

文章编号: 1007 4619(2007) 03 0373-07

江苏近海岸水深遥感研究

田庆久^{1,2}, 王晶晶¹, 杜心栋¹

(1 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093 2 中国科学院 中国遥感卫星地面站重点实验室, 北京 100086)

摘 要: 以江苏近海辐射沙脊群海域为典型研究区, 通过实测水深数据和水体光谱测量与分析, 发现对应 TM3 和 TM4 波段的水体光谱反射率对水深信息敏感, 线性相关系数分别达到 -0.561 和 -0.694 。结合多光谱遥感信息传输方程所推导出的水深信息对数反演模式, 针对本研究区 TM4 和 TM3 波段数据所建立的水深预测模式的复相关系数 R^2 为 0.4793 。对 $0-15\text{m}$ 水深, 预测水深和实测水深之间拟合较好。利用 TM5 波段反射率、出露沙洲反射率以及海水反射率的差异, 通过建立掩膜图像, 可较有效地对 TM 遥感图像进行水陆分离, 提取 TM 图像中海水部分, 进一步可通过常用的图像处理软件绘制每隔 5m 的 TM 水深遥感制图、等深线图。随着高空间、高光谱、高辐射分辨率遥感技术的发展, 对浅海水域的水深和海底地形进行遥感探测的技术方法和应用将会不断地深入开展。

关键词: 遥感; 水深; TM; 海岸带; 光谱

中图分类号: TP79 文献标识码: A

Study on Water Depth Extraction from Remote Sensing Imagery in Jiangsu Coastal Zone

TIAN Qing-jiu^{1,2}, WANG Jing-jing¹, DU Xin-dong¹

(1 International Institute for Earth System Science Nanjing University Jiangsu Nanjing 210093 China)

2 The Key Lab of China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences Beijing 100086 China)

Abstract This paper takes offshore sandbanks in Jiangsu Province as a typical study area. The reflectance of red and near infrared bands is sensitive to water depth based on the analysis of *situ* water depth and synchronously measuring water reflectance spectra. The linear correlation between depth and reflectance of Landsat TM 1 and TM 2 is -0.561 and -0.694 respectively. The water depth derived method based on the multispectral remote sensing transfer model shows that depth has linear relationship with the logarithm form of ratio of radiance (or reflectance) differences between deep water and two bands respectively, which are sensitive to water depth. TM 4 and TM 3 were found to be sensitive to water depth according to former analysis in this study and depth retrieval model was developed using reflectance of these two bands. The model ($R^2=0.4793$) was tested to have good accuracy for depth less than 15m , whereas the predicted accuracy is unaccepted. The reflectance of TM 5 combined with the spectra comparison between seawater and sand bank can be used to find the limit between seawater and other objects, which can be used to extract seawater in TM image. Then water depth was computed by depth retrieval model in the study area. Fathom lines with 5m intervals can be detected through image managing software. With the development of high spatial, spectral and radiant resolution remote sensing technique, the research on shallow water bathymetry remote sensing method and its application will be under continuing investigation.

