

# 黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测

樊 辉<sup>1, 2</sup> 黄海军<sup>2</sup> 唐军武<sup>3</sup>

(1 山东省科技发展战略研究所,济南市科院路 19 号,250014)  
(2 中国科学院海洋研究所,青岛市南海路 7 号,266071)  
(3 国家卫星海洋应用中心,北京市大慧寺路 8 号,100081)

**摘 要:**通过黄河口含沙水体野外遥感光谱反射率的观测实验,探讨了黄河口水体表观光谱特性,分析了悬浮体中有机颗粒含量和悬沙粒度对光谱特性的影响。针对 Landsat TM/ETM<sup>+</sup> 影像波段特性,对黄河口含沙水体在其可见光至近红外 4 个波段的光谱特性进行了模拟分析,并结合表观光谱观测数据建立了经验回归函数,以估测不同时相黄河口水体表层悬沙的浓度。  
**关键词:**黄河口; 悬沙浓度; 光谱反射率; 遥感  
**中图法分类号:**P237.3;P237.9

悬沙定量遥感应用研究的重点在于建立水体的多光谱生物光学模型和现场实测数据收集<sup>[1]</sup>。从遥感影像获取水体中各组分的含量,要求使用遥感反射率而不是辐照度反射率来建立与水体固有光学特性的关系<sup>[2-4]</sup>。国际上常用的表观光谱测量的方法有剖面测量法<sup>[5,6]</sup>和水表面以上测量法<sup>[4-7]</sup>(又称表面法)。本文采用水表面以上测量法获取黄河口含沙水体光谱特性,并将其应用于 Landsat TM 光谱响应模拟研究。

## 1 研究数据与方法

本文研究数据获取于 2004 年 6 月 19 日至 27 日期间黄河口海区野外海面光谱测量和悬沙取样调查。

### 1.1 黄河口水体表观光谱特性测量

野外表观光谱测量采用的是水表面以上测量法。光谱测量仪为双通道地物波谱仪(FieldSpec Dual),光谱范围为 350~1 050 nm,光谱分辨率为 3 nm。文献[5]详细描述了利用光谱仪进行水面以上光谱测量的过程。近年来,许多学者对光谱仪现场观测几何作了进一步的研究和探讨。本次测量过程按文献[7,8]的规定进行。

### 1.2 表层悬沙取样及粒度分析

在每个海面光谱观测站点采集表层(0~50 cm)含沙海水样品,采用负压抽滤法过滤(滤膜孔径为 0.45  $\mu\text{m}$ ,按总量的 20%设置校正膜)。然后对滤膜进行烘干、称重以及烧失量分析,多次称重差值不大于 0.01 mg。最后,利用 Cilas 940L 型激光粒度仪对烧失量实验后的悬浮体样品进行粒度测试。

## 2 黄河口含沙水体光谱特性

本次实验所采集的水体悬沙浓度范围为 5.4~1 713.1 mg/L。由图 1 可得出以下结论。

- 1) 黄河口含沙水体遥感光谱反射率均小于 0.07  $\text{sr}^{-1}$ 。
- 2) 不同含沙量水体,其遥感反射率光谱曲线不同。悬浮泥沙浓度较小时( $<25 \text{ mg/L}$ ),其遥感反射率光谱仅有一个峰值,位于黄光波段(560~590 nm)。悬沙浓度较高( $>25 \text{ mg/L}$ )时,其遥感反射率光谱则有两个峰值:主峰随着悬浮泥沙浓度的增加,由黄光波段向红光波段(620~760 nm)移动;次主峰位于近红外波段(760~1 100 nm),通常低于主峰,但随着悬沙浓度的升高,其

差值不断缩小。

3) 存在一过渡含沙浓度区,其在黄光波段至红光波段间的遥感反射率近似,无明显的峰值存在。文献[3,4]也表明,该过渡区悬沙浓度的范围大约在 150~350 mg/L 之间。因此,该浓度范围的悬浮泥沙浓度的遥感反演就有更多可供选择的波段。

4) 在 400~550 nm 波段范围内,遥感光谱反射率对悬浮泥沙浓度的变化反映不敏感。在 550~700 nm,大体趋势是悬沙浓度升高,水体遥感反射率也随之提高,但也存在悬沙浓度为 403.2 (14.9) mg/L 水体的遥感光谱反射率高于悬沙浓度为 1 207.3(72.9) mg/L 和 1 713.1(183.4) mg/L 水体的遥感光谱反射率的现象。其中,括号外的数值为悬浮泥沙浓度,括号内的数值为有机物浓度。

