

基于可见光与近红外遥感反射率关系的 藻华水体识别模式

李 炎 商少凌 张彩云 马晓鑫 黄立伟 吴景瑜 曾银东

(近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门大学, 厦门 361005. E-mail: liyan@xmu.edu.cn)

摘要 极轨气象卫星AVHRR红光波段(波段 1, 波长 580~680 nm)和近红外波段(波段 2, 波长 720~1100 nm)的水体遥感反射率关系函数 $R_{rs}^{(2)-1} = \alpha_0 R_{rs}^{(1)-1} + g^{-1}(1 - \alpha_0)$ 中, 参数 $\alpha_0 = (b_b^{(1)}/b_b^{(2)})(a^{(2)}/a^{(1)})$ 对叶绿素浓度敏感且相对独立于浊度, 以 $1.6 < \alpha_0 < 5.6$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$ 为判据, 可以实现叶绿素浓度为 64~256 $\mu\text{g/L}$ 的近海藻华水体识别. 在 2003 年 6 月闽江口藻华水体的 AVHRR 遥感信息识别基础上, 进行了该识别模式与传统的单波段模式, 以及与比值法、NDVI 法、差值法等双波段模式的比较, 建议将该识别模式发展为近海藻华水体遥感的普适模式.

关键词 遥感 海洋光学 藻华 算法 河口

近海藻华的监测方法, 已经从简单的目测报告逐渐发展到具有统一实施细则以及判断和评价标准的规范化监测, 但规范化监测方法确立前几十年的藻华频数快速增长期, 却留下了一段重要的数据空白. 具有 20 余年积累的极轨气象卫星 AVHRR 遥感数据, 是发掘这段数据空白期藻华事件记录的首选信息源. 近十年来, 各国海洋遥感界一直关注着 AVHRR 红光波段(波段 1, 波长 580~680 nm)和近红外波段(波段 2, 波长 720~1100 nm)的藻华水体信息提取办法[1~10], 但一直未形成规范化的遥感监测方法. 本文从近海藻华水体的 AVHRR 遥感识别模式的物理基础出发, 整理和分析前人的研究思路, 探讨如何建立规范化的普适模式. 模式评估的数据基础, 主要根据本实验室 2003 年 6 月在台湾海峡西岸闽江口藻华海域的观测结果.

1 藻华水体的遥感反射率光谱曲线

文献所报道的藻华水体光谱反射率曲线, 尽管存在藻种差别的影响, 均在主要由颗粒散射所形成的反射光谱背景上, 集中表现出下列两个特征吸收峰和一个特征反射峰[7,9,11~12].

(1) 440 nm 附近的吸收峰, 藻华水体叶绿素 a 浓度与 440 nm 吸收系数呈正相关关系.

(2) 670 nm 附近的吸收峰, 藻华水体叶绿素 a 浓度与 670 nm 吸收系数呈正相关关系.

(3) 680~740 nm 区间的反射峰, 藻华水体叶绿素 a 浓度与位于 683 nm 附近的反射峰高度呈正相关关系

[11,12], 也与 680~740 nm 区间的反射峰位置红移呈正相关关系[13,14].

2003 年 5~6 月福建省闽江口海域发生严重的甲藻类(*Gymnodinium mikimotoi* 和 *Prorocentrum triestinum*)赤潮. 图 1 为 2003 年 6 月 2 日 10:00~15:40 闽江口 119°52'~119°54'E 和 26°16'~26°19'N 海区不同叶绿素 a 浓度水体的水面上遥感反射率光谱曲线, 符合上述两个特征吸收峰和一个可红移的特征反射峰等藻华水体光谱特征.

2 红光波段和近红外波段的水体遥感反射率关系函数

AVHRR 波段 1 和波段 2 分别接受 670 nm 附近的藻华水体吸收峰和 680~740 nm 藻华水体反射峰的长波侧信号(图 1), 但同时也接受悬浮泥沙、云和太阳耀光信号的影响. AVHRR 波段 1 与波段 2 信号的二维直方图上, 可以区分出弧状分布的含沙水体点群、线状分布的云点群或太阳耀光点群, 以及位于两点群之间的藻华水体点群[4,15]. 2003 年 6 月 3 日闽江口赤潮发生期间的 AVHRR 的波段 1 与波段 2 遥感记录 $D^{(1)}$ 和 $D^{(2)}$ 的二维直方图上(图 2(c)), 均反映了 Gower[4]和 Li 等[15]所注意的这种点群分异.

