

# 悬浮泥沙浓度遥感反演模型研究

张 芸<sup>1</sup>, 张 鹰, 王晶晶<sup>2</sup>

(1.江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏 南京 210046; 2.南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 对实验室固定粒径的悬浮泥沙水体的反射率光谱特征进行了分析, 选取反射率的敏感波段, 建立了遥感反射率和悬浮泥沙浓度的遥感反演模型; 同时, 又利用野外现场实测的光谱反射率和悬浮泥沙中值粒径, 建立受粒径影响的悬浮泥沙浓度反演模型。结果表明, 主成分模型的反演效果最好, 其次是幂指数模型, 而线性模型的反演效果较差。

**关键词:** 泥沙浓度; 反射率; 遥感模型

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2008) 05-0032-04

水体中悬浮物的含量是重要的水质参数, 尤其是悬浮泥沙的含量。悬浮泥沙浓度对确定水流挟沙能力和研究河口水流泥沙运动规律具有重要的作用, 对研究海岸带的水质、生态、环境以及海岸工程、港口建设等具有重要意义<sup>[1]</sup>。传统泥沙调查方法是用船进行逐点采样分析, 速度慢、周期长, 且只能获得在时间和空间分布上都很离散的少量数据, 利用遥感快速、大范围、周期短的特点, 可以实现大面积水域悬浮泥沙的动态、连续、同步的观测。应用遥感技术的关键问题在于建立遥感反射率与泥沙浓度的反演模型, 实现遥感的定量研究。

遥感的量化是通过试验的或物理的模型将遥感信息定量地反演为某些地学、生物学及大气等观测目标量<sup>[2]</sup>。国内外学者用遥感手段对悬浮泥沙展开了大量的定量研究。早在 20 世纪 70 年代, Klemas 等<sup>[3]</sup>提出了用 MSS 遥感数据估算特拉华湾悬浮泥沙含量的统计模型。Mertes 等<sup>[4]</sup>通过实验室测得悬浮泥沙的光谱反射特征, 用 TM 影像分析得出了线性光谱混合模型, 用来计算亚马逊河水表的悬浮物质浓度。近十年来, 中国学者已经日趋于遥感的定量研究。李炎、李京等<sup>[5]</sup>利用 NOAA/AVHRR、SeaWiF, 在对沿海进行大量实验的基础上, 建立了多种悬浮泥沙反演模型; 恽才兴、韩震等<sup>[6]</sup>进行悬浮泥沙反射光谱特性实验研究, 建立悬浮泥沙定量分析统计模式。尽管国内外学者在悬浮泥沙领域做了大量的研究, 仍需要进一步探讨定量模型。作者基于对悬浮泥沙水体的光谱的敏感波段分析, 利用实验室固定粒径悬浮泥沙水体的反射率和野外现

场实测的光谱反射率数据, 建立悬浮泥沙浓度的遥感反演模型。

## 1 资料获取

以江苏海安县老坝港附近的潮沟为研究采样区。老坝港岸上有广阔的滩涂地带, 岸外有辐射沙洲群, 形成了典型的被沙堆和沙滩包围的低平堆积海岸, 其物质组成多为颗粒细的淤泥物质<sup>[7]</sup>。

**实验方法:** 首先将从野外采集的泥沙样品经过筛选分级、烘干和称量后分别包装, 逐一放入定容过的器皿, 进行溶解、浸泡数日, 然后在露天进行实验。使用底部敷以黑色无光塑料布的水槽 (0.8 m × 0.8 m × 0.8 m), 按照 NASA 测量规范使用光谱仪, 测量 3 组泥沙中值粒径分别为 0.019, 0.032, 0.076 mm, 实验中水体悬浮泥沙量范围自 0.010 g/L 开始, 逐渐增加到 3.699 g/L。