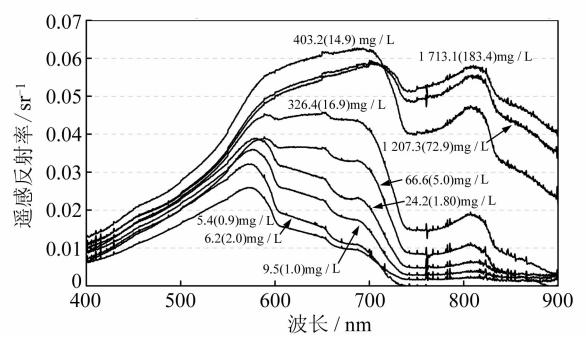


图 1 黄河口不同浓度悬沙水体光谱特性  
Fig. 1 Typical Remote Sensing Reflectance Spectra, Corresponding to Different Suspended Sediment Concentrations and Organic Particle Matter Concentrations

5) 在 750~900 nm 波段,遥感光谱反射率随水体中悬沙浓度的增长呈现明显的增长趋势,特别是位于 810 nm 左右的次主峰值,变化更为显著。当含沙量小于 25 mg/L 时,次主峰几乎不存在。这可能是由于该波段处于水体的强吸收区,当水体含沙量过低时,悬沙后向散射小,水体表面的遥感反射率也很低,甚至趋近于零。

分析表明,对于含沙量小于 25 mg/L 的水体,其遥感反演的最满意波段应选择遥感反射率光谱的主峰;当含沙量大于 25 mg/L 时,则应选择近红外波段的次主峰。

含沙水体的光谱响应不仅取决于悬沙浓度,而且还与泥沙的颜色、类型、颗粒大小和矿物组成以及水体中叶绿素和有色可溶性有机物(CDOM)等有着密切的关系<sup>[9,10]</sup>。在黄河口含沙量较高的水体中,有机物质含量也较高,且 CDOM 的浓度会随水体含沙量的增加而增加。因此,该类水体在 550~700 nm 间的光谱吸收能力较强,从而部分抵消了悬沙的后向散射作用,导致遥感光谱散射

率下降。这与 Rhone 河口<sup>[3]</sup>和 Gironde 河口<sup>[4]</sup>的观测稍有不同。在 Gironde 河口,含沙量为 35~250 mg/L 的水体在 400~700 nm 间,其遥感光谱反射率随含沙量的升高而升高;当水体含沙量高于 250 mg/L 时,其遥感光谱反射率则趋于饱和。

已有研究表明,光谱反射率对水体中悬沙颗粒大小的比例是相当敏感的,水体中小粒径(<1 μm)悬沙相对数量增加,水体光谱反射率则增大;而大粒径(>20 μm)悬沙相对数量的增加则会引起光谱反射率变小<sup>[3]</sup>。本次实验结果表明,黄河口悬沙粒径范围为 0.5~90 μm,中值粒径范围为 8~17 μm,大部分悬沙粒径介于 10~50 μm 间。粒径小于 1 μm 的悬沙颗粒极少(<0.4%),而大于 20 μm 的悬沙颗粒在河口不同区域却存在较大差异(所占比例为 11.1%~42.7%)。这与黄河口悬沙浓度的分布情况呈相反趋势,该现象会在一定程度上影响黄河口表层悬沙定量估测的精度。

3 黄河口表层悬沙浓度遥感估测

按照 Dekker 等<sup>[11]</sup>的方法,利用海表面光谱测量数据可模拟 Landsat TM/ETM<sup>+</sup>可见光至近红外谱段的光谱响应,结果如图 2 所示。从图 2 可知,对于低含沙量和低有机颗粒含量水体,在 TM2 波段范围内,遥感光谱反射率随悬沙浓度的增加而显著增大,故而适合这类水体的遥感反演。当水体含沙量较低(<10 mg/L)时,TM4 波段对悬沙浓度的响应不敏感,而对含沙量较高的水体,其遥感光谱反射率随悬沙含量的增长明显,因此, TM4 波段只适合高悬沙含量水体的反演。当水体有机颗粒物质含量较低(<20 mg/L)时, TM3 波段的光谱反射率随悬沙含量的增加而增加,但水体中有机颗粒物质含量高, TM3 光谱反射率与悬沙含量的相关关系不明显。因此,对于悬沙含量变异较大的黄河口水体,很难基于单一波段准确地反演水体悬沙的浓度。尽管研究表明<sup>[12,13]</sup>,黄河含沙水体光谱反射率与水体含沙量在 MSS6 和 MSS7 波段有较为满意的对数关系,但相关系数 R<sup>2</sup>均小于 0.85。其他河口也有利用陆地卫星 MSS5 或 TM3 单一波段数据成功反演悬沙浓度的例子,但都缺乏对特定水体进行光谱特性的分析,或水体中悬沙含量较低。

