

星载红外与微波多源遥感数据提取长江口 淤泥质潮滩水边线信息*

韩震 金亚秋

复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 河口水体通常含沙量较高, 悬浮泥沙影响淤泥质潮滩水边线信息提取的精度。以长江口九段沙淤泥质潮滩为试验区, 提出用星载红外和微波多源两通道遥感数据进行水边线信息提取。试验分析表明, 以星载反射红外数据为主, 辅以热红外数据或微波数据组合, 进行淤泥质潮滩水边线信息提取是十分有效的方法。最后, 根据提取的长江口九段沙水边线信息, 采用水边线高程遥感反演技术, 对九段沙面积动态变迁进行了定量评估。

关键词 星载红外与微波遥感 淤泥质潮滩 水边线 九段沙

淤泥质潮滩是在周期性潮汐作用下经常被海水所浸淹的沿海湿地, 是一种动态不稳定的水土资源。水边线是淤泥质潮滩重要特征参数之一, 它是潮汐波动下起伏不平的海面和陆地的瞬时交接线。淤泥质潮滩作为海陆相互作用的敏感地带, 每天潮涨潮落, 干湿交替, 水边线的变化给常规专业调查和观测工作带来很大的困难。开展水边线遥感研究, 有助于实现宏观、动态、同步监测淤泥质潮滩的生态环境和资源开发利用, 弥补常规观测方法的不足。

任明达等^[1]曾分别用航空像片和陆地卫星(Landsat)多光谱扫描仪(MSS)数据研究塘沽港淤泥质潮滩的水边线。Kevin等^[2]用Landsat TM数据监测尼罗河三角洲水边线的变化。Ryu等^[3]近年来也采用Landsat TM数据研究韩国Gomso湾潮间带的水边线提取。这些工作采用的均是可见光与反射红外数据。尽管通常反映水陆边界最明显的波段为反射红外波段^[4], 但是这类数据同时也对悬浮泥沙的响应十分敏感^[5]。在大河口地区, 水体中的悬浮

泥沙含量通常较高, 它是影响水边线位置变化的重要因素之一, 在一定程度上降低了水边线提取的实际效果。对于中国的长江口、黄河口、珠江口这些高含沙量的河口, 如何抑制高含量悬浮泥沙信息对水边线信息的影响, 对提高河口水边线提取精度是十分重要的。

克服河口水体中高含量悬浮泥沙对水边线信息提取的影响, 多源遥感数据的比较与选择是一条有效的途径^[6]。本文选择悬浮泥沙含量较高的长江口九段沙淤泥质潮滩为研究区。九段沙位于长江口南导堤的南面, 南槽的北部, 20世纪50年代初期开始初露, 并逐渐扩大和增高, 成为长江口继崇明、长兴、横沙之后的第四个岛屿, 其地理位置见图1。综合采用Landsat被动反射红外数据、热红外数据和欧洲遥感卫星合成孔径雷达(ERS-2 SAR)主动微波数据, 提取淤泥质潮滩的水边线信息, 分析淤泥质潮滩的动态变迁。采用Laplace-Gauss^[7], Roberts^[8]和Sobel^[9]三种算法对这些遥感数据分别进行了水边线信息的提取, 对其效果进行了比较。并

2004-12-07 收稿, 2005-02-24 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2001CB309401)、国家自然科学基金(批准号: 60171009)、上海光科技专项(批准号: 36105012)、国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室开放研究基金(批准号: 200402)和中国博士后科学基金(批准号: 2004036096)资助项目

