

引用格式:孔金玲,杨晶,蒲永峰,等.曹妃甸近岸海域垂向悬沙含量遥感反演[J].地球信息科学学报,2016,18(10):1428-1434. [Kong J L, Yang J, Pu Y F, *et al.* 2016. Remote sensing retrieval for vertical spatial distribution of suspended sediment concentration in the Caofeidian coastal waters. Journal of Geo-information Science, 18(10):1428-1434.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.01428

曹妃甸近岸海域垂向悬沙含量遥感反演

孔金玲¹, 杨晶¹, 蒲永峰¹, 倪梓轩², 杜东³, 柳富田³

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;
3. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

Remote Sensing Retrieval for Vertical Spatial Distribution of Suspended Sediment Concentration in the Caofeidian Coastal Waters

KONG Jinling^{1*}, YANG Jing¹, PU Yongfeng¹, NI Zixuan², DU Dong³ and LIU Futian³

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Geological Engineering and Surveying & Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

Abstract: The suspended solids content in ocean water is a significant water quality parameter, and the use of remote sensing technology to monitor the suspended sediment concentration (SSC) is an important research direction in ocean color remote sensing. In this paper, based on a set of *in situ* data sets, which include the simultaneous spectral reflectance data and the SSC data of different depths obtained from 35 field sites distributed within the four profiles of Caofeidian waters, and combined with the Landsat-5 TM remote sensing data, an empirical statistical model between the SSC levels of water surface and the remote sensing reflectance was established. So the SSC levels of water surface in the study area were estimated. Subsequently, by respectively analyzing the correlation relationships of SSC levels between the surface and the middle layers, as well as the surface and the bottom layers, we deduced the SSC inversion results of the middle and bottom layers based on the results of surface SSC levels and we also studied the vertical spatial distribution patterns of SSC. The study results indicate that there is an obvious correlation between the SSC levels in the vertical direction. Based on the reflectance ratio (R_{TM3}/R_{TM2}) of Landsat-5 TM image, an optimized quadratic polynomial model for the SSC retrieval of water surface was established. Based on this model, the relevant models for the middle and bottom layers were also established. Then, the inversion precision of each model was validated using seven check points. The model's mean relative error of each layer was controlled to be less than 30%, the mean absolute errors and root mean square errors of the surface and middle layers were below 6 mg/L and 10 mg/L respectively. The precision of the bottom layer was slightly lower than the surface and middle layers. The results provide a foundation to further study the sediment transport rule of marine environment and the optimization of sediment transport model under hydrodynamic forces.

Key words: Caofeidian; suspended sediment; vertical spatial distribution; remote sensing models

***Corresponding author:** KONG Jinling, E-mail: jlkong@163.com

摘要: 利用遥感技术监测水体悬浮泥沙含量是海洋水色遥感的一个重要研究方向。本文以曹妃甸近岸海域4个剖面35个站点开展的现场光谱测量、同步采集的不同深度悬浮泥沙含量样品数据为基础,采用Landsat-5 TM遥感数据,建立水体表、中、底层悬沙含量遥感反演模型,并研究悬沙垂向上的空间分布规律。结果表明,曹妃甸近岸海域泥沙含量在垂向上有明显的关联性,以Landsat-5 TM影像反射率比值(R_{TM3}/R_{TM2})为因子,构建优化的悬浮泥沙含量遥感反演模型,各层模型平均相对误差都

收稿日期 2015-11-24;修回日期:2016-05-03.

基金项目:国家自然科学基金项目(41272246);中国地质调查局地质调查项目(1212010814005);教育部科学技术研究重点项目(108183);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G3272013)。

作者简介:孔金玲(1964-),女,博士,教授,主要从事定量遥感研究。E-mail: jlkong@163.com

在30%以内,表层和中层的平均绝对误差在6 mg/L以下,均方根误差小于10 mg/L,底层的精度略低于表层和中层。研究结果为进一步研究海洋环境泥沙运移规律、优化水动力作用下泥沙运移模型提供支持。

