

文章编号: 1007-4619 (2001) 02-0154-07

河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究

李四海^{1,2}, 恽才兴¹

(1. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘 要: 根据多时相 NOAA AVHRR 卫星遥感数据和准同步实测表层含沙量资料, 分别利用经暗像元大气校正的遥感图像灰度值、 R_1-R_2 相关关系曲线的斜率, 以及泥沙指数等参数, 建立泥沙遥感定量模式(灰度法、斜率法和泥沙指数法), 并对 3 种模式的效果和适用性进行了比较。灰度法由于只用了单个波段的光谱信息, 模式的相关性较差; 斜率法通过计算 R_1-R_2 关系曲线的斜率, 达到大气校正的目的。但由于在泥沙浓度交界面上存在斜率值跃变现象, 会影响最终效果; 泥沙指数法综合应用了 Ch_1 , Ch_2 波段的光谱信息, 模式的相关性较好, 可获得层次丰富泥沙图像。

关键词: 卫星遥感; 定量模式; 图像灰度; 斜率; 泥沙指数

中图分类号: TP79 文献标识码: A

1 引 言

河口泥沙运动是近岸工程实施过程中需要考虑的重要问题之一。一般来说, 河口地区既是入海悬浮泥沙的主要扩散区, 又是上游底沙推移的接纳区。在江海交汇、径潮流相互消长、盐淡水混合、风浪掀沙等多种作用下, 拦门沙地区的泥沙运动极其活跃, 底沙与悬沙交换频繁, 一般的常规现场观测方法, 难以发现其空间场分布和动态变化规律。卫星遥感技术问世以来, 海洋水色信息在遥感图像上有明显反映, 其中表层悬浮泥沙可直接判别河口水流的流态及近岸浑水区的活动范围。经过 80 年代的科技攻关, 国内外学者已在悬浮泥沙遥感图像处理及定量模式研究方面, 积累了不少成功经验, 这为运用卫星遥感技术解决沿岸工程泥沙问题打下了良好基础^[1]。

利用遥感手段研究河口海岸地区混浊水体的泥沙运动(泥沙来源、扩散范围、输移方向以及含沙量判读等)是十分有效的。就含沙量定量判读而言, 解决遥感模式问题乃是关键所在, 即确定遥感数据与

悬沙浓度(指表层含沙量)的数学关系, 或称为悬沙浓度遥感模式。关于悬浮泥沙遥感定量模式, 国内外学者进行了广泛研究^[2-12], 提出了众多形式的模型。国外学者提出的模型, 大多不适合中国河口区高泥沙含量的情况。国内学者针对中国河口区具体情况, 也提出了相应的模型。但由于某些原因, 至今尚无统一的定量模式或可靠的模型参数, 即使在同一地区也是如此。主要在于: (1) 缺乏足够、可靠的同步实测定标资料; (2) 利用一个时相的遥感资料得到的定量模式, 由于同步实测定标资料缺乏, 且遥感资料未能做有效的辐射和大气校正处理, 模式参数很难具有普遍适用性。 (3) 不同时间获取的遥感资料, 由于外界干扰条件不同, 遥感数据本身存在的差异性难以有效消除, 故不能简单套用不同条件下得到的有关模式参数。

针对上述情况, 本文以长江口为示范区, 根据多时相、同步性好的遥感和实测表层悬浮泥沙含量数据, 探讨了多种泥沙遥感参数与实测含沙量间的相关关系, 并建立了相应的遥感定量模式; 利用多期不同时相的遥感和实测资料, 对模型的可靠性和适用性进行了分析和检验。

收稿日期: 2000-04-10; 修订日期: 2000-06-26

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目“区域海洋地理信息示范系统”(96-922-04-04)资助。

作者简介: 李四海(1970—), 男, 河北河间市人。1992年毕业于武汉测绘科技大学地图制图专业, 1995年获得南京大学地图学与遥感专业硕士学位后, 到国家海洋信息中心工作, 主要从事海洋地理信息系统及海洋遥感的应用研究。1998年入华东师范大学河口海岸国家重点实验室攻读在职博士。已发表论文十余篇。