**野外数据采集:** 采用 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 便携式地物光谱仪现场测得悬浮泥沙水体的反射率。利用光电测沙仪现场测得悬浮泥沙光电读数, 再将泥沙带回实验室制作标定曲线, 计算悬浮泥沙的质量浓度为 0.010~3.699 g/L。

收稿日期: 2006-04-03; 修回日期: 2008-02-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50339010); 国家“211工程”建设项目

作者简介: 张芸 (1982-), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 从事海洋遥感和地理信息系统方面研究, 电话: 13675181054, E-mail: zhangyun209@163.com

## 2 悬浮泥沙水体的光谱特征分析

### 2.1 悬浮泥沙水体的光谱特征

根据实验室对3组不同粒径泥沙光谱数据的测量,结果表明不同含沙量的水体光谱反射率是明显不同,泥沙粒径  $D_{50}=0.019\text{ mm}$  的部分浓度悬浮泥沙水体的反射率光谱曲线如图1。由图1可以得出以下结论:(1)反射率波谱具有双峰特征。悬浮泥沙水体的反射率有两个峰值:位于黄光波段(560~590 nm)的第一个峰和位于近红外波段(760~900 nm)的第二个峰。含沙量较低时,两峰都比较平坦,且第一个反射峰高于第二个反射峰,随

着含沙量的增加,第二个反射峰逐渐升高,直到高于第一个反射峰。(2)反射率波谱曲线都高于清水,且随着泥沙浓度的增加而增大,但增幅不同,反射率增幅最大的波长与反射率峰值所在的位置基本吻合。(3)第一个反射峰的“红移”现象。随着泥沙浓度的增加,第一个反射峰的峰值波长逐渐向长波方向移动,即所谓“红移”现象。当悬浮泥沙浓度达到某一值时,红移就停止。对此,不同的研究者有不同的结果,对应的泥沙浓度也不尽相同<sup>[8]</sup>。第二个反射峰的峰值稳定在800~820 nm,两反射峰之间的反射谷也稳定在730~750 nm。

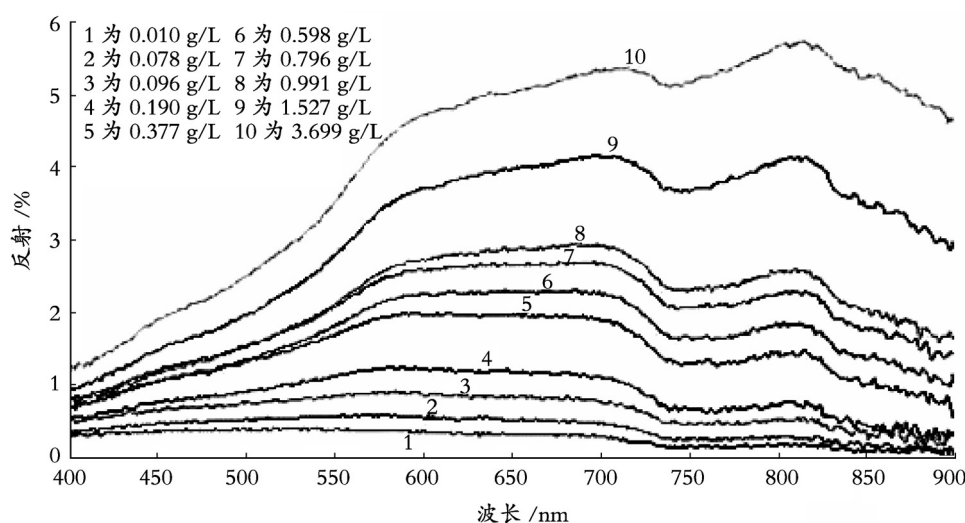


图1 不同浓度悬浮泥沙水体的反射波谱曲线

Fig.1 The reflectance curve of different SSCs

### 2.2 悬浮泥沙浓度的敏感波段

#### 2.2.1 单波段反射率与悬浮泥沙浓度的相关分析

实验结果表明,悬浮泥沙水体的浓度和各波段光谱反射率具有很好的相关性。波段在400~1 000 nm,相关系数在0.9以上的达到95.5%。其中相关性最好的波段在900~930 nm,最大相关系数为0.996 2,平均相关系数达0.989 6。