E-mail: han-zhen@mail.china.com; yqjin@fudan.ac.cn

运用多时相的红外和微波遥感数据对九段沙近 15 年来的面积动态变迁进行了分析。

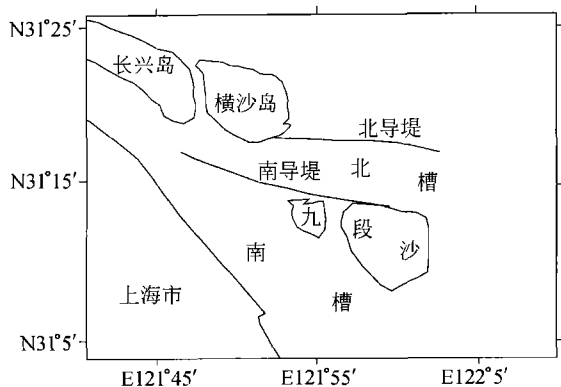


图 1 长江口九段沙地理位置图(2000 年)

1 图像边缘检测算法

图像中的边界线往往表明一个特征区域的终结和另一个特征区域的开始,边缘检测是利用物体和背景在某种图像特征上的差异来实现的. Laplace-Gauss 算法是一种二阶边缘检测方法,它通过寻找图像灰度值中二阶微分中的过零点来检测边缘点^[7]. 由于遥感图像存在噪声,需进行去噪处理. 光学遥感图像的噪声为加性 Gauss 噪声, SAR 遥感图像的相干斑的统计分布近似服从 Gamma 分布^[10],因此 Laplace-Gauss 算法只对光学遥感图像水边线信息提取有效. Roberts 边缘算法是利用局部差分算子寻找边缘^[8],它是一个 2 行×2 列算子,对于边缘线灰度突变的低噪声遥感图像处理效果较好^[11]. Sobel 边缘算子为图 2 所示的 3 个卷积核,图像中的每个像元都用这两个核做卷积,两个卷积的最大值作为该点的输出值,这样可使它们对边缘的走向更敏感^[9], Sobel 边缘算子为 3 行×3 列算子,对灰度渐变和噪声较多的遥感图像处理效果较好^[11].

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

图 2 Sobel 边缘算子

2 红外数据提取水边线信息

图 3(a)和(b)是我们在长江口崇明岛东滩实测的淤泥和水体的反射光谱曲线. 可以发现淤泥的反射波谱曲线的总趋势是上升的,反射率在 0.1—0.7 之间,而水体各个波段的反射率都比较低,尤其在近红外部分,在 1000 nm 以后下降至 0.01—0.02. 在近红外波段范围内,淤泥的反射率要高于水体的反射率,两者有明显的区别. 在热红外波段范围内,水体和淤泥的热特性差异也较大. 一般淤泥在白天受太阳辐射影响,温度较高,呈暖色调. 而水体由于热容量大,升温慢,比周围淤泥温度低,呈冷色调. 这就为利用热红外数据提取淤泥质潮滩的水边线提供了可能.

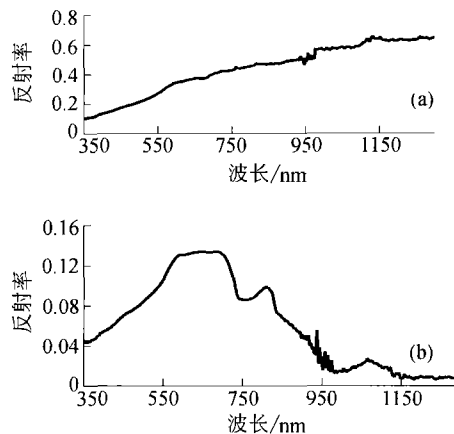


图 3 淤泥和水体反射光谱图
(a) 淤泥; (b) 水体

图 4(a)—(c)为九段沙反射红外数据(1997 年 4 月 11 日中潮期, Landsat TM 4 波段, 0.76—0.90 μm)分别使用三种算法处理后得到的水边线信息. 经对比可以发现三种算法都可以进行水边线信息提取,但是 Laplace-Gauss 算法得到的水边线不如 Roberts 算法和 Sobel 算法得到的水边线轮廓清晰,这是因为 Laplace-Gauss 算法是靠高梯度值边缘确定水边线的. 而此时的九段沙正处于长江口最大浑浊带,该处水体为高含沙量水体,水体和淤泥之间的梯度值降低了. 由于水边线周围水体的含沙量有差别,相对水体含沙量低的部位水边线较清晰,相对水体含沙量高的部位水边线较模糊,这说明高含量