2 含沙水体光谱特征^[2, 3]

2.1 含沙水体光谱特征

含沙水体的海面反射率光谱有两个峰值: 位于黄光波段的主峰和位于近红外波段的次级峰。许多研究者实测了两个峰值所在波段海面光谱反射率(R_w)和表层含沙量(S)的关系。其 R_w - S 关系具有下列前3个共同点^[3]和后3个差异点:

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

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

(3) $S=0$ 时, R_w 为一大于 0 的常量。 S 较大时, R_w 随 S 的增加迅速趋于一小于 1 的极值, 即 $\lim_{S \rightarrow 0} R_w(S) > 0$ 和 $\lim_{S \rightarrow +\infty} R_w(S) < 1$ 。

(4) $S=0$ 时, 黄光波段光谱反射率 R_{w1} 和近红外波段光谱反射率 R_{w2} 与清水相同, 趋于一个接近 0 的常量, 此时 $R_{w1} \approx R_{w2}$ 。

(5) $S < S_m$ 时, $dR_{w1}/dS > dR_{w2}/dS$; 当 $S > S_m$ 时, $dR_{w1}/dS < dR_{w2}/dS$, R_{w1} - S 关系曲线和 R_{w2} - S 关系曲线有个对应于 S_m 的转折点。

(6) $S = S_t$ 时, $R_{w1} = R_{w2}$, R_{w1} - S 关系曲线和 R_{w2} - S 关系曲线有 1 个对应于 S_t 的转折点。

2.2 光谱反射率与含沙量的主要关系式

关于表层悬浮泥沙遥感定量模式, 至今还没有统一的看法。已有的光谱反射率含沙量关系函数表达式, 主要包括 4 类:

(1) 线性关系式。线性关系式仅满足实测关系式中的 2.1 节中(1)和(4)特征, 属有限的线性区间内近似表达式。

(2) 对数关系式。对数关系式仅满足实测关系式中的 2.1 节中(1), (2)和(4)特征, 但反映高含沙量特性的(3)和(5), (6)特征差别较大。对数关系式仅适合于低含沙水域。

(3) 负指数关系式。负指数关系式满足实测关系式中的 2.1 节中(1)~(5)特征, 但(6)特征差别较大, 仍难准确表达高含沙量区的高阶变化。

(4) Gordon 关系式。Gordon 关系式满足实测关系式中的 2.1 节中(1)~(6)特征, 适用区间包括低含沙量和高含沙量区。

3 实验方法与结果

以长江口为示范区, 根据 1998-8-1 至 1999-4-1, 8 个时相 NOAA AVHRR 第 1, 2 波段数据及 3 个站位 15 个站次的准同步定点实测表层含沙量数据(采样时间在 14: 00; NOAA 数据获取时间在 13: 00—14: 00), 对图像灰度值、 R_1-R_2 相关曲线斜率、泥沙指数等参数与含沙量的关系进行了实验, 提出了有较强适用性的高浓度泥沙遥感定量模式。为了使不同模式的精度检验具有可比性, 本文在各模式建立时采用了相同采样点的遥感和实测数据。站位布置如图 1。



图 1 实测点站位布置

Fig. 1 The sits of in-situ measure stations

3.1 像元灰度法

即利用像元灰度值与实测表层含沙量建立相关关系, 这是最常采用的方法。线性关系式、对数关系式以及负指数关系式, 都是在此基础上得到的。很多研究中都是利用同一时相的遥感数据和同步性较差的少数实测点建立相关关系, 所得到的模式参数缺乏适用性。本文利用经辐射定标和暗像元纠正的 AVHRR 第 1 波段的多时相遥感数据和实测数据进行了实验, 但结果也不理想。图 2 是 AVHRR 第 1 波段灰度值与实测含沙量的关系及其拟合曲线。线性关系式为 $S = 10.882 * Ch1 + 16.373$, 拟合度 $r^2 = 0.5386$ (表 1)。散点的分布趋势不很明显, 拟合系数较低。

