

悬沙水体不同波段反射比的分布特征 及悬沙量估算实验研究*

傅 克 忖

荒 川 久 幸

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

(东京水产大学, 东京)

曾 宪 模

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

关键词 悬沙水体 不同波段反射比 因子分析

1 引言

我国沿岸、河口附近水域具有高悬沙量的特点。悬沙的分布、扩散、沉降过程影响港口、航道水深的维持, 影响生态环境。利用卫星遥感资料开展悬沙遥感及定量算法研究, 在我国已取得诸多成果, 恽才兴等^[1]提出了几种悬沙定量的经验和半经验模式。“七五”攻关分别对黄河口和长江口提出了对数模式、线性分析模式和双峰比模式, Ma 等^[2]将模式识别方法应用于悬沙遥感。90 年代后期, 国际上陆续发射多颗海色卫星, 我国也计划发射海色卫星, 为有效地利用海色卫星资料, 进一步开展悬沙定量算法及传感器谱段选择研究具有重要意义。

利用海洋水色光谱仪 OCSM^[3,4], 进行了悬沙水体不同波段反射比与悬沙浓度关系的实验研究, 探讨悬沙遥感灵敏的波谱段, 采用因子分析, 建立较高浓度悬沙定量算法。

2 实验

2.1 实验条件

实验在东京水产大学馆山坂田实验场的露天水池中进行。水池底及内壁敷以黑色无光塑料布, 用以消除池壁及池底对太阳光反射的影响。实验用海洋水色光谱仪 OCSM(ocean color spectrum meter)的上、下两端面传感器各有 8 个可见光通道, 波长分别为 440、480、520、550、

本文于 1998-02-10 收到, 修改稿于 1998-07-17 收到。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:49546004, 49676305)。

第一作者简介:傅克忖, 男, 57 岁, 研究员, 从事海色遥感应用基础研究。

600、660、680 和 710 nm, 各通道带宽约 10 nm. 光谱仪上端面传感器测量向下辐照度 $E_d(\lambda)$, 下端面传感器测量向上辐亮度 $L_u(\lambda)$. 光谱仪由浮圈托浮垂直立于水池中央, 下端面潜入水面下约 1 cm, 以消除水面反射光及太阳耀光的影响. 实验海水来自实验场的海水过滤水塔, 实验海水体积为 2.0 m×2.0 m×1.2 m.

本底海水悬浮物质含量经分析测试为 2.97 mg/dm³. 实验泥沙样品取自实验场附近田野中的泥土. 由库尔特计数器 (Coulter counter ZM型) 测定, 悬沙的中值粒径 $d_m = 5.8\mu\text{m}$ 左右, 如图 1 所示. 实验过程中, 连续晴天无云, 在太阳光照下进行.

2.2 实验方法

实验用泥沙样品经过筛、处理、称量后分别包装, 实验时逐一放入容器, 取实验水池之水溶解拌匀, 倒入水池中搅拌均匀, 呈悬浮状态下进行辐射光谱测量. 实验中水体悬沙量范围自 35.45 mg/dm³ 开始, 逐渐增至 1 134.65 mg/dm³.

2.3 实验结果

将水色光谱仪测得各通道向上辐亮度 $L_u(\lambda)$ 做归一化处理, 即 $L_u(\lambda)/E_d(\lambda)$, 本文称为反射比, 以 $R(\lambda)$ 表示. 随着逐次增加实验水体的悬沙量, 各种悬沙量下不同波段反射比的变化如图 2、3、4 所示.

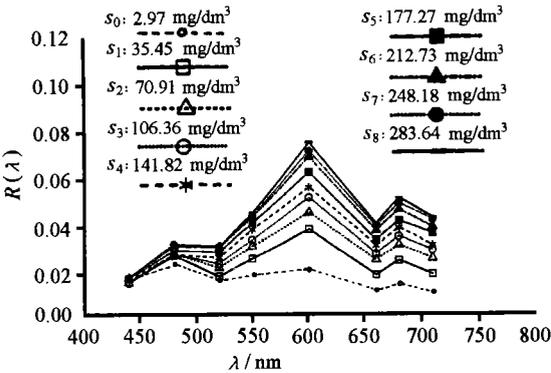


图 2 不同波段反射比随悬沙量的变化 (悬沙范围: 34.45~283.64 mg/dm³)