遥感反射率 R_{rs} 是吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 的函数, 引用常用的一阶 $b_b/(a+b_b)$ 模式[16], AVHRR 的波段 1 和波段 2 遥感反射率 $R_{rs}^{(1)}$ 和 $R_{rs}^{(2)}$, 分别是对应波段吸收系数 $a^{(1)}$ 和 $a^{(2)}$, 以及后向散射系数 $b_b^{(1)}$ 和 $b_b^{(2)}$ 的函数,

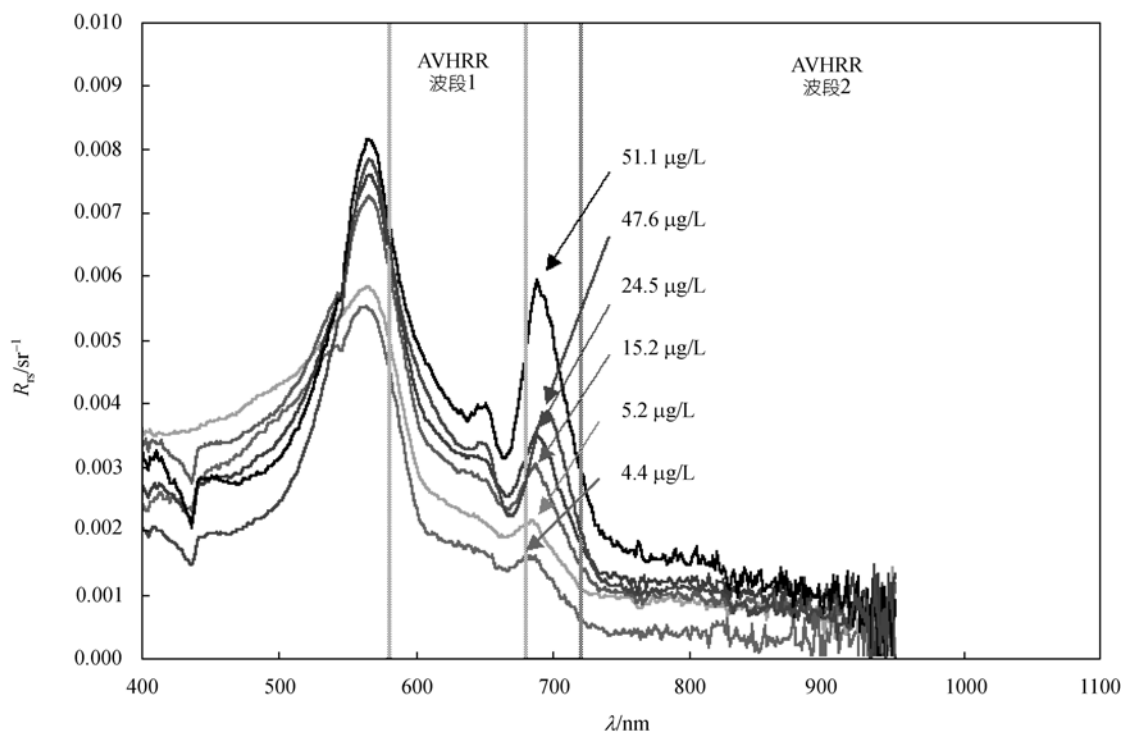


图1 2003年6月2日10:00~15:40 闽江口 119°52'~119°54'E 和 26°16'~26°19'N 海区不同叶绿素 a 浓度水体的水面上遥感反射率光谱曲线(GER-1500 便携式光谱仪测量)
图中标出 AVHRR 波段 1 和波段 2 的波长覆盖范围