Key words remote sensing; water depth; TM; coastal zone; spectra

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

作者简介: 田庆久 (1964-), 男, 博士, 教授, 博导。主要从事高光谱遥感与遥感信息量化研究。发表学术论文 110 余篇, 其中近 20 余

篇被 SCI/EI 收录。E-mail: tianqj@nju.edu.cn

1 引 言

Jerby^[1]在假设研究区海底底质反射一致及水体衰减系数相同的前提下,利用单波段模型进行水深反演。Poleyn和 Sattinger^[2]针对不同海底底质类型提出用波段比值方法消除不同海底底质反射和水体衰减系数的影响,进行水深反演。Paredes和 Spero^[3]采用多波段方法针对不同海底底质类型进行水深反演。一些学者通过不同的波段变换来试图突出光谱信号中的水深信息。Walker和 Kalic^[4]对 TM 图像波段进行正交变换后来反演水深, Khan等^[5]先对 TM 图像进行主成分分析,后用前几个分量进行水深反演。M. Ibrahim和 A. P. Cracknell^[6],利用 MSS-4(0.5—0.6 μm)采用指数回归模型提取 Penang 岛海域的水下地形信息,由于该区域水质较清,最大探测水深为 37m。VanHenge和 Spitzer^[7]利用 TM 1/2 β 波段多时相影像通过多元线性回归模型来提取 Vlieland de Riche 海峡的水下地形信息,并指出悬浮物质浓度对于遥感测深有重大的影响,通过多时相影像来提高所获取信息的可靠性。Lafon等^[8]利用多时相 SPOT 影像 XS1(500—590nm)和 XS2(610—680nm)采用指数回归模型对 A reachon 湖入海口进行水深探测,发现高空间分辨率的影像可以提高模拟精度。中国学者张鹰等^[9]对安徽武昌湖和长江口等水域利用 HRV, TM 和 AVHRR 进行水深遥感方法研究,并利用研究成果进行水下地形和冲淤变化的分析;党福星等^[10]对多波段水深遥感进行了研究,进行底质类型的识别与分区,并应用于中国南海岛礁水深的计算;黄家柱等^[11]利用 TM 遥感数据,建立了长江南通河段水深遥感模型;邱凯昌等^[12]利用 Landsat TM 1 和 TM 2 波段对南沙群岛海域采用多波段分段线性回归方法进行水深探测,由于水质较清,发现水深 20m 内可取得较满意的结果。吕黎光^[13]利用 QuickBird 高空间分辨率遥感影像对垦丁南湾海域进行水深探测,对水质较清海域,有效探测深度达到 30m,在水深不到 12m 的浅海域可以达到 90% 的精度。

研究区位于中国南黄海辐射沙脊群区域,该区位于南黄海江苏岸外,由沙脊和沙脊之间的潮流深槽组成,以琼港为中心向外海呈辐射状延伸,总面积达 28000km²^[14],部分沙洲在海面以下,其中暗沙面积占沙洲总面积的 86%,水下地形复杂且变化迅

速^[15]。水深一般在 30m 以浅,江苏沿海南部海域潮差大,在 2.4—4m 之间。该研究区是江苏建立对外国际港口的重点研究开发区,江苏岸外水下地形的变化研究对航运和资源开发利用都至关重要,并为江苏沿海港口建设、航道运输、滩涂资源开发利用、经济发展等提供依据。

2 多光谱遥感水深信息反演模式

多光谱遥感探测水深原理主要基于光线对水体的透射,水体对可见光的衰减系数越小,则其对水体的穿透性就越好,可见光衰减系数的值决定了多光谱遥感对水体探测中的可测深度。可见光在水中的传输主要局限在 0.4—0.7 μm 波长范围,就 0—10m 清洁海水层而言,可见光在 0.4—0.6 μm 波长范围可透射约 50% 的入射辐射,在 0.6—0.7 μm 波长范围,透射少于 10% 的辐射。无论对纯水、大洋水或是沿岸水体,可见光衰减系数极小值都出现在蓝-绿色波段之间,蓝绿色光对水层的穿透性最好,当水体变混浊时,衰减系数的极小值会向波长长的一侧移动,因此混浊度较大的沿岸水一般呈黄绿色,稍向外海,水呈蓝绿色,大洋水多呈蓝色和深蓝色。因而,对水中信息进行光学遥感的最有效波段在蓝色(0.45 μm)至黄色(0.60 μm)附近之间。一旦水体混浊度增加,水体后向散射分量很快就会大于来自水底的反射分量,当水体混浊度较为均一时,水体后向散射分量与水体深度具有良好的正相关性,依此也可以估算出水深。对于水质相差较大或水底面为砂、岩礁、淤泥以及海藻杂乱分布的浅海区,问题就要复杂得多。

传感器所接收的光辐射主要由三部分组成:水底的反射辐射,水-气界面的反射辐射及水体的后向散射能量。当大气、水面、悬移质和底部物质反射不随空间变化时,水体总辐射强度则随水深加大而减弱。除与水底反射的程度有关外,还与水体本身的衰减系数有关,由此遥感探测水深方程可描述如下^[13,16]:

$$L_z(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} [\rho(\lambda) e^{-(\sec\theta + \sec\theta') \alpha(\lambda)z} + \rho_{a/w}(\lambda)] L_\lambda d\lambda + L_{sc}(\lambda) + L_0(\lambda) \quad (1)$$

式中, $L_z(\lambda)$ 是 Z 水深时由卫星传感器接收的 λ 光谱波段的辐亮度, L_λ 是入射到水体表面的太阳光谱辐亮度, $\rho_{a/w}(\lambda)$ 是水-气界面反射率, ρ 是水底反射率, $L_{sc}(\lambda)$ 是水体的后向散射辐亮度, $L_0(\lambda)$ 为大气