关键词: 曹妃甸;悬浮泥沙;垂向空间分布;遥感模型

1 引言

海洋水色遥感是监测海水生态环境的重要技术手段。海洋水体中悬浮物含量是重要的水体质量参数^[1],尤其是悬浮泥沙含量影响着水体的携沙能力、透明度以及河口海岸的演变规律和水体生态系统^[2]。传统悬浮泥沙浓度调查主要依赖于海上作业船只的监测,而遥感技术以实时性、连续性、广泛性、同步性等特点,为海洋调查研究提供了新的技术手段,利用遥感技术监测水体悬浮泥沙浓度成为海洋遥感领域的一个重要研究方向^[3]。以往的成果主要是关于海洋表层水体悬浮泥沙浓度遥感监测方法的研究^[4-6],且国内外学者应用不同的遥感数据源在河口、近岸海域开展了卓有成效的工作^[7-8]。在遥感反演模型方面,经历了从经验模型到半分析模型以至理论模型的发展历程^[9-11]。由于海洋环境的复杂性,对于海洋水体垂向悬浮泥沙分布特征的研究,只局限于依靠少量离散监测点数据进行分析,较少从宏观的、整体的、连续的角度对海洋水体悬浮泥沙分布规律开展研究。

本文以曹妃甸地区近岸海域为研究区,基于现场光谱测量和不同深度悬沙含量测量数据,采用Landsat-5 TM遥感数据,建立水体表层、中层和底层悬沙含量遥感反演模型,实现不同层面的连续空间场研究泥沙的空间分布规律,弥补只依靠少量离散点数据分析泥沙空间分布特征的不足,为进一步研究曹妃甸地区泥沙运移规律,优化水动力作用下泥沙运移模型提供支持。

2 研究区及数据

2.1 研究区

曹妃甸位于渤海湾中心地带,距离滦南县城63 km,向东距离京唐港33海里,距离北京约230 km,港口位置非常优越^[12]。良好的自然地理条件,使曹妃甸港区具有明显的近岸深水优势,特别是25 m水深水域直通渤海海峡,是渤海湾唯一不需要新开挖航道和港池即可建设30万吨级大型泊位的“钻石级”港址,被誉为“国宝之地”^[13]。曹妃甸港口建设是河北省政府的“一号工程”,也是国家首批

发展循环经济试点区域之一。

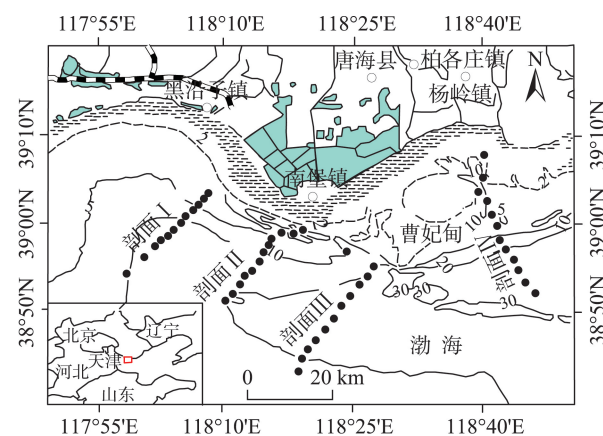
曹妃甸海域悬移质泥沙主要来自西部海域并随潮波输运至东部。野外实测数据显示,该区域表层悬沙量比较低,整体上均小于120 mg/L,平均含沙量低于30 mg/L。海域沉积物类型主要由砂、中砂、细砂、粉砂和粉砂质粘土、粘土质粉砂组成,其中以粘土质粉砂与细粉砂为主,分别占全部底质取样样品的60%和25%^[14]。沉积物的分布由陆向海呈细-粗-细的变化规律,沉积物中值粒径的分布由西向东呈由小到大的变化趋势,表层沉积物平均粒径在0.003~4 mm范围之间,其中粉砂(0.004~0.063 mm)分布范围最广^[13,15]。

2.2 数据采集与处理

本文数据源包括研究区Landsat-5 TM遥感影像和野外实测数据集。野外实测数据为用美国双通道ASD光谱仪(光谱覆盖范围350~2500 nm)采集的光谱数据和同步采集的不同深度的泥沙水质样本数据。研究区共布设4个剖面,每个剖面有12个监测点,监测点的分布如图1所示。4个剖面分别于2009年6月13日、22日、23日和25日进行了数据采集,采集时间在9:30~14:30之间。

