

文章编号: 1007-4619(2003)01-0054-04

遥感在悬浮物质浓度提取中的应用 ——以福建闽江口为例

汪小钦^{1,2}, 王钦敏¹, 鄢群勇¹, 许 2

(1. 福州大学 地球信息科学与技术研究所, 福州 350002;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 介绍了悬浮物质浓度遥感监测的一般原理, 重点介绍光谱混合分析法。利用 TM 遥感影像, 分别用光谱混合分析法和回归分析的经验模型计算了闽江口悬浮物质浓度的分布, 对结果进行了分析和对比。结果表明, 光谱混合分析法可以充分利用多波段的数据, 不需要大量的实验数据, 有较好的实用性, 能用于缺乏实测数据的区域。

关键词: 悬浮物质浓度, 光谱混合分析法, 经验模型, 近岸水体

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

水中悬浮物质(SS: Suspended Sediment)的含量是最重要的水质参数之一。SS 不仅可以作为污染物的示踪剂, 其含沙量的多少直接影响水体透明度、浑浊度、水色等光学性质, 也影响水生生态条件和河口海岸带冲淤变化过程, 对近岸工程、港口航道建设等都具有重要的意义, 是了解和管理海岸信息的重要依据。

早在 20 世纪 70 年代初 Landsat-1 刚刚发射成功, Klemas 等提出了用 MSS 遥感数据估算特拉华湾(Delawane Bay) SS 含量的统计模型^[1]。随后许多学者提出了不同模型来模拟 SS 与遥感数据的关系, 尤其在利用 NOAA/AVHRR 来获取 SS 的含量方面作了大量的工作^[2-5]。但其 1.1km 的分辨率对河口海岸带区域来说显得太粗糙, 而 TM 数据 30m 的分辨率具有较大的优势。黎夏推导出一个统一式^[6], 其形式包含了 Gordon 表达式和负指数关系式, 利用 TM 数据, 该式被应用于珠江口 SS 的遥感定量分析中。Tassan 对海岸带 SS、叶绿素、黄色物质的卫星遥感信息提取进行了深入的研究^[7,8]。在这些研究中, 一般需要地面的实测数据, 而许多区域往往缺乏实测资料, 使得这些方法无法有效地应用。Mertes 等依靠用实验室测得的不同悬浮固体浓度水体的光谱反射特征, 利用 TM 多波段影像光谱混合分析法得出

线性光谱混合模型, 用来计算亚马逊河湿地水表的悬浮固体浓度^[9]。光谱混合分析为缺乏实测数据的地区提供了一种有力的方法。

本文利用 1991-10-11 及 1998-12-17 获取的 TM 影像, 用线性光谱混合分析法提取福建闽江口的悬浮物质浓度。为了验证光谱混合分析法的适用性, 同时采用由国家海洋局第二海洋研究所及第三海洋研究所对闽江口海面悬沙调查研究所所导出的对数关系式^[10]来计算其浓度分布。

1 遥感监测悬浮物质浓度的一般原理

近岸河口海域悬沙含量较高, 水体后向散射信息较强, 在遥感影像中能很好的反映。由于水体的后向散射决定于水体分子散射、悬浮物质和藻类的后向散射。黄色物质为可溶性物质, 不具有散射能力, 但由于黄色物质对短波段有强烈的吸收作用, 可使水中下行辐射能量密度大大降低, 因而使水体的光谱反照比减少。因此, 只有在水体本身和黄色物质的吸收都很小的情况下, 才能获得比较真实的 SS 信息。水体本身对近红外波段有强烈的吸收, 最适于遥感悬浮固体的波长是 0.6—0.8 μm , 这相当于 Landsat MSS4—6 波段, TM2—4 波段, NOAA/AVHRR 的 CH1 波段, 以及各种航天航空的黑白、彩色、彩色红外影像等。这些

收稿日期: 2001-07-10; 修订日期: 2001-11-07

基金项目: 国家 863 项目资助(818-06-03)

作者简介: 汪小钦(1972—), 女, 讲师, 1994 年获南京大学大气物理学学士学位, 1997 年毕业于南京大学大气科学系, 获理学硕士学位, 现为中科院地理科学与资源研究所在读博士。主要从事环境遥感方面的研究, 已发表论文 7 篇。