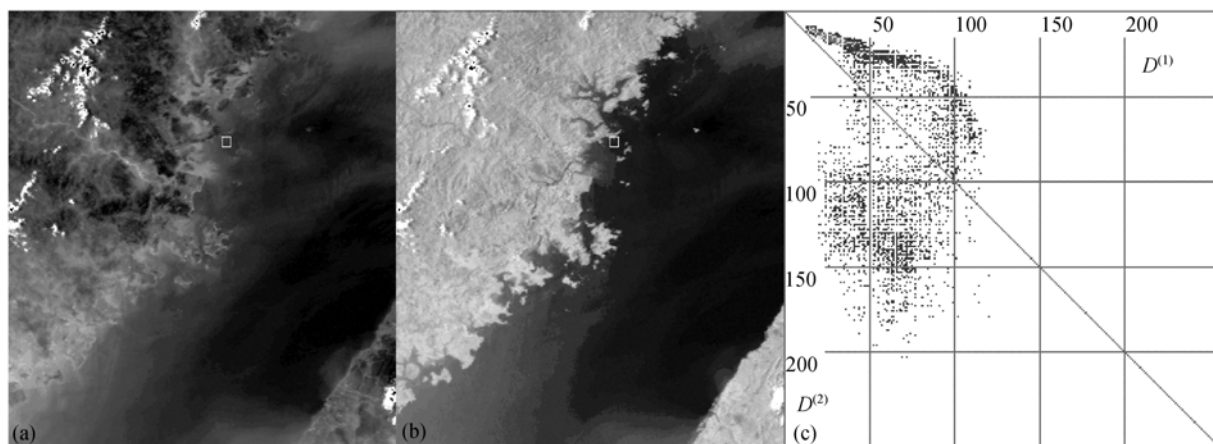


图2 2003年6月3日闽江口赤潮期间的 AVHRR 遥感数据

(a) 波段 1 遥感记录 $D^{(1)}$, 方框表示 2003 年 6 月 2 日 10:00~15:40 测量区; (b) 波段 2 遥感记录 $D^{(2)}$, 方框表示 2003 年 6 月 2 日 10:00~15:40 测量区; (c) $D^{(1)}$ ~ $D^{(2)}$ 二维直方图

$$\begin{aligned} R_{rs}^{(1)} &= g [b_b^{(1)} / (a^{(1)} + b_b^{(1)})]; \\ R_{rs}^{(2)} &= g [b_b^{(2)} / (a^{(2)} + b_b^{(2)})]. \end{aligned} \quad (1)$$

参数 g 为高浑浊水体所能达到的水面上遥感反射率最大值, 其值为 f/Q 和 t^2/n^2 的乘积^[17]. 其中, f/Q 在一类水体取 0.0949^[16], 在高散射系数的近岸水体采用

0.084^[18], 均值为 0.0895, 取 t^2/n^2 0.54^[17], 参数 g 则为 0.0483.

鉴于波段 2 吸收系数 $a^{(2)}$ 很接近纯水吸收系数 $a_w^{(2)}$, $R_{rs}^{(2)}/g$ 值可以近似地表达波段 2 的后向散射系数 $b_b^{(2)}$ (图 3).

$$\begin{aligned} R_{rs}^{(2)}/g &= b_b^{(2)}/(a^{(2)}+b_b^{(2)}) = 1/(a^{(2)}/b_b^{(2)}+1) \\ &\approx 1/(a_w^{(2)}/b_b^{(2)}+1). \end{aligned} \quad (2)$$

反映 $R_{rs}^{(1)}$ 和 $R_{rs}^{(2)}$ 之间联系的方程组, 可参考Li^[19]由(1)式导出,

$$\begin{aligned} R_{rs}^{(2)-1} &= \alpha_0 R_{rs}^{(1)-1} + g^{-1} (1-\alpha_0); \\ \alpha_0 &= (b_b^{(1)}/b_b^{(2)})(a^{(2)}/a^{(1)}). \end{aligned} \quad (3)$$

在 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 坐标系中, (3)式所定义的 α_0 等值线表现为一弧线族, 弧线族具有共同的端点 $R_{rs}^{(1)} = R_{rs}^{(2)} = g$, 以及 $R_{rs}^{(1)} \approx R_{rs}^{(2)} \approx 0$ 的交会区(图 3).