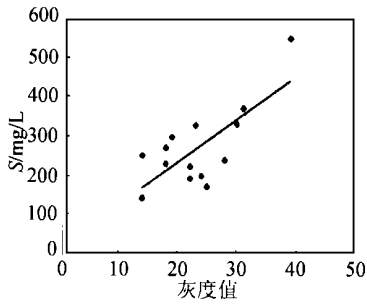


图 2 实测含沙量 S 与 $Ch1$ 灰度值关系曲线

Fig. 2 Correlation between sediment concentration and the gray value of $Ch1$

由于 NOAA/AVHRR 的光谱分辨率较低,加之大气影响未能彻底消除,致使图像灰度对泥沙浓度的变化反映不够灵敏。图 3,图 4 分别是低和高泥沙浓度区的某一光谱剖面上 $Ch1$, $Ch2$ 像元的灰度响应曲线。由图可见,在低浓度区 $Ch1$ 有较好的灰度响应能力,而当表层悬沙达到某一浓度值后, $Ch1$ 的响应值达到饱和,失去反应能力。而 $Ch2$ 对高浓度区有很好的响应,但对低浓度区不敏感。所以,单个波段的灰度值难以全面地反映出不同泥沙浓度的光谱信息,最终使模式产生较大的误差。

表 1 模型相关参数与实测表层含沙量

Table 1 The values of parameters in the models and the in-situ sediment concentration in the surface layer

日期	站位	$Ch1$ 像元灰度	$R_2 - R_1$ 斜率	泥沙指数	实测值/mg/L
1998-08-06	S_2	18	0.3997	0.3125	227.8
	S_3	14	0.4215	0.3050	250.0
1998-08-09	S_1	28	0.3848	0.3170	239.1
	S_2	23	0.4568	0.2320	327.0
	S_3	14	0.1868	0.5556	140.0
1998-08-10	S_1	25	0.3629	0.3140	187.6
	S_3	24	0.3426	0.2973	265.0
1998-08-11	S_1	30	0.3300	0.1944	200.0
	S_3	16	0.3000	0.2534	142.0
1998-08-24	S_1	22	0.3188	0.3529	223.5
	S_2	22	0.3500	0.3750	192.7
	S_3	18	0.4316	0.2667	270.0
1998-12-21	S_1	19	0.3980	0.2307	297.6
1998-12-29	S_1	31	0.4736	0.216	370.2
1999-04-07	S_1	39	0.5703	0.1212	548.7
像元灰度法		$S = 10.882 * Ch1 + 16.373, r^2 = 0.5386, \Delta E = 0.2435$			
斜率法		$S = 59.833 * \exp(3.6735 * \alpha), r^2 = 0.8357, \Delta E = 0.1215$			
泥沙指数法		$S = 620.92 * \exp(-2.9742 * SI), r^2 = 0.8413, \Delta E = 0.09889$			

$$\Delta E = \sum |(\text{模型值} - \text{实测值}) / \text{实测值}| / \text{样点数}$$

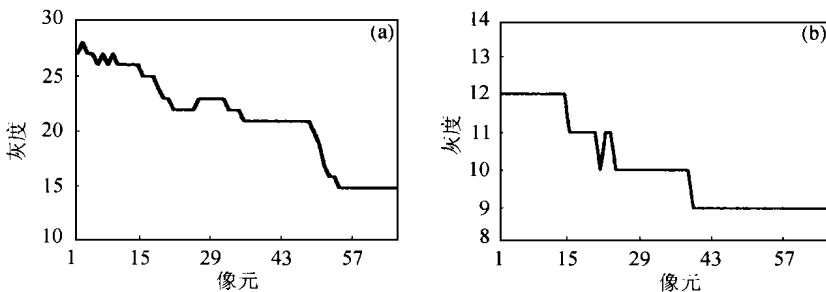


图 3 $Ch1$ 及 $Ch2$ 在低泥沙浓度区某一剖面上的响应

(a) $Ch1$; (b) $Ch2$

Fig. 3 The gray value profile of $Ch1$ and $Ch2$ in the region of low sediment concentration

