

基于高光谱数据的珠江口表层水体悬浮泥沙遥感反演模式

刘大召¹, 张辰光², 付东洋¹, 沈春燕¹

(1. 广东海洋大学, 广东 湛江 524088; 2. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 利用 2006 年 12 月 4 日珠江口海域实测的高光谱遥感反射率数据及悬浮泥沙质量浓度数据, 进行了该海域表层水体悬浮泥沙遥感反演模式的研究。研究表明, 悬浮泥沙质量浓度与 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_3)$ 的相关性较好, 其中 $R_{rs}(\lambda)$ 代表遥感反射率, λ 代表波长, $\lambda_1 = 762.6 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 559.09 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 772.78 \text{ nm}$, 建立了悬浮泥沙质量浓度定量遥感反演模式, 该模式的均方根误差为 4.67 mg/L , 可以用于珠江口海域的悬浮泥沙质量浓度的遥感监测。

关键词: 珠江口; 高光谱; 悬浮泥沙

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)07-0077-04

泥沙是河口海岸自然调整中的关键问题, 从河口流入的泥沙对全球生物与化学物质的循环以及碳氮等生命物质的循环有着重要的意义。每年有大量的泥沙等沉积物经河口入海, 其中水体所挟带的泥沙和各种营养元素、有机物质及污染物等对河口附近水域的生态环境有显著影响, 另外, 悬浮泥沙的质量浓度(SSC)和运移规律是河口形态和演变规律的核心问题, 了解和掌握河口悬浮泥沙的通量变化、空间分布格局、运移与沉积规律, 并结合动力过程, 可以为河口区的潜在地貌演变等提供分析依据^[1]。

国内外有关近岸 II 类水体悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式的成果比较多。大量的研究工作是借助不同的遥感数据源, 并开展同步的地面试验, 提出了基于统计经验分析法的遥感定量模式来计算水体中悬浮泥沙的质量浓度。Evlyn 等^[2]通过分析实验室水体光谱反射率和总悬浮颗粒物浓度之间的关系, 发现水体光谱反射率和悬浮颗粒之间呈线性关系, 在 $450\sim 900 \text{ nm}$ 处两者的相关性较好, 且在红波段相关性最高。Mahtaba 等^[3]利用地物光谱仪数据模拟不同 TM 波段设置对不同悬浮泥沙质量浓度的光谱反射率, 实验结果表明 TM4 波段是估测悬浮泥沙质量浓度的最佳波段, 并且利用 TM4 波段反射率建立估测悬浮泥沙质量浓度的二次回归模型, 该模型估测效果优于线性模型估测效果。许珺等^[4]通过研究发现 SPOT 的 1 波段和 2 波段对反映水体悬浮固体比较敏感, 建立了遥感影像灰度值与水中悬浮固体含量之间的相关关系。张穗等^[5]利用长江口地区的 SPOT 遥感影像, 对长江口表层悬浮泥沙质量浓度的空间分布和动态变化规律进行分析, 绘制了长江口表层水

体悬浮泥沙质量浓度分级图。

由于近岸水体的光学特性远比大洋水体复杂, 不同水色成分的吸收和散射光谱有重叠区域, 组合起来的光谱特性是非线性的、复杂多变的, 且有季节变化, 因此二类水体悬浮泥沙的通用模式和高精度的模式还没有真正建立起来。如何提高悬浮泥沙遥感探测的精度仍是众多研究水体泥沙学者的追求目标。作者在借鉴前人工作的基础上, 结合珠江口海域实测的高光谱遥感反射率数据及表层水体悬浮泥沙质量浓度数据, 提出了一种适合该海域的悬浮泥沙遥感反演模式。

