

空间插值与遥感反演的潮滩沉积物 类型精度对比*

郑晓丹, 张东*, 张鹰, 李欢

(南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210046)

摘要:以射阳河口南部潮滩为研究区, 分别利用普通克里格插值和遥感反演得到潮滩表层的沉积物组分质量分数, 进而获取沉积物类型, 并对 2 种方法进行比较分析。结果表明, 研究区分布 3 种沉积物, 分别为粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂。根据沉积物分类精度和空间分布特征的对比, 空间插值获得的沉积物组分质量分数精度较高, 沉积物类型总体分类精度均为 87.9%, 但高光谱遥感反演出的沉积物组分分布图能较好的反映出沉积物组分的空间异质性特征, 沉积物类型的分布也具有更明显的空间变化规律, 呈现出由低潮位向岸、由潮沟向滩面颗粒逐渐变细的趋势, 这种空间分布特征与采样点粒度分析结果所表现的趋势基本一致, 且与研究区的水动力环境特征及沉积物物质来源相吻合。

关键词:沉积物类型; 沉积物组分; 克里格插值; 遥感反演

中图分类号: TP753

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2010)04-0515-08

沉积物类型的识别是潮滩研究的重要手段。由于海岸带淤泥质潮滩沉积物的自然特性以及潮汐水位变动的影响, 在这一地区对潮滩进行大范围高密度的采样存在很大困难。目前传统方法研究表层沉积物的空间分布是通过现场采样结合实验室分析获取采样点的沉积物信息, 然后利用空间插值得到沉积物的空间分布趋势, 其理论基础在于沉积物类型的空间分布满足一定的统计分布特征, 但是由于地理空间的异质性及尺度效应的存在, 很难有一个通用性的、满足精度要求的空间插值模型^[1], 而且沉积物栅格式采样的空间尺度偏大、采样点密度偏于稀疏, 难以建立较为精细的沉积物类型空间分布图^[2]。利用遥感技术结合野外采样数据, 获取不同时相潮滩沉积物类型的空间分布^[3-5], 可以有效弥补常规方法在大尺度信息提取时的不足。

由于潮滩沉积物类型的直接遥感分类存在同物异谱问题难以解决^[3], 因此目前利用遥感技术来获取沉积物的类型主要采用 2 种方法, 一种是基于光谱解混的线性光谱分解法^[6], 另外一种是基于组分遥感反演的沉积物分类方法^[3]。2 种方法本身都能获得较高的分类精度, 但是前者受制于影像上纯净端元(endmember)的提取, 如果提取的端元难以保证其“纯净”性, 则会直接影响到解译结果和精度^[7]; 而后者直接利用沉积物的反射光谱特征进行分类, 方法本身具有较强的稳定性。因此, 本研究采用基于组分遥感反演的沉积物分类方法, 从预测精度及分布趋势两方面对遥感反演与空间插值方法进行对比分析, 确定 2 种方法的适用范围, 以便为选择准确有效的方法进行潮滩沉积环境的动态监测和分析提供参考依据。

1 数据准备

研究区选在江苏射阳河口南侧的粉沙淤泥质潮滩(120°29'~120°34'E, 33°42'~33°48'N), 见图 1。采样范

* 收稿日期: 2009-04-30

资助项目: 国家自然科学基金项目——潮滩滩面高程的高光谱定量遥感反演方法研究(40606044); 教育部高校博士点基金项目——海洋浅水地形遥感反演的关键技术研究(200803190007)

作者简介: 郑晓丹(1983-), 女, 河北省邢台人, 硕士研究生, 主要从事海洋信息技术方面研究。E-mail: zhengxiaodan@126.com

* 通讯作者, 副教授, 主要从事海洋信息技术及海洋动力过程方面研究。E-mail: zhangdong@njnu.edu.cn

(张 赛 编辑)

围覆盖整个研究区,基本均匀布设样点。按路线穿越法调查,一般垂直岸线布置采样路线,共采集了 58 个有效样本数据,采样过程中用 Starlink Invicta® 210 DGPS/信标一体机定位,精度为 1 m。考虑到一次涨落潮期间的活动层厚度大约为 5 cm^[8],采样深度约为 3 cm。取样时间是 2007 年 5 月和 7 月,采样时潮间带表层基本完全出露,土壤水下渗充分,土壤表层含水量对沉积物的光谱特性影响降低到最小,有利于沉积物粒度参数定量遥感反演。