影像不仅广泛地应用于海面流沙悬态的定性和半定量判读解译,而且还能根据各种理论和经验模式,获得水体含沙量的定量信息。

遥感传感器接收到的辐射亮度 L 与水体反射比 R 的关系为:

$$L = L_p + \frac{E_{ad}}{\pi} RT \quad (1)$$

式中 L_p 为大气辐射亮度, T 为大气透射比, E_{ad} 为水面上的向下辐照度,三者在同一成像条件下均可视为常数。因此,遥感悬浮物质含量 S 的关键是确定其与反射比 R 的关系。国内外多年来的研究工作主要集中在确定 R 与 S 两者之间的定量关系,在形式上主要可分为线性关系式、对数关系式、多波段关系式、Gordon 关系式等。

本文的验证模型采用由国家海洋局第二海洋研究所及第三海洋研究所对闽江口海面悬沙调查研究中所导出的对数关系式^[11]:

$$R = -0.0506081 + 0.0811637 \log S \quad (2)$$

R 为 TM 第 3 波段的反射率。

2 线性光谱混合分析法计算悬浮固体浓度原理与方法

光谱混合分析是一种像元分解的方法,将像元的光谱特征看成是各种纯净地物类型光谱特征的混合,用数学方法计算出每种纯净地物在低分辨率像元中所占的百分比。在均匀光照明、地表比较光滑的情况下,不考虑各种地物间因散射而产生的相互作用的情况下,特定区域反射光线为各种地物在视场内的反射光的线性组合,这就是线性光谱混合模型。线性光谱混合模型计算简单,已被应用于植被覆盖、岩石与土壤类型分析、水体悬浮物质浓度计算等方面。与其它方法相比,光谱混合分析法较少依赖于实测数据,并且可以充分利用特定传感器的多光谱波段数据,适用于不同悬浮固体浓度的水体。

在多光谱影像中,选取每一种纯净地物作为像元组合,每个波段像元的光谱特征可以表示为像元组分的线性组合:

$$\left. \begin{aligned} DN_b &= \sum_{i=1}^N f_i \cdot DN_{i,b} + E_b \\ \sum_{i=1}^N f_i &= 1 \\ 0 \leq f_i &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 DN_b 为像元在波段 b ($b = 1, 2, \dots, B$) 的辐射亮

度, f_i 为该像元中第 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 类组分所占的比例, $DN_{i,b}$ 为第 i 类组分在波段 b 的辐射亮度, E_b 为每个波段拟合的误差,其均方差为:

$$\epsilon = \left(B^{-1} \sum_{b=1}^B E_b^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

通过最小二乘法,使 ϵ 最小,对应的 f_i 即准确反映了各组分所占面积的比例。

在计算悬浮物质浓度时,把最小浓度值和最大浓度值作为像元分解的终端组分,把其它各像元作为是这两种成分的混合。由于终端组分只有两种,可以把以上的模型简化为:

$$\begin{aligned} R_b &= (1 - f_{\text{high}})R_{Lb} + f_{\text{high}}R_{Hb} + E_b \\ b &= 1, 2, \dots, B \end{aligned} \quad (5)$$

式中 R_b 为第 b 波段的反射率, R_{Lb} 为最小浓度值在第 b 波段的反射率, R_{Hb} 为最大浓度值在第 b 波段的反射率。令 $\frac{\partial \epsilon}{\partial f_{\text{high}}} = 0$ 则有

$$\begin{aligned} \sum_{b=1}^B [R_b - (1 - f_{\text{high}})R_{Lb} - f_{\text{high}}R_{Hb}] \cdot (R_{Lb} - R_{Hb}) &= 0 \\ \Rightarrow \sum_{b=1}^B [(R_b - R_{Lb}) \chi (R_{Lb} - R_{Hb}) + f_{\text{high}}(R_{Lb} - R_{Hb})^2] &= 0 \\ \Rightarrow f_{\text{high}} &= \frac{\sum_{b=1}^B (R_b - R_{Lb}) \chi (R_{Hb} - R_{Lb})}{\sum_{b=1}^B (R_{Hb} - R_{Lb})^2} \end{aligned} \quad (6)$$