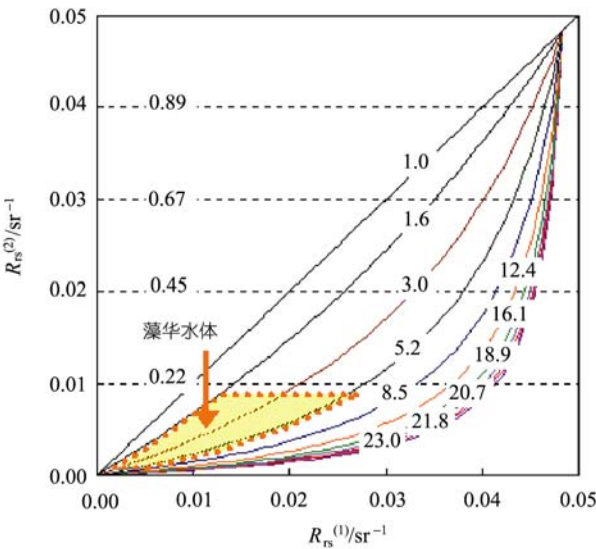


图 3 AVHRR 波段 1 和波段 2 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 坐标系中的 α_0 等值线族(实线)和 $R_{rs}^{(2)}/g$ 等值线族(虚线)
粗虚线内为 $1.6 < \alpha_0 < 5.2$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$ 的藻华水体识别窗[见(14)式]

3 藻华水体遥感识别的 α_0 值和 $R_{rs}^{(2)}/g$ 值判据

(3)式所定义的 α_0 可以由纯水、悬浮泥沙、叶绿素a和黄色物质对AVHRR的波段1和波段2后向散射系数的贡献 $b_{bw}^{(1)}, b_{bs}^{(1)}, b_{bc}^{(1)}, b_{bw}^{(2)}, b_{bs}^{(2)}, b_{bc}^{(2)}$, 以及对吸收系数的贡献 $a_w^{(1)}, a_s^{(1)}, a_c^{(1)}, a_y^{(1)}, a_w^{(2)}, a_s^{(2)}, a_c^{(2)}, a_y^{(2)}$ 所构成. 对于基本满足 $b_{bc}^{(1)} + b_{bs}^{(1)} \gg b_{bw}^{(1)}, b_{bc}^{(2)} + b_{bs}^{(2)} \gg b_{bw}^{(2)}$ 和 $a_w^{(2)} + a_s^{(2)} + a_y^{(2)} \gg a_c^{(2)}$ 的藻华水体, α_0 可以近似表示为

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= (b_b^{(1)}/b_b^{(2)})(a^{(2)}/a^{(1)}) \\ &= [(b_{bw}^{(1)} + b_{bs}^{(1)} + b_{bc}^{(1)})/(b_{bw}^{(2)} + b_{bs}^{(2)} + b_{bc}^{(2)})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\cdot [(a_w^{(2)} + a_s^{(2)} + a_c^{(2)} + a_y^{(2)})/ \\ &(a_w^{(1)} + a_s^{(1)} + a_c^{(1)} + a_y^{(1)})] \\ &\approx [(b_{bc}^{(1)} + b_{bs}^{(1)})/(b_{bc}^{(2)} + b_{bs}^{(2)})] \\ &\cdot [(a_w^{(2)} + a_s^{(2)} + a_y^{(2)})/(a_w^{(1)} + a_s^{(1)} + a_c^{(1)} + a_y^{(1)})]. \end{aligned} \quad (4)$$

由于藻类和非藻类颗粒的散射均符合Mie散射规律, 后向散射系数 b_{bc} 和 b_{bs} 均随波长按幂指数率减小, 简单地将藻类和非藻类颗粒后向散射系数之和 $b_{bc} + b_{bs}$ 表达为波长 400 nm时的后向散射系数 X 和散射曲线形态参数 Y 的函数^[18],

$$\begin{aligned} b_{bc}^{(1)} + b_{bs}^{(1)} &= X(400/\lambda_1)^Y; \\ b_{bc}^{(2)} + b_{bs}^{(2)} &= X(400/\lambda_2)^Y. \end{aligned} \quad (5)$$