遥感反演的数据源为 Hyperion L1 高光谱遥感影像数据,成像时间为 2006 年 5 月 3 日。成像时太阳高度角 60.78° 方位角 120.39°,影像光谱分辨率 10 nm,空间分辨率 30 m,幅宽 7.5 km,共 242 个波段。

在实验室对采集的沉积物样品加入浓度为 10% 的六偏磷酸钠,然后用超声液振荡对样品进行分散处理后,经 Mastersize2000 激光粒度仪测试,分析沉积物粒径,得到砂、粉砂、粘土的组分含量,沉积物粒度分类与命名采用谢帕德(Shepard)三角图分类法,3 种组分合成沉积物类型的具体分级值见《海洋调查规范》^[9]。

2 方 法

在 58 个样本点中任取空间均匀分布的 36 个点作为训练样本,分别利用普通克里格插值和遥感反演得到潮滩表层的沉积物组分质量分数,进而获取沉积物类型。利用剩余的 22 个点作为验证点对 2 种方法得到的组分含量与沉积物类型进行精度评价。

2.1 空间插值

潮滩沉积物由于受到潮汐、波浪、地形等多种因素的影响,具有高度的空间异质性。研究表明,地统计学是研究土壤特性空间变异特征的较好方法^[10]。在地统计学中,普通克里格法又是最基本、应用最为广泛,也是研究最为透彻的一种空间插值方法,在土壤科学领域得到广泛应用^[11]。因此,本研究选用普通克里格法对研究区潮间带沉积物组分质量分数进行空间插值,将离散的沉积物组分质量分数推演到整个研究区。

首先,对野外实测数据进行粒度分析,得到潮滩采样点沉积物的组分,把采样点差分 GPS(DGPS)定位数据导入 ArcMap 中,获得采样点沉积物组分质量分数的空间分布,数据检验后,根据半方差函数图和各拟合参数检验情况选择适当的克里格插值模型^[12];然后,运用交叉验证对所选择的插值模型进行验证,修正各参数,生成最合理的沉积物组分质量分数分布图^[13];最后,根据 Shepard 三角分类法确定每一栅格的沉积物类型,得到研究区潮滩的表层沉积物类型分布图。

2.2 遥感反演

对原始影像进行图像预处理得到分离后的条状潮间带影像^[14],根据地表真实光谱反射率数据,提取特征参数。采用特征波段法建立定量遥感模型,选择与沉积物组分质量分数相关性较高的 2 102 nm 波段为特征波段,相关系数分别为 -0.895, 0.907 和 0.655,对应的 RMSE 为 3.752, 3.139 和 1.041。通过回归分析,

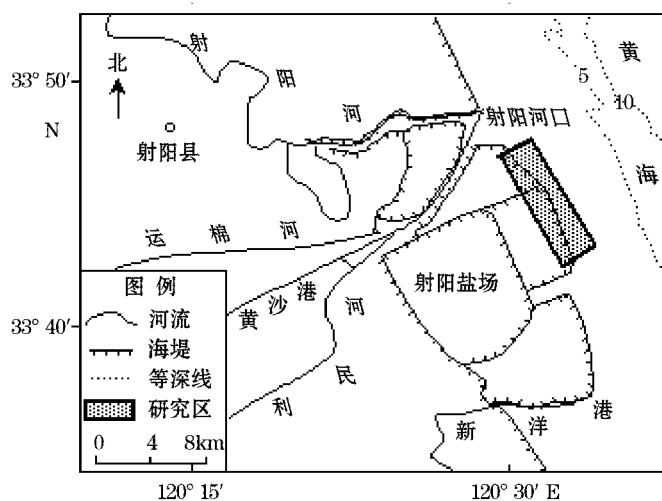


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Sketch of the studied area

建立沉积物组分的线性定量遥感模型如下^[3]:

$$\omega_{\text{砂}}(\%) = -980 \times R_{2102} + 82.902 \quad (0 < R_{2102} < 0.085) \quad (1)$$

$$\omega_{\text{粉砂}}(\%) = 878.33 \times R_{2102} + 19.122 \quad (0 < R_{2102} < 0.092) \quad (2)$$

$$\omega_{\text{粘土}}(\%) = 117.93 \times R_{2102} - 2.658 \quad (0.02 < R_{2102} < 0.87) \quad (3)$$