悬浮泥沙水体对水边线信息提取有相当的影响, Sobel 算法和 Roberts 算法是通过边缘点勾画出水边线的轮廓, 所以水边线轮廓清晰. 其中 Sobel 算法比 Roberts 算法得到的水边线更清晰, 这是因为水边

线的灰度变化是渐变的, 尤其是图像右下方的水边线. 另外, 三种算法得到的结果除了水边线信息较丰富外, 流态信息也表现比较明显, 这在一定程度上影响了水边线信息的提取.

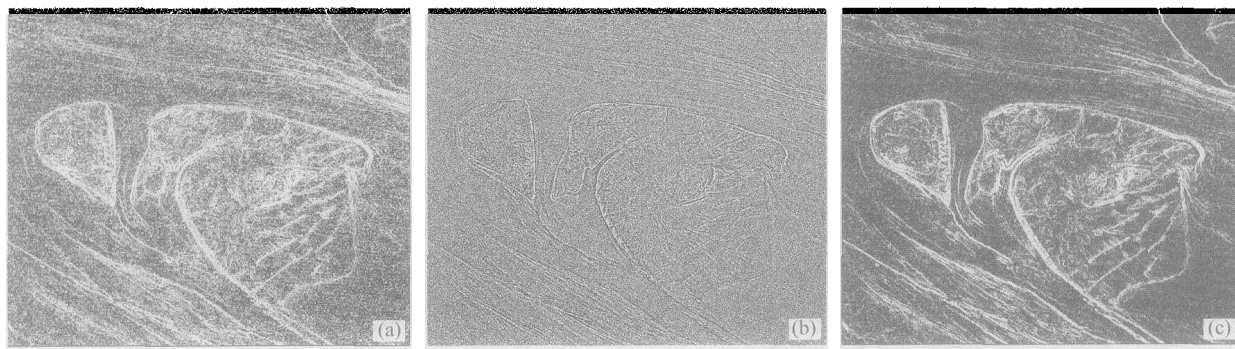


图4 反射红外数据用三种算法提取的水边线信息

(a) Laplace-Gauss 算法结果; (b) Roberts 算法结果; (c) Sobel 算法结果

由于热扩散作用的影响, 热红外波段所反映的信息往往偏大, 边界不十分清晰, 因此单独利用热红外波段提取水边线信息效果不理想. 图5为九段沙反射红外数据和热红外数据合成后(1997年4月

11日 Landsat TM 4 波段($0.76\text{--}0.90\ \mu\text{m}$)、5 波段($1.55\text{--}1.75\ \mu\text{m}$)、6 波段($10.4\text{--}12.5\ \mu\text{m}$)), 使用三种算法处理后得到的图像.