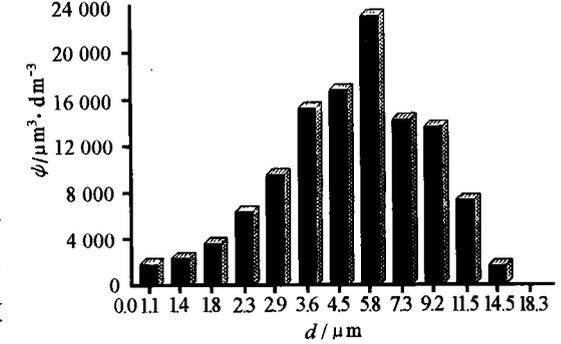


图 1 悬沙粒径及体容量 ϕ 分布

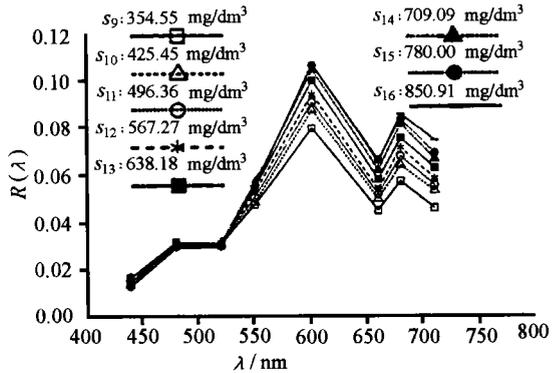


图 3 不同波段反射比随悬沙量的变化 (悬沙范围: 354.55~850.91 mg/dm³)

如图 2 所示, 实验本底水体 (悬浮物质含量 2.97 mg/dm³) 反射比峰值位于 480 nm 通道处. 当悬沙量达 35.45 mg/dm³ 时, 反射比峰值移位于 600 nm 通道. 随水体悬沙量增加, 各通道反射比增大, 即水体的向上辐亮度增强. 当悬沙量达 248.18 mg/dm³ 时, 440、480、520 nm 通道反射比饱和, 600 nm 通道的反射比始终处于峰值状态. 图 3 所示悬沙量达 709.00 mg/dm³ 时, 550 nm 通道的反射比饱和. 当悬沙量达 780.00 mg/dm³ 时, 600 及 660 nm 的反射比接近饱和, 而当悬沙量达 850.00 mg/dm³ 时, 680 及 710 nm 的反射比尚未饱和, 但反射比的峰值始终位于 600 nm 通道

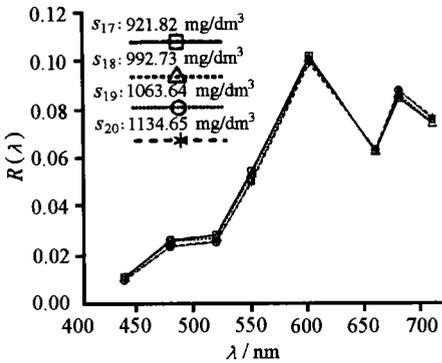


图 4 不同波段反射比随悬沙量的变化 (悬沙范围: 921.82~1 134.65 mg/dm³)

处, 这表明 600 nm 左右为最敏感谱段. 图 4 表示当悬沙量达 1 134.00 mg/dm³ 时, 各通道的反射比都处于饱和状态, 此时, 反射比最大值仍位于 600 nm 通道处, 但长波段通道的反射比随悬沙量增加而增大较快.

实验结果表明: (1) 对于水体中悬浮沙中值粒径为 5.8 μm 左右的情况下, 可见光遥感悬沙最敏感的波段位于 600 nm 附近. (2) 随悬沙浓度增加, 反射比逐渐增大, 按波段排列依次为 600、680、550、710、660 nm. 当悬沙量达 248.00 mg/dm³ 时, 波段 520、480、440 nm 的反射比已饱和. (3) 可见光遥感悬沙浓度最大值, 对不同波段有所不同, 对于 550 nm 遥感悬沙浓度最大值约为 700.00 mg/dm³, 对 600、660 nm 约为 780.00 mg/dm³, 对 680 nm 约为 1 063.00 mg/dm³, 对 710 nm 则约为 1 135.00 mg/dm³.