用光谱混合分析法计算悬浮物质浓度,首先要获取不同悬浮物质浓度水体的光谱特征。由于缺少同步的实测悬浮物质浓度数据,无法从影像上获取不同浓度的光谱特征,本文采用陈涛等的现场观测的实验数据^[12],其浓度从 43.3mg/L 到 2324.8mg/L,实验区悬浮物质的中值粒径为 4—5 μm ,以粉砂质为主。据福建海洋研究所的报告^[13],福建沿海的悬浮物质的粒径均小于 15 μm ,福州沿海的中值粒径为 4—6 μm ,主要为粉砂质,与实验区的悬浮物质颗粒相近,因此采用陈涛等的实测数据^[12]。为了能反映悬浮物质浓度小于 43.3mg/L 的水体,采用 Witte 等^[9]的实验数据中的最小值 5.6mg/L。尽管 Witte 等的实验备件与陈涛等的不同,但对于悬浮物质浓度很小的水体,其反射率接近自然水体,差别不大。由于随着悬浮固体浓度的增加,最大反射波段有向长波方向移动的趋势,即 TM2 波段对低浓度变化比较敏感, TM3 波段对高浓度变化比较敏感。因此本文采用 TM2 和 TM3 的反射率数据(表 1)表 1 中除 5.6mg/L 列的数值取自文献^[9]外,其余各列均根据文献^[12]。

表 1 不同悬浮物质浓度水体的反射率

Table 1 Water reflectance of different suspended sediment concentration

悬浮固体浓度/(mg/L)		5.6	43.3	81.0	308.6	522.6	1140.4	2324.8
反射率	TM2	1.0	2.25	3.50	9.25	12.0	12.40	15.60
/%	TM3	0.80	1.50	2.50	10.20	13.0	15.60	22.0

选用最小浓度值 5.6mg/L 和最大浓度值 2324.8mg/L 作为像元分解的终端组分,分别计算出每个像元所含的高浓度成分比例 f_{high} , 就可通过线性混合知道该像元所代表的悬浮物质浓度。但是由于水体光谱反射率与悬浮物质浓度的非线性关系,随着悬浮物质含量增加,反射率的增高速度减慢,单纯地使用线性光谱混合分析模型,将高估水体悬浮固体浓度。根据表 1 中的实验数据, f_{high} 值与悬浮浓度进行回归分析,得到一条对数校正曲线:

$$f_{high} = 0.2997 \ln(0.3 \cdot S + 21.554) - 0.9807 \quad (7)$$

将由式(6)得到的 f_{high} 代入式(7),计算出悬浮物质浓度 S 值。

3 遥感影像的预处理

由于卫星传感器所接收到的信息,包含了大气、水体等多方面的信息。为了抑制其它信息,增强表征水体特征的信息,必须对 TM 数据进行预处理。预处理主要包括:大气校正、几何校正、水体提取等。其中大气校正采用目前比较成功的以辐射传输为基础的 6S 大气校正模型^[14],得到遥感影像的反射率。

4 结果分析与讨论

由线性光谱混合分析模型计算的闽江口水域悬浮物质浓度(SSC: Suspended Sediment Concentration)的分布见图版[图 1]。1991 年最大浓度为 2096.6mg/L,最小浓度为 17.8mg/L,大部分水域悬浮物质浓度小于 1000mg/L。1998 年最大浓度为 2203.6mg/L,最小浓度为 38.5mg/L,大部分水域悬浮物质浓度小于 500mg/L。在两个年份中,悬浮物质浓度较大的区域基本在闽江入海口处,离海岸越远,浓度越低。

由于没有与影像同步的实测数据,采用由经验的对数式(2)计算的闽江口水域悬浮物质浓度的分布作为对比(图版 I 图 2)。1991 年最大浓度为 2484.7mg/L,最小浓度为 27.6mg/L,大部分水域悬浮物质浓度小于 1000mg/L。1998 年最大浓度为 2226.9mg/L,最小浓度为 20.7mg/L,大部分水域悬浮固体浓度小于 500mg/L。