2.2.1 水体悬浮泥沙含量测量与分析

水体悬浮泥沙样品采用2.5 L定深采水器采集。待船体停稳后,使用专用的有机玻璃或不锈钢定深采水器进行表、中、底分层采样。表层样在水



图例 ○ 县、镇 ● 野外采样点 ----- 等深线 ———— 铁路

图1 研究区野外实测站点分布图

Fig. 1 Distribution map of *in situ* field sites

面以下0~1.5 m处采集,共采集48个样点;中层取样深度为水深的0.6倍,共采集37个样点;底层取样深度为海底以上2 m左右,共采集41个样点;其中,同步获取表、中、底层35个站点的泥沙浓度。实验测试按《海洋监测规范》进行^[16],采用过滤重量法,将水体在真空过滤器中通过0.45 μm滤膜进行过滤,并将留在滤膜上的悬浮泥沙进行称重,计算水体中悬浮泥沙浓度。

根据野外获取样品,选取同时采集表、中、底层泥沙样品的测站共35个,其悬浮泥沙含量、粒径测试统计结果如表1所示。整体上,曹妃甸海域含沙量较低,分布范围为0.6~285.6 mg/L。除个别点外,表层悬沙含量基本上小于100 mg/L;而且呈现出西部海域含沙量高于东部海域、近岸海域含沙量高于远海区域(一般为远海区域的10~20倍)的分布特征;甸头前沿海域平均含沙量为20 mg/L,涨潮平均含沙量略高于落潮平均含沙量。从垂向上看,表、中、底层含沙量具有逐渐增大的趋势。表、中、底层平均泥沙浓度分别为16.5、25.4、29.0 mg/L,呈现出泥沙在底部运移的特征。悬沙粒径分布范围为2.98~78.76 μm,呈现近岸与远海较粗,中部相对较细的特点;在垂向上,表、中、底层平均泥沙粒径分别为19.03、15.92、13.34 μm,具有沿水深逐渐变细的特征,说明曹妃甸深槽水流动力能悬浮起较大颗粒的泥沙^[13]。

表1 表、中、底层悬浮泥沙含量、粒径测试结果

Tab. 1 Test results of SSC and particle size in the surface, middle and bottom layers

取样位置	悬浮泥沙含量/(mg/L)			粒径/μm		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均
表层	2.2	208.7	16.5	2.98	72.83	19.03
中层	0.7	216.3	25.4	3.02	78.76	15.92
底层	0.6	285.6	29.0	3.13	64.97	13.34

2.2.2 水体光谱数据测量与处理

水体光谱测量采用光谱仪水面之上测量法获取研究区光谱数据,观测几何采用Φ=135°,θ=40°^[17],测量仪器采用美国ASD公司双通道地物光谱仪。测量时严格地按照测量原理分别测量标准板、遮挡直射阳光的标准板、天空光、水体表面的辐照度L和DN值,测量周期至少跨越一个波浪周期,每个目标的测量数据约记录15条左右,测量时间集中在10:00~14:00。

对于标准板经过严格定标的光谱仪,在固定积分时间的条件下,遥感反射率可通过式(1)计算得到。

$$R = \frac{(S_{sw} - \rho S_{sky}) \rho_p}{\pi S_p} \tag{1}$$

式中:S_{sw}为光谱仪面向海面的测量值;S_{sky}为光谱仪面向天空的测量值;S_p为光谱仪面向标准版的测量值;ρ_p为严格定标后的标准板反射率;ρ为气-水界面反射率,根据每个站点测量时的天气、风速和时间等因素确定ρ的取值。