3 悬沙水体不同波段反射比数据的因子分析

我们试图用少数几个新变量来反映原有多通道悬沙水体反射比 $R(\lambda)$ [$R(\lambda) = L_u(\lambda)/E_d(\lambda)$] 场的主要特征, 首先对多通道反射比数据进行因子分析. 设变量 $R_1(\lambda), R_2(\lambda), \dots, R_m(\lambda)$ 代表多通道悬沙水体反射比 (本文中 $m = 8$), 每个反射比有几个测量值, 则反射比数据可表示为 $r_{it}(\lambda), i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n$ (本文中 n 取 15), 写成矩阵形式 $R = (r_{it})$. 将矩阵 R 做因子分析变换, 为此求解反射比协方差矩阵的特征问题, 得到特征向量矩阵 $V = (v_{ik}), i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, m$; 特征值 $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, m$, 从而作为新变量的主因子矩阵为

$$\left. \begin{aligned} Z &= V^T \cdot R \\ Z &= (z_{it}), \quad i = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中, V^T 为特征向量矩阵 V 的转置矩阵. 变换以后方差贡献集中于前面少数几个新变量上, 且新变量 Z_i 彼此正交.

本文对悬沙浓度 35.45~760.00 mg/dm³ 范围内水体不同波段反射比数据进行因子分析. 经计算得到 8 个特征值分别为 6.183 3、1.431 8、0.262 5、0.084 4、0.027 6、0.005 3、0.004 1、0.000 9. 8 个主因子对方差的贡献率分别为 0.772 9、0.179 0、0.032 8、0.010 5、0.003 4、0.000 7、0.000 5、0.000 1. 8 个主因子的方差累积贡献率为 0.772 9、0.951 9、0.984 7、0.995 2、0.998 7、0.999 4、0.999 9、1.000 0.

本文设定所选取的主因子对方差的累积贡献率为 99.5% 来确定选取主因子的数目, 前 4 个主因子已能反映信息量的 99.52%, 选取前 4 个主因子用于估算悬沙量.

4 估算悬沙量模式

4.1 模式建立

建立悬沙量的自然对数关于前 4 个主因子的多元线性回归方程:

$$y = \ln(SS) = B_0 + B_1Z_1 + B_2Z_2 + B_3Z_3 + B_4Z_4, \quad (2)$$

式中, SS 代表悬沙量; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 分别代表前 4 个主因子; B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 为回归系数. 经运算得到

$$y = \ln(SS) = 5.536 + 0.344Z_1 + 0.017Z_2 + 0.126Z_3 - 0.172Z_4. \quad (3)$$

4.2 模式检验

4.2.1 线性关系显著性检验

(1) 子样全相关系数为

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m L_{i0} B_i}{L_{00}}},$$

式中, B_i 为回归系数;

$$L_{i0} = \sum_{k=1}^n (z_{ik} - \bar{z}_i)(y_k - \bar{y}); \quad L_{00} = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2.$$

取信度 $\alpha = 0.01$, 查相关系数临界值表得临界值 $r_\alpha = 0.785$. 今子样全相关系数 $r = 0.9844$, $r > r_\alpha$, 线性关系显著.

(2) $F = \frac{U}{Q(n-m-1)m} = F(m, n-m-1)$, 即 F 服从自由度为 $(m, n-m-1)$ 的 F 分布, 其中 $U = \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2$ (回归平方和), $Q = \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - y_k)^2$ (残差平方和). 取信度 $\alpha = 0.01$, 查 F 分布表得临界值 $F_{0.01}(m, n-m-1) = F_{0.01}(4, 10) = 5.99$, 今 $F = 78.50$, $F > F_\alpha$, 线性关系显著.

4.2.2 回报检验

将 15 个样本的前 4 个主因子代入模式(3), 得到计算值 SS. 计算值与实验值 SS_m 及相对误差 $E(\%)$ 列入表 1 左侧, 回报平均误差为 47.40 mg/dm^3 , 平均相对误差为 13.95% .