1 研究的区域

珠江口是一个复合型的三角洲, 由西、北江三角洲, 东江三角洲及独流入海的潭江等小河组合而成, 面积约为 2.68 万 km^2 。在长期的径流、潮流与径流挟沙的作用下, 河汊密如蛛网, 水乡四通八达, 形成“三江汇集, 八口分流”的珠江尾间的复杂形状^[6]。珠江年平均入海径流总量在中国仅次于长江, 位居第二位, 约 3.26 km^3 , 输入口门的悬沙量约为 7098 万 t ^[7]。本文的调查研究区域如图 1 所示, 采样站位用 GPS 确定其经纬度信息。

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-05-22

基金项目: 广东省自然科学基金重点项目(06105018); 国家海洋局公益性行业科研专项(200805028); 广东海洋大学自然科学基金(1012151, 1012152)

作者简介: 刘大召(1972-), 男, 河南平顶山人, 在读博士研究生, 主要研究方向为海洋水色遥感, E-mail: llddz@163.com

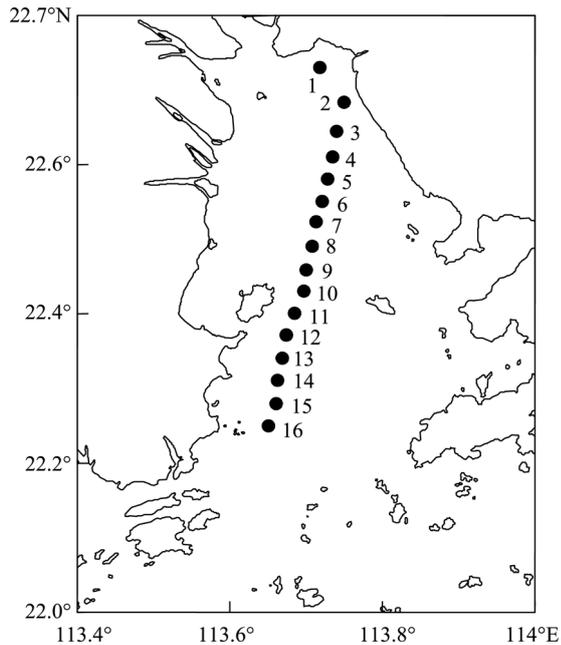


图 1 研究区域及采样点的分布

Fig. 1 Study area and the distribution of sampling points

2 光谱的测量及光谱特征分析

水体光谱的测量采用的是水面之上测量法，主要仪器是 SD2000 光谱仪，测量的时间为 2006 年 12 月 4 日 8:30 至 16:00 时，由一艘快艇自 1 号采样点到 16 号采样点穿梭进行。每个采样点至少测量 3 次，遥感反射率可用下式表示：

$$R_{rs} = \frac{L_u - L_s \rho_f}{L_p \pi / \rho_p}$$

式中， R_{rs} 代表水体的遥感反射率， ρ_f 为水面的菲涅尔反射系数，取经验值 0.02^[7]， L_u 为水面上行辐亮度， L_s 为天空光的辐亮度， L_p 为标准板的上行辐亮度， ρ_p 为标准板的反射率。测量获得的光谱分辨率为 0.38 nm，在实际应用中，需要对光谱进行重采样。在本研究中采用累加平均的方法进行光谱重采样，将原始光谱采样成光谱分辨率为 10 nm。

悬浮泥沙质量浓度的测量采用称质量法，每一采样点均采集 5 L 表层水样，在实验室中用滤膜进行过滤。在 450 °C 条件下高温煅烧 4 h 后，称无机颗粒（即悬浮泥沙）的质量，用悬浮泥沙的质量除以样品的体积即得到悬浮泥沙的质量浓度，本次实验中悬浮泥沙质量浓度范围为 7.2~42.2 mg/L。

图 2 为利用水面测量法所获取的研究区域的遥感反射率曲线。从图 2 中可以看出，随着悬浮泥沙质

量浓度的增加，反射率在可见光范围都有明显的增加，并分别于 580 nm 和 810 nm 附近形成反射峰，称为双峰现象^[8]。比较不同悬浮泥沙质量浓度的遥感反射率曲线可以看出，在 580 nm 处，水体反射率随悬浮泥沙质量浓度的增加而增加，反射率曲线能够很好地区分不同悬浮泥沙质量浓度。有学者认为第二反射峰(810 nm 附近)的反射率随着水体中悬浮泥沙质量浓度的增加而增加，并随着悬浮泥沙质量浓度的增加向短波方向移动，称为“红移”现象^[9]。