根据式(1)对遥感反射率进行计算,绘制了研究区水体光谱曲线(如图2)。

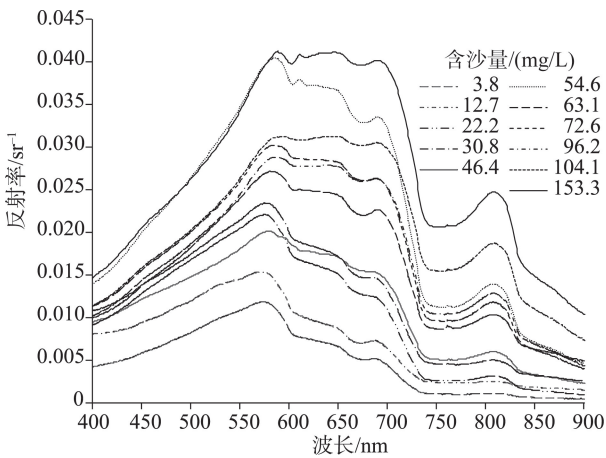


图2 研究区水体光谱特征曲线
Fig. 2 Spectral reflectance curves of waters in the study area

由图2可知,研究区水体光谱曲线具有含沙水体光谱曲线的特征:水体遥感反射率随悬浮泥沙浓度的增加而增加;光谱反射率呈现双峰的特点,第一反射峰在550~600 nm之间,第二反射峰在780~830 nm之间,且第一反射峰的值高于第二反射峰;随着水体悬浮泥沙浓度的增加,第二反射峰的增加速度高于第一反射峰的增加速度。

2.2.3 遥感数据及预处理

遥感数据选用2009年6月11日的Landsat-5 TM遥感影像,其预处理包括大气校正、几何校正、水陆分离、波段分离等。其中,大气校正利用ENVI软件中FLAASH大气校正模块完成;几何校正是在待校正的遥感影像中选取32个控制点,采用ERDAS软件中二次多项式模型进行校正,误差控制在0.5个像元之内;采用归一化水体指数以0为阈值提取水体,最终得到研究区水陆分离后的影像^[18]。

3 研究方法

将35个站点的测试数据(每个站点同步获取了表层、中层、底层悬沙含量数据)分为表层、中层悬沙含量测试数据和表层、底层悬沙含量测试数据2组;同时,在35个站点中选28个为建模点,其余7个为模型检验点。利用实测的光谱数据计算 Landsat-5 TM 相应波段等效遥感反射率,分析单一波段反射率及不同波段反射率比值与悬沙含量之间的相关关系,选择敏感波段(或组合波段),建立悬沙含量遥感反演模型。

3.1 表层悬沙含量遥感反演模型

由 Landsat-5 TM 相应波段等效遥感反射率及不同波段反射率比值与悬沙含量进行相关分析,发现反射率比值(R_{TM3}/R_{TM2})与表层悬沙浓度(Suspended

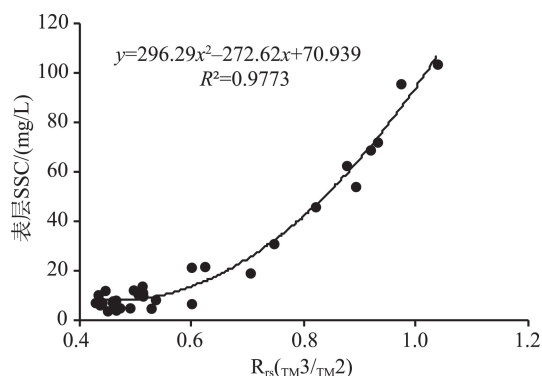
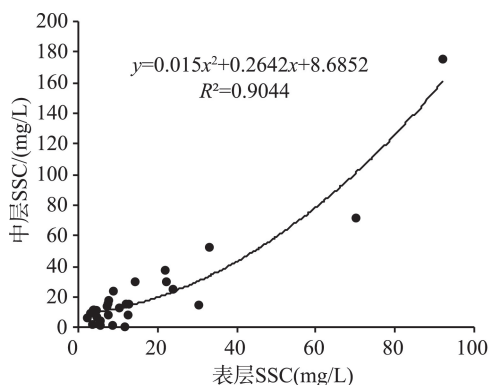
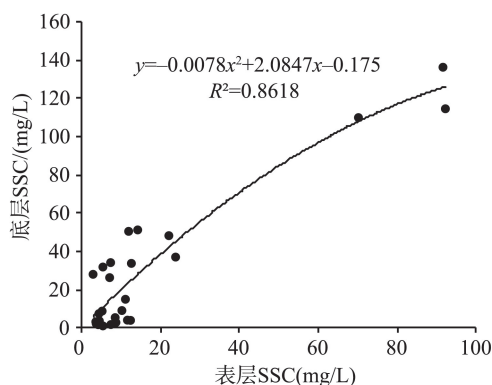