由于非藻类物质的吸收系数 a_s 和 a_y 均随波长按指数率减小, 简单地将吸收系数之和 $a_s + a_y$ 的生物-光学模式表达为波长 400 nm时的吸收系数 G 和吸收曲线形态参数 S 的函数^[17],

$$\begin{aligned} a_s^{(1)} + a_y^{(1)} &= G \exp[-S(\lambda_1 - 400)]; \\ a_s^{(2)} + a_y^{(2)} &= G \exp[-S(\lambda_2 - 400)]; \end{aligned} \quad (6)$$

并引用表述藻类颗粒叶绿素a浓度 C 及其波段 1 吸收系数 $a_c^{(1)}$ 的生物-光学模式^[16],

$$a_c^{(1)} = AC^{1-B}, \quad (7)$$

则 α_0 可以由下式估计,

$$\begin{aligned} \alpha_0 &\approx (\lambda_2/\lambda_1)^Y \{a_w^{(2)} + G \exp[-S(\lambda_2 - 400)]\} / \{a_w^{(1)} \\ &+ G \exp[-S(\lambda_1 - 400)] + AC^{1-B}\}. \end{aligned} \quad (8)$$

取,

$$\begin{aligned} Y &= 1; \quad (\text{据Tassan}^{[20]}) \\ a_w^{(1)} &\approx a_w^{(630 \text{ nm})} = 0.292 \text{ m}^{-1}; \quad (\text{据Pope和Fry}^{[21]}) \\ a_w^{(2)} &\approx a_w^{(900 \text{ nm})} = 6.67 \text{ m}^{-1}; \quad (\text{据Palmer和Williams}^{[22]}) \\ S &= 0.012; \quad (\text{据曹文熙等}^{[23]}) \\ G &= 2 \text{ m}^{-1} \\ A &= 0.023; \\ B &= 0.08. \end{aligned} \quad (9)$$

则 α_0 为叶绿素a浓度 C 的函数(表 1),

$$\alpha_0 \approx 9.64/(0.419 + 0.023C^{0.992}). \quad (10)$$

由(3)和(10)式, 红光波段遥感反射率与近红外波段遥感反射率的关系也是叶绿素a浓度 C 的函数,

$$\begin{aligned} R_{rs}^{(2)-1} &= [9.64/(0.419 + 0.023C^{0.992})]R_{rs}^{(1)-1} \\ &+ [1 - 9.64/(0.419 + 0.023C^{0.992})]g^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

(11)式表明水体的叶绿素a浓度与 α_0 值负相关. 叶绿素a浓度越高, α_0 越小, $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 关系函数弧线的曲率越小, 越接近直线 $R_{rs}^{(1)} = R_{rs}^{(2)}$. 反之, 叶绿素

表 1 不同叶绿素a浓度条件下的 α_0 计算值($G = 2 \text{ m}^{-1}, A = 0.023, B = 0.08$)

叶绿素a浓度 $C/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0	1	2	4	8	16	32	64	128	256
α_0	23.0	21.8	20.7	18.9	16.1	12.4	8.5	5.2	3.0	1.6

a浓度越低, α_0 越大, $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 关系函数弧线的曲率越大, 越接近对应叶绿素a浓度 $C = 0$ 的含沙水体, α_0 值为 23 的弧线,

$$R_{rs}^{(2)-1} = 23R_{rs}^{(1)-1} - 22g^{-1}. \quad (12)$$

由(2)和(9)式, 波段 2 的后向散射系数可表达为 $R_{rs}^{(2)}/g$ 的正相关函数,

$$\begin{aligned} b_b^{(2)} &\approx a_w^{(2)} / \{ [1/(R_{rs}^{(2)}/g)] - 1 \} \\ &= 6.67(R_{rs}^{(2)}/g) / [1 - (R_{rs}^{(2)}/g)]. \end{aligned} \quad (13)$$