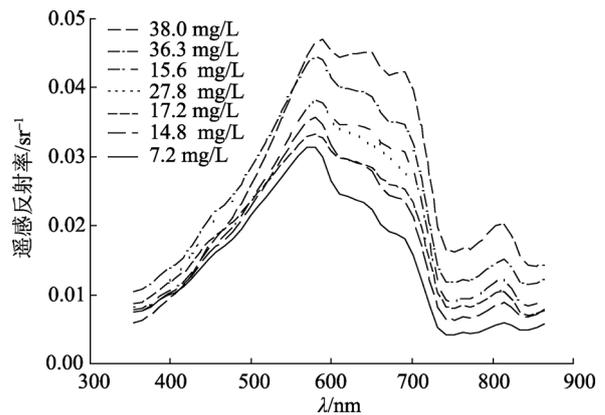


图 2 不同质量浓度的悬浮泥沙的光谱曲线

Fig. 2 Reflectance curves of suspended sediment at different concentrations

3 原理及方法

3.1 相关性分析

为了找出对悬浮泥沙敏感的波段，需要对悬浮泥沙质量浓度与光谱数据之间的相关性进行分析，结果如图 3 所示。可以看到蓝光波段(<490 nm)相关系数比较低。第一反射峰附近(580 nm)的相关系数仅为 0.33，表明该波段除了受到悬浮泥沙的影响外，也受到其他水质参数(如叶绿素、黄色物质)的强烈影响，因此利用蓝绿波段进行悬浮泥沙的反演可能会

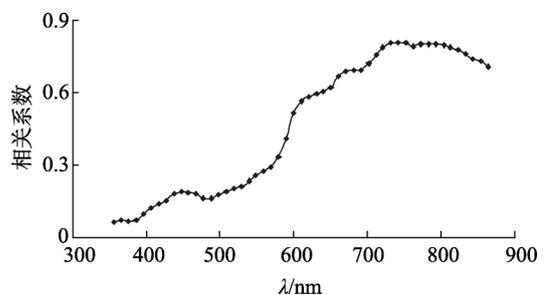


图 3 悬浮泥沙质量浓度与遥感反射率之间的相关系数

Fig. 3 Correlation between suspended sediment concentration and remote sensing reflectance

引入较大的误差。相关系数随着波长的增加而显著增加,在 742 nm 附近达到最大。在大于 750 nm 的波长范围内,由于水体的强烈吸收作用,这一部分反射光谱的变化主要是因为悬浮泥沙的散射作用造成的^[10],因此 742 nm 处的波段可以作为悬浮泥沙的敏感波段。

3.2 两波段悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式

不同波段之间的遥感反射率的比值常被用来进行悬浮泥沙的反演。根据前面的分析,中心波长为 742.25 nm 波段的遥感反射率与悬浮泥沙质量浓度的相关系数最高,可以做为一个候选波段,计算该波段遥感反射率与剩余所有波段遥感反射率的比值,利用最小二乘法建立上述比值与悬浮泥沙质量浓度的回归方程,并计算每一回归方程反演的悬浮泥沙质量浓度与实测的悬浮泥沙质量浓度的均方根误差,结果如图 4 所示。