#### 2.2.2 多波段平均反射率与悬浮泥沙浓度的相关分析

由于地物光谱仪存在1 nm的波段间隔,水体反射率曲线存在一定的波动,在浓度较低时,表现尤为明显。采用一段波长反射率的平均值和悬浮泥沙浓度做相关分析可以减弱这种影响。 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 分别代表稳定的反射谷730~750 nm、稳定的第二个反射峰800~820 nm和相关性最好的波段900~930 nm反射率的平均值,与浓度作相关分析,得出相关系数分别为0.962 7、0.964 6、0.991 4。和单波段的相

关性相比,多波段相关系数并没有单波段的最大相关系数高;但单个波段的反射率难以全面地反映出不同泥沙浓度的光谱信息<sup>[9]</sup>。

## 3 悬浮泥沙反演模型的建立

鉴于泥沙颗粒大小对水体光谱反射率影响的复杂性,在建立悬浮泥沙反演模型时,先不考虑粒径大小的影响,以与海边泥沙样品粒径最接近的泥沙粒径  $D_{50}=0.032\text{ mm}$  的实验室数据,建立遥感反射率和悬浮泥沙浓度的遥感反演模型;然后利用野外现场实测的光谱反射率数据,将粒径作为其中一个因子,建立受粒径影响的悬浮泥沙浓度反演模型。

### 3.1 线性回归模型和幂指数回归模型

根据对悬浮泥沙水体的光谱特征的分析,笔者分别选取730~750, 800~820, 900~930 nm波段反射率的平均值  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  作分析。

表 1 敏感波段反射率和泥沙浓度的相关系数

Tab.1 The correlation coefficients of the optimal wavelengths of spectrum reflectance and SSC

|         | $R_1$   | $\ln R_1$ | $R_2$   | $\ln R_2$ | $R_3$   | $\ln R_3$ |
|---------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| $S$     | 0.962 7 | 0.793 3   | 0.964 6 | 0.800 2   | 0.991 4 | 0.807 4   |
| $\ln S$ | 0.902 4 | 0.994 8   | 0.897 5 | 0.992 8   | 0.836 1 | 0.973 2   |

由表 1 可知： $R_1, R_2, R_3$  与  $S$  之间具有很好的相关性，相关系数都超过了 0.962 7，其中  $R_3$  与  $S$  的相关性最好； $R_1, R_2$  与  $\ln S$  相关系数最高，分别为 0.994 8, 0.992 8。由此，建立悬浮泥沙浓度与反

射率的线性回归模型  $S=A+BR$ 、幂指数回归模型  $S=aR^b$ 。各模型的回归参数和相关系数见表 2，其中  $r$  为相关系数， $A/a, B/b$  为模型的回归系数。

表 2  $R_1, R_2, R_3$  与  $S$  线性、幂指数回归参数

Tab.2 The parameters of linear model and power model of  $R_1, R_2, R_3$  and  $S$

| 回归参数  | 线性回归模型   |         |          | 幂指数回归模型 |         |         |
|-------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|
|       | $R_1$    | $R_2$   | $R_3$    | $R_1$   | $R_2$   | $R_3$   |
| $r$   | 0.962 7  | 0.964 6 | 0.991 4  | 0.994 8 | 0.992 8 | 0.973 2 |
| $A/a$ | -0.327 8 | -0.303  | -0.100 8 | 267.11  | 232.15  | 120.29  |
| $B/b$ | 64.984   | 58.775  | 81.302   | 1.490 5 | 1.486 2 | 1.133 6 |