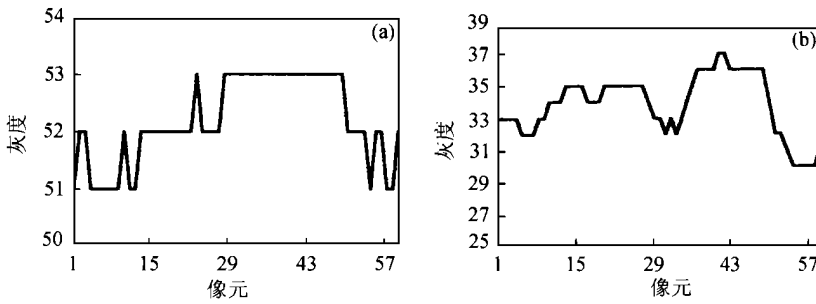


图 4 Ch1 和 Ch2 在高泥沙浓度区某一剖面上的响应
(a) Ch1; (b) Ch2

Fig. 4 The gray value profile of Ch1 and Ch2 in the region of high sediment concentration

3.2 斜率法^{2,8}

3.2.1 理论依据

遥感器探测到的光谱反射率可表示为¹³

$$R_{\lambda} = (R_{r\lambda} + R_{a\lambda} + t_{d\lambda}R_{w\lambda}) t_{o\lambda} \quad (1)$$

其中 $R_{r\lambda}$ 是 Rayleigh 散射的贡献, $R_{a\lambda}$ 为气溶胶散射的贡献, $R_{w\lambda}$ 为水面光谱反射率; $t_{o\lambda}$ 为双程的臭氧透过率, $t_{d\lambda}$ 为双程漫透射率。

对应于黄红光波段和近红外波段, 比如 AVHRR/ Ch1 和 AVHRR/ Ch2 波段, 分别有

$$\begin{aligned} R_1 &= (R_{r1} + R_{a1} + t_{d1}R_{w1}) t_{o1} \\ R_2 &= (R_{r2} + R_{a2} + t_{d2}R_{w2}) t_{o2} \end{aligned} \quad (2)$$

方程的未知参数中, R_{r1} 和 R_{r2} 可以根据卫星姿态和大气光学模式准确算出, t_{o1} 和 t_{o2} 也可以估计出来。为消除 R_{a1} 和 R_{a2} 的影响, Gordon 始创的大气校正方法采用了可视为用 R_1 减去 ϵR_2 的手段^[14], 其中 ϵ 为两个波段气溶胶散射影响的比值, 有一定时间变化但水平方向变化较小。该手段的数学表示形式为

$$\begin{aligned} R_1 - \epsilon R_2 &= (R_{r1} + R_{a1} + t_{d1}R_{w1}) t_{o1} + \epsilon (R_{r2} \\ &+ R_{a2} + t_{d2}R_{w2}) t_{o2} \end{aligned} \quad (3)$$

或表达为

$$\begin{aligned} (R_1 - \epsilon R_2) &= (t_{o1}R_{r1} - \epsilon t_{o2}R_{r2}) + (t_{o1}R_{a1} \\ &- \epsilon t_{o2}R_{a2}) + (t_{o1}t_{d1}R_{w1} - \epsilon t_{o2}t_{d2}R_{w2}) \end{aligned} \quad (4)$$

方程右边第 2 项为气溶胶散射影响项。当 $\epsilon = (R_{a1}/R_{a2})(t_{o1}/t_{o2})$ 时, 该项等于 0。此时, 满足 $R_{w2} = 0$ 条件 I 类水体, 可以按 Gordon 的路线根据式 (4) 简单地求出探测波段的水面光谱反射率 R_{w1} 。而满足 R_{w2} 为 R_{w1} 函数条件的其他水体, 也可根据式 (4) 求出探测波段的水面光谱反射率 R_{w1} 。