程辐射, $\alpha(\lambda)$ 是水体的衰减系数, θ 是遥感器天顶角, φ 是太阳天顶角, $d\lambda$ 是光谱带宽。

当太阳高度、天气状况和水体衰减系数以及水中和大气中的散射光条件相同时, 对深水域而言, $Z \rightarrow \infty$ 时, 方程 (1) 中的幂指数项应为零, 即海底反射辐射亮度近似为零, 方程 (1) 可写为:

$$L_{\infty}(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} \rho(\lambda) L_{\lambda} d\lambda + L_{sc}(\lambda) + L_0(\lambda) \quad (2)$$

式中, 水体后向散射 $L_{sc}(\lambda)$ 随深度变化也很小, $L_0(\lambda)$ 几乎不变, 由 (1) 式减去 (2) 式, 可得下式:

$$\begin{aligned} \Delta L_Z(\lambda) &= L_Z(\lambda) - L_{\infty}(\lambda) \\ &= \int_{\Delta\lambda} \rho(\lambda) e^{-(\sec\theta + \sec\varphi)\alpha(\lambda)Z} L_{\lambda} d\lambda \quad (3) \end{aligned}$$

对于窄光谱波段 i 而言, 由式 (3) 可得:

$$\Delta L_Z(\lambda_i) = L_{\lambda_i} \Delta\lambda_i \rho(\lambda_i) e^{-(\sec\theta + \sec\varphi)\alpha(\lambda_i)Z} \quad (4)$$

对两个窄光谱波段 i 和 j 结合 (4) 式进行两个波段的比值可得:

$$\frac{\Delta L_i}{\Delta L_j} = K_i \frac{\rho(\lambda_i)}{\rho(\lambda_j)} e^{-(\sec\theta + \sec\varphi)[\alpha(\lambda_i) - \alpha(\lambda_j)]Z} \quad (5)$$

式中, K_i 为常数。虽然水体的衰减系数和底部反射率随水体类型和底质种类不同有很大差异, 然而两个波段的底部反射率比值 $\rho(\lambda_i) / \rho(\lambda_j)$, 对应同一底部物质而言是不变的, 两个波段的衰减系数差值 $\alpha(\lambda_i) - \alpha(\lambda_j)$, 对同一类型的水体基本保持恒定。由 (5) 式可得:

$$\frac{\Delta L_i}{\Delta L_j} = K_1 e^{-K_2 Z} \quad (6)$$

式中, K_1 和 K_2 为常数。对 (6) 式两边取自然对数, 可得:

$$Z = A \ln \left(\frac{\Delta L_i}{\Delta L_j} \right) + B \quad (7)$$

式中, A 和 B 为待定系数。

考虑到遥感图像辐射亮度与地表反射率之间近似为线性相关关系, 因此:

$$Z = A' \ln \left(\frac{\Delta \rho_i}{\Delta \rho_j} \right) + B' \quad (8)$$

由上式推导可看到, 水深 Z 与比值 $\frac{\Delta L_i}{\Delta L_j}$ 和 $\frac{\Delta \rho_i}{\Delta \rho_j}$ 的关系为对数关系。因此, 如果能够确定两个波段对水深信息反映敏感, 可通过这两个波段辐射亮度 (或反射率) 与对应深水的差值的比值, 用最小二乘法的回归计算, 分别求出 A 和 B 或 A' 和 B' 系数及其复相关系数 R^2 , 由此可求取水深 Z 。(7) 式和 (8) 式即为多光谱遥感水深信息反演模式。

3 数据采集与处理

3.1 遥感数据的采集与处理

选用 Landsat TM 卫星遥感图像 (图 1), 成像时间为 2004 年 5 月 23 日。图 1 是 TM 4 TM 3 TM 2 三个波段的 RGB 彩色合成图像, 该景图像非常清晰, 海水在合成图像上呈现不同层次的蓝色, 出露的沙洲呈现棕色, 而陆地大部分由植被覆盖并呈现红色。从图像中可清晰看出水体的层次, 直观反映水体信息较好。

