

悬浮泥沙定量遥感综合模式及其在珠江口的应用^{*}

刘小平, 邓孺孺, 彭晓鹏
(中山大学遥感中心, 广东 广州 510275)

摘要: 从太阳光在水体中传输的物理机制入手, 引入水体光学厚度概念, 根据辐射传输理论, 推导出悬浮泥沙定量遥感的综合模式, 该模式具有明确清晰的物理意义。并且该模式在条件简化下几乎包含了前人所推导的所有半经验模式, 包括线性模式、对数模式、Gordon 模式、负指数模式、统一模式。将该模式应用于珠江入海口水域的悬浮泥沙调查与监测中, 取得了不错的效果。

关键词: 悬浮泥沙; 定量遥感; 模式; 珠江口

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 03-0109-05

河口水域悬浮泥沙浓度分布受流场与潮汐的影响, 变化较大。实地测量泥沙浓度只能取有限的几个点。难以获取大范围面积内泥沙浓度分布的情况。如果应用遥感手段则可以大范围、直观的反映水体泥沙分布情况。另外, 遥感数据也可以实时地反映水体信息, 从而可以分析泥沙分布的动态变化规律。这为港口工程的选址、港湾环境的监测、航道的治理提供了科学的依据。

水的反射特性很复杂, 它包含水表面的镜面反射、水体反射和水底反射。水体反射与水底反射合称离水辐亮度。离水辐亮度包含了水的信息, 它与水体中组份的种类、含量有关。不同组份对光谱的影响不一, 污染物使水体的吸收率增大, 水中悬浮泥沙使水散射率显著增大, 叶绿素使可见波段吸收率增大、红外波段反射率增高。正是由于离水辐亮度反映了水体中悬浮泥沙和其它组份的信息, 因此可用来反演悬浮泥沙浓度。

已有的实测数据和研究表明^[1], 含沙水体对太阳辐射光谱的反射率 R_w 与水体的悬沙浓度 S 有着非常密切的关系, R_w 随着 S 的变化有 3 个特征:

(1) R_w 随着 S 的增加而增加, 即 $dR_w/dS > 0$ 。

(2) 变化率 dR_w/dS 并不是一个常量, 而是随着 S 的增加而减小, 即 $d^2R_w/dS^2 < 0$ 。

(3) $S=0$ 时, R_w 为一个大于 0 的常数, S 较大时, R_w 随着 S 的增加而迅速趋向于小于 1 的极值。即 $\lim_{S \rightarrow \infty} R_w(S) < 1$ 。

不同含沙量水体的反射率峰值都约在 0.60 μm 波长处, 之后, 随着波长的增加, 反射率逐渐减小并趋于平坦。至红外波段处 (TM5、TM7), 由于水体的强烈吸收, 反射率接近于 0, 这样每个波段减去 TM5 可消除水面镜面反射光的影响。

1 研究现状及存在的问题

已有的悬浮泥沙遥感定量模式一般都是半理论半经验的, 即从理论出发, 推导出一定的数学模式, 再由实测数据来确定和验证参数^[2]。其中最具有代表性, 应用最为广泛的有下面几种:

(1) 线性模式^[3]

$$R_w = a + bS \quad (1)$$

其中, R_w 为水体反射率, S 为水面悬浮泥沙浓度, a , b 为待定系数。此式应用得最早, 也最简单, 比较粗略, 只适用于低浓度的悬浮泥沙水体。

(2) 对数模式^[3]

$$R_w = a + b \lg S \quad (2)$$

在悬沙浓度不高的情况下, 该式能真实的反映悬沙浓度和卫星数据的关系, 而且形式简单, 计算方便, 因此得到了广泛应用。我国的大多数河流含沙量高, 因此不适合。

(3) Gordon 模式^[4]

$$R_w = c + S/(a + bS) \quad (3)$$

$$\text{或 } 1/(R_w - c) = b + a/S$$

该式根据准单散射近似公式得到, 适用区间包

* 收稿日期: 2004-04-01

基金项目: 国家 973 项目子课题 (G2000077903-8); 国家“985 工程”基金资助项目

作者简介: 刘小平 (1978 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 邓孺孺, E-mail: eesdr@zsu.edu.cn