式中, $\omega_{\text{砂}}$ 、 $\omega_{\text{粉砂}}$ 和 $\omega_{\text{粘土}}$ 分别为砂、粉砂和粘土的质量分数; R_{2102} 为 Hyperion 影像 2 102 nm 波段的地表反射率, 公式后列出了模型所适用的反射率范围。根据所建立的定量遥感模型进行波段运算, 获得砂、粉砂和粘土含质量分数布图层, 然后参照 shepard 三角分类方法, 建立不同沉积物类型对应的砂、粉砂和粘土质量分数区间, 逐像元进行沉积物类型的自动判别, 生成研究区潮滩的表层沉积物类型分布图^[3]。

3 精度评价

3.1 沉积物组分质量分数的精度评价

采用一个相对精度指标(平均相对误差 \bar{d})和 2 个衡量绝对误差的指标(均方根误差 $RMSE$ 和偏差 $bias$)来评价空间插值与遥感反演两种方法获得的沉积物组分的预测精度^[8], 计算公式如下:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z_i - Z_0|}{Z_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_0)^2} \quad (5)$$

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_0) \quad (6)$$

式中, Z_i 表示克里格插值或遥感反演得到的沉积物各组分质量分数预测值; Z_0 为实测值; n 为检验样本的样点数。

分别利用克里格空间插值法和高光谱遥感反演法, 插值及反演出砂、粉砂和粘土质量分数空间分布结果图, 然后从图中分别提取出 22 个空间均匀分布的检验样本点的砂、粉砂和粘土质量分数值, 分析它们与实测值之间的误差, 结果见表 1。可以看出, 运用克里格法进行空间插值得到沉积物组分质量分数误差均稍优于高光谱定量遥感反演得到的结果。

表 1 对检验样本沉积物组分的误差比较

Table 1 Comparison between the errors of sediment component content respectively from remote sensing retrieval and spatial interpolation method

方 法	砂质量分数			粉砂质量分数			粘土质量分数		
	$\bar{d}/\%$	$RMSE$	$bias$	$\bar{d}/\%$	$RMSE$	$bias$	$\bar{d}/\%$	$RMSE$	$bias$
空间插值	13.34	6.29	5.40	8.85	5.80	4.74	37.80	1.37	1.17
遥感反演	18.50	8.38	6.67	10.31	7.57	5.98	25.33	1.34	1.07

3.2 沉积物类型的精度评价

利用 58 个实测样本分析得到的沉积物类型对空间插值与遥感反演结果进行验证, 精度评价见表 2。通过空间插值得到的 7 个粉砂质砂、47 个砂质粉砂和 4 个粉砂样本中, 分别有 5 个、44 个、2 个样本的类型与实测类型一致, 使用精度分别为 71.4%、93.6% 和 50%。在实测的 8 个、47 个和 3 个样本中, 分别有 5 个、44 个和 2 个样本的空间插值类型正确, 对应的生产者精度分别为 62.5%、93.6% 和 66.7%, 总体分类精度为 87.9%。

表 2 沉积类型的空间插值与遥感反演精度比较

Table 2 Comparison between the sediment classification results respectively from remote sensing retrieval and spatial interpolation method

沉积物类型	空间插值精度/%			遥感反演精度/%		
	使用者精度	生产者精度	总体精度	使用者精度	生产者精度	总体精度
粉砂质砂	71.4	62.5		71.5	71.5	
砂质粉砂	93.6	93.6	87.9	93.5	91.5	87.9
粉砂	50	66.7		60	75	

在遥感反演得到的 7 个粉砂质砂、46 个砂质粉砂和 5 个粉砂样本中, 分别有 5 个、43 个和 3 个样本的遥感反演类型正确, 使用精度分别达到 71.5%, 93.5% 和 60%。从实测验证点的角度来看, 对应于实测的 7 个粉砂质砂、47 个砂质粉砂和 4 个粉砂样本中, 生产者精度分别为 71.5%, 91.5% 和 75%, 并且最终的总体分类精度为 87.9%, 与空间插值获得的总体分类精度相同。