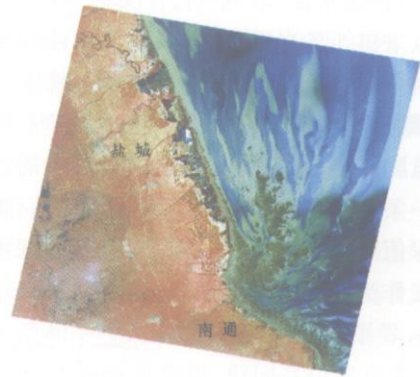


图 1 研究区 TM 4 B / 2 波段 RGB 假彩色合成图像
Fig 1 Location of study area as shown in TM 4 B / 2 false color composite image

本文对获取的遥感图像进行几何校正和大气校正后再转化成反射率图像。通过在地形图和遥感图像上选取同名地物控制点来对遥感图像进行几何精校正, 校正误差控制在 0.5 个像元以内。本文采用的大气校正方法是 6S 模型法, 选取海洋型气溶胶模式, 所需要的其他参数可以在卫星数据的头文件资料及收集的气象资料中查到。

3.2 水深数据采集与处理

2005 年 10 月 23—27 日进行了野外水深与光谱的采集工作, 包括高精度的差分 GPS 定位。结合研究区 TM 遥感图像和已有水深资料, 选择水深变化较大的测量航线断面, 即盐城东台河闸 (川水港闸) 和南通小洋口闸外海域两条断面, 采用船舶进行逐点测量, 共完成水深测量断面约 200km。本研究使用 HD-16 数字化回声测深仪和 HD5800N 型动态全球定位系统, 进行水深测量和同步地理坐标测量, 仪器测深范围为 0.3—120m, 测深精度: $\pm 2\text{cm} + 0.1\%$ 。测量时导航软件实时同步采集水深

数据与动态差分 GPS同步地理坐标定位数据。

3.3 水体光谱采集与处理

研究区盐城东台闸海域水深测量断面的水深变化范围较大,最大水深可达到 36m,在该海域进行水深数据采集的同时,利用美国 ASD 公司的 FieldSpec Pro FR 便携式光谱仪同步进行了水体表面的野外光谱采集,光谱采集在船上进行,选取不同深度并采集 21 处的水体光谱曲线 150 多条。ASD 光谱仪光谱测量范围为 350—2500nm,光谱分辨率为 3—10nm,光纤探头视场为 25°,光谱采样频率设置为 10Hz,探头距离水面 1m 左右,探头方向垂直于水面,每个样点采集 5 条光谱曲线,去除异常曲线和异常样点,然后将每个样点的曲线进行平均,减少了由于波浪、太阳耀斑等对测量影响而产生的误差。把光谱测量用的电脑和测深仪器的时间进行统一,通过时间来确定每一条光谱曲线所对应的水深测量值,将光谱曲线和水深值对应起来。对选取 21 条不同深度的水体光谱曲线作为样本进行分析(图 2 表 1)。

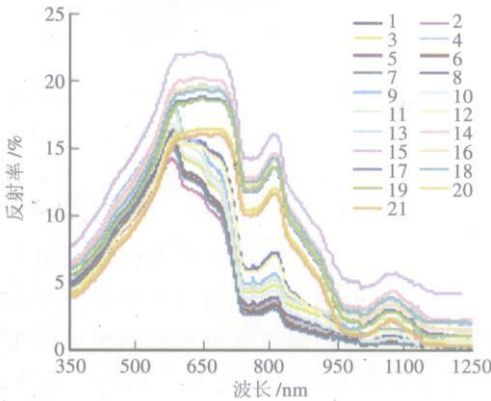


图 2 不同水深的实测水体反射光谱曲线
Fig 2 Reflectance spectra of different water depth

表 1 21 个不同水深样本点的光谱所对应的实测水深值
Table 1 Water depths corresponding to reflectance spectra

| 编号 | 水深 /m | 编号 | 水深 /m | 编号 | 水深 /m |
|----|-------|----|-------|----|-------|
| 1 | 7.47 | 8 | 22.67 | 15 | 7.52 |
| 2 | 8.93 | 9 | 17.63 | 16 | 6.37 |
| 3 | 11.19 | 10 | 19.55 | 17 | 5.32 |
| 4 | 13.41 | 11 | 14.74 | 18 | 4.79 |
| 5 | 15.10 | 12 | 9.88 | 19 | 4.24 |
| 6 | 19.43 | 13 | 10.20 | 20 | 3.53 |
| 7 | 21.53 | 14 | 8.90 | 21 | 3.01 |