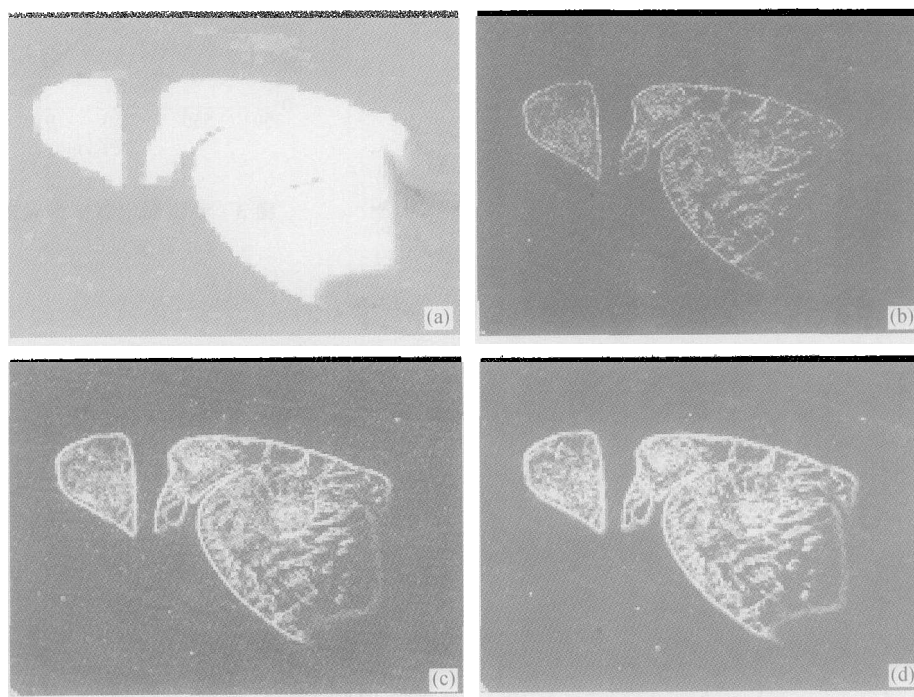


图5 反射红外和热红外数据合成后三种算法提取的水边线信息

(a) 原始热红外图像; (b) Laplace-Gauss 算法; (c) Roberts 算法; (d) Sobel 算法

经对比发现,用同样算法图5比图4的水边线轮廓更清晰,而且压抑了流态信息.这是因为长江口悬浮泥沙的第二个峰值在0.78—0.83 μm^[5],所以对于高含沙量长江口水体,泥沙流态信息在反射红外波段上反映非常明显,而热红外波段是记录地物辐射温度的波段,它对水体响应比较敏感,对泥沙响应不是很敏感.当热红外波段和反射红外波段合成后,降低了水体中悬浮泥沙对水边线信息提取的影响,所以反射红外波段和热红外波段合成图像较单独反射红外波段图像的水边线更清晰.而长江口悬浮泥沙的第一个峰值在0.55—0.70 μm^[5],当可见光波段和反射红外波段合成后,就不会像热红外波段一样降低水体中悬浮泥沙对水边线信息提取的影响,这表明单独使用可见光波段或可见光波段和反射红外波段合成提取水边线的效果也不会理想.

3 微波数据提取水边线信息

淤泥质潮滩上的淤泥和水体在表面粗糙度、复介电常数等都呈现较大的差异与变化,利用高分辨率ERS-2 SAR的后向散射数据图像进行水边线信息的提取是可行的.

由于SAR的成像机理不同于光学传感器,固有的相干斑现象使SAR图像呈现强噪声.SAR图像的相干斑的统计分布近似服从Gamma分布,不同于光学图像的加性Gauss噪声.针对SAR图像的边缘检测,Touzi等^[12]提出了基于统计的边界检测方法,Oliver等^[13]提出了最优边界检测算法.经试验发现,这些方法对微波数据提取直线信息效果较好^[10,12,13],但是利用这些方法提取形状比较复杂的水边线效果较差,不如利用红外数据提取水边线信息的效果.但是,由于微波遥感具有全天候、全天时和穿透云雾等特点,尤其是全天候、全天时的特点可弥补光学遥感时间频率的不足,因此利用微波数据进行水边线信息提取具有重要的实用价值.而且,SAR数据同热红外数据一样,可降低水体中悬浮泥沙对水边线信息提取的影响.

本文首先对2001年7月19日(中潮)ERS-2 SAR数据(5.3GHz,垂直同极化后向散射系数)进行了预处理(使用双通道滤波器组进行ERS-2 SAR图像的小波变换,然后采用双正交小波函数族对ERS-2图像进行了去噪处理^[11]),然后进行纹理分

析.SAR图像的纹理特征与SAR雷达波长、分辨率和入射角有关,也会随着地面目标物的组成成分及其背景环境特征状态而变化.本文所指的纹理是指SAR图像的中等纹理,它是细微纹理的包络,由同类型目标(水体或淤泥)的若干分辨单元空间排列的不均匀性和不同类型目标(水体和淤泥)的细微纹理占有多个分辨单元而形成的^[15].通过纹理分析,得到数值域、均值、方差、熵和偏斜度5个分量图像,最后选用了显示水边线信息最明显的均值分量图像(图6),均值分量的计算公式为:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} f(i,j)}{MN}$$

式中 $f(i, j)$ 为图像 i 行、 j 列处的灰度值, M , N 分别为图像的行列数.