括低含沙量和高含沙量区, 但试验表明该式不如对数关系式精度高, 因而没有得到普遍的应用。

(4) 负指数模式^[5]

$$R_w = a + b(L - \exp(-cS)) \text{ 或}$$
$$\ln(c - R_w) = a + bS \quad (4)$$

该式在很大程度上克服了估算误差随悬浮沙浓度增大而增加的弱点, 并可以近似地概括线性和对数关系式。但由于式中采用了一些近似条件, 也有一定的缺陷。

(5) 统一模式^[9]

$$L = \text{Gordon}(S) \text{ Index}(S) =$$
$$A + B[S/(G + S)] + C[S/(G + S)]e^{-DS} \quad (5)$$

此模式在一定条件下包含了 Gordon 式和负指数式实验证明, 该模式效果最好。

物理模型是根据水体反射光谱产生的物理过程, 建立悬浮泥沙浓度和水体反射光谱之间的关系模型。物理模型相对于经验半经验模型有较为明显的优势: 物理模型具有普适性, 能适用于不同的地区。采用多波段数据, 信息量丰富, 全面考虑了水体各组分对反射光谱的影响。此外, 物理模型并不需要遥感数据的同步实测数据, 而同步实测数据的获取需要花费大量的人力、物力。本文在文献 [7] 的水污染物理模型的基础上, 考虑不同颗粒大小的悬浮泥沙对水体反射光谱的影响, 提出了悬浮泥沙定量遥感综合模式。

2 基于物理机制的悬浮泥沙定量遥感综合模式

2.1 模式原理及推理

太阳光在含沙水体中传输时, 如果悬浮泥沙颗粒较小, 会与其发生散射作用; 如果悬浮泥沙颗粒较大, 则主要与悬沙发生反射作用。因此, 遥感器接收到的离水辐亮度 $L_{wo}(\lambda)$ 应包括 3 部分: 水中散射光、水中反射光、和水底反射光, 表达为:

$$L_{wo}(\lambda) = L_s(\lambda) + L_g(\lambda) + L_b(\lambda) \quad (6)$$

其中, L_s 为水中散射光, L_g 为水中反射光, L_b 为水底反射光。太阳光在水体中散射的物理机制其实与太阳光在大气中散射的物理机制几乎一样, 因此引入水体光学厚度 $\tau_w(\lambda)$ 概念。假设水体介质为均匀一致 (即消光系数恒定), 仿照大气光学厚度概念可知, 水体垂直光学厚度 $\tau_w(\lambda) = (\alpha + \beta)h$; 沿太阳光入射方向的水体光学厚度 $\tau_w(\lambda) = (\alpha + \beta)h/\cos\theta$ 。其中, $\alpha = \alpha_w + S\alpha_s + D_u\alpha_u$ 为水体总的吸收系数, 等于水分子、悬浮泥沙、污染物的吸收系数之和, α_w 、 α_s 、 α_u 分别为水体、悬

浮泥沙、污染物的吸收系数; S 、 D_u 分别为水中悬浮泥沙浓度和污染物浓度。 $\beta = \beta_w + \varnothing\beta_s + D_u\beta_u$ 为水体总的散射系数, β_w 、 β_s 、 β_u 分别为水分子、悬浮泥沙、污染物的散射系数, $\varnothing$ 为较细悬浮泥沙的比例因子。在这里暂不考虑叶绿素对太阳光谱的影响, 因为珠江入口的叶绿素含量相当有限。则在水深 h 处, 太阳光在水体垂直方向的透过率 $T(\lambda) = e^{-\tau_w(\lambda)} = e^{-(\alpha + \beta)h}$, 入射方向的透过率 $T'(\lambda) = e^{-\tau_w(\lambda)} = e^{-(\alpha + \beta)h/\cos\theta}$ 。如果只考虑一次散射, 水深 h 处的薄层水的散射对离水辐亮度的贡献为:

$$dL_s = \frac{E_0 \cos \theta T' \bar{\omega}(\theta) T dh}{4\pi}$$
$$\frac{E_0 \cos \theta \bar{\omega}(\theta)}{4\pi} e^{-(\alpha + \beta)uh} dh \quad (7)$$