4 遥感水深反演技术

4.1 潮汐校正

研究区航线的水深数据的采集不可能同一时间获取,其瞬时的潮位也在变化,为了使不同时刻采集的水深数据具有可比性,可将其统一校正到当天的最高潮位下的水深。同时,为了与 TM 遥感图像获取时间相对应,结合水深测区南通小洋口港、盐城弼港 2004 年 5 月 23 日预测潮汐表,根据潮汐数据计算出遥感图像实际成像的时间瞬时的潮位数据。通过已校正到当天最高潮位下水深实测数据和遥感图像成像时刻的潮位差,来修正遥感图像成像时的水深数据,得到遥感数据获取时刻的研究区水深数据,作为下一步分析的数据源。以南通小洋口外海域为典型研究区,从遥感图像中提取出与水深值相对应的像元反射率值。由于 TM 图像对应的是以 30m×30m 为最小单元(像元大小)的水深平均值,所以需要将在同一个像元内的实测水深值进行平均,使水深值和遥感图像各波段的反射率值一一对应。本研究采用可利用的水深与光谱值相对应的样本点共 109 个。

4.2 水深信息敏感波段选择

考虑到近红外波段之后水体反射光谱近乎为 0 且多为随机噪音信息,本研究将 21 个水样点水深仅与 400—1500nm 光谱范围内反射率值直接进行一一对应的线性相关分析。如图 3 所示,发现对应红波段近红外波段范围相关系数较高,最大值在 841nm 处,相关系数可达到为 -0.70 而对应蓝绿波段相关系数较低。对应 TM1、TM2、TM3、TM4 波段,相应的相关

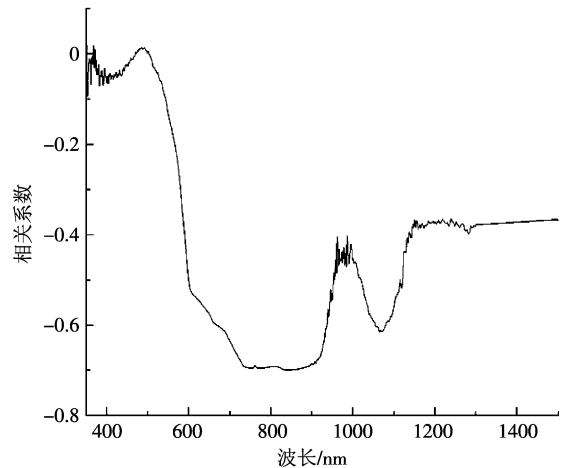


图 3 水深与光谱反射率相关系数曲线

Fig 3 Correlation between water depth and spectral reflectance

系数依次为 0.02 - 0.053 - 0.561 和 -0.694。显然, TM4 TM3 波段光谱反射率对水深信息较为敏感。

可见光 近红外遥感各波段对水体的衰减系数是各不相同的, 在各波段最大入水深度范围内, 长波段的衰减系数大, 对水深变化的分辨率高, 携带的水深的信息量更大些^[17]。在江苏近海岸带水深较浅的情况下, 对于 TM 图像, 水深分辨率高的波段 TM3 和 TM4 反映水深变化的敏感程度比 TM1 和 TM2 高, 即与水深的相关性表现较好。

4.3 TM 图像水深预测模式

在 TM 反射率图像的海域范围内, 沿实测航线随机选择的 109 个不同水深样点, 参考多光谱遥感水深信息反演模式(见式(7)), 选择该研究区水深信息敏感波段 TM4 和 TM3 用于 TM 图像水深预测模式的建立。选择一深水像元并取其对应 TM4 和 TM3 的反射率值为 a_4 和 a_3 。建立 $(TM4 - a_4) / (TM3 - a_3)$ 因子与水深的对数回归关系预测模式(图 4)。

$$Z = -12.7 \ln(x) + 0.4154 \quad (R^2 = 0.4793) \quad (9)$$

式中, Z 表示水深值, x 表示 $(TM4 - a_4) / (TM3 - a_3)$ 波段反射率比值。复相关系数 R^2 为 0.4793 预测反演的水深值和实测水深的平均绝对误差 MAE 为 1.857m 和均方根误差 RMSE 为 2.230m。