为克服单一波段反演的不足,许多学者尝试利用多个波段数据的运算结果来反演水体中的悬沙浓度,并取得了很好的效果<sup>[14]</sup>。本文研究了悬沙浓度与模拟所得的 Landsat TM 波段遥感光谱

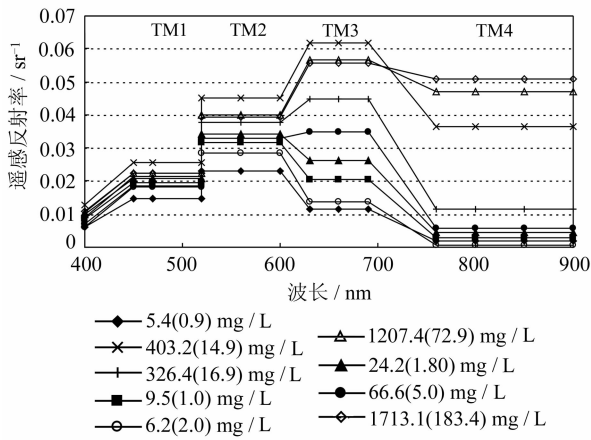


图 2 黄河口不同含沙浓度水体在 Landsat TM 各波段光谱特性的模拟

Fig. 2 Simulated Spectral Responses of Landsat TM Wave Bands to Different Turbid Waters

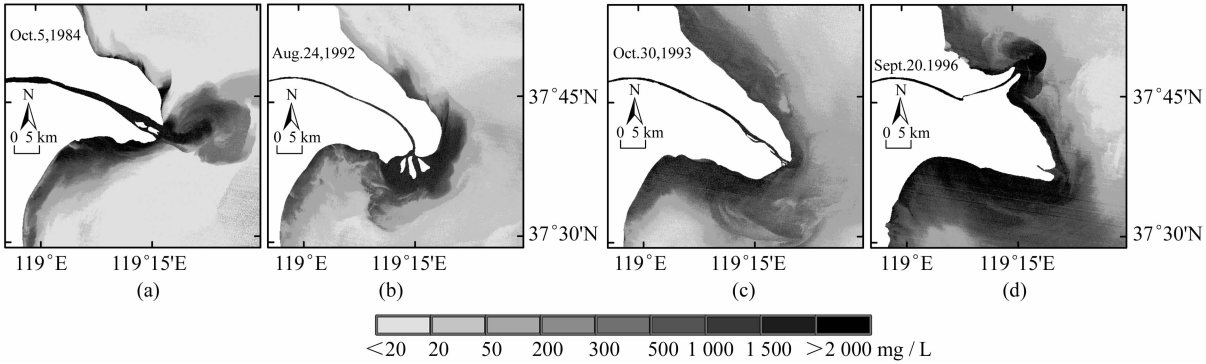


图 3 黄河口表层悬沙浓度反演结果

Fig. 3 Distribution of Suspended Sediment Concentrations Retrieved from Landsat TM Data

4 结 语

本文通过模拟分析黄河口含沙水体在 TM 可见光至近红外 4 个波段的光谱响应特性,建立了光谱反射率与表层悬沙浓度的回归关系,以此来估测多个时相黄河口水体表层的悬沙浓度,其结果较好地描述了黄河口悬沙的分布。但由于缺乏卫星过境时同步悬沙浓度的观测资料,本文未能对反演的准确度和精度进行验证。

参 考 文 献

[1] Dekker A, Bukata R P. Remote Sensing of Inland and Coastal Waters[M]. Piscataway: IEEE Press, 2002

[2] Morel A, Gentili B. Diffuse Reflectance of Oceanic WatersII Bidirectional Aspects[J]. Applied Optics, 1993, 32(33): 6 864-6 879

[3] Forget P, Ouillon S, Lahet F, et al. Inversion of

反射率及其组合的回归关系。结果表明,单波段中, $R_{TM3}$ 与表层悬沙浓度的相关程度较高,与以前黄河口悬沙反演的研究一致<sup>[13]</sup>,其他河口也有类似的结论<sup>[13]</sup>。该结论与前面的分析有所不同,不同波段组合中,以 $R_{TM3}/R_{TM1}$ 、 $R_{TM3}/R_{TM2}$ 与悬沙浓度的相关关系较好,这与文献[4, 14]的研究结果类似。其他几种比值与悬沙浓度的相关性也比单波段好,说明波段比值方法用于悬沙浓度反演往往能得到较为满意的结果<sup>[14]</sup>。

