

长江口悬浮泥沙的MODIS影像遥感监测研究*

李云驹^{1,2}, 常庆瑞¹, 杨晓梅³, 刘 举¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2 黄河水利委员会 信息中心, 河南 郑州 470003;

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

[摘 要] 通过对遥感监测泥沙原理和MODIS传感器特征的分析,应用不同时间的MODIS影像进行长江口及其附近海域的悬浮泥沙监测。结果表明:(1)长江口及其附近海域悬浮泥沙含量较高,其中杭州湾悬浮泥沙浓度高于长江口;(2)长江口及其附近海域水体中的泥沙由再悬浮形成,且冬季泥沙浓度和范围均大于春季;(3)入海径流与海洋动力是影响河口沿岸及近海水域水体悬浮泥沙含量的主要因素,其中海洋动力的潮流和波浪是主导控制因素。

[关键词] 长江口; 悬浮泥沙; 遥感监测; MODIS 影像

[中图分类号] TV 148⁺. 1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)04-0117-05

我国是世界上重要的海洋大国之一,主要海域渤海、黄海、东海的绝大部分和南海的近岸部分都属于二类水体,水中悬浮大量泥沙。悬浮泥沙不仅影响河口地区港口与航道安全^[1,2],同时还是各种营养盐和污染物的重要载体,易引起赤潮等严重生态危机,河流入海泥沙量的剧烈变化还会影响并引起海岸线及滩涂明显的变化。因此,掌握河口沿岸及近海水域水体含沙量的时空分布,分析海岸冲淤变化,估算河流入海物质通量具有重要的理论和实际意义。

1972年美国Landsat-1图像显示了卫星遥感测量悬浮泥沙含量的能力。近几十年来,国际上悬浮泥沙遥感研究工作主要围绕建立悬浮泥沙遥感定量模式展开,重点是利用Landsat, SPOT和气象卫星提供的不同空间分辨率、时间分辨率及光谱分辨率的遥感影像,在有关海区结合工程和应用需求,通过现场光谱测试及准同步采样,建立悬浮泥沙遥感统计分析和反演模式^[3-5]。我国悬浮泥沙遥感研究起步于20世纪70年代中期,通过国家重点科技攻关项目和“863”计划,在长江口、杭州湾、珠江口、渤海湾和辽东湾等海区进行了长期的悬浮泥沙遥感研究,取得了一定成果^[6-10]。本研究应用高光谱成像光谱仪(MODIS)遥感数据,进行悬浮泥沙监测研究,以期为河流入海口和海岸带泥沙实时监测,以及遥感

定量模型建立积累资料 and 提供依据。

1 原理和方法

1.1 监测原理

悬浮泥沙光谱反射率具有双峰特征,如图1所示,第一反射峰位于550~670 nm,第二反射峰位于780~830 nm,当水体中悬浮泥沙含量增加时,反射波谱上的反射峰由短波向长波方向位移,即具有所谓的“红移现象”^[8,9]。光谱反射率 R_w 为一大于零的数值,并随含沙量 S 的增加而单调增加,但其增幅不同,变化率随含沙量 S 的增加而减小;当含沙量 S 较大时,光谱反射率 R_w 随含沙量 S 的增加趋于某一常量,即随着水体含沙量增加,反射率增大幅度最大的波长与反射率波谱最大峰值位置基本吻合。在含沙量较低时,第一反射峰值 R_{w1} 高于第二反射峰值 R_{w2} ;随含沙量增加,第二反射峰值 R_{w2} 逐渐升高。当悬浮泥沙颗粒较细时,随泥沙含量增加,第二反射峰值 R_{w2} 的升高速度大于第一反射峰值 R_{w1} 的升高速度,悬浮泥沙的反演就是基于这一原理。

1.2 MODIS 影像简介

MODIS是1999-12-18发射成功的对地观测系列卫星(EOS)携带的主要传感器——中分辨率成像光谱仪^[11,12],视场角 $\pm 55^\circ$;扫描宽度2 230 km,回归

* [收稿日期] 2004-06-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30170790);教育部重点科技项目(03157)

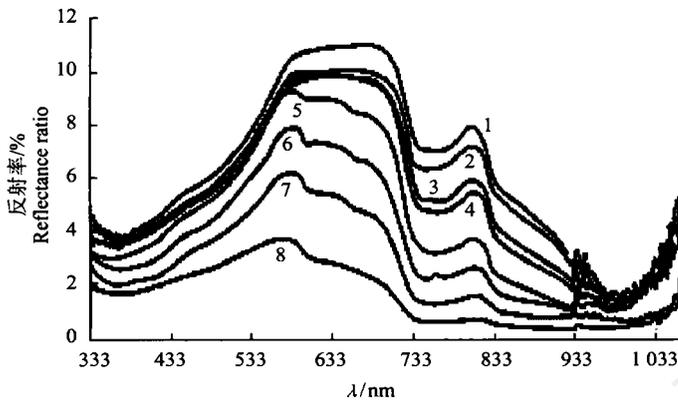
[作者简介] 李云驹(1978-),男,河南南阳人,硕士,主要从事遥感与地理信息系统研究。