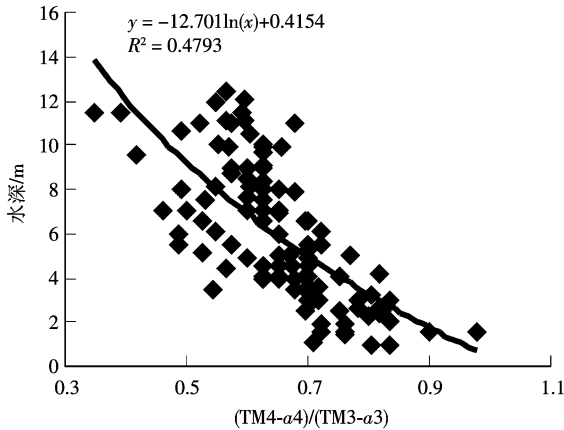


图 4 TM 图像水深预测模式

Fig 4 Water depth retrieval model based on TM image

波段水陆交界处的实际反射率值, 发现 TM 5 波段的反射率值可很好地区分水陆边界, TM 5 波段水体的反射率都小于 9%, 选取 9% 反射率值为作为 TM 5 波段水陆分界的阈值。但掩膜后的图像陆上零星的水体和大部分出露水面的辐射沙洲未被掩去, 主要是因为辐射沙洲的表面有积水层。辐射沙洲的 TM3 波段的反射率小于 TM4 波段, 而大部分海水 TM3 波段的反射率大于 TM4 波段, 只有近岸海水的 TM3 波段的反射率小于 TM4 波段; 对于 TM3 波段的反射率, 近岸水体的值都大于 15%, 而出露沙洲的值都小于 15%。大部分海水在近红外 TM4 波段强烈吸收, 反射率都低于 TM3 波段的反射率; 但是近岸水体浑浊度大, 含沙量高, 因而在近红外 TM4 波段的反射率较大, TM3 波段的反射率值也较高。因而可以用 $(TM4 - TM3)$ 波段反射率差值作为区分海水和辐射沙洲的方法, 同时设定 TM3 反射率的阈值为 15%, 来区分近岸水体和辐射沙洲。

据上述处理, TM 图像中出露水表的辐射沙洲基本上被提取出来, 不再和海水混杂一起。陆上部分有些海水养殖池和一些人工挖掘的池塘、沟渠等, 仅从光谱信息上虽不能和海水分离, 但因其位置在海岸带陆地上, 形状多为规则四边形或带状, 通过目视解译就可将其识别出来。如图 5 所示, 从 TM 图像中可较好地提取海水部分, 非海水部分在图像上为棕色(设置为 0)。

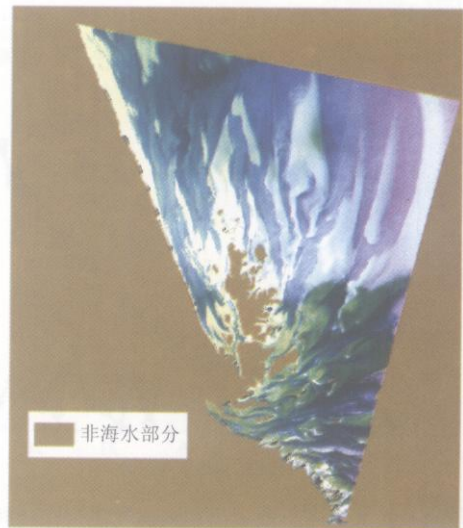


图 5 水陆分离后研究区 TM4 B/2 波段 RGB 合成图像

Fig 5 TM4 B/2 false color composite image of study area after extraction of sea water

5 水深遥感制图

5.1 海水信息的提取

通过建立掩膜图像, 对 TM 遥感图像进行水陆分离, 去除各波段的陆上信息部分, 提取海水部分。由于水体对近红外波段强烈吸收, 通过观察图像各

5.2 水深反演成图与精度分析

针对江苏海岸外海域研究区, TM 遥感图像水

陆分离后,采用式(8)水深预测模式对整个 TM 遥感图像的江苏岸外海域进行水深反演,以 5m 水深为间隔,绘制 30m 以浅的水深遥感制图(如图 6 所示)。继之,在 TM 图像上再选择 28 个未参加建模的水深样点,采用式(8)水深预测模式反演水深,以检验江苏岸外海域的水深反演遥感制图精度。选择的 28 个样本中,最小的水深为 0.94m,最大水深为 34.39m。图 7 是反演预测水深值和真实水深值的对比曲线图:随着水深的增加,拟合效果逐渐变差,水深大于 15m 时,预测水深远偏离实测水深。