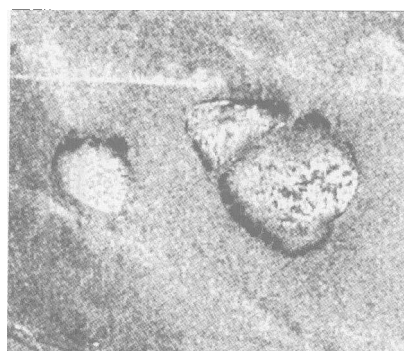


图6 2001年7月19日ERS-2 SAR均值分量图像

将2001年7月3日(中潮)Landsat ETM 5波段(反射红外数据)、4波段(反射红外数据)、ERS-2 SAR均值分量图像通过RGB彩色合成后,进行HIS变换(H 为色度、 I 为强度、 S 为饱和度,本文采用的是三角形彩色坐标变换).HIS变换能有效地将RGB系统中影像强度 I 与其光谱信息 H 、 S 相分离,通过HIS空间变换,可得到 H 、 I 、 S 三个分量图像.先将 H 、 S 两个分量图像的灰度值范围进行拉伸,将ERS-2 SAR均值分量图像与 I 分量图像进行直方图匹配,然后去掉 I 分量图像,用灰度拉伸后的ERS-2 SAR均值分量图像和 H 、 S 分量图像进行HIS逆变换^[16],变换至RGB系统,最后利用Roberts算子和Sobel算子对变换后的图像进行水边线信息提取(图7(a)-(f)).

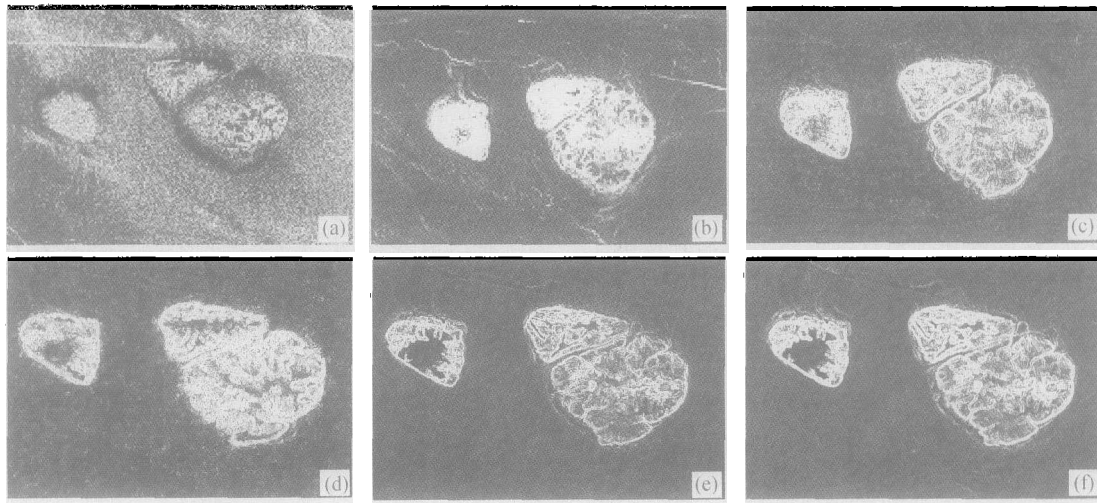


图7 微波与红外数据合成后用 Sobel 算法和 Roberts 算法得到的水边线信息

(a) 原始 SAR 图像; (b) 反射红外波段 Sobel 算法; (c) 反射红外和热红外波段合成后 Sobel 算法; (d) 反射红外、热红外和微波融合后 Sobel 算法; (e) 反射红外和微波融合后 Roberts 算法; (f) 反射红外和微波融合后 Sobel 算法