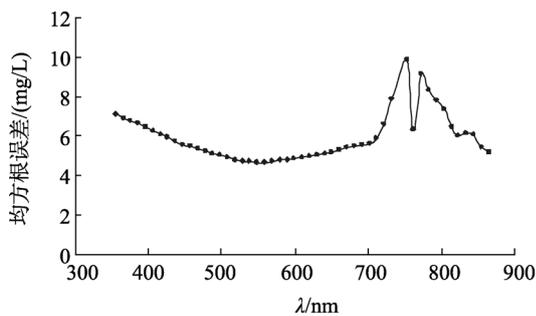


图 4 悬浮泥沙质量浓度反演值与实测值的均方根误差
Fig. 4 Root mean square errors for retrieved and measured suspended sediment concentrations at different and remote sensing reflectance

从图 4 可以看出,中心波长为 742.25 nm 波段的遥感反射率与中心波长为 548.92 nm 波段的遥感反射率比值拟合方程的悬浮泥沙质量浓度的反演值与实测值的均方根误差最小。本文利用该比值来建立悬浮泥沙质量浓度的拟合回归方程,分别采用线性、指数、幂函数和对数函数回归拟合, R^2 代表确定系数,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出所有的拟合方式中,以线性拟合的相关性最好,其他拟合方式的相关性差别不大。

3.3 三波段悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式

三波段的悬浮泥沙质量浓度的反演模式定义为 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_3)$ 。

根据前面两波段模式的分析可知,中心波长为 742.25 nm 波段的遥感反射率与中心波长为 548.92 nm

表 1 悬浮泥沙质量浓度的拟合回归方程
Tab. 1 Fitted regression equations for suspended sediment concentration

拟合方式	方程式	R^2
线性拟合	$y = 123.85x - 17.24$	0.80
指数拟合	$y = 2.63e^{6.13x}$	0.77
幂函数拟合	$y = 175.87x^{1.9}$	0.78
对数拟合	$y = 37.3\ln x + 66.37$	0.77

波段遥感反射率比值与悬浮泥沙的质量浓度有较好的相关性,选取 λ_1, λ_2 的初始值分别为 742.25 nm 和 548.92 nm,本研究中通过迭代的方法来确定第 3 个波段的中心波长,具体的思路如下:

第一步,利用最小二乘法建立 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda)$ 与悬浮泥沙质量浓度的线性回归方程,其中的 λ 的范围为 355~864 nm。根据均方根误差最小确定 λ_3 的初值为 752.43 nm。

第二步,采用类似的方法,固定 λ_1, λ_3 的值,建立 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda) - R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_3)$ 与悬浮泥沙质量浓度的线性回归方程,根据均方根误差最小确定 λ_2 的值为 559.09 nm。

第三步,固定 λ_2, λ_3 的值,建立 $R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(\lambda_3)$ 与悬浮泥沙质量浓度的线性回归方程,根据均方根误差最小确定 λ_1 的值为 762.6 nm。

重复第一步、第二步、第三步,直到模式趋于稳定,本研究中,经过 5 次回归,模式即趋于稳定,最终确定的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的值分别为: 762.6, 559.09 和 772.78 nm。

图 5 为利用迭代算法得到的珠江口悬浮泥沙质量浓度的反演模式,可以看到悬浮泥沙质量浓度与 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_3)$ 有较好相关性,三波段悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式的均方根误差为 4.45 mg/L,平均相对误差为 13.49%。三波段悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式比较充分地利用了高光谱数据各波段的信息,经过多次的迭代运算,模式趋于稳定,因此该模式具有较好的适用性。另外,该模式的反演精度接近于杨锦坤等^[11]2007 年提出的珠江口海域悬浮泥沙的反演模式(平均相对误差 12.1%),这也从另外一方面说明本文提出的模式是有效的,适合于珠江口海域悬浮泥沙质量浓度的遥感反演。