其中, $\bar{\omega}(\theta) = \beta_w P_w(\theta) + \varnothing\beta_s P_s(\theta) + D_u\beta_u P_u(\theta)$, $u = 1 + 1/\cos\theta$, $P_w(\theta)$ 、 $P_s(\theta)$ 、 $P_u(\theta)$ 分别为水体、悬浮泥沙、水体污染物的相函数。根据反射光谱的物理机制, 水深 h 处的薄层水的反射对离水辐亮度的贡献为:

$$dL_g = \frac{E_0 \cos \theta T' C (1 - \varnothing) R_s S T dh}{\pi}$$
$$\frac{E_0 \cos \theta C (1 - \varnothing) R_s S}{\pi} e^{-(\alpha + \beta)uh} dh \quad (8)$$

其中 R_s 为泥沙在陆地上的反射率, C 为泥沙在水中反射率增加倍率。

联合式 (7)、式 (8) 可得,

$$L_s + L_g =$$
$$\int_0^H \frac{E_0 \cos \theta \bar{\omega}(\theta) + 4C(1 - \varnothing) R_s S}{4\pi} e^{-(\alpha + \beta)uh} dh =$$
$$\frac{E_0 \cos \theta \bar{\omega}(\theta) + 4C R_s (1 - \varnothing) S}{4\pi u (\alpha + \beta)} [1 - e^{-(\alpha + \beta)uH}] \quad (9)$$

其中, H 为水体的深度。同样, 依据反射光谱物理机制, 可求得水底反射光为

$$L_b(\lambda) = \frac{E_0 \cos \theta R_b}{\pi} e^{-(\alpha + \beta)uH} \quad (10)$$

其中, R_b 为水底反射率, 将式 (9)、(10) 代入式 (6) 中, 即可求出离水辐亮度

$$L_{wo} = \frac{E_0 \cos \theta \bar{\omega}(\theta) + 4C(1 - \varnothing) R_s S}{4\pi u (\alpha + \beta)} [1 - e^{-(\alpha + \beta)uH}] +$$
$$\frac{E_0 \cos \theta R_b}{\pi} e^{-(\alpha + \beta)uH}$$

则水体的出水反射率可表示为

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{L_{wo}(\lambda) \pi}{E_0 \cos \theta} =$$
$$\frac{\bar{\omega}(\theta) + 4C R_s (1 - \varnothing) S}{4u (\alpha + \beta)} [1 - e^{-(\alpha + \beta)uH}] + R_b e^{-(\alpha + \beta)uH} \quad (11)$$

式 (11) 即为所求得的悬浮泥沙定量遥感综合模式, 但方程式过于复杂, 难以方便求解。为提高模

式的实用性，可根据研究水域的具体情况进行简化和改进。

2.2 定量遥感综合模式与其它模式的关系

所有的悬浮泥沙半经验模式都简化了太阳光在水中辐射传输的条件，都没有考虑水体污染物对太阳光的影响等，综合模式在简化条件下几乎包括了所有的半经验模式。

2.2.1 综合模式与 Gordon 式的关系 当不考虑透视深度时，即 $H \rightarrow \infty^+$ ，不考虑悬浮泥沙的反射，且不考虑污染物对太阳光谱的影响，则式 (11) 可简化为：

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{\beta_w P_w(\theta) + S \beta_s P_s(\theta)}{4u(\alpha_w + \beta_w + S \beta_s)} \tag{12}$$