事实上, 藻类颗粒的聚集引起叶绿素a浓度 C 增高(α_0 减小), 同时, 也引起波段 2 后向散射系数 $b_b^{(2)}$ 增大($R_{rs}^{(2)}/g$ 值增加). 如果将藻华水体的叶绿素浓度范围设为 $64 \mu\text{g/L} < C < 256 \mu\text{g/L}$, 根据(10)式, 藻华水体的 α_0 值判据将在 5.2~1.6 范围内变动. 假定悬浮颗粒以藻类颗粒占优势, 并具有一类水体文献中常用的叶绿素a浓度与 $b_b^{(2)}$ 值的关系^[20], 相应的 $b_b^{(2)}$ 在 $0.08 \sim 0.2 \text{ m}^{-1}$ 范围内变动¹⁾, 藻华水体的 $R_{rs}^{(2)}/g$ 值判据在 0.01~0.03 间变动. 考虑到藻类颗粒出现在近表层的藻华水体近红外反射信号呈数量级增加^[13], 藻华水体对应的 $R_{rs}^{(2)}/g$ 值将增大. 因此识别藻华水体的 α_0 值和 $R_{rs}^{(2)}/g$ 值判据可选为(图 3):

$$\begin{aligned} 1.6 &< \alpha_0 < 5.2; \\ 0.01 &< R_{rs}^{(2)}/g < 0.2. \end{aligned} \quad (14)$$

4 AVHRR 遥感数据的藻华水体识别步骤

4.1 确定校准点 $R_{rs}^{(1)} \approx R_{rs}^{(2)} \approx 0$

调入AVHRR的波段1与波段2遥感记录 $D^{(1)}, D^{(2)}$, 构造其二维直方图(图 2). 选择由洁净到浑浊的含沙水体子区, 在 $D^{(1)} \sim D^{(2)}$ 二维直方图上根据含沙水体点群所构成的弧线, 以及云点群或太阳耀光点群所构成直线的下交点, 或取比洁净水遥感记录值最小值小一个记录单位的记录值, 分别确定为 $R_{rs}^{(1)} = 0$ 和 $R_{rs}^{(2)} = 0$ 所对应的遥感记录 $D_0^{(1)}$ 和 $D_0^{(2)}$.

4.2 确定校准点 $R_{rs}^{(1)} = R_{rs}^{(2)} = g$

在 $D^{(1)} \sim D^{(2)}$ 二维直方图上根据含沙水体弧线点群和云或太阳耀光直线点群的上交点, 分别确定 $R_{rs}^{(1)} = g$ 和 $R_{rs}^{(2)} = g$ 所对应的遥感记录值 $D_g^{(1)}$ 和 $D_g^{(2)}$.

另一个方法是选取含沙水体子区数据, 按最小二乘法获 $(D^{(1)} - D_0^{(1)})^{-1}$ 与 $(D^{(2)} - D_0^{(2)})^{-1}$ 的线性回归系数 a 和 b , 估算 $R_{rs}^{(1)} = g$ 和 $R_{rs}^{(2)} = g$ 所对应的遥感记录值 $D_g^{(1)}$ 和 $D_g^{(2)}$,

$$\begin{aligned} (D^{(2)} - D_0^{(2)})^{-1} &= a [C_{21}(D^{(1)} - D_0^{(1)})]^{-1} + b; \\ D_g^{(1)} &= (1 - a)/b/C_{21} + D_0^{(1)}; \\ D_g^{(2)} &= (1 - a)/b + D_0^{(2)}. \end{aligned} \quad (15)$$

其中 C_{21} 是遥感反射率换算的比例因子, 一般由 $D^{(1)} \sim D^{(2)}$ 二维直方图上的云点阵或太阳耀光点阵斜率给定^[4].

4.3 藻华水体识别及其图像显示

逐点计算归一化遥感反射率 $R_{rs}^{(1)}/g$ 和 $R_{rs}^{(2)}/g$ 值,

$$\begin{aligned} R_{rs}^{(1)}/g &= (D^{(1)} - D_0^{(1)}) / (D_g^{(1)} - D_0^{(1)}); \\ R_{rs}^{(2)}/g &= (D^{(2)} - D_0^{(2)}) / (D_g^{(2)} - D_0^{(2)}). \end{aligned} \quad (16)$$

逐点计算 α_0 值,

$$\alpha_0 = ((R_{rs}^{(2)}/g)^{-1} - 1) / ((R_{rs}^{(1)}/g)^{-1} - 1); \quad (17)$$

接着显示遥感图像中符合(14)式所列藻华水体 α_0 和 $R_{rs}^{(2)}/g$ 值经验判据的藻华水体像元.