虽然由光谱混合分析模型的计算结果的数值与经验模型有所差别,但总体的分布趋势是一致的,各

区域所处的浓度的量级也基本一致。较大浓度区域集中在闽江入海口附近水域。1998 年的浓度与 1991 年相比,有较大幅度的降低,主要是由于中下游水口水电站的建立,截留了相当一部分的悬浮固体,使闽江下游及入海口的悬浮固体浓度降低。

以上的结果表明,在缺乏实测数据的地区,只要有适当的纯净像元的观测数据或能通过辐射转换理论计算出水体和悬浮物的光学特性,利用光谱混合分析法计算悬浮物质浓度是可行的。

5 结 论

本文介绍了悬浮物质浓度遥感监测的一般原理,重点介绍了线性光谱混合分析法提取悬浮物质浓度。利用 TM 遥感影像,对福州沿海闽江口水域的悬浮物质浓度进行了定量反演,并就线性混合法的结果和经验对数式的结果进行了对比分析。通过分析可以得出以下的一些认识:(1)在闽江口水域,悬浮物质浓度较大的区域基本在闽江入海口处,离海岸越远,浓度越低;(2)利用遥感资料可以快速、客观地反映海岸带水体悬浮物质的分布情况;(3)在缺少实测资料的地区,光谱混合分析法是一种可行的分析方法。

参 考 文 献 (References)

- [1] Klemas V, Bartlett D, Ph ilpot W *et al.* Coastal and Estuarine Studies with ERTs-1 and Skylab [J]. *Remote Sensing Envir.*, 1974, 3: 153—177.
- [2] Li J. A Study on Determination of Concentration of Suspended Solids in Water by Remote Sensing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, (2): 166—173. [李京. 水域悬浮固体含量的遥感定量研究[J]. 环境科学学报, 1986, (2): 166—173.]
- [3] Stumpf R, Pennock J. Calibration of a General Optical Equation for Remote Sensing of Suspended Sediments in a Moderately Turbid Estuary [J]. *J. Geo. Res.*, 1989, 94(C10): 14363—14371.
- [4] Li Yan, Huang Wei, Fang Ming. An Algorithm for the Retrieval of Suspended Sediment in Coastal Waters of China from AVHRR Data [J]. *Continental Shelf Res.*, 1998, 18: 487—500.
- [5] Li Y, Li J. An Algorithm for Calculating Suspended Sediments Based on the Transformation of Reflectances Ratio between Ocean Surface and Remote Sensors [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(17): 1892—1897. [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.]

- [6] Li X. A Unified Model for Calculating Suspended Sediments and its Applications in the Mouth of Pearl River[J]. *Remote Sensing of Environment*. 1992, 7(2):106—113. [黎夏. 悬浮泥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—113.]
- [7] Tassan S. An Improved In-water Algorithm for the Determination of Chlorophyll and Suspended Sediment Concentration from Thematic Mapper Data in Coastal Waters [J]. *Int. J. of Remote Sensing*, 1993, 14(6):1221—1229.
- [8] Tassan S. A Procedure to Determine the Particulate Content of Shallow Water from Thematic Mapper Data [J]. *Int. J. of Remote Sensing*, 1998, 19(3):557—562.
- [9] Mertes L A K, Smith M O, Adams J B. Estimating Suspended Sediment Concentration in Surface Waters of the Amazon River Wetlands from Landsat Images [J]. *Remote Sensing of Environ.*, 1993, 43:281—301.
- [10] Ma Ai-nai. Remote Sensing Information Models [M]. Beijing: Peking University Press, 1997. [马蔼乃. 遥感信息模型 M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.]
- [11] Lin M J. Remote Sensing Application in Ocean and Coastal Zone [M], Beijing: Ocean Press, 1991. [林敏基. 海洋与海岸带遥感应用 M]. 北京: 海洋出版社, 1991.]
- [12] Chen T, Li W, Wu S C. The Relation between Suspended Sediment Concentration and the Maximum of the Spectral Reflectance [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(1):38—43. [陈涛, 李武, 吴曙初. 悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长长红移的相关关系 J]. *海洋学报*, 1994, 16(1):38—43.]
- [13] Fujian Institute of Oceanography. Research Report of Oceanic Survey in the Middle-north of the Taiwan Strait [R]. Beijing: Science Press, 1988. [福建海洋研究所. 台湾海峡中北部海洋综合调查研究报告 R]. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [14] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview [J]. *IEEE Trans. Geosc. and Remote Sensing*, 1997, 35(3):675—686.