4 沉积物的空间分布特征

4.1 沉积物组分的空间分布特征

4.1.1 空间插值结果

通过对江苏射阳河口南侧研究区(见图 1)潮间带沉积物组分质量分数的克里格插值, 得到沉积物中砂质量分数(%)、粉砂质量分数(%)与粘土质量分数(%)的分布图(图 2)。由图可知, 潮沟附近及研究区潮滩南部为砂的质量分数较高的地区, 粉砂主要分布在潮间带上部和研究区潮滩北部, 成块状分布, 渐变规律不明显。

4.1.2 遥感反演结果

利用星载高光谱遥感反演获得潮滩沉积物的 3 种组分质量分数的分布图层, 较好的反映出沉积物组分的空间异质性特征。从图 3 可以看出, 砂、粉砂、粘土的空间分布具有一定的规律性。砂的质量分数较高区主要分布在中潮位以下及潮沟附近, 这是由于中潮位以下为强动力带, 堆积了潮滩上最粗的物质; 而潮沟作为海域来沙的通道, 在潮沟谷地外围形成较粗的潮沟天然堤沉积。粉砂主要分布在研究区北部潮滩和潮间带上带, 是由于潮滩上流速和含沙量由潮间下带向岸逐渐减小, 细颗粒沉积物被淤积在中潮位到高潮位之间^[15]。

4.2 沉积物类型的空间分布特征

利用空间插值和遥感反演得到的研究区潮间带表层沉积物类型解译结果见图 4。从图 4a 可以看出, 通过克里格插值法获得的沉积物类型, 多呈成块状分布, 无细节特征变化, 渐变规律不明显。遥感反演得出的沉积物类型分布具有更明显的空间变化特征(图 4b), 表现出由低潮位向岸、由潮沟向滩面, 颗粒逐渐由粗变细的趋势, 与研究区的水动力环境特征及沉积物物质来源吻合。当潮流由顺岸的滨外水道涌向潮滩时, 潮向发生变化, 向岸分量增强, 且随着潮位升高流向偏转加大, 能量被大量消耗, 平均流速降低, 细颗粒物质都被再悬浮并向海岸方向输送; 而且由于潮沟是海域来沙的通道, 促使颗粒较粗的泥沙在潮沟边缘发生沉积, 因此粉砂质砂分布于低潮位附近以及研究区中部的潮沟两侧。粉砂主要分布在潮间带上部, 这是因为植被覆盖层对水流具有明显的衰减功效, 通过改变底部潮流边界层结构、增大摩擦阻力起到了降低流速、捕捉悬沙的作用^[16]。