图3 表层悬沙浓度与反射率比值拟合散点图

Fig. 3 Scatter plot between surface SSC and reflectance ratios



(a) 表层与中层悬沙含量相关关系拟合图



(b) 表层与底层悬沙含量相关关系拟合图

图4 表层与中层、底层悬沙含量的相关关系拟合图

Fig. 4 Scatter plot of surface SSC and middle SSC, surface SSC and bottom SSC

Sediment Concentration, SSC) 相关性最好。选择 R_{TM3}/R_{TM2} 为敏感因子,建立 R_{TM3}/R_{TM2} 与表层 SSC 之间的相关模型(包括线性回归模型、对数模型、指数模型、二次多项式模型和幂函数模型),其中,二次多项式模型是悬沙浓度的最佳反演模型^[19](模型决定系数 $R^2=0.9773$)如式(2)所示。表层悬沙浓度反演模型拟合散点图如图3所示。

$$SSC_{表} = 296.29(R_{TM3}/R_{TM2})^2 - 272.62(R_{TM3}/R_{TM2}) + 70.94 \quad (R^2 = 0.9773) \quad (2)$$

式中: $SSC_{表}$ 为遥感反演的表层悬沙浓度。

3.2 中层、底层悬沙含量遥感反演模型

根据悬沙浓度测试数据,分别对表层和中层、表层和底层的悬沙含量进行相关性分析,相关系数分别为:0.94、0.87,表明表层与中层、表层与底层的悬沙含量具有明显的相关性。分别建立表层与中层、底层的悬沙含量的相关模型,发现二次多项式模型拟合效果最好,相关系数分别达到0.9044和0.8618。因此,选择相应的二次多项式模型为表层与中层、表层与底层悬沙含量的相关模型,如式(3)–(4)所示。

$$SSC_{中} = 0.015(SSC_{表})^2 + 0.2642(SSC_{表}) + 8.6852 \quad (R^2 = 0.9044) \quad (3)$$

$$SSC_{底} = -0.0078(SSC_{表})^2 + 2.0847(SSC_{表}) - 0.175 \quad (R^2 = 0.8618) \quad (4)$$

将式(2)反演的表层泥沙含量代入式(3)、(4),可分别反演中层和底层的泥沙含量。

表层与中层、底层悬沙含量的相关关系拟合如图4所示。

4 结果与分析

4.1 反演模型分析与验证

根据构建的不同深度泥沙浓度反演模型,在实测的等效反射率比值(R_{TM3}/R_{TM2})变化区间,模拟表、中、底层泥沙浓度的变化规律。图5所示,悬浮泥沙垂向分布(除高浓度个别点外),基本上与天然河道中悬移质含沙量垂线分布的经典理论一致,即悬浮物的浓度在接近海底处达到最高,距海底越远,则浓度越低^[20]。模型曲线显示, $R_{TM3}/R_{TM2}=0.45$,是反演模型的拐点,即当 $R_{TM3}/R_{TM2}<0.45$ ($SSC_{表}<8.3\text{ mg/L}$)时,泥沙浓度与 R_{TM3}/R_{TM2} 成反比,而当 $R_{TM3}/R_{TM2}>0.45$ 时,泥沙浓度与 R_{TM3}/R_{TM2} 成正比,这与光谱数据反映的结果一致。水体的光谱曲线(图2)显示,当水体表层泥沙浓度较低时,不同浓度间对应的反射率变化, $\Delta R_{TM3}<\Delta R_{TM2}$,因此,泥沙浓度与 R_{TM3}/R_{TM2} 成反比;随着泥沙浓度的增加,不同浓度间对应的反射率变化, $\Delta R_{TM3}>\Delta R_{TM2}$,此时,泥沙浓度与 R_{TM3}/R_{TM2} 成正比。此外,从图5可看出,当 $R_{TM3}/R_{TM2}<0.75$ ($SSC_{表}<$