考虑到不同波段遥感反射率之比可部分消除悬沙颗粒折射系数和后向散射有效因子对遥感反射率的影响<sup>[4, 14]</sup>,且应用于遥感影像时,可消除大气影响的乘积效应部分,故选择 $R_{TM3}/R_{TM2} = 0.168\ 3 \ln(\text{SPM}) + 0.245\ 4$ 估测水体表层的悬沙浓度,结果如图 3 所示。

Reflectance Spectra of Nonchlorophyllous Turbid Coastal Waters[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 264-272

[4] Doxaran D, Froidefond J, Lavender S, et al. Spectral Signature of Highly Turbid Waters, Application with SPOT Data to Quantify Suspended Particulate Matter Concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 149-161

[5] Whitlock C H, Poole L R, Usry J W, et al. Comparison of Reflectance with Backscatter and Absorption Parameters for Turbid Waters [J]. Applied Optics, 1981, 20(3): 517-522

[6] Wang M, Lyzenga D R, Klemas V V. Measurement of Optical Properties in the Delaware Estuary [J]. Journal of Coastal Research, 1996, 12(1): 211-228

[7] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析: 水面以上测量法 [J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44

[8] Mobley C D. Estimation of the Remote-Sensing Reflectance from Above-Surface Measurements [J]. Applied Optics, 1999, 38(36): 7 442-7 455

[9] Novo E M M, Hanson J D, Curran P J. The Effect of Sediment Type on the Relationship Between Reflectance and Suspended Sediment Concentration [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(7): 1 283-1 289

[10] Choubey V K, Subramanian V. Spectral Response of Suspended Sediments in Water Under Controlled Conditions[J]. Journal of Hydrology, 1991,122(1/4): 301-308

[11] Dekker A G, Malthus T J, Wijnen M M, et al. The Effect of Spectral Band Width and Positioning on the Spectral Signature Analysis of Inland Waters [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(2/3): 211-226

[12] 黄海军, 李成治, 郭建军. 黄河口海域悬沙光谱特征的研究[J]. 海洋科学, 1994(5): 40-44

[13] 黎夏. 悬沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用[J]. 环境遥感, 1992, 7(2): 106-114

[14] Doxaran D, Froidefond J, Castaing P. A Reflectance Band Ratio Used to Estimate Suspended Matter Concentrations in Sediment-dominated Coastal Waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23): 5 079-5 085

第一作者简介:樊辉,博士。主要从事海岸带环境遥感研究。  
E-mail:fanh@zhanlue.net

Spectral Signature of Waters in Huanghe Estuary and Estimation of Suspended Sediment Concentration from Remote Sensing Data

FAN Hui<sup>1,2</sup> HUANG Haijun<sup>2</sup> TANG Junwu<sup>3</sup>

(1 Institute of Strategy Development of Science and Technology, Shandong Academy of Sciences, 19 Keyuan Road, Jinan 250014, China)  
(2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 7 Nanhai Road, Qingdao 266071, China)  
(3 National Satellite Ocean Application Service, 8 Dahuisi Road, Beijing 10081, China)

**Abstract:** The responses of spectral signature to suspended sediment concentration (SSC) of turbid waters in the Huanghe estuary are addressed based upon in situ above-water radiance measurement and water sampling, for suspended sediment concentration ranging from 5. 4 to 1 713. 1 mg/L. The influences of suspended organic particle matter and particle distribution of suspended sediment on spectral signature are analyzed. Some empirical relationships between remote-sensing reflectance in Landsat TM bands and suspended sediment concentration are established. The best correlation is obtained for the reflectance ratio of Landsat TM3 and TM2, which is further applied to the estimation of SSC in the estuary.

**Key words:** Huanghe estuary; suspended sediment concentration; spectral reflectance; remote sensing

About the first author: FAN Hui, Ph. D, majors in remote sensing of environment in coastal zones.  
E-mail: fanh@zhanlue.net

2006 年 P&K 收录《地球空间信息科学学报(英文版)》情况  
(公布名单为第一作者)

2001 年	第 3 期	刘耀林							
2002 年	第 1 期	刘耀林	刘艳芳	梁 勇					
2003 年	第 1 期	黄漠涛	第 2 期	金双根	第 4 期	艾廷华	吴小芳	朱 庆	张云涛
2004 年	第 3 期	潘 励	王 密	乐 鹏	苏国中	李 斌	张正禄	沈云中	
2005 年	第 1 期	聂贵根	周春霞	刘 刚	陈楚江	李均力	第 2 期	朱 庆	李建平 侯恩科
	第 4 期	黄声享	徐晓华	张小红					