4 结论

随着悬浮泥沙质量浓度的增加,含沙水体光谱的遥感反射率在可见光范围都有明显的增加,并分

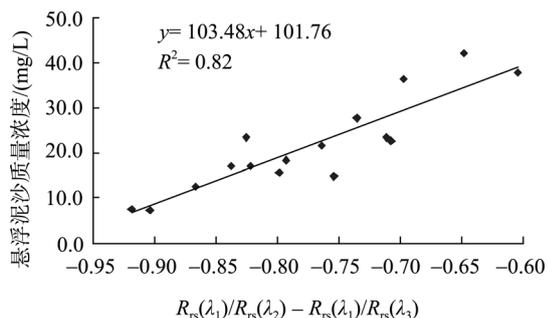


图5 三波段悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式

Fig. 5 Three-bands model for remote-sensing of suspended sediment concentration

别于 580 nm 和 810 nm 附近形成反射峰, 在 580 nm 处, 反射率曲线能够很好地区分不同悬浮泥沙质量浓度。

悬浮泥沙质量浓度与含沙水体的遥感反射率相关系数随着波长的增加而显著增加, 在 742 nm 附近达到最大。两波段悬浮泥沙质量浓度的遥感反演模式中, 以线性拟合的相关性最好。相对两波段悬浮泥沙质量浓度的遥感反演模式模式, 三波段悬浮泥沙质量浓度遥感反演模式的精度有所提高, 适用性较好。

由于实验数据的采集在冬季进行, 而冬季珠江口悬浮泥沙的质量浓度较低, 因此本文中两波段、三波段悬浮泥沙质量浓度的遥感反演模式的适用性需要做进一步的验证。

参考文献:

- [1] 王繁. 河口水体悬浮物固有光学性质及浓度遥感反演模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] Evlyn M L, Carlos A S, Claodia Z F B. Result of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids[J]. **Remote Sensing of Environment**, 1991, 36: 67-72.
- [3] Mahtaba A L, Runquist D C, Han L H, *et al.* Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance [J]. **Geocarto International**, 1998, 13(2): 11-15.
- [4] 许珺, 方红亮, 傅肃性, 等. 运用 SPOT 数据进行河流水体悬浮固体浓度的研究—以台湾淡水河为例[J]. **遥感技术与应用**, 1999, 14(4): 17-22.
- [5] 张穗, 陈慧娟, 陈鹏霄. 长江口水体表层泥沙含量遥感监测研究[J]. **长江科学院院报**, 2005, 22(5): 23-25
- [6] 严恺, 梁其荀. **海岸工程**[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [7] 邢前国. 珠江口水质高光谱反演[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2006.
- [8] 祝令亚, 王世新, 周艺, 等. 应用 MODIS 影像估测太湖水体悬浮物浓度[J]. **水科学进展**, 2007, 18(3): 444-450.
- [9] 宋召军, 黄海军, 刘芳. 南黄海辐射沙洲附近海域悬浮泥沙的遥感反演研究[J]. **高技术通讯**, 2006, 16(11): 1185-1189.
- [10] 吕恒, 李新国, 江南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型 [J] . **湖泊科学**, 2005, 17(2): 104-109.
- [11] 杨锦坤, 陈楚群. 珠江口二类水体水色三要素的优化反演 [J] . **热带海洋学报**, 2007, 26(5): 15-20.

Hyperspectral data-based remote-sensing inversion model for suspended sediment in surface waters at the Pearl River Estuary

LIU Da-zhao¹, ZHANG Chen-guang², FU Dong-yang¹, SHEN Chun-yan¹

(1. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Received: Dec., 24, 2009

Key words: the Pearl River Estuary; hyperspectral; suspended sediment

Abstract: The remote-sensing inversion model for the Pearl River Estuary suspended sediment was established using data of hyperspectral remote sensing reflectance and suspended sediment concentrations collected on December 4, 2006. We found a good correlation between suspended sediment concentrations and $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_3)$ (λ , wave length; $R_{rs}(\lambda)$ remote sensing reflectance; $\lambda_1 = 762.6$ nm; $\lambda_2 = 559.09$ nm; and $\lambda_3 = 727.8$ nm). The root mean square error of this model was 4.67 mg/L. The model can be used in the remote sensing of the suspended sediment concentrations of the Pearl River Estuary.

(本文编辑: 刘珊珊)