### 3.2 主成分回归模型

主成分分析是把原来多个变量转为少数几个综合指标的一种统计分析方法<sup>[10]</sup>，各指标尽可能多地反映原来的信息，同时指标间又是相互独立的。设变量  $R_1(\lambda), R_2(\lambda), \dots, R_m(\lambda)$  代表多通道悬浮泥沙水体反射率（测得的反射率波段为 400~950 nm，因而本文中  $m=551$ ），每个反射率都有几个测量值，则反射率数据可表示为  $r_{ij}(\lambda), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ （本文中  $n$  取 10），写成矩阵形式  $R=(r_{ij})$ 。将  $R$  矩阵做主成分分析，最终获得多通道反射率数据的主成分为：

$$Z = \bar{V}R, Z = (Z_{ij}), \\ i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$$

式中  $\bar{V}^T$  为特征向量矩阵  $V$  的转置矩阵。经过主成分分析以后，多通道悬浮泥沙水体反射光谱信息就集中在前面少数几个新的主成分上，且新主成分  $Z_i$  彼此正交。

计算结果得到 551 个成分，其中前 3 个主成分的方差贡献率分别为 0.994 5, 0.005 3 和 0.000 1，第一个主分量已能反映反射光谱信息的 99.45 %，

前 3 个主成分累积能反映 99.99 % 的信息。

将前 3 个主成分  $Z_1, Z_2, Z_3$  建立线性、对数、指数、多项式等回归模型。通过比较模型拟合的相关系数和实际悬浮泥沙浓度相对于拟合曲线的分布状况，线性回归方程具有较好的拟合效果，相关系数为 0.997 1，回归方程如下：

$$S = 0.865 + 0.066Z_1 + 0.261Z_2 + 1.083Z_3$$

### 3.3 粒径影响的悬浮泥沙浓度反演模型

在实际情况下，泥沙粒径大小对光谱的反射率具有重要的影响，光谱的特征规律：在浓度一定的情况下，悬浮泥沙水体的反射率和粒径是负相关的关系；在相同的粒径条件下，反射率随泥沙浓度的增大而增大。作者敏感波段 730~750, 800~820, 900~930 nm 反射率的平均值，构建变量  $T=Rd$ ，其中  $d$  为泥沙的中值粒径， $R$  为敏感波段反射率的平均值，来建立受泥沙粒径影响的悬浮泥沙浓度反演模型。建立的模型分别为线性模型  $S=A+BT$ 、幂指数模型  $S=aR^b$ ，各模型的回归参数和相关系数见表 3。

表 3  $T_1, T_2, T_3$  与  $S$  线性、幂指数回归参数

Tab.3 The parameters of linear model and power model of  $T_1, T_2, T_3$  and  $S$

| 回归参数  | 线性回归模型    |          |         | 幂指数回归模型 |         |         |
|-------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|
|       | $T_1$     | $T_2$    | $T_3$   | $T_1$   | $T_2$   | $T_3$   |
| $r$   | 0.947 0   | 0.949 7  | 0.956 9 | 0.975 3 | 0.977 3 | 0.981 4 |
| $A/a$ | 924.85    | 835.85   | 1 217.3 | 6 358.2 | 4 426.9 | 1 095.1 |
| $B/b$ | -0.024 27 | -0.010 3 | 0.072 1 | 1.274 6 | 1.237 2 | 0.967 7 |

由表 2 可知,在线性回归模型中,  $R_3$  与  $S$  的相关性最好;在幂指数回归模型中,  $R_1$ ,  $R_2$  与  $S$  反演效果都要比线性方程好,其中  $R_1$  与  $S$  的反演效果最好。考虑粒径的影响,由表 4 可知:在线性回归模型中,  $T_3$  与  $S$  的相关性较好;在幂指数回归模型中,  $T_6$  与  $S$  的相关性较好。比较表 2 和表 3,可以发现考虑粒径影响的线性、幂指数模型反演效果总体上要比固定粒径的模型低。