式中， $\beta_w P_w(\theta)$ 、 $\beta_s P_s(\theta)$ 、 u 、 $\alpha_w + \beta_w$ 都为实测常数，因此式 (12) 可以简化为

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{\alpha + bS}{c + dS}$$

与式 (3) 相比可以看出，此即为 Gordon 关系式。

2.2.2 综合模式与统一模式的关系 当不考虑污染物的影响，不考虑悬浮泥沙的反射，且不考虑水底反射光时，则式 (11) 可简化为：

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{\beta_w P_w(\theta)}{4u(\alpha_w + \beta_w + S \beta_s)} [1 - e^{-(\alpha_w + \beta_w + S \beta_s)uH}] \tag{13}$$

式中， $\beta_w P_w(\theta)$ 、 $\beta_s P_s(\theta)$ 、 u 、 $\alpha_w + \beta_w$ 都为实测常数，因此式 (13) 可以简化为：

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{a + bS}{c + dS} [1 - ne^{-kS}]$$

其中 a 、 b 、 c 、 d 、 n 、 k 皆为常数，与式 (5) 相比较，可以看出此即为统一模式。

2.2.3 综合模式与负指数模式的关系 当不考虑污染物的影响，不考虑悬浮泥沙的反射，不考虑水体本身的吸收和散射，且不考虑水底反射光时，则式 (11) 可简化为： $R_{wo}(\lambda) = a [1 - ne^{-kS}]$ ，此式恰好与负指数模式相符。由此可见，线性模式和对数模式也可以由负指数模式进一步简化所得^[5] 综合模式在一定条件下包括了所有的半经验模式。

3 模式的简化及其在珠江口悬沙浑浊度提取中的应用

3.1 模式的简化

本文选取珠江口 1998 年 12 月 22 日的 LANDSAT5 TM 影像，对水体悬浮泥沙进行遥感分

析。珠江口基本情况：珠江入海口水域的泥沙浑浊度较高，污染物浓度较大，叶绿素浓度较小，因此本水域对离水反射率产生重要影响的主要是水中悬浮泥沙和污染物，叶绿素等其它物质因含量有限而影响不大，可忽略。由于珠江入海口水域的泥沙浑浊度较高，污染也较严重，水体对入射光的消光作用明显，光在水中被强烈散射、吸收。在水深 $> 2\text{ m}$ 处，获取的入射辐射能极其微弱，可忽略不计，相当于水深趋于无穷大： $H \rightarrow \infty^+$ ，所以有： $e^{-(\alpha + \beta)uH} \rightarrow 0$ 。只考虑悬浮泥沙、污染物的影响，则本地区的悬浮泥沙遥感模式可简化为：

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{\bar{\omega}(\theta) + 4CR_s(1 - \bar{\omega})S}{4u(\alpha + \beta)} = \frac{\beta_w P_w(\theta) + S \beta_s P_s(\theta) + D \beta_u P_u(\theta) + 4CR_s(1 - \bar{\omega})S}{4u(\alpha_w + S \alpha_s + D_u \alpha_u + \beta_w + S \beta_s + D_u \beta_u)} \tag{14}$$

由于研究区水中污染物以化学污染物为主，对水体光谱的影响以吸收为主，对水体散射性质影响不大，其散射性质与水比较接近；而悬浮泥沙对水体光谱的影响则以散射为主。因此忽略污染物的散射、悬浮泥沙的吸收作用，模式可进一步简化为：

$$R_{wo}(\lambda) = \frac{\beta_w P_w(\theta) + S \beta_s P_s(\theta) + 4CR_s(1 - \bar{\omega})S}{4u(\alpha_w + D_u \alpha_u + \beta_w + S \beta_s)} \tag{15}$$