[通讯作者] 常庆瑞(1959-),男,陕西子洲人,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究。

周期 1 d。MODIS 共有 36 个光谱通道, 波段范围 0.4~14 μm , 其中 2 个通道(0.62~0.67 μm , 0.841~0.876 μm)的空间分辨率为 250 m, 5 个通道(可见光、远红外)的空间分辨率为 500 m, 其余 29 个通道的空间分辨率为 1 km。能够探测和识别的地物包括: 1) 海陆表面的温度和地面火情; 2) 海洋水色, 水中沉积物和叶绿素; 3) 全球植被及其变化; 4) 云层表征; 5) 气溶胶的浓度和特性; 6) 大气温度和湿度, 雪覆盖特征; 7) 洋流。

MODIS 数据主要有 3 个特点: 第一, NASA 对

MODIS 数据实行全球免费接收的政策, 因此可以获取长期持续的、廉价实用的数据资源; 第二, MODIS 数据涉及波段范围广, 分辨率比 NOAA/AVHRR 有较大改进, 对地球科学的综合研究和陆地、大气、海洋进行分别研究有较高价值; 第三, EOS 已发射的两颗对地观测卫星都是太阳同步极轨卫星, 其中 TERRA 在上午过境, AQUA 在下午过境, 加上晚间过境数据, 每天可以得到 4 期 MODIS 遥感数据, 对实时地球观测和灾害监测有重要意义。



1. 含沙量 0.312 0 g/L Sediment concentration 0.312 0 g/L
2. 含沙量 0.238 3 g/L Sediment concentration 0.238 3 g/L
3. 含沙量 0.205 1 g/L Sediment concentration 0.205 1 g/L
4. 含沙量 0.162 0 g/L Sediment concentration 0.162 0 g/L
5. 含沙量 0.090 5 g/L Sediment concentration 0.090 5 g/L
6. 含沙量 0.071 3 g/L Sediment concentration 0.071 3 g/L
7. 含沙量 0.037 3 g/L Sediment concentration 0.037 3 g/L
8. 含沙量 0.018 7 g/L Sediment concentration 0.018 7 g/L

图 1 不同泥沙含量的光谱曲线

Fig 1 The spectral distribution curve of different sediment concentrations

1.3 监测方法

根据 MODIS 影像的波段信息和近岸水体的光谱特性, 对悬浮泥沙反映较好的波段有 1, 4, 6, 12 和 13, 泥沙在这些波段具有很强的反射, 且不同浓度泥沙之间差异较大。然而, 受大气散射和地形起伏的影响, 如果采用单通道遥感数据, 监测精度较低; 如果采用 2 个通道的遥感数据组合, 能使水体的差异更加有效地表现出来, 可较好地反映海水中悬浮泥沙分布的相对等级^[6-8,10]。由于水体在可见光波段有较高的反射率, 在红外波段的反射率较低, 且在近红外光波段的光谱反射率受水体中悬浮泥沙含量的影响不大。因此, 本研究采用 MODIS 影像通道 1 和通道 6 数据之间的差值, 即差值指数来突出海水中悬浮泥沙分布的信息:

$$DVI = R_1 - R_6,$$

式中, DVI 为差值指数; R_1 和 R_6 分别为通道 1 和通道 6 的影像灰度数据。

悬浮泥沙遥感监测的工作流程如图 2 所示。

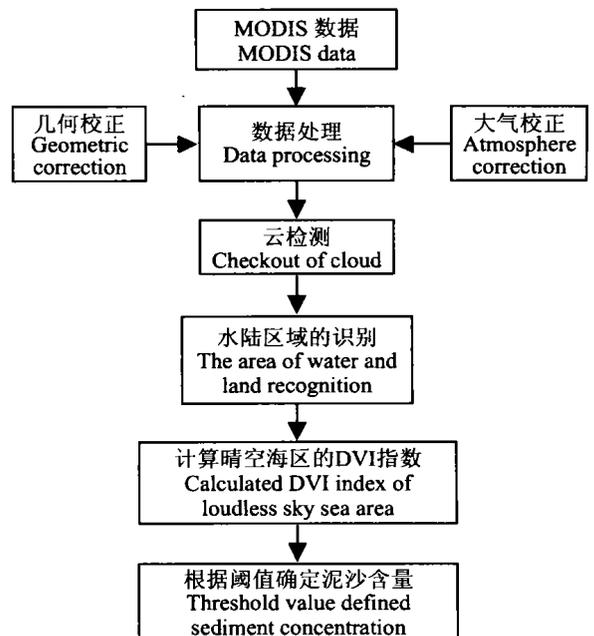


图 2 悬浮泥沙遥感监测工作流程

Fig 2 Process of RS monitoring suspended sediment

2 长江口附近海域MODIS 影像的泥沙遥感监测

2.1 长江口附近海域水文和地貌条件

长江口是一个丰水多沙的大型河口, 多年平均径流量 $29\,300\text{m}^3/\text{s}$, 最大径流量 $92\,600\text{m}^3/\text{s}$ (1954-08-01), 年径流总量达 $9\,240\text{亿}\text{m}^3$ 。每年 5~10 月是洪水期, 径流量占全年总径流量的 71.7%, 其中 7 月的径流量最大; 11 月~翌年 4 月是枯水期, 径流量仅占全年总径流量的 28.3%, 以 2 月的径流量最小^[10]。长江口是一个多汊河口, 自徐六径开始分别被崇明岛、长兴岛和横沙岛、九段沙分为南北支、南北港及南北槽, 成为三级分汊、四口入海。主要地貌类型有暗沙、拦门沙、水下三角洲和潮滩, 潮滩又可分为河口心滩(白茹沙、扁担沙、九段沙等)和边滩(南汇、崇明东滩及边滩)。

长江口是一个中等潮差河口, 位于口门处的中

浚站测得的多年平均潮差为 2.66m , 最大潮差为 4.62m , 最小潮差为 0.17m 。潮流是长江口主要的动力因子^[13, 14], 由于受地转偏向力的影响, 在口门外潮流表现为旋转流, 口门内受到地形约束多为往复流。径流同样是河口重要的动力因子, 由于径流作用, 口门内的落潮流速一般大于涨潮流速, 涨潮流上溯过程中受径流顶托及地形的阻碍使潮波变形, 造成涨落潮历时不一致, 落潮历时大于涨潮历时^[13]。长江口波浪受风力控制的特征较为明显, 波浪对开敞的河口潮滩地貌短期演变起着重要作用^[15]。

2.2 监测结果及分析

从 2002 年实时接收的 MODIS 资料中选取质量较好的 01-04 和 03-07 影像, 经过灰度拉伸处理, 选择波段 2、6 进行差值指数—DVI 运算, 根据 DVI 值划分悬浮泥沙含量等级, 得到长江口及其附近海域悬浮泥沙的空间分布(图 3)和面积统计(表 1)。