从图 7(a) 可以发现, SAR 图像的水边线十分不清楚. 图 7(c) 经 Sobel 算法, 反射红外波段和热红外波段合成后得到的水边线图像要比图 7(b) 单独用反射红外波段得到的水边线清晰. 微波和反射红外数据融合后得到的图 7(f) 图像可以清晰地显示水边线信息, 其中图 7(f) Sobel 算法得到的水边线的轮廓较图 7(e) Roberts 算法得到的更清晰些, 这是因为微波和反射红外数据融合后得到的图像具有噪声较多、边缘线灰度渐变的特点, 而 Sobel 算法相对于 Roberts 算法, 对灰度渐变和噪声较多的遥感图像处理效果更好. 从图 7(d) 可以发现, 反射红外波段、热红外波段和 SAR 三者数据组合后, 水边线轮廓有些模糊, 反映水边线的效果反而不好. 这是因为 SAR 数据和热红外数据虽然可以降低水体中悬浮泥沙对水边线信息提取的影响, 但由于它们在融合图像中占权重太大, 降低了反映水边线最敏感的反射红外波段的作用, 突出了热红外波段的扩散作用和 SAR 噪声多的特点, 因此效果也是不理想的.

由于平均梯度反映图像中微小细节的反差和纹理变化特征, 适合于表达两侧附近灰度有明显差异的水边线. 平均梯度越大, 水边线提取精度越高, 其计算公式如下:

$$\nabla \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\Delta_x f(i, j)^2 + \Delta_y f(i, j)^2]^{\frac{1}{2}},$$

式中 $\nabla \bar{G}$ 为平均梯度, $\Delta_x f(i, j)$, $\Delta_y f(i, j)$ 分别为像元 (i, j) 在 x , y 方向上的一阶差分. M , N 分别为图像的行列数.

由图 4, 5 和 7 的数据进行的计算结果如表 1. 可以看出, 长江口淤泥质潮滩的反射红外数据和热红外或微波数据融合得到的水边线信息效果较单独反射红外数据得到的水边线信息效果好. 在三种算法中, Sobel 算法更适合长江口淤泥质潮滩水边线信息的提取.

表 1 水边线信息提取精度评价

	Laplace-Gauss 算法	Roberts 算法	Sobel 算法
反射红外数据的平均梯度值	6.695	11.401	12.314
反射红外和热红外数据融合后平均梯度值	7.732	15.447	16.295
反射红外和微波数据融合后平均梯度值		14.735	16.825

4 九段沙面积动态变迁

九段沙为上海市面积最大的河口心滩湿地保护

区, 该沙由上沙、中沙、下沙三个沙洲组成, 东西长约 50 km, 南北最宽处约 15 km. 九段沙目前基本保持原始自然状态, 由于中沙和下沙已连接在一起, 故本次研究将中沙和下沙合称为下沙. 在九段沙动态变迁中, 我们采用了水边线高程遥感反演技术^[17], 即先对不同潮位站的实测水位高度进行潮位分带校正, 确定卫星成像时刻的水位高度, 同时对多时相的遥感影像(本文用红外数据和微波数据)进行空间配准. 利用本文方法勾绘出水边线, 以反射红外数据为主, 辅以热红外数据或微波数据.

通过大通站水文资料, 在年输沙量小的年份和枯季, 由于泥沙含量低, 在数据融合中热红外数据或微波数据所占权重应小些. 在年输沙量大的年份和洪季, 由于泥沙含量高, 在数据融合中热红外数据或微波数据所占权重应大些. 此外, 由于在长江口遥感图像多具有灰度渐变和噪声较多的特点, 因此主要采用了 Sobel 算法. 然后选择相近潮高和不同时相的遥感影像, 测量水边线的平移距离, 进行九段沙面积动态变迁分析. 表 2 给出九段沙不同年份面积变化表.