式 (15) 中， $R_{wo}(\lambda)$ 可从经过辐射定标、大气校正和去除水体镜面反射光影响并转化为反射率的影像上获得；水分子、悬浮泥沙及污染物的散射率、吸收率及相函数都可以从实测中得到；因此，式 (15) 中只有悬浮泥沙浓度、污染物浓度和较细悬浮泥沙的比例因子 3 个未知数。而 LANDSAT TM 遥感影像的 TM1、TM2、TM3 波段恰好能很好的反映水体信息，对水体悬浮泥沙浑浊度非常敏感。因此可用 TM1、TM2、TM3 3 个波段的数据代入式 (15) 中，建立三元一次方程组进行求解。本文利用软件 Matlab 求解此方程组非常方便简单，由此求出水中悬浮泥沙浑浊度。

3.2 模式在珠江口悬沙浑浊度提取中的应用

3.2.1 水体各参数的确定 水的吸收和散射系数可以直接测定^[8]。采用 Zhang 等^[9] 测定的开阔海水的吸收、散射参数（见表 1），散射相函数也能够直接测定。污染物的吸收系数和悬浮泥沙的散射系数可以从离水反射率遥感影像上直接计算求取，具体方法见参考文献^[10]。所求得的水体各组分参数如表 1 所示。

表 1 珠江口水质遥感定量模型参数表

Tab 1 The parameters of quantitative remote sensing model of suspended sediment for Zhujiang River outfall

波段	水分子		悬浮泥沙		污染物		
	β_w	α_w	p_w	p_s	β_s	C	α_u
1	0.216	0.0017	1.002	0.0191	0.0965	1.983	0.1238
2	0.066	0.0089	1.002	0.00191	0.7592	1.843	0.2870
3	0.410	0.0043	1.002	0.0191	7.4258	3.336	0.5567

3.2.2 处理步骤

(1) 辐射定标及大气校正，这是进行定量遥感的前提条件。

(2) 进行水陆分离：为了精确定义研究范围，提高计算机的运算速度，使得水质遥感定量模型更实用，采取了水陆分离的办法。由于水体对近红外波段强烈吸收，而对可见光中的绿光波段有较高的反射，这是水体独特的光谱特性，所以可利用水体指数法提取水体。水体指数（NDWI）的计算公式为： $NDWI = (TM2 - TM5) / (TM2 + TM5)$ 。以 0 为阈值，水体的 NDWI 为正值，而土壤和植被等地物的 NDWI 为负值。

(3) 利用 TM5 波段对水体的强烈吸收作用，消除水体镜面反射光的影响，得出水域出水反射率图像。因为 TM5 离水反射率基本等于零，其反射光只有水体的镜面反射光，用其它波段水体反射率减去 TM5 波段值即为消除镜面反射的离水辐射率。

(4) 将水体各参数代入式（15）中，建立三元一次方程组，利用 Matlab 软件进行计算，得到水体悬浮泥沙浑浊度。再利用 PCI Geomatic v 8.2 图像处理软件对影像进行处理，得出珠江口水域悬浮泥沙浑浊度图（图 1a），亮度越高其泥沙浓度也就越大；再对其进行定量分级（图 1b）。

度较高，外海逐渐降低。高含沙区大部分分布在西滩的浅滩，这主要是由于在自然环境条件下，水体中的含沙量分布与水下地形之间存在有动力上的联系，在同样动力条件下，无论是径流、潮流和风浪对于水深较小的浅滩地区的掀沙作用大于深水区，因此造成浅滩地区含沙量高，深水地区含沙量低的分布。

4 结 论

(1) 本文导出的综合模式在条件简化下几乎包括了前人所推导的半经验模式。

(2) 可根据研究区的实际情况对该模式进行简化，减少参数，有利于提高模式计算效率。

(3) 该模式物理意义清晰明了，比较全面的考虑了水体各组分对太阳光谱的影响，综合应用了 TM1、TM2、TM3 三个波段的光谱信息。

(4) 该模式在对珠江口水域的悬浮泥沙信息提取中取得了成功，结果表明：珠江口西滩地区的含沙浓度明显高于东部，其分布与水下地形相似，河口内及其附近的水域悬浮泥沙浓度较高，外海逐渐降低。这与实际情况非常相符。其中横门水道、洪奇沥水道、蕉门水道、东宝河等入海口水域的含沙量特别高。这是因为这几个水道入海口属于浅滩，而浅滩地区的掀沙作用大于深水区，因此造成浅滩地区含沙量高。