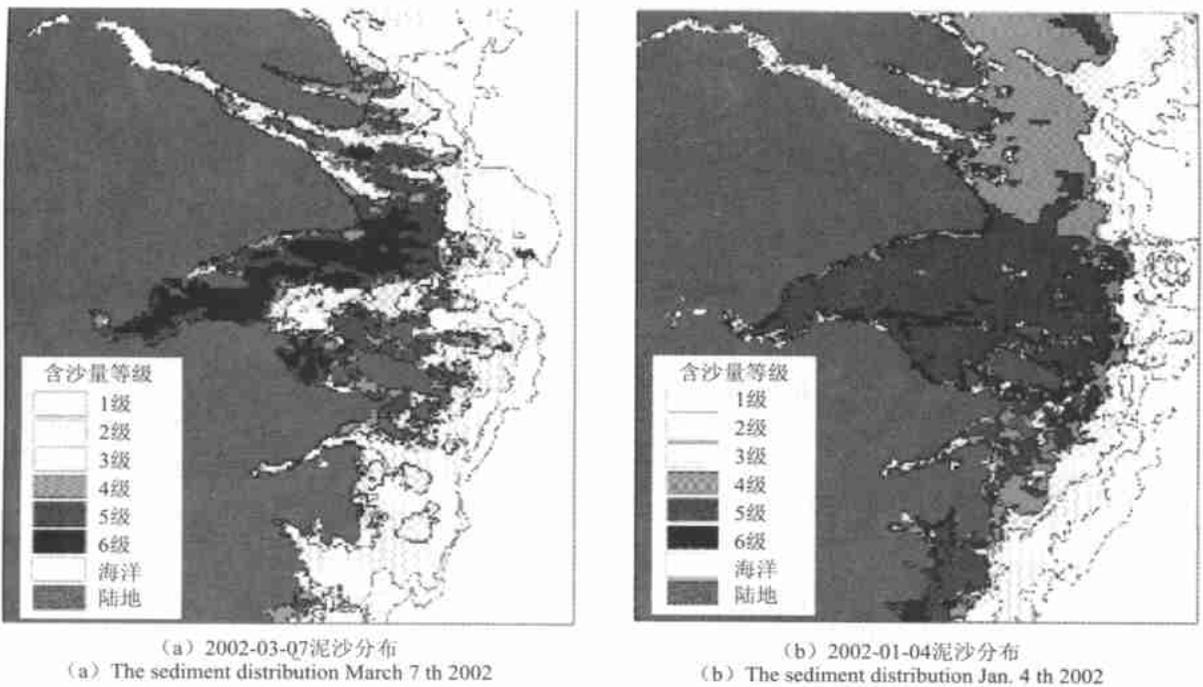


图 3 长江口附近海域泥沙分布图

Fig. 3 The distribution of suspended sediment in the yangtse river estuary and near shore zone

由图 3 可以得出: (1) 长江入海口口门附近存在泥沙最大浑浊带, 该带随洪枯季、大小潮迁移, 基本为长江口拦门沙北支、北港、北槽、南槽 4 个入海水道的核心部分。且口门附近的最大浑浊带并非近岸水域悬沙浓度最高的区域, 如横沙、余山和引水船 3 站在长江口最大浑浊带区域, 其悬沙浓度要明显低

于南侧的大俄山。(2) 长江从入海口至口外悬沙浓度不断增高, 且悬沙浓度的变幅表现为口外大于口内。由泥沙最大浑浊带向低浊度带过渡, 形成一个由入海水道向东南方向延伸的浑水舌。浑水舌的外侧发育着沿东南偏南方向延伸的浑水线, 浑水线的水平梯度以北侧为高, 向南呈减小趋势。(3) 杭州湾的悬

浮泥沙浓度很高,并且高于长江口,与两条河流入海口水文站观测的结果相一致。这是由于杭州湾的强潮性和长江口来沙的影响,使杭州湾以悬沙浓度较高而著名。

长江口及其附近海域悬浮泥沙在时间上呈现明显的季节性变化:(1)悬浮泥沙浓度冬季明显高于春

季,悬沙浓度 4 级以上($> 180 \text{ mg/L}$)面积冬季为 $122\ 994\ 36 \text{ km}^2$,春季只有 $52\ 946\ 28 \text{ km}^2$; (2)悬浮泥沙海域范围冬季远远大于春季,冬季有 $217\ 168\ 62 \text{ km}^2$,而春季有 $163\ 306\ 54 \text{ km}^2$ 。该结论与长期的地面实测泥沙资料和有关研究结果^[13, 14]相一致。

表 1 长江口附近海域悬浮泥沙含量及其动态变化

Table 1 The sediment concentration and dynamic variance in the yangtse river estuary and near shore zone

泥沙含量等级 Grade of sediment concentration	面积/ km^2 Area	
	2002-01-04	2002-03-07
1($< 60 \text{ mg/L}$)	23 663 39	29 461 76
2($60\sim 120 \text{ mg/L}$)	33 134 37	51 955 96
3($120\sim 180 \text{ mg/L}$)	37 376 50	28 942 54
4($180\sim 240 \text{ mg/L}$)	52 566 33	17 123 52
5($240\sim 300 \text{ mg/L}$)	59 758 87	20 230 85
6($> 300 \text{ mg/L}$)	10 669 16	15 591 91

3 悬浮泥沙分布机制探讨

长江口及其附近海域水体中的泥沙绝大多数由再悬浮组成,泥沙再悬浮和悬浮浓度主要受入海径流与海洋动力(风浪和潮流)强弱对比的影响和控制。

3.1 悬浮泥沙季节和周期性变化机制

长江口泥沙冬季悬浮浓度远大于夏季,并且随潮汐发生周期性变化。原因是夏季长江口主要受洪季径流控制,径流的强度大、范围广,而海洋动力相对减弱,泥沙再悬浮相对较弱;相反,冬季径流影响减弱,而海洋动力——潮流、波浪作用相对增强;另外,长江口近岸水域水深浅,风浪作用较强,波浪掀沙、潮流输沙,其中风浪的作用主要表现为对底部泥沙起掀动作用。而且冬季长江口风浪本身也较夏季强,从而表现为冬季泥沙再悬浮十分强烈,引起悬沙浓度的季节性变化。潮汐作用有大小潮的周期变化,大潮时潮流作用强劲,底部泥沙在底部剪切力的作