表 1 悬浮泥沙的实验值、估算值及预测值

样品号	实验值/ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	估算值/ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	相对误差 $E/\%$	预测值/ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	相对误差 $E/\%$
1	2.79	—	—	—	—
2	35.45	44.44	25.36	57.73	62.83
3	70.91	78.32	10.46	80.02	12.85
4	106.36	90.84	14.59	85.94	19.29
5	141.82	110.98	21.74	101.99	28.08
6	177.27	181.88	2.60	184.33	3.98
7	212.73	249.35	17.22	258.99	21.75
8	248.18	293.50	18.26	317.74	28.03
9	283.64	255.52	9.91	247.36	12.79
10	354.55	327.38	7.66	289.58	18.32
11	425.45	444.72	4.53	446.74	5.00
12	496.36	399.74	19.47	371.97	25.06
13	567.27	480.12	15.36	464.37	18.14
14	638.18	593.02	7.08	584.95	8.34
15	709.09	851.79	20.12	912.84	28.73
16	780.00	855.53	14.81	1023.29	31.19
平均		误差:47.40	13.95	误差:70.98	21.63

4.2.3 预报检验

将某一样本作为预报(预测)对象,将其余样本的反射比数据进行因子分析.此后做悬沙量对前 4 个主因子的多元线性回归,建立形式为

$$\ln(SS) = b_0 + b_1Z_1 + b_2Z_2 + b_3Z_3 + b_4Z_4 \quad (4)$$

的方程式用于计算预报对象的悬沙量.使用本次因子分析时得到的特征向量矩阵 V 来求得预报样本的各主因子

$$Z_i = \sum_{k=1}^8 v_{ik}R_k, \quad i = 1, 2, \dots, 8,$$

取前 4 个代入式(4),得到预测值 SS_i ,对样品逐一轮流预报,将预测值、相对误差列入表 1 右侧.预测平均误差为 70.98 mg/dm^3 ,平均相对误差为 21.63% .

4.3 通道数减缩

根据图 2 反射比的分布特征,前 3 个通道的反射比在悬沙较低浓度(248.00 mg/dm^3)时即饱和,在较高浓度情况下,减缩通道数,仅对后 5 个通道反射比数据进行因子分析,得到 5 个主因子,它们对方差的贡献率分别为 0.9819 、 0.0154 、 0.0015 、 0.0009 、 0.0003 ,累积贡献率分别为 0.9819 、 0.9973 、 0.9988 、 0.9997 、 1.0000 .

前两个主因子的方差贡献率已达 0.9973 ,建立估算模型:

$$\ln(SS) = b_0 + b_1Z_1 + b_2Z_2, \quad (5)$$

运算得到估算悬沙模式:

$$\ln(SS) = 5.554 + 0.383Z_1 - 0.282Z_2, \quad (6)$$

子样全相关系数 $r = 0.9766$, $F = 123.90$.将悬沙实验值、回报值及预测值列入表 2.回报值平均误差为 50.65 mg/dm^3 ,平均相对误差为 15.61% ,预测值平均误差为 68.66 mg/dm^3 ,平均相对误差为 21.76% .结果表明,具有与全通道大致一样的估算精度.

表 2 悬浮泥沙的实验值、估算值及预测值

样品号	实验值/ $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$	估算值/ $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$	相对误差 $E/\%$	预测值/ $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$	相对误差 $E/\%$
1	2.79	—	—	—	—
2	35.45	50.31	41.92	63.10	78.01
3	70.91	85.25	20.22	88.94	25.43
4	106.36	96.57	9.20	94.79	10.87
5	141.82	108.97	23.16	104.45	26.35
6	177.27	164.00	7.49	161.15	9.09
7	212.73	219.24	3.06	219.88	3.36
8	248.18	286.64	15.48	301.81	21.61
9	283.64	235.84	16.85	288.15	19.56
10	354.55	303.29	14.46	297.47	16.10
11	425.45	421.47	0.19	421.18	1.00
12	496.36	355.71	28.34	286.18	42.36
13	567.27	578.50	1.98	578.14	1.92
14	638.18	616.71	3.36	613.40	3.88
15	709.09	901.56	27.14	964.00	35.95
16	780.00	940.77	20.61	1020.71	30.85
平均		误差:50.65	15.61	误差:68.66	21.76

4.4 高浓度悬沙的估算

对较高浓度悬沙情况下($177.00 \sim 780.00 \text{ mg/dm}^3$),将 8 通道反射比数据进行因子分析,

得到 8 个主因子的方差贡献率为 0.713 8、0.207 3、0.041 7、0.022 3、0.012 5、0.001 2、0.001 1、0.000 1, 方差累积贡献率为 0.713 8、0.921 1、0.962 8、0.985 1、0.997 6、0.998 7、0.999 9、1.000 0.