Estimating Suspended Sediment Concentration in Coastal Waters of Minjiang River Using Remote Sensing Images

WANG Xiao-qin^{1, 2}, WANG Qin-min¹, WU Qun-yong¹, XU Jun²

(1. Institute of Geo-Information Science and Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China ;

2. LREIS, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Backscattering in coastal waters is stronger than that in open sea because of high suspended sediment, and its information is reflected well in remote sensing images. The key to estimate suspended sediment concentration (SSC) from remote sensing images is to establish the relationship between SSC and water reflectance R . Many theoretic or empirical models have been developed for calculating SSC. But most of them need real-time survey data of SSC, which limit the use of these models.

In this paper, spectral mixing analysis method, which needs little real-time data, was introduced in detail. The pixels with minimum and maximal SSC were used as endmembers, and other pixels were regarded as the mixtures of the two endmembers. A linear spectral mixing analysis model was as followed:

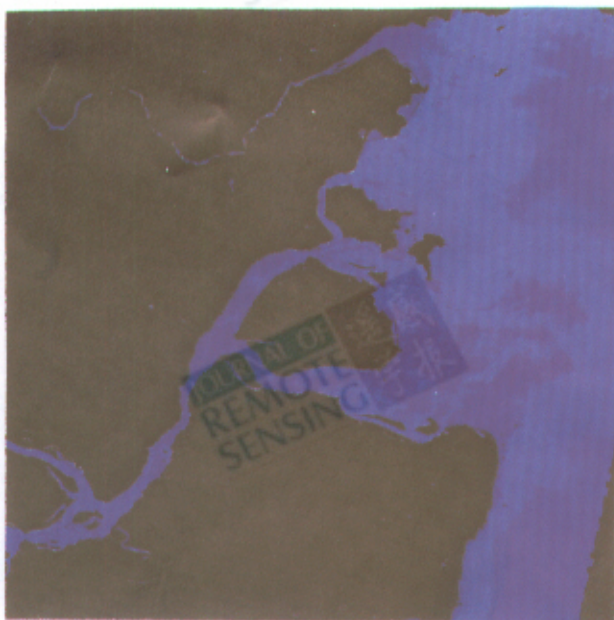
$$R_b = (1 - f_{\text{high}})R_{Lb} + f_{\text{high}}R_{Hb} + E_b \quad b = 1, 2, \dots, B$$

where R_b was the b th reflectance, R_{Lb} and R_{Hb} were the b th reflectance for minimum or maximal SSC, f_{high} was the fraction of maximal SSC, E_b was residual error and B was the number of bands. In order to get the minimum sum of E_b ($b = 1, 2, \dots, B$), the following model has been developed:

$$f_{\text{high}} = \frac{\sum_{b=1}^B (R_b - R_{Lb}) (R_{Hb} - R_{Lb})}{\sum_{b=1}^B (R_{Hb} - R_{Lb})^2}$$

Based on TM remote sensing images, the quantitative relationship between SSC and spectral reflectance was studied. The distribution of SSCs in coastal waters of Minjiang River was calculated by using spectral mixing analysis and empirical formula respectively. The results showed that (1) the high SSC regions lay in the mouth of Minjiang River, and the further from the coastal, the lower was the SSC; (2) the distribution of SSC can be estimated quickly and objectively from remote sensing images; (3) spectral mixing analysis is a good method, especially in areas lack of much measured data, for it can make full use of multi-band of images and needs less samples.

Key words: suspended sediment concentration; spectral mixing analysis; empirical model; coastal water



(a) 1991 年



(b) 1998 年

图 1 由光谱混合分析模型计算的闽江口沿海悬浮固体的浓度分布



(a) 1991 年



(b) 1998 年

图 2 由经验模型计算的闽江口水域悬浮固体的浓度分布