图 4(a) 为 2003 年 6 月 3 日闽江口赤潮发生期间的 $D^{(1)} \sim D^{(2)}$ 二维直方图, 并标出选定的两个校准点和叠加在二维直方图上的藻华水体识别窗. 图 4(b) 在 $D^{(2)}$ 底图上显示的藻华水体识别图像. 2003 年 6 月 2 日现场观测的闽江口赤潮发生区, 正落于遥感识别到的闽江口藻华发生区的 A 区内.

5 藻华水体遥感识别模式的比较

5.1 与单波段模式的比较

藻华水体的 680~740 nm 反射峰红移, 加上 740 nm 以上近红外波段藻华颗粒散射引起反射, 足以产生在清洁水背景中可被识别的 AVHRR 波段 2 高反射率信号. 选择合适的 AVHRR 波段 2 遥感反射率阈值, 可以将具有较高反射率的藻华水体与周边清水分开. Prangsmas 和 Roozekrans^[24], Gower^[5], Stumpf 等^[2] 和 Kahru 等^[6] 利用 AVHRR 波段 2 相对较高反射率信息, 成功地进行了近海清水区藻华水体的遥感识别及其时间序列分析. 根据 $R_{rs}^{(2)}$ 等值线族定义的单波段模式的分类窗, 在 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图上呈水平条带, 将藻华水体点群定义在 $R_{rs}^{(2)}$ 大于某个经验阈值的区间, 显然只能将高散射特性藻华水体从低浊水体区分出来, 而无法区分具有高散射特性藻华水体与浑浊水体, 也无法区分低散射特性藻华水体与低浊水体(图 5).

5.2 与比值法和 NDVI 法的比较

比值法及其相关的 NDVI 法均为双波段识别的

1) 参照 Tassan^[20], $b_b^{(2)} = 0.005(0.12C^{0.63})/a_c^{(550\text{nm})}/a_c^{(2)}$, 取 $a_c^{(550\text{nm})}/a_c^{(2)} = 10$, 对应 $64 \mu\text{g/L} < C < 256 \mu\text{g/L}$ 区间, 有 $0.08 \text{ m}^{-1} < b_b^{(2)} < 0.2 \text{ m}^{-1}$