33.91 mg/L)时,根据泥沙监测数据判定,属于中部到远海的区域,表层和中层的泥沙浓度接近,底层泥沙浓度大于上两层,且靠岸的距离越近,底层泥沙浓度越高;当 $R_{TM3}/R_{TM2}>0.75$, $SSC_{表}>33.91\text{ mg/L}$ 时,根据研究区监测资料,对应的站点位于近岸海域,水深基本上在10 m以内,反演模型显示,此时,中层的泥沙浓度迅速增高,在岸边高浓度区域接近甚至有超过底层浓度的趋势。这主要是近岸河口区大量泥沙的沉积以及浅水海域底层泥沙的再悬浮的共同作用,成为近岸海域中层泥沙浓度增高的主要原因。

利用7个模型检验点的含沙量数据对模型进行验证,采用平均绝对误差、平均相对误差和均方根误差来评价模型精度,计算结果如表2所示。

表2 反演模型精度评定

Tab. 2 Precision assessments of the retrieval models			
模型适用范围	平均绝对误差/(mg/L)	平均相对误差/(%)	均方根误差/(mg/L)
表层	5.57	25.35	7.22
中层	5.85	27.47	8.13
底层	8.72	29.24	11.50

表2表明,从底层到表层,反演模型精度逐渐提高,表层和中层的反演结果的平均绝对误差在6 mg/L以下,均方根误差小于10 mg/L;各层平均相对误差都在30%以内。其中,表层反演模型的精度略高于肖艳芳等^[21]在曹妃甸附近海域提出的表层悬浮泥沙含量反演模式(平均相对误差为33.0%);底层反演结果的精度要略低于表层和中层的结果。这主要是由于海洋水动力作用,海底泥沙运移复杂,表层与底层的泥沙浓度虽有明显的相关性,但其相关性要低于表层与中层的相关性,致使底层泥沙反演精度略低于表层和中层,这一结论也与杜东等^[13]得出的结论一致。

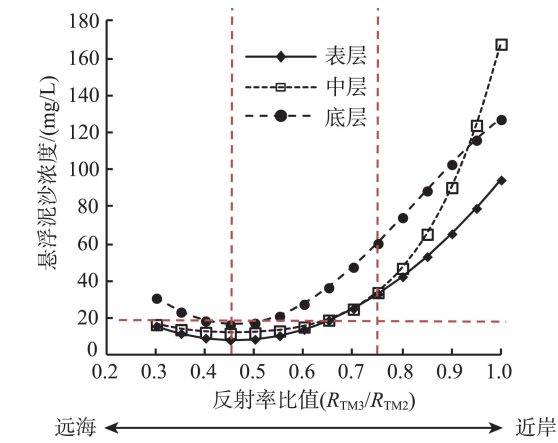


图5 表、中、底层悬沙含量反演模型的模拟结果

Fig. 5 The simulation results of the retrieval models for the SSC of surface, middle and bottom layers

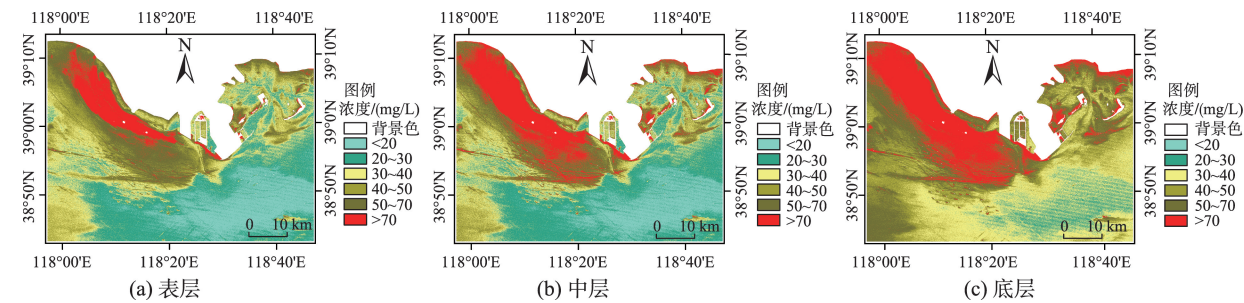


图6 泥沙含量垂向分布图

Fig. 6 Distribution maps of the SSC levels in vertical layers

4.2 泥沙含量遥感反演模型的应用

选用2009年6月11日的Landsat-5 TM遥感数据,根据式(2)–(4)分别反演表、中、底层泥沙含量,并用ArcGIS和ENVI软件分层制作泥沙分布图(图6)。