仍按 99.5% 方差累积贡献率选取了 5 个主因子, 类似上述的计算, 得到估算悬沙方程:

$$\ln(SS) = 5.987 + 0.196Z_1 - 0.017Z_2 - 0.135Z_3 - 0.057Z_4 + 0.182Z_5, \quad (7)$$

子样全相关系数 $r = 0.991 0$, $F = 54.99$. 将实验值、回报检验的计算值、预报检验的预测值、相对误差列入表 3. 回报值平均误差为 19.59 mg/dm^3 (悬沙范围: $177.27 \sim 780.00 \text{ mg/dm}^3$), 平均相对误差为 4.78%, 预测值平均误差为 38.51 mg/dm^3 , 平均相对误差为 9.29%. 经比较可知, 对较高浓度范围悬沙的估算, 精度较高.

表 3 高悬浮泥沙的实验值、估算值及预测值

样品号	实验值/ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	估算值/ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	相对误差 $E/\%$	预测值/ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	相对误差 $E/\%$
6	177.27	178.19	0.52	188.72	6.46
7	212.73	242.87	14.17	253.47	19.15
8	248.18	246.43	0.71	247.06	0.45
9	283.64	253.63	10.58	243.85	14.03
10	354.55	342.84	3.30	305.69	13.78
11	425.45	440.67	3.58	433.05	4.14
12	496.36	492.58	6.81	397.84	19.85
13	567.27	592.30	4.41	558.61	1.53
14	638.18	575.89	9.76	563.90	11.64
15	709.09	733.60	3.46	753.41	6.25
16	780.00	790.13	1.30	818.26	4.91
平均		误差: 19.59	4.78	误差: 38.51	9.29

5 结语

5.1 对于水体中悬浮沙中值粒径为 $5.8 \mu\text{m}$ 左右的情况下, 可见光遥感悬沙最敏感的波段位于 600 nm 附近.

5.2 随悬沙浓度增加, 反射比逐渐增大, 按波段排列依次为 600 、 680 、 550 、 710 、 660 nm . 当悬沙量达 248.00 mg/dm^3 时, 波段 520 、 480 、 440 nm 的反射比已饱和.

5.3 可见光遥感悬沙浓度最大值对不同波段有所不同, 对 550 nm 遥感悬沙浓度最大值约为 700.00 mg/dm^3 , 对于 600 、 660 nm 约为 780.00 mg/dm^3 , 对 680 nm 约为 $1\ 063.00 \text{ mg/dm}^3$, 对 710 nm 则约为 $1\ 135.00 \text{ mg/dm}^3$.

5.4 利用因子分析方法结合多元线性回归, 可以较精确地估算悬沙量. 对于较高浓度范围 ($177.00 \sim 780.00 \text{ mg/dm}^3$) 的悬沙, 预测精度误差小于 10%.

参考文献

- 1 恽才兴, 胡嘉敏. 遥感技术在河口海岸研究中的应用. 海洋通报, 1982, 11(2): 61~70
- 2 Ma Jun, Huang Xiaosheng, Huang Tao *et al.*. Pattern recognition method of multispectral remote sensing for suspended matter

- in coastal water. SPIE, 1993, **2028**(16): 86~92
- 3 Kishino M, Sugihara S, Okami N. Ocean color spectrum meter (OCSM) for remote sensing study. J. Remote Sensing Soc. Japan, 1983, **3**(2):13~20
 - 4 松生 治, 森永 勤, 宮澤 豪. 海洋のリモートセンシングに関する基礎的研究 1: 海面における上方向不同波段輝度分布と海中懸濁物の量, 質及び存在する深さとの関係. Tokyo Univ. Fish., 1985, **72**(2):111~125
 - 5 Fischer J. Factor analysis of multispectral radiances over coastal and open ocean water based on radiation transfer calculations. Applied Optics, 1986, **25**(3):448~458
 - 6 Gitelson A, Garbuzow G, Szilagyi E *et al.* Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland water quality. International Journal of Remote Sensing, 1993, **14**(7):1269~1295

Distribution feature of reflectance of water body containing suspended particles in different wave lengths and experimental study on estimating amount of suspended particles

Fu Kecun,¹ Hisayuki Arakawa,² Zeng Xianmo¹

1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266603*

2. *Tokyo University of Fisheries, Tokyo*

Key words Water mass containing suspended particles, spectral reflectance, factor analysis