将式 (2) 等号两边取对含沙量 S 的微分, 遥感器探测的光谱反射率-含沙量关系曲线的斜率, 与海面光谱反射率-含沙量关系曲线的斜率具有下列联

系:

$$\begin{aligned} dR_1/dS &= t_{o1} t_{d1} dR_{w1}/dS \\ dR_2/dS &= t_{o2} t_{d2} dR_{w2}/dS \end{aligned} \quad (5)$$

两式相除, 两个波段海面光谱反射率关系曲线 ($R_{w2} - R_{w1}$ 曲线) 的斜率, 与遥感器相应两个波段的光谱反射率关系曲线 ($R_1 - R_2$ 曲线) 的斜率有下列联系:

$$dR_2/dR_1 = (t_{d2}/t_{d1})(t_{o2}/t_{o1}) dR_{w2}/dR_{w1} \quad (6)$$

式 (6) 表明, 海面 $R_{w1} - R_{w2}$ 曲线到遥感器 $R_1 - R_2$ 曲线之间, 斜率的传递是线性的, 传递的比例因子 $(t_{d2}/t_{d1})(t_{o2}/t_{o1})$ 取决于该两个波段的大气透射率 (包括漫透射率和臭氧层吸收率) 的比值。

根据理想大气透射率计算结果, 在可以取得良好黄红光波段和近红外波段遥感图像的时段, 比如正午前后无云条件下, 漫透射率比值略小于 1, 臭氧层吸收率比值接近 1, 相对误差小于 10%。从近似应用角度, 将大气透过率比值取 1, 则式 (6) 可简化为

$$dR_2/dR_1 = dR_{w2}/dR_{w1} \quad (7)$$

即海面光谱反射率关系曲线和遥感器相应光谱反射率关系曲线为相似曲线。

3.2.2 实验及结果

斜率法直接从海面光谱反射率曲线与遥感器相应两个波段的光谱反射率关系曲线的斜率联系入手, 将遥感器光谱反射率归一化到海面光谱反射率图像。本文在求得多时相 AVHRR1, 2 波段的光谱反射率关系曲线斜率图像后^[4], 利用回归分析方法, 求得斜率与实测含沙量的拟合关系式, 得到定量模式, 而后反演得到每个时相的悬沙遥感图像。斜率与泥沙浓度的关系及其拟合曲线如图 5。指数拟合关系式为: $S = 59.833e^{3.6735 * \alpha}$, 拟合度 $r^2 = 0.8357$ (表 1)。在斜率图像中, 由于泥沙浓度分界处斜率值存在明显的跃变现象, 会造成许多假的高泥沙浓度带生成, 而影响应用效果。研究发现, 非跃变处的斜率值与

Ch1 灰度值之间存在显著的线性相关关系, 因此可以通过 Ch1 间接得到每个像元点的斜率值, 从而消除了像元跃变现象。图 6 是利用斜率法得到的表层悬沙浓度分级图(10 mgL⁻¹/级)。

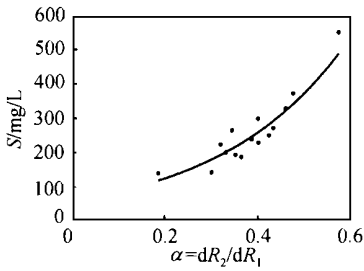


图 5 实测含沙量 S 与 R_{w1}-R_{w2} 标准斜率关系曲线

Fig. 5 Correlation between the slope of the R_{w1}-R_{w2} curve and the sediment concentration