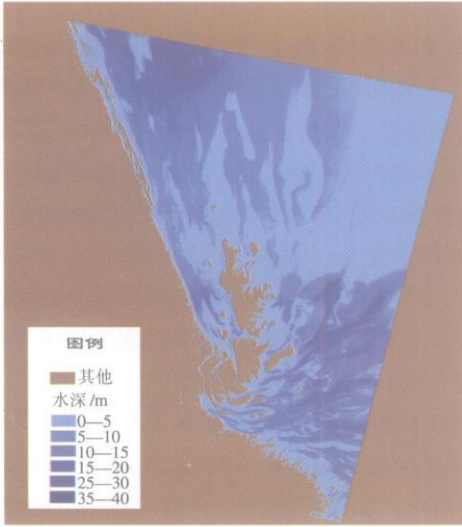


图 6 江苏近海岸水深遥感制图

Fig 6 Bathymetric map of Jiangsu coastal zone produced by applying depth retrieval model based on TM image

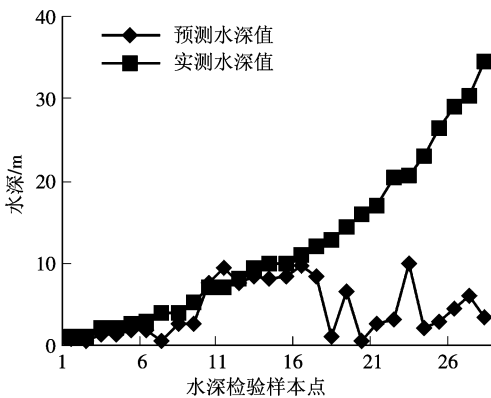


图 7 江苏近海岸水体的预测和实测水深比较

Fig 7 Comparison of predicted and measured depth

6 结论与讨论

(1) 针对本海域水体,对应红波段 近红外波段范围,水体光谱反射率对水深信息敏感,与水深的线

性相关系数较高,最大值在 841nm 处,相关系数可达到为 -0.70 而对应蓝绿波段相关系数较低;TM3 和 TM4 波段的反射率对水深信息比较敏感,线性相关系数分别可达到 -0.561 和 -0.694 而 TM1 和 TM2 波段的反射率对水深信息表现得不敏感。

(2) 从多光谱遥感信息传输方程所推导出的水深信息反演模式表明,如果能够确定两个波段对水深信息敏感,水深与这两个波段的辐射亮度(或反射率)及对应深水差值的比值的自然对数成线性关系。针对本研究区和 TM 遥感数据, TM4 及 TM3 为相应的敏感波段,所建立的水深预测模式的复相关系数 R^2 为 0.4793 对 0—15m 水深,预测水深和实测水深之间拟合较好,水深大于 15m 时,预测水深远偏离实测水深。

(3) 通过已校正到当天最高潮位下水深实测数据和遥感图像成像时刻的潮位差,来修正遥感图像成像时的水深数据,可得到遥感数据获取时刻的研究区水深数据。结合 TM5 波段反射率、出露沙洲反射率及海水反射率的差异,通过建立掩膜图像,可较为有效地对 TM 遥感图像进行水陆分离,提取 TM 图像中的海水部分;可通过常用的图像处理软件绘制每隔 5m 的 TM 水深遥感制图。

(4) 随着高空间、高光谱、高辐射分辨率遥感技术的发展,对浅海水域的水深和水下地形进行遥感探测的技术方法和应用将会不断地深入开展,尤其需要进一步解决海水中悬浮物质、叶绿素和黄色物质对传感器探测到的水深信号的影响。

致谢 本文得到江苏省地质调查研究院委托项目“江苏海岸水下地形多尺度遥感成图关键技术研究”的支持。感谢李向前高工为本研究开展所给予的支持和建议。

参考文献 (References)

- [1] Jerby N G. Marine Optics[M]. Elsevier Scientific Amsterdam, 1976.
- [2] Polyn F G, Sattinger I J. Water Depth Determination Using Remote Sensing Techniques[A]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment[C]. Ann Arbor MI, 13-16 October 1969.
- [3] Paredes J M, Spero R E. Water Depth Mapping from Passive Remote Sensing Data under a Generalized Ratio Assumption[J]. Applied Optics, 1983, 22: 1134-1135.
- [4] Walker G, Kalcic M. Gram-Schmidt Orthogonalization Technique for Atmospheric and Sunlight Correction of Landsat Imagery[A].