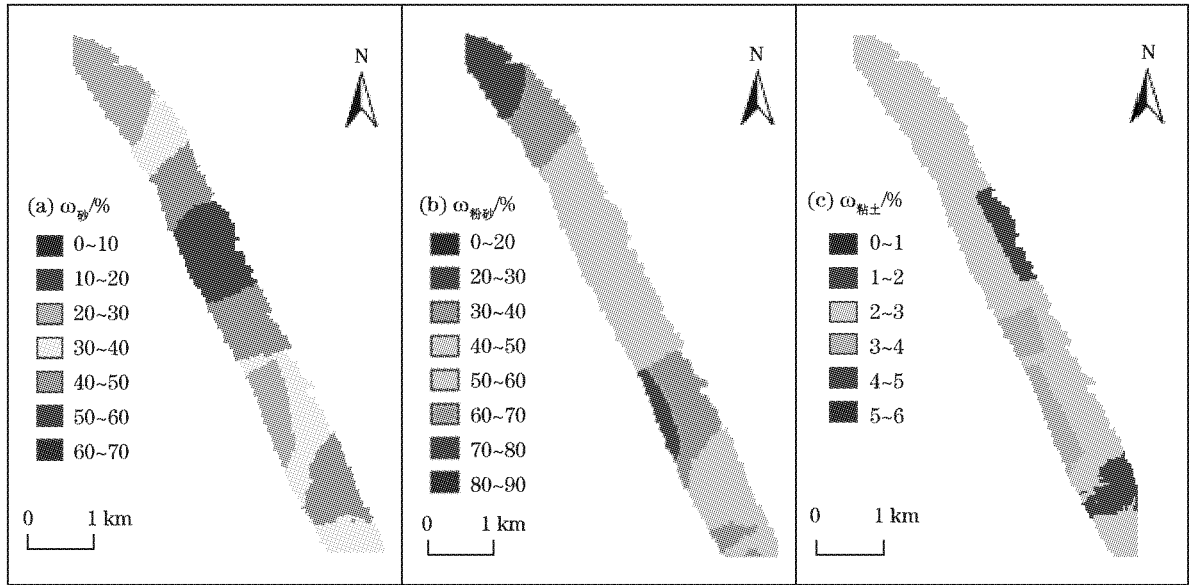


图 2 土壤组分质量分数(砂、粉砂、粘土)克里格插值结果

Fig. 2 Results of Sediment component contents (sand, silt and clay) from Kriging interpolation method

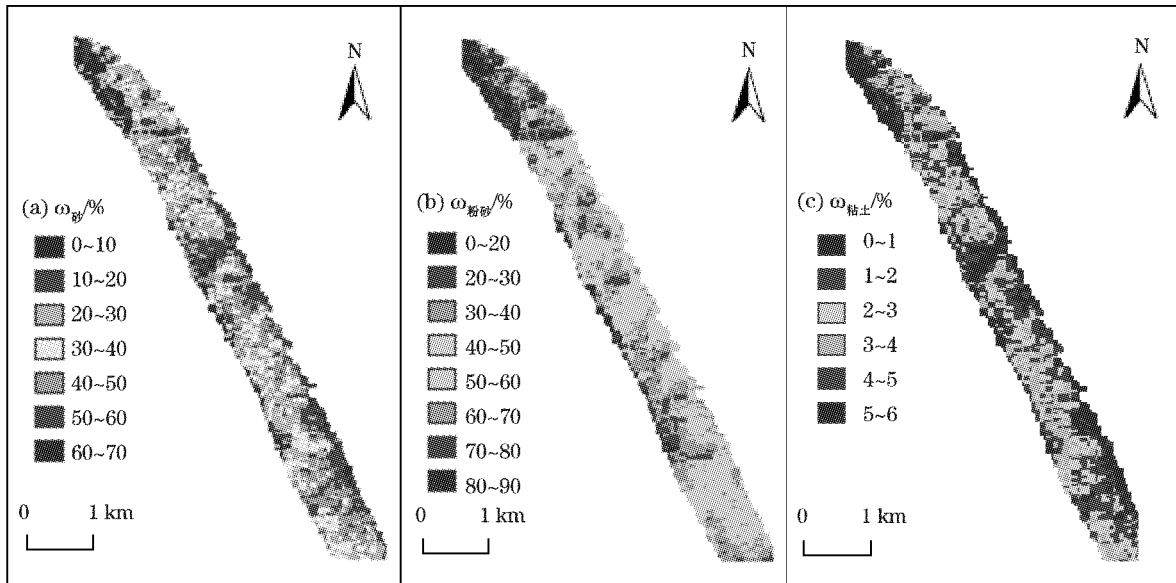


图 3 土壤组分质量分数(砂、粉砂、粘土)遥感反演结果

Fig. 3 Results of sediment component contents (sand, silt and clay) from the remote sensing retrieval