由表 2 说明, 九段沙上沙低潮滩以上面积从 1987 至 1997 年减少 0.92 km², 1997 至 2000 年减少 0.44 km², 而 2000 至 2001 年增加 1.11 km²; 九段沙下沙低潮滩以上面积从 1987 至 1997 年增加 34.79 km², 1997 至 2000 年减少 21.24 km², 而 2000 至 2001 年增加 1.40 km²; 九段沙下沙高潮滩面积从 1990 至 2000 年增加 6.73 km².

表 2 九段沙不同年份面积变化表

位置	年限	水边线高程 (理论基面)/cm	面积变化 / km ²
九段沙上沙	(1987—1997)	109—103	-0.92
	(1987—2000)	109—111	-1.36
	(1987—2001)	109—110	-0.25
	(1997—2000)	103—111	-0.44
	(1997—2001)	103—110	0.67
	(2000—2001)	111—110	1.11
九段沙下沙	(1987—1997)	118—135	34.79
	(1987—2000)	118—126	13.55
	(1987—2001)	118—151	11.95
	(1990—2000)	313—320	6.73
	(1997—2000)	135—126	-21.24
	(2000—2001)	126—151	1.40

以上数据表明, 南导堤修建以前, 九段沙上沙受北槽和江亚北槽水流顶冲, 在向下迁移过程中, 面积逐渐缩小. 1998 年以来, 由于九段沙和江亚南沙北侧已建成(31 km)的南导堤和南、北槽分流口潜坝工程, 九段沙原自然冲淤变化及生态环境已受到河口整治建筑物的掩护, 为此其淤涨速度和演变趋势将有别于长江口深水航道整治工程前的自然状态, 加上深水航道二、三期工程实施期间大规模开挖过程中的疏浚泥土有可能吹填上滩, 这必然会加速九段沙的淤涨^[18,19].