- SPIE Proc[C]. 1994 **2315**: 799—812
- [5] Khan M A, Fadhllah Y H, AlH inai K G. Thematic Mapping of Subtidal Coastal Habitats in the Western Arabian Gulf Using Landsat TM Data— Abu Ali Bay Saudi Arabia[J]. *International Journal of Remote Sensing* 1992 **13**: 605— 614
- [6] Ibrahim M, Cracknell A P. Bathymetry Using Landsat MSS Data of Penang Island in Malaysia[J]. *International Journal of Remote Sensing* 1990 **11**: 557— 559
- [7] VanHengel W, Spitzer D. Multi temporal Water Depth Mapping by Means of Landsat TM [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1991 **12**(4): 703— 712
- [8] Lafon V, Froidefond JM, Lahet F *et al* SPOT Shallow Water Bathymetry of a Moderately Turbid Tidal Flat Based on Field Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment* 2002 **81**: 136— 148.
- [9] Zhang Y. Study of Fathoming Method by RS Technology[J]. *Journal of Hohai University* 1998 **26**(6): 68— 72 [张鹰. 水深遥感方法研究[J]. 河海大学学报 1998 **26**(6): 68— 72]
- [10] Dang F X, Ding Q. A Technique for Extracting Water Depth Information from Multispectral Scanner Data in the South China Sea[J]. *Marine Science Bulletin* 2003 **22**(3): 55— 59 [党福星, 丁谦. 利用多波段卫星数据进行浅海水深反演方法研究[J]. 海洋通报, 2003 **22**(3): 55— 59.]
- [11] Huang JZ, You Y M. Experiment of Water Depth Surveying in the Nantong Section of the Yangtze River[J]. *Advances in Water Science* 2002 **13**(2): 235— 238 [黄家柱, 尤玉明. 长江南通河段卫星遥感水深探测试验[J]. 水科学进展, 2002 **13**(2): 235— 238.]
- [12] Di K G, Ding Q, Chen W, *et al* Shallow Water Depth Extraction and Chart Production from TM Images in Nansha Islands and Nearby Sea Area[J]. *Remote Sensing for Land and Resources* 1999 (3): 59— 64. [邱凯昌, 丁谦, 陈薇等. 南沙群岛海域浅海水深提取及影像海图制作技术[J]. 国土资源遥感, 1999 (3): 59— 64]
- [13] Leu L G. Bathymetric Mapping in Kending Shallow Waters Using a QuickBird Imagery[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2004 **9**(2): 23— 42 [吕黎光. 捷鸟卫星影像应用于垦丁浅海水深之测绘分析[J]. 航测及遥测学刊, 2004 **9**(2): 23— 42.]
- [14] Wang Y. Radiative Sandy Ridge Field on Continental Shelf of the Yellow Sea[M]. Beijing: China Environmental Science Press 2002 [王颖. 黄海陆架辐射状沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [15] Zhu D K, Fu M Z. Research on the Primary Formation of Radiative Sand Banks of the Nearshore Waters in Jiangsu[A]. Theses on the Integrated Survey of East Sand in Jiangsu Coastal Zone[C]. Beijing: Ocean Press 1986 [朱大奎, 傅命佐. 江苏岸外辐射状沙洲的初步研究[A]. 江苏省海岸带东沙滩综合调查文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1986.]
- [16] Kanong Company Imagery Research Laboratory. Wang L, Gong J L, *et al* Translation Development of Remote Sensing and its Application[M]. Beijing: Science Press 1983 [(日)卡农公司图像研究室. 王历, 龚家龙等译. 遥感—遥感技术的发展及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [17] Li T F, Yi J G, Li Y X, *et al* The Extraction of Geomorphologic Remote Sensing Information on Shallow Sea Underwater Terrain and its Application[J]. *Remote Sensing of Environment (China)* 1991, **6**(1): 22— 29. [李铁芳, 易建春, 厉银喜等. 浅海水下地形地貌遥感信息提取与应用[J]. 环境遥感, 1991, **6**(1): 22— 29.]