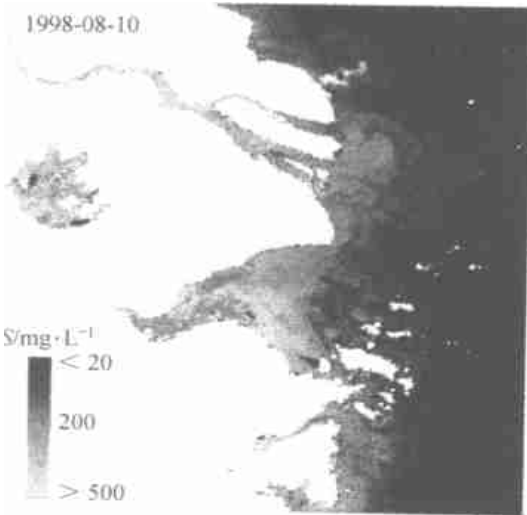


图 6 斜率法反演的表层悬沙浓度分级图

Fig. 6 The sediment concentration map from the slope method

3.3 泥沙指数法

3.3.1 理论依据

Gordon 等人用 Mont-Carle (随机模拟) 方法解辐射传输方程, 得到幂级数形式的结果^[5], 取其第 1 项以准单散射近似值表示, 为分式方程: $R_{w\lambda} = Y_{\lambda} B_{b\lambda} / (A_{\lambda} + B_{b\lambda})$, 式中 R_w 为水面光谱反射率, Y_{λ} 为等于 0.33 的常数, A_{λ} 和 $B_{b\lambda}$ 分别为目标水体的吸收系数和后向散射系数。实际使用时, 设水层的吸收系数和后向散射系数均与含沙量 S 有线性关系, 则 $R_{w\lambda} = Y_{\lambda} (m_1 + m_2 S) / (m_3 + m_4 S)$, m_1, m_2, m_3, m_4 为与水体光学性质有关的系数。

由图 3, 图 4 可知, 只利用某一个波段, 不能很好地反映出泥沙各浓度级的信息。如何确定一个有

效的参数, 才能较全面地反映出多浓度级的悬沙信息? 我们发现, 在 R_{w1} 与 R_{w2} 的差值与含沙量 S 的关系曲线^[2] 中, 对应于 $S=0$, $R_{w1} - R_{w2} \approx 0$; 对应于 $S = S_m$, $R_{w1} - R_{w2}$ 达极大值; 对应于 $S = S_t$, $R_{w1} - R_{w2} = 0$; 对应于 $S > S_t$, $R_{w1} - R_{w2} < 0$ (图 7)。因此, 当泥沙浓度高于 S_m 后 (约 50 gm⁻³), 参数 $(Ch1 - Ch2) / (Ch1 + Ch2)$ ($Ch1, Ch2$ 为经大气校正后的灰度值或反射率) 与含沙量呈明显的负相关, 可以很好地反映高泥沙浓度的变化。这里不妨将此参数定义为泥沙指数 SI 。但由 $R_{w1} - R_{w2} - S$ 曲线形状可知, 高、低浓度区 (< 50 mg/L) 可能会出现相同的 SI 值。本文处理时, 首先根据 $Ch1, Ch2$ 确定高、低泥沙浓度分界线, 对低浓度区进行了掩膜处理。

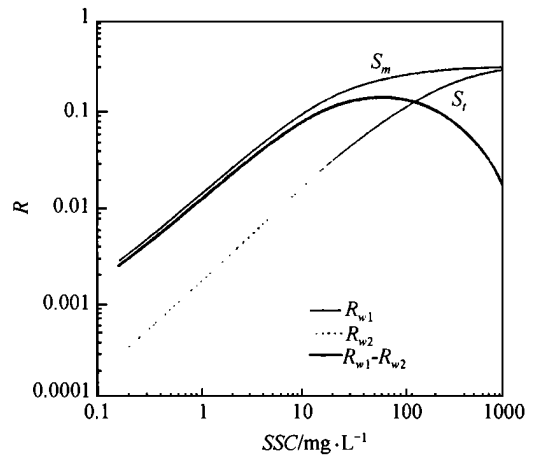


图 7 采用 Gordon 关系式表示的 AVHRR/ Ch1 和 Ch2 波段 R_{w1} 与 R_{w2} 及其差值 $R_{w1} - R_{w2}$ 与含沙量 S 的区域性标准关系曲线(据李炎等, 1999)

Fig. 7 Relation between sediment concentration and R_{w1}, R_{w2} , and $R_{w1} - R_{w2}$ got from the AVHRR/ Ch1 and Ch2 expressed by the Gordon model (According to Li Y. et al., 1999)