### 3.4 悬浮泥沙反演模型的检验

在对线性、幂指数、主成分模型的敏感波段分析后,笔者选取线性回归模型( $R_3$ )、幂指数回归模型( $R_1$ )、主成分回归模型( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ )、线性回归模型( $T_3$ )、幂指数回归模型( $T_3$ )进行历史样本拟合检验,并计算了泥沙浓度拟合值和实测值之间的平均绝对误差和相对误差。结果表明:各模型的平均相对误差分别为 51.27%, 12.99%, 9.83%, 21.83%, 14.43%。主成分回归模型( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ )的反演效果最好,其次为幂指数回归( $T_3$ )。两个线性回归模型反演效果较差,平均相对误差很大,其中最大平均误差达 51.27%。

## 4 结论

悬浮泥沙水体的反射率波谱曲线的敏感波段范围是 730~750, 800~820, 900~950 nm。

线性模型的最敏感波段在大于 900 nm 的近红外波段,悬浮泥沙浓度和遥感反射率的相关系数在 900~950 nm 最高。虽然相关系数最大,但是线性模型的反演效果远不如幂指数和主成分模型好,误差很大。

幂指数模型采用可见光红光波段的 730~750 nm 的反射率效果较好,固定粒径时平均相对误差低于 13%。

由于主成分分析法能很好的获取多通道悬浮泥沙水体光谱反射率信息,模型的反演能力优于敏感波段模型。利用主成分分析方法结合多元线性回归,固定粒径的情况下,可以精确地估算泥沙含量,模型反演的值和实测值的平均相对误差仅为 9.83%。

根据以上的分析可知,在本实验所有的反演模

型中,主成分分析模型的反演效果最好,紧接着是幂指数模型,而线性模型的反演精度最差。考虑粒径的影响后,模型的反演精度都有所下降,主要原因是:实验室测量的数据是水体泥沙的光谱反射率,野外现场实测的水体悬浮泥沙发射率包含叶绿素、叶黄素、各种营养成分等其它信息。

### 参考文献:

- [1] 汪小钦,陈崇成.遥感在近岸海洋环境监测中的应用[J]. 海洋环境科学,2000,19(4):72-76.
- [2] 赵书河,冯学智.海洋遥感应用研究现状及展望[J]. 海洋科学,2002,25(9):29-30.
- [3] Klemas V, Bartlett D, Philpot W, *et al* .Coastal and estuarine studies with ERTs21 and Skylab[J].*Remote Sensing Envir* ,1974,3:153-177.
- [4] 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 Envir*, 1993, 43: 281-301.
- [5] 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):1 892-1 897.
- [6] 韩震,恽才兴,蒋雪中.悬浮泥沙反射光谱特性实验研究[J].水利学报,2003,12:118-121.
- [7] 单树模,王庭愧,金其铭.江苏省地理[M].南京:江苏教育出版社,1986.
- [8] 陈涛,李武,吴曙初.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):38-44.
- [9] 李四海,恽才兴.河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J].遥感学报,2001,5(2):154-161.
- [10] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,1996.84-92.

(下转第 56 页)

(上接第35页)

# Analysis on the sensing model of suspended sediment concentrations

ZHAGN Yun<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, WANG Jing-jing<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Environmental Evolvment and Ecological Construction in Jiangsu, Nanjing 210097,China;  
2.International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093,China)

**Received:** Apr., 3, 2006

**Key words:** suspended sediment concentration (SSC); reflectance; sensing model

**Abstract:** The characteristics of reflected spectrum of suspended sediments in laboratory with a given size are analyzed, optimal wavelengths of spectrum reflectance are selected and the quantitative sensing model for reflectivity and SSC is established. Including the field measured reflectance and the median diameter ( $D_{50}$ ) of sediments, a quantitative remote sensing model for the prediction of SSC is established. The result suggests that the principle component model shows the best precision and the power model is much better than the linear model.

( 本文编辑: 刘珊珊 )