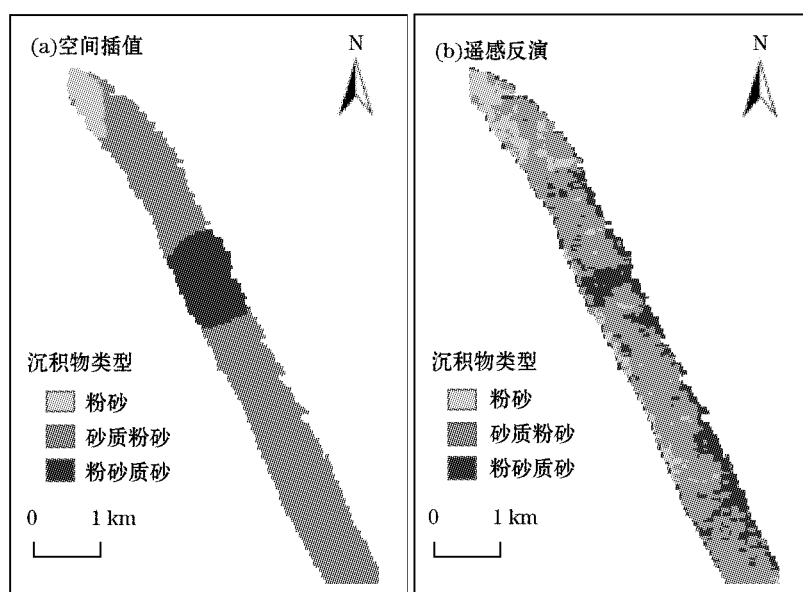


图 4 研究区潮间带表层沉积物类型分类

Fig. 4 Surface sediment distribution in the studied area of the intertidal flat

遥感反演得出的沉积物类型分布图比空间插值获得的结果具有更明显的空间变异特征,且与实际情况吻合,主要是由于空间插值是通过已知点的空间建模来拟合生成充分逼近已知要素空间分布特征的函数方程,但是由于取样、测量误差、时空尺度效应等原因,这种充分逼近不能充分反映事物正确的分布规律,一般多应用于中小范围的监测;而遥感反演通过对样本集总体规律的归纳来拟合未知点的值,可克服异常点的误差所带来的干扰,且时效性强,因此可用于快速、高效获取大中尺度范围的沉积类型的空间分布规律,为潮滩研究提供重要的数据支持。

5 结 论

1) 为得到研究区沉积物类型的空间分布特征,对采样样本的组分质量分数(砂、粉砂和粘土)分别进行克里格插值和高光谱定量遥感反演,获得逐像元砂、粉砂和粘土质量分数,得到砂、粉砂和粘土质量分数分布图层,再结合 Shepard 三角分类法确定每一栅格或像元的沉积物类型。研究区一共有 3 种沉积物类型,分别是粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂,以砂质粉砂为主。

2) 根据获得的沉积物组分质量分数与沉积物类型的精度对比,结果表明:空间插值的沉积物组分质量分数(砂、粉砂、粘土)精度普遍高于遥感反演结果,2 种方法获得的沉积物类型总体精度相同,均为 87.9%。

3) 从沉积物的空间分布来看,高光谱遥感反演得到的沉积物组分分布图能较好的反映出沉积物组分的空间异质性特征,沉积物类型的分布也更具有明显的空间变化特征,呈现出由低潮位向岸、由潮沟向滩面由粗变细的趋势,这种空间分布特征与采样点粒度分析结果所表现的趋势基本一致,能够合理的解释沉积物分布与区域地貌、动力及发育演化特征之间的关系。

4) 空间插值和遥感反演 2 种方法得到的沉积物类型总体精度相同,但遥感反演得出的沉积物类型分布图具有更明显的空间变化特征,且与研究区的水动力环境特征及沉积物物质来源吻合,因此可用于快速、高效获取大中尺度范围的沉积类型的空间分布规律,为潮滩研究提供重要的数据支持。

参考文献(References):