用下再悬浮;小潮时水流流速减小,部分泥沙落淤底床,水体中悬沙浓度降低,故悬沙浓度呈现大小潮周期变化,大潮悬沙浓度高,小潮悬沙浓度低。

3.2 悬浮泥沙空间分布形成机制

长江流域由于上游强烈的土壤侵蚀,每年都有大量泥沙源源不断地进入河流,挟带泥沙的径流出徐六径后,汇入河口及其近岸水域,水流逐渐扩展而减速,导致泥沙从水体中沉积至底床和边滩,由河口三角洲向海不断伸展。而后,主要受海洋动力(潮汐和波浪)的作用控制,泥沙被再悬浮和重新分配。在空间上,从河流入海口向口外水域径流作用逐渐减弱,而潮流作用相对增强,特别是其南侧的杭州湾为一强潮海湾,潮流作用很强,相应的悬沙浓度随径流的减弱和潮流作用的增强而增加,显示泥沙是从低悬沙浓度水域向高悬沙浓度水域输运。潮流作用的另一个特点就是涨、落潮流往复运动,悬沙浓度的变化与潮流的往复运动及其作用下的泥沙再悬浮紧密联系在一起的。

[参考文献]

- [1] 陈沈良,谷国传 杭州湾悬沙浓度变化与模拟[J]. 泥沙研究, 2000, (5): 45- 50
- [2] 张国安,虞志英,何青,等 长江口深水航道一期工程前后泥沙运动特性初步分析[J]. 泥沙研究, 2003, (6): 31- 38
- [3] Gordon H R, Clark D K, Brown J W, et al Phytoplankton pigment concentrations in the middle atlantic bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates[J]. Applied Optics, 1983, (2): 20- 36
- [4] He Q ing, Yun Caixing Preliminary study on transportation and distribution of sediment load in the Yangtze estuary[J]. International Journal of Sediment Research, 1998, 13(4): 59- 69
- [5] Su Jilan, Wang kangshan The suspended sediment balance in Changjiang Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1986, 23: 81- 98

- [6] 朱立俊, 龙玉明 辽东湾缓中海岸演变及悬沙分布特征的遥感分析[J]. 海洋工程, 2000, 18(1): 65- 73
- [7] 李四海 河口悬浮泥沙浓度 SeaWiFS 遥感定量模式研究[J]. 海洋学报, 2002, 24(2): 51- 58
- [8] 李 炎, 李 京 基于海面- 遥感器光谱反射率斜率传递现象的悬浮泥沙遥感算法[J]. 科学通报, 1999, 44(17): 1892- 1897
- [9] 陈 涛 悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 38- 43
- [10] 韩 震, 恽才兴, 蒋雪中 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究[J]. 泥沙研究, 2003, (12): 118- 121
- [11] 刘 闯, 葛成辉 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息, 2000, (3): 45- 48
- [12] 刘 闯, 葛成辉 美国对地观测系统AQUA 卫星遥感数据政策、主要技术指标与数据本土化共享问题[J]. 遥感信息, 2002, (6): 38- 42
- [13] 王 初, 贺宝根 长江河口潮滩悬浮泥沙输移规律研究进展[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2003, 32(2): 96- 100
- [14] 杨时伦, 姚炎明, 贺松林 长江口长兴、横沙岛潮滩沉积特征及其影响机制[J]. 地理学报, 1994, 49(5): 450- 456
- [15] 杨时伦 风浪开敞潮滩短期演变中的作用——以南汇东滩为例[J]. 海洋科学, 1991, (2): 59- 64

Remote sensing detection of suspended sediment in the Yangtse River Estuary by MODIS images

L I Y un - ju^{1,2}, CHANG Q ing - rui¹, YANG X iao - mei³, L I U Ju¹

(1 College of Resources and Environment, North West A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Information Center of Yellow River Water Conservancy Comm ittee, Zhengzhou, Henan 470003, China;

3 Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Remote sensing detection of suspended sediment was carried out in the Yangtse River estuary by the utility of MODIS images and analysis of principles of sediment remote sensing detection. The results show that: (1) the suspended sediment quantity of the immediate offshore area is higher, thereinto, the suspended sediment concentration of Hangzhou bay is higher than that of the Yangtse river estuary. (2) the suspended sediment in the yangtse river estuary and near shore zone come into being from resuspension, and the density and area of sediment in winter is higher than that in spring; (3) surface runoff and ocean motive are the main factors affecting the suspended sediment concentration of river estuary zone and water area near ocean, and the tide of ocean motive and wave are dominant factors

Key words: the yangtse river estuary; the suspended sediment; Remote Sensing detection; MODIS images