(5) 由于无卫星同步数据作检验，故没有跟其它模式作精度的对比及作精度的检验，此为本文一大缺憾。

(6) 模式的假设前提是一次散射及一次反射，未考虑多次散射和多次反射，在实际应用中，会带来一定误差。

参考文献:

[1] Munday J C. Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement[J] . Remote Sensing of Environment, 1979, 8: 169.

[2] 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(5): 106- 113.

[3] 李炎, 李京. 基于海面一遥感器光谱反射率斜率传递现

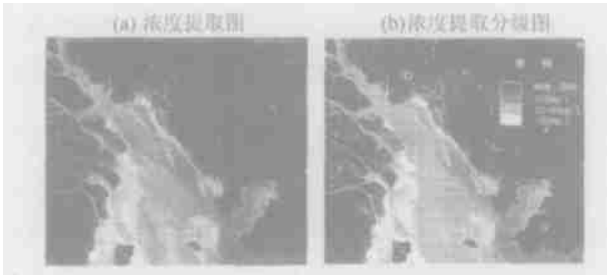


图 1 珠江口悬浮泥沙浓度分布提取及分级图
Fig. 1 Distribution image of and its classification suspended sediment concentration in the Pearl River outfall

3.2.3 结 果 由珠江口悬浮泥沙浓度分布及其分级图（图 1）可见，悬浮泥沙总的分布情况为珠江口西滩地区的含沙浓度明显高于东部，其分布与水下地形相似。河口内及其附近的水域悬浮泥沙浓

象的悬浮泥沙遥感算法[J] . 科学通报, 1999, 44 (17): 1892—1897.

[4] GORDON H R , MOREL A Y . Remote Assess of ocean color for interpretation of satelite visible imagery A Review [J] . New York: Springer Verlag, 1983.

[5] 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, 6(2). 166—173

[6] LI XIA. A united model for quantitative remote sensing of suspended sediment concentration[J] . Remote sensing, 1993 , 14(14): 2665—2675.

[7] 邓孺孺, 何执兼, 陈晓翔. 基于二次散射的水污染遥感模型及其在珠江口水域的应用[J] . 海洋学报, 2003, 25 (6): 69—78.

[8] LEE Z P, CARDER K, PEACOCK T G, et al. Method to derive ocean absorption coefficients from remote — sensing reflectance[J] . Appl Opt, 1994, 35: 453—462.

[9] ZHANG M, CARDER K, MULLER—KARGER F E, et al. Noise reduction and atmospheric correction for coastal applications of landsat thematic mapper imagery[J] . Remote Sens Environ, 1999, 9(70): 167—180 .

[10] 邓孺孺, 何执兼, 陈晓翔等. 珠江口水域水污染遥感定量分析[J] . 中山大学学报(自然科学版), 2002, 41(3): 99—103.

An Integrated Model for Quantitative Remote Sensing Measurement of Suspended Sediment and Its Application in the Pearl River Estuary

LIU Xiao ping, DENG Ru ru, PENG Xiao juan

(Center for Application of Remote Sensing, Sun Yat—sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the physical mechanisms of spectrum transmission in water, an integrated model, which has specific and distinct physical meaning, was presented as a quantitative approach to detect suspended sediment concentration. The water optical thickness was cooperated into this model. Under simplified conditions, the integrated model can almost cover all experiential models and semi experiential models including the linear model, the logarithm model, the Gordon model, the negative index model and the unified model. This integrated model was applied to detect suspended sediments in the Pearl River estuary, and the results showed that the model can fulfill the quantitative survey of sediments.

Key words: suspended sediments; quantitative remote sensing; the Pearl River estuary