- [1] ZHU H Y, LIU S L, JIA S F. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements[J]. Geographical research, 2004, 23(4): 425-432. 朱会义,刘述林,贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 425-432.
- [2] LIU W D. Study on extraction of soil information and data mining by hyperspectral remote sensing[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica, 2002. 刘伟东. 高光谱遥感信息提取与挖掘研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [3] ZHANG D, ZHANG Y, LI H, et al. High resolution surface sediment type mapping using hyperspectral image and field data in muddy intertidal flat area[J]. Acta oceanologica sinica, 2008, 30(3): 62-71. 张东,张鹰,李欢,等. 基于组分反演的高光谱潮间带表层沉积物自动分类研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(3): 62-71.
- [4] ZHENG X D, ZHANG D, ZHANG Y, et al. Spatial distribution characteristics of surface sediment grain-size parameters in intertidal flat using hyperspectral remote sensing data[J]. Acta oceanologica sinica, 2009, 31(3): 57-66. 郑晓丹,张东,张鹰,等. 基于高光谱的潮间带表层沉积物粒度参数空间分布规律研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 57-66.
- [5] BRUCE W P, CAROLI A J, THOMAS R L. Mapping an invasive plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 hyperion hyperspectral sensor [J]. Remote Sensing of Environment, 2007(108): 74-81.
- [6] LI H, ZHANG D, ZHANG Y. Classification of surface sediment type in intertidal flat area by means of linear spectral unmixing technology[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(3): 382-388. 李欢,张东,张鹰. 基于线性光谱分解的潮间带表层沉积物分类[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(3): 382-388.
- [7] RAINEY M P, TYLER A N, GILVEAR D J, et al. Mapping intertidal estuarine sediment grain size distributions through airborne remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 2003(86): 480-490.
- [8] JIA J J, CHENG P, GAO S. Comparison between grain size trends derived from irregular and regular sampling grids with the help of GIS interpolation tools[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 125-141. 贾建军,程鹏,高抒. 利用插值实验分析网格对粒度趋势分析的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 135-141.
- [9] GB/T13909-1992 Specification for oceanographic survey—Marine geology and geophysics investigation[S]. Beijing: China Standard Press, 2008. GB/T13909-1992 海洋调查规范:海洋地质地球物理调查[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [10] GUO X D, FU B J, CHEN L D, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei province; Semivariogram and Kriging analysis[J]. Acta geographica sinica, 2000, 55(5): 555-565. 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征--变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555-565.
- [11] ZHANG R J, ZHOU Q, CHEN C X. Application of ordinary Kriging method in entomologic ecology[J]. Chinese journal of applied ecology, 2003, 14(1): 90-92. 张润杰,周强,陈翠贤,等. 普通克立格法在昆虫生态学中的应用[J]. 应用生态学报, 2003, 13(1): 90-92.
- [12] WU X W, YAN L M. Setting parameters and choosing optimum semivariogram models of ordinary Kriging interpolation——A case study of spatial interpolation to January average temperature of Fujian province[J]. Geo-information science, 2007, 9(3): 104-108. 吴学文,晏路明. 普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法——以福建省一月均温空间内插为例[J]. 地球信息科学, 2007, 9(3): 104-108.
- [13] WU X Q, ZHANG H Y, LI R G, et al. The application and practice of ArcGis9[M]. Beijing: Qinghua university Press, 2007: 481-517. 吴秀芹,张洪岩,李瑞改,等. ArcGis9 地理信息系统应用与实践(下册)[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 481-517.
- [14] ZHANG D, ZHANG Y, LI H. Methods for data preprocessing of hyperspectral satellite-remote sensing imagery of coastal zone[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 92-97. 张东,张鹰,李欢. 海岸带星载高光谱遥感影像预处理方法[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 92-97.
- [15] ZHU D K, KE X K, GAO S. Tidal flat sedimentation of Jiangsu coast[J]. Journal of oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1987, 4(3): 19-27. 朱大奎,柯贤坤,高抒. 江苏海岸潮滩沉积研究[J]. 黄渤海海洋, 1987, 4(3): 19-27.
- [16] GAO J H, OU W X, YANG G S, et al. Characteristics of tidal flat sediment at different ecologic zones, North Jiangsu Province[J]. Donghai Marine Science, 2005, 23(1): 40-46. 高建华,欧维新,杨桂山,等. 苏北潮滩不同生态带沉积物分布特征[J]. 东海海洋, 2005, 23(1): 40-46.

Comparison of Sediment Classification Accuracy Between Remote Sensing Retrieval and Spatial Interpolation

ZHENG Xiao-dan, ZHANG Dong, ZHANG Ying, LI Huan

(School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: The intertidal flat in the south of the sheyang River estuary is studied. The Kriging interpolation and the remote sensing retrieval are respectively employed to derive the sediment component contents in the samples from the surface of the intertidal flat and to classify the sediment types. It is shown in the results that there are 3 kinds of sediments and they are silty sand, sandy silt, and silt. Also it is learnt from the comparison between the results respectively from the two methods that the sediment component contents derived from the spatial interpolation is more accurate. The sediment classification accuracy is 87.9%, as determined by either of the two method. However the inhomogeneity of the sediment component distribution in the tidal flat can be better reflected in the sediment distribution map derived from the hyper-spectral remote sensing retrieval, and the sediment spatial distribution has better regularity in the map showing a tendency that the sedimentary grain size becomes gradually finer from the low water level to the beach and from the tidal trench to the intertidal flat surface. The tendency of the sediment spatial distribution is consistent with the results from the grain size analysis of the sedimentary in situ samples, and also consistent with the characterization of the hydrodynamic environments and with the deposited material source.

Key words: sediment types; sediment components; Kriging interpolation; remote sensing retrieval

Received: April 30, 2009