3.3.2 实验及结果

首先在长江口外海区找“清洁水体”, 对 $Ch1, Ch2$ 进行暗像元大气校正。求得泥沙指数后, 将其与实测含沙量建立相关关系, 得到定量遥感模式, 最后输出表层悬沙图像。图 8 是泥沙指数与实测含沙量的关系及拟合曲线。指数拟合关系式为 $S = 620.92e^{-2.9742 * SI}$, 拟合度 $r^2 = 0.8413$ (表 1)。图 9 是用泥沙指数法得到的高浓度区悬沙浓度分级图(10 mgL⁻¹/级)。图 9 与图 6 相比, 高泥沙浓度区的信息更为丰富。

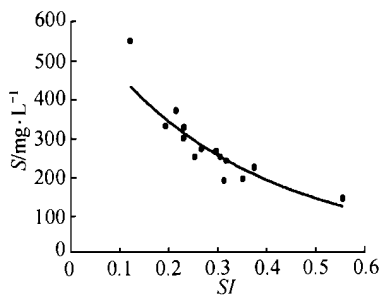


图 8 泥沙指数与实测含沙量相关曲线

Fig. 8 Correlation between sediment index and in-situ sediment concentration

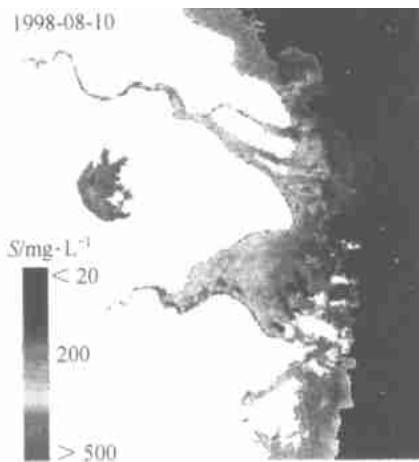


图 9 泥沙指数法反演的表层悬沙浓度分级图

Fig. 9 Sediment concentration map from the sediment index model

4 结 论

本文根据多时相准同步的遥感和实测数据, 利用图像灰度(或反射率)、 R_1-R_2 相关曲线的斜率以及泥沙指数等 3 种参数, 进行悬浮泥沙遥感定量模式研究, 实验表明:

(1) 利用多时相、同步性好的遥感和实测数据, 建立泥沙遥感定量模式, 是一种新的尝试。它基本保证了数据采集的时间一致性, 避免了常规调查方法中采样数据点少、同步性差等的不足; 另外, 多时相数据更能综合反映泥沙特性, 使模式更具有代表性。

(2) 图像灰度法只利用了 AVHRR/ $Ch1$ 单个波段的光谱信息, 由于 NOAA/AVHRR 单波段的带宽较长, 其对泥沙浓度变化的敏感度较低, 尤其是在泥沙高浓度区。因此, 灰度值与含沙量之间的相关性较差, 不宜采用此方法建立河口泥沙定量遥感模式。

(3) 斜率法通过计算 R_1-R_2 相关曲线的斜率,

间接地消除了大气影响, 实测值与斜率值之间呈显著的指数相关, 可以得到较好的定量模式。但在等斜率图像中, 泥沙浓度分界处斜率值存在明显的跃变现象, 会影响最终的应用效果。为消除跃变现象, 本文利用斜率值与 $Ch1$ 之间显著的相关关系, 间接地得到各点的斜率值。但如何通过更加有效的算法消除浓度分界处的跃变现象, 有待进一步研究。

(4) 泥沙指数法从泥沙水体光谱特征出发, 根据其在不同波段的响应特性, 综合应用了 AVHRR/ $Ch1$, $Ch2$ 两个波段的光谱信息, 得到了对泥沙浓度变化较为敏感的特征参数。泥沙指数与实测含沙量之间指数相关显著, 在 $50-500 \text{ gm}^{-3}$ 浓度范围内都有较好的应用效果, 尤其适合较高浓度泥沙区。

致谢: 国家海洋环境预报中心的刘建强研究员等为本文提供了卫星资料; 国家海洋局第二海洋研究所的李炎研究员给予了热情指导; 国家卫星海洋应用中心的唐军武研究员对本文提出了有益的建议, 在此一并致谢。

