特征等方面应用中可获得较好效果,可充分利用 Landsat 卫星数据的历史延续性和光谱特性等特点,在海岸带地质环境调查中发挥作用。
- (2) 采用中、高分辨率 InSAR 技术相结合的方法,研究区域性以及正在实施的重大工程建设区的地面形变特征与动态变化,可以满足不同精度的应用需求,建议在地面沉降监测研究中积极推广。
- (3) 采用遥感技术结合潮汐、高程、地质取样等数

- 据研究潮间带特征及其变化,可以取得较好的效果,特别是在探索观测潮间带动态变化方面是一种很有潜力的方法。但潮间带特征及动态研究是一个相对复杂的工作,对潮位、高程、物质成分光谱特征、图像采集时间等要求很高,在今后工作中还应加强的研究。
- (4) 采用 ALOS 数据同 Landsat 数据的解译结果校正比对,可提高岸线位置、边界和几何形状等特征的解译精度,解译结果可基本达到 1:50 000 调查精度要求。在具体应用中,应注意通过光谱特征数据和几何特征数据的相互校正的方法提高解译精度。
- (5) 中巴卫星、北京一号小卫星和中国环境卫星等数据的辅助作用明显,在应用中可根据研究内容和

已有图像特征,选择其作为补充信息源,填补数据的缺失,提高监测与研究工作的完整性。

参考文献:

- [1] GB/T 14158—1993 区域水文地质工程地质环境地质综合勘查规范(1:50 000) [S]. [GB/T 14158—1993 Synthetical survey code for regional hydrogeology, engineering geology and environmental geology (1:50 000) [S]. (in Chinese)]
- [2] 陈勇. 海岸带滩涂资源遥感应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 296—304. [CHEN Y. Advance of remote sensing application to tidal flat resource monitoring in coastal zone [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 296—304. (in Chinese)]
- [3] 李娜, 闫冬梅, 张丽. 天津滨海新区—曹妃甸典型地区土地利用演变分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 289—295. [LI N, YAN D M, ZHANG L. Analysis of the evolution of land use in Tianjin Binhai New Area and Caofeidian region [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 289—295. (in Chinese)]
- [4] 陶明刚. Landsat-TM 遥感影像岸线变迁解译研究——以九龙江河口地区为例[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 107—110. [TAO M G. Interpretation of coastline changes based on Landsat TM remote sensing images: an example of the mouth area of Jiulongjiang River. [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(1): 107—110. (in Chinese)]
- [5] 范景辉, 李梅, 郭小方. 基于 PSINSAR 方法和 ASAR 数据监测天津地面沉降的实验研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 74(4): 23—27. [FAN J H, LI M, GUO X F, et al. A Preliminary study of the subsidence in Tianjin area using ASAR images based on PSInSAR technique [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 74(4): 23—27. (in Chinese)]
- [6] 余连生, 李智勇, 文贡坚, 等. 遥感图像融合技术在潮间带地形提取中的应用[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 551—554. [YU L S, LI Z Y, WEN G J, et al. Application of intertidal zone extraction based on remote sensing image fusion technique [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(5): 551—554. (in Chinese)]
- [7] 李长江, 等. 浙江省国土资源遥感调查与综合研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004. [LI C J, et al. Land and resources remote sensing investigation and comprehensive research of Zhejiang province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese)]
- [8] 毛志华, 陈建裕, 林明森, 等. 东沙群岛卫星遥感[M]. 北京: 海洋出版社, 2007. [MAO Z H, CHEN J Y, LIN M S, et al. Satellite remote sensing of Dongsha Islands [M]. Beijing: Ocean Press, 2007. (in Chinese)]
- [9] 范素英, 徐雯佳, 李纪娜. 河北曹妃甸主要地表地质环境变化遥感分析[J]. 国土资源遥感, 2010, 86(增刊): 159—162. [FAN S Y, XU W J, LI J N. A remote sensing analysis of the variation of main surface geological environmental elements in Caofeidian [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 86(Sup): 159—162. (in Chinese)]
- [10] 方成, 王小丹, 杨金霞, 等. 唐山市海岸线变化特征及环境影响效应分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(4): 419—427. [FANG C, WANG X D, YANG J X, et al. Analysis of shoreline changes and environmental impact effects in Tangshan city [J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(4): 419—427. (in Chinese)]
- [11] 奥勇, 王晓峰, 孔金玲. 曹妃甸近海表层悬浮泥沙遥感定量监测研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(1): 77—80. [AO Y, WANG X F, KONG J L. Study on remote sensing quantitative model of suspended sediments in the coastal waters of Caofeidian [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(1): 77—80. (in Chinese)]
- [12] 长安大学. 曹妃甸近岸海域悬浮泥沙定量遥感监测专题报告(2010年) [R]. 2011. [Chang'an University. Study on remote sensing quantitative model of suspended sediments in the coastal waters of Caofeidian (2010) [R]. 2011. (in Chinese)]
- [13] 杜钊锋, 宫辉力, 王洒, 等. 短时空基线 PS-InSAR 在北京地面沉降监测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 116—120. [DU Z F, GONG H L, WANG S, et al. Application of small spatio-temporal baseline PS-InSAR to the study of land subsidence in Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 116—120. (in Chinese)]
- [14] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202—2212.
- [15] 中国国土资源航空物探遥感中心. 曹妃甸工业区地面沉降高分辨率雷达数据 InSAR 监测试验研究报告 [R]. 2011 [China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources. Study on Subsidence in Caofeidian Industrial Area using high resolution radar data based on InSAR technique [R]. 2011. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华