图6反映了表、中、底层泥沙空间场分布特征,由表层到底层,泥沙含量呈增大的趋势,尤其是底层,泥沙浓度大部分区域都高于30 mg/L,这主要是泥沙的沉积作用使底部泥沙含量高于中部和表层。从同一层的泥沙分布看,近岸泥沙浓度高于远海海域,尤其西北部沿海泥沙浓度普遍大于70 mg/L,结果表明,曹妃甸海域的泥沙主要来源于西北部唐河、沙河入海口,并且在水动力作用下由西部向东部输送,从而显示了泥沙分布的另一特征是西部海域高于东部海域。

5 结论

运用遥感技术反演近岸海域水体中垂向悬浮泥沙浓度,可从宏观的角度认识悬沙含量的空间分布规律。为进一步优化水动力作用下泥沙运移模型提供支持。本文采用Landsat-5 TM遥感数据,运用统计回归的方法,建立了曹妃甸近岸水体表、中、底层悬沙含量遥感反演模型,实现悬沙含量遥感反演,并制作了悬沙含量垂向空间分布图。主要研究结论如下:

(1)曹妃甸近岸海域泥沙含量在垂向上有明显的相关性,表层和底层、中层的悬沙含量相关系数分别为0.94和0.87。

(2)Landsat-5 TM影像反射率比值(R_{TM3}/R_{TM2})是表层泥沙含量遥感反演的最敏感因子,且其二次多项式模型是最佳的反演模型(相关系数 $R^2=0.9773$)。

(3)运用水体表、中、底层悬沙含量遥感反演模型,对研究区泥沙含量进行了反演。各层模型平均相对误差都在30%以内,表层和中层的平均绝对误差在6 mg/L以下,均方根误差小于10 mg/L,底层的精度略低于表层和中层。

(4)反演结果反映了表、中、底层泥沙空间场分布特征。垂向上由表层到底层,泥沙含量呈增大的趋势;从同一层的泥沙分布看,近岸泥沙浓度高于远海海域,尤其西北部沿海泥沙浓度普遍大于70 mg/L。

(5)运用定量遥感的方法研究泥沙的垂向变化规律,弥补了只依靠少量离散点数据分析泥沙空间

分布特征的不足,为进一步研究泥沙运移规律,优化水动力作用下泥沙运移模型提供了支持。

由于野外采样数据有限,本文仅针对采样点建立了表、中、底层泥沙浓度的相关经验模型。今后,将进一步研究水体的固有光学特性,建立泥沙浓度反演的分析模型和半分析模型,以提高反演精度。

参考文献(References):

- [1] 阎福礼,刘韶菲,王世新,等.太湖浮游藻类的后向散射分离及其叶绿素a浓度反演[J].地球信息科学学报,2014,16(6):989-996. [Yan F L, Liu S F, Wang S X, et al. Phytoplankton backscattering coefficients partitioning and its applications in retrieving chlorophyll-a concentrations in Taihu lake[J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(6):989-996.]
- [2] 秦蕴珊,李凡,徐善民,等.南黄海水域中悬浮体的研究[J].海洋与湖沼,1989,20(2):101-112. [Qin Y S, Li F, Xu S M, et al. Suspended matter in the south yellow sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1989,20(2):101-112.]
- [3] 刘志国,周云轩,蒋雪中,等.近岸Ⅱ类水体表层悬浮泥沙浓度遥感模式研究进展[J].地球物理学进展,2006,21(1):321-326. [Liu Z G, Zhou Y X, Jiang X Z, et al. Progress on suspended sediment concentration remote sensing in nearshore case 2 waters[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1):321-326.]
- [4] Kong J L, Sun X M, Wang W K, et al. An optimal model for estimating suspended sediment concentration from Landsat TM images in the CaoFeidian coastal waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015,36(19-20):5257-5272.
- [5] Volpe V, Silvestri S, Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters [J]. Remote Sensing of Environment, 2010,115(1):44-54.
- [6] 樊辉,黄海军.南黄海辐射沙洲邻近海域表层悬浮颗粒物浓度遥感反演[J].地理科学,2011,31(2):159-165. [Fan H, Huang H J. Remote sensing retrieval of suspended particulate matter concentrations of surface waters near radial sand ridges area in the south yellow sea[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(2):159-165.]
- [7] 陈燕,孔金玲,孙晓明,等.基于半分析模型的渤海湾近岸海域悬浮泥沙浓度遥感反演[J].地理与地理信息科学,2014,30(3):33-36. [Chen Y, Kong J L, Sun X M, et al. Retrieval of sea surface suspended sediment concentration in Bohai gulf offshore area on semi-analysis model [J]. Geography and Geo-Information Science, 2014,30(3):33-36.]
- [8] Wang J J, Lu X X, Liew S C, et al. Retrieval of suspended

- sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009,34(8): 1082-1092.
- [9] Bayram A, Kankal M, Önsoy H. Estimation of suspended sediment concentration from turbidity measurements using artificial neural networks[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012,184(7):4355-4365.
- [10] Kong J L, Sun X M, Wong D, *et al.* A semi-analytical model for remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in the gulf of Bohai, China[J]. *Remote Sensing*, 2015,7:5373-5397.
- [11] 王旭楠.基于辐射传输模型的水质参数定量遥感反演[D].长春:吉林大学,2007. [Wang X N. Radiative Transfer Model (RTM)-based water pollution parameters retrieval from Landsat TM/ETM data[D]. Changchun: Jilin University, 2007.]
- [12] 曹妃甸工业区门户网站[DB/OL].<http://www.caofeidian.gov.cn/cfdportal/区情概览.aspx>. [Caofeidian industrial zone portal website[DB/OL]. <http://www.caofeidian.gov.cn/cfdportal/situationoverview.aspx>.]
- [13] 杜东,刘宏伟,秦雅飞,等.河北省曹妃甸近岸海域悬浮泥沙含量分布特征研究[J].*地质调查与研究*,2013,35(2): 189-194. [Du D, Liu H W, Qin Y F, *et al.* Study on distribution characteristics of the suspended particulate matter (SPM) concentration in the Caofeidian coastal area[J]. *Geological Survey and Research*, 2013,35(2):189-194.]
- [14] 杨华,赵洪波,吴以喜.曹妃甸海域水文泥沙环境及冲淤演变分析[J].*水道港口*,2005,26(3):130-133. [Yang H, Zhao H B, Wu Y X. Analysis of hydrodynamic and sediment transport of Caofeidian sea area[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2005,26(3):130-133.]
- [15] 李建国,孙晓明,康慧,等.曹妃甸近海Ⅱ类水体光谱反射率与悬浮泥沙浓度相关性研究[J].*国土资源遥感*,2009(3):54-58. [Li J G, Sun X M, Kang H, *et al.* The correlation between the average reflectance of case II water in Caofeidian offing and the concentration of surface suspended particulate matter[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009,3:54-58.]
- [16] 《海洋调查规范》GB17378.4-1998,海洋监测规范(第四部分:海水分析) [S].北京:中国标准出版社,1998. [GB17378. 4-1998. The specification for marine monitoring (part 4: seawater analysis)[S]. Beijing: Standard Press of China, 1998.]
- [17] 唐军武,田国良,汪小勇,等.水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法[J].*遥感学报*,2004,8(1):37-44. [Tang J W, Tian G L, Wang X Y, *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004,8(1):37-44.]
- [18] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].*遥感学报*,2005,9(5):589-595. [Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005,9(5):589-595.]
- [19] 蒲永峰.基于RS和GIS技术的曹妃甸近岸海域多层泥沙浓度空间分布特征模拟与分析[D].西安:长安大学,2012. [Pu Y F. Multilayer sediment concentration spatial distribution characteristics of simulation and analysis based on RS and GIS technology in Caofeidian offshore areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.]
- [20] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983. [Qian N, Wan Z H. Mechanics of sediment transport[M]. Beijing: Science Press, 1983.]
- [21] 肖艳芳,赵文吉,朱琳.近海水体悬浮物HJ-1号小卫星CCD定量反演研究[J].*海洋科学*,2012,36(8):59-63. [Xiao Y F, Zhao W J, Zhu L. Quantitative retrieval model of suspended sediment concentration in estuary based on HJ-1 CCD image[J]. *Marine Sciences*, 2012,36(8):59-63.]