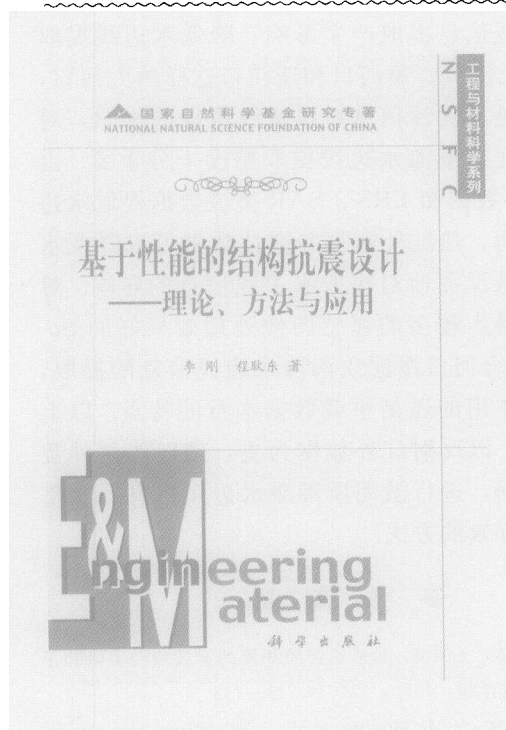
5 结论

反映长江口水边线最明显的波段在近红外波段, 但是长江口悬浮泥沙第二个反射峰也在此范围, 而且随着泥沙含量的增加, 其对悬浮泥沙反射光谱特性的影响越来越显著, 因此它必然会对淤泥质潮滩水边线信息提取产生影响, 降低水边线提取精度. 对于长江口、黄河口和珠江口这样的大河口, 抑制高含量悬浮泥沙信息对水边线信息的影响, 对提高河口淤泥质潮滩水边线提取精度十分重要. 由 Landsat 红外数据和 ERS-2 SAR 微波数据提取水边线的研究表明, 热红外数据和微波数据可以降低水体中高含量悬浮泥沙对提取水边线信息的影响. 对灰度渐变和噪声较多的遥感图像处理效果好的 Sobel 算法更适合河口淤泥质潮滩水边线信息的提取, 但是起决定作用的还是星载数据本身的特点. 以上的试验证明: 以反射红外数据为主, 辅以热红外数据或微波数据, 进行淤泥质潮滩水边线信息提取是十分可行和有效的方法.

参 考 文 献

- 1 任明达, 柳林, 王安龙. 粉砂淤泥质潮滩的多波段与多时相卫星片解译. 海洋学报, 1990, 12(6): 741—748
- 2 Kevin W, Hesham M. Monitoring changing position of coastlines using thematic mapper imagery, an example from the Nile Delta. Geomorphology, 1999, 29: 93—105
- 3 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. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(3): 442—456
- 4 陈述彭, 赵英时. 遥感地学分析. 北京: 测绘出版社, 1990. 35
- 5 韩震, 恽才兴, 蒋雪中. 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究. 水

- 利学报, 2003, 327(12): 118—122
- 6 金亚秋. 空间遥感及其对地观测信息获取与处理. 2004年高技术发展报告. 北京: 科学出版社, 2004, 110—116
- 7 Marr D, Hildreth E. Theory of Edge Detection. London; Proc R Soc London, Ser B, 1980, 207: 187—217
- 8 Roberts L G. Machine perception of three-dimensional solids. Tippett J T ed. Optical and Electro-Optical Information Processing. Cambridge, MA: MIT Press, 1965, 159—197
- 9 Davis L S. A Survey of edge detection techniques. CGIP, 1975, 4: 248—270
- 10 王程, 王润生. SAR图像直线提取. 电子学报, 2003, 31(6): 816—820
- 11 Castleman K R 著. 朱志刚, 等译. 数字图像处理. 北京: 电子工业出版社, 2002, 388—390
- 12 Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR image. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(6): 764—773
- 13 Oliver C J, Blacknell D, White R G. Optimum edge detection in SAR. IEE Proc Radar Sonar Navig, 1996, 143(1): 31—40
- 14 何炬, 严壮志, 刘书朋. 基于小波的数字乳腺图像上肿块的处理. 上海大学学报, 2000, 6(6): 538—540
- 15 郭华东. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2000, 215
- 16 Ledley R S, Buas M, Golab T J. Fundamentals of true-color image processing. Proc 10th Int Conf Pat Rec Los Alamitos CA: IEEE Comp Soc Press, 1990, 1, 791—795
- 17 韩震, 恽才兴, 伶汀洋大铲湾潮滩冲淤遥感反演研究. 海洋学报, 2003, 25(5): 58—64
- 18 杨世伦, 贺松林, 谢文辉. 长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系. 海洋工程, 1998, 16(4): 55—65
- 19 徐福敏, 严以新, 茅丽华. 长江口九段沙下段冲淤演变水动力机制分析. 水科学进展, 2002, 13(2): 166—171



国家自然科学基金研究专著

《基于性能的结构抗震设计——理论、方法与应用》

李刚 程耿东 著

科学出版社 定价: 48.00 元

本书较系统地介绍了基于性能的抗震设计思想、理论和方法, 建立起了基于性能的结构抗震优化设计的框架, 着重介绍了作者多年来的相关研究成果, 主要包括基于投资-效应准则的优化设计模型的建立、基于性能的目标可靠度优化决策、结构分灾抗震设计及基础隔震结构一体化优化设计、结构可靠度分析及基于可靠度的优化设计算法研究、ANSYS 软件二次开发及其在实际工程中的应用等。

本书可供土木工程、工程力学等专业的科学研究人员、工程技术人员、研究生以及高等院校的教师和本科生参考。