参 考 文 献 (References)

- [1] Yun Caixing, Shi Weirong, He Qing. An analysis of the trend of sediment field in the Changjiang channel [J]. In: Special issue on the regulation of Changjiang deep-water channel and harbour construction, *Journal of East China Normal University*, 1995, 50-60. [恽才兴, 时伟荣, 何青. 长江口通海航道泥沙场动态分析[J]. 长江口深水航道治理与港口建设专辑, 华东师范大学学报, 1995, 50-60.]
- [2] Li Yan, Li Jing. An algorithm for the retrieval of suspended sediment from remotely sensed data based on the transmission of the spectral reflectance from ocean surface to remote sensor [J]. *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.]
- [3] Li Jing. A measurement of the sediment concentration in the Hangzhou Bay using NOAA/AVHRR data [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9(1): 132-136. [李京. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 数据测杭州湾海域的悬浮泥沙含量[J]. 海洋学报, 1987, 9(1): 132-136.]
- [4] Feng Hui. A study on the quantitative pattern of suspended sediment [J]. *Remote Sensing Information*, 1987, (2): 16-19. [冯辉. 悬浮泥沙浓度遥感定量模式[J]. 遥感信息, 1987, (2): 16-19.]
- [5] Gordon H R, Morel A y. Remote Assessment of Ocean Color for interpretation of Satellite Visible Imagery, A Review [R]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [6] Huang W, Fang M. Application of NOAA/AVHRR data in Hong Kong. In Hong Kong and the Pearl River Delta As Seen from Space Images [C]. In: Au K N, Lulla K, eds. *Geocarto*, 1997. 93-99.

- [7] Liedtke J, Robert A, Lutemauer J. Practical remote sensing of suspended concentration [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1995, 61(2): 167—175.
- [8] Li Yan, Wei Huang, Ming Fang. An algorithm for the retrieval of suspended sediment in coastal waters of China from AVHRR data [J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18: 487—500.
- [9] Reddy M A. Remote sensing for mapping of suspended sediment in Krishna Bay estuary, Andhra Pradesh, India [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(11), 2215—2221.
- [10] Stumpf R P, Pennock J R. Calibration of a general optical equation for remote sensing of suspended sediments in a moderately turbid estuary [J]. *J. Geophysical Res*, 1989, 94(C10): 14363—14371.
- [11] Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(12): 2369—2378.
- [12] Zhimen Chen, Cuman P J, Hanson J D. Derivative Reflectance Spectroscopy to Estimate Suspended Sediment Concentration [J]. *Remote Sensing Environment*, 1992, 40: 67—77.
- [13] Viollier M, Tanre D, Deschamps P Y. An algorithm for remote sensing of water color from space [J]. *Boundary-layer Meteorology*, 1980, 18: 247—261.
- [14] Gordon H R. Remove of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(10): 1631—1636.

A Study on the Quantitative Model of the Suspended Sediment Concentration from the Meteorological Satellite Imagery

LI Si-hai^{1,2} YUN Cai-xing¹

(1. State Key lab. of Estuarine and Coastal Research, Shanghai 200062, China;

2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: According to the multi-temporal NOAA/AVHRR imagery and near simultaneously acquired in-situ surface-layer sediment data, this paper uses 3 kinds of parameter, i. e. the gray values of the imagery, the slope of R_1-R_2 relative curve, and the sediment index to establish the quantitative retrieval models for sediment's concentration respectively, and to assess their application effects.

The correlation of the model obtained from the gray value method, for using only the spectral information of one band, is not very good; The slope method corrects the atmospheric affection by computing the R_1-R_2 relative curve, and the model from it is stable. While, the sudden change of the slope value often happens in the interface of the water of different sediment's concentration, which will affect the result. The sediment index method uses the spectral information of Ch_1 and Ch_2 , a good quantitative model and imagery with plenty of sediment information are derived.

Key words: satellite remote sensing; quantitative retrieval model; gray value; slope; sediment index