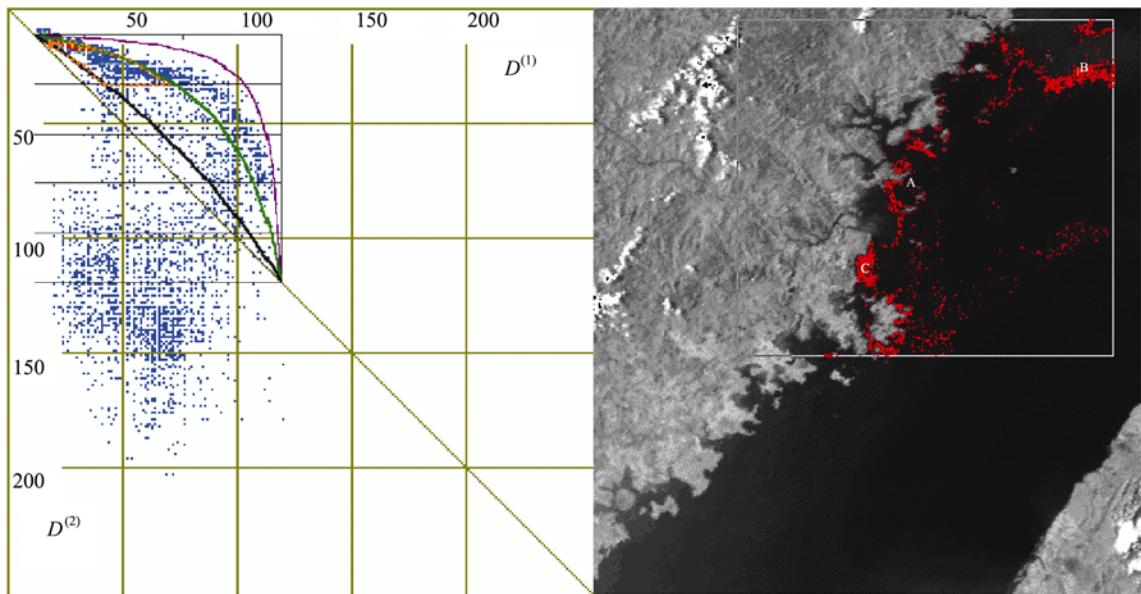


图 4

2003 年 6 月 3 日闽江口及毗邻水域的: (a) $D^{(1)} \sim D^{(2)}$ 二维直方图、选定的低交点(小网格框的左上角)和高交点(小网格框的右下角)、叠加在二维直方图上的藻华水体识别模板(红色虚框); (b) $D^{(2)}$ 图像上显示的藻华水体分布区 (A 区: 2003 年 6 月 2 日现场观测的闽江口藻华发生区; B 区: 浙江南部海域疑似藻华区; C 区: 闽江口潮间带和潮下带的疑似藻华区)

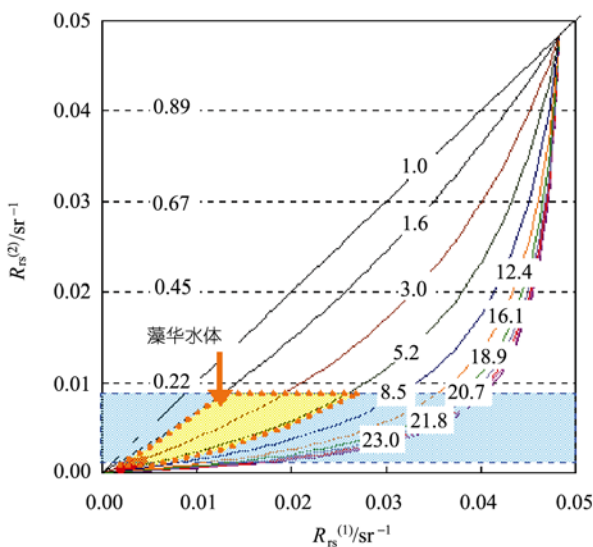


图 5

AVHRR 波段 1 和波段 2 的 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图上的(14)式藻华水体识别窗(虚线框: $1.6 < \alpha_0 < 5.2$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$)和单波段模式分类窗(浅蓝色条带: $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$). 红色圆点为 2003 年 6 月 2 日闽江口藻华水体的现场测量结果

流模式. Stumpf 等^[11]认为, 水体的 AVHRR 波段 2 和波段 1 遥感反射率比值($R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$)与藻华密度正相关. 在 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图上, 比值法分类窗根据 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$ 等值线族定义, 表现为以坐标原点为中心的辐

射状条带, 其中云或太阳耀光点群的 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)} = 1$, 水体点群 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)} \leq 1$, 藻华水体点群分布介于两者之间, $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$ 为 0.3~0.7(图 6). 赵冬至等^[10]利用现场同步观测数据验证浓度 2~17 $\mu\text{g/L}$ 区间的叶绿素 a 与 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$ 具有精度为 $\pm 4 \mu\text{g/L}$ 的线性相关关系. 对于低浊水体, 比值法的 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$ 等值线族判据接近(14)式的 α_0 等值线族判据, 藻华水体识别效果相近. 但在高浊水体, 比值法的 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$ 等值线族判据明显偏离(14)式的 α_0 等值线族判据, 难以区分高叶绿素 a 水体点群与高含沙水体点群, 影响了比值法在高浊水体中的藻华水体识别能力.

比值 $R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)}$ 可换算为常用的 NDVI 值,

$$\text{NDVI} = (R_{rs}^{(2)} - R_{rs}^{(1)}) / (R_{rs}^{(2)} + R_{rs}^{(1)}) \\ = (R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)} - 1) / (R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)} + 1) \quad (18)$$

NDVI 等值线族在 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图上同样呈辐射状分布(图 6). 在低浊水体, NDVI 也具有与藻华密度的正相关联系^[11,12]. 但在高浊水体, NDVI 等值线族判据同样偏离了 α_0 等值线族判据, 影响了 NDVI 法在高浊水体中的藻华水体识别能力.

显然, 只有增加了与(14)式相同的附加 $R_{rs}^{(2)}/g$ 判据 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$, 比值法或 NDVI 法的藻华水体识别窗口方才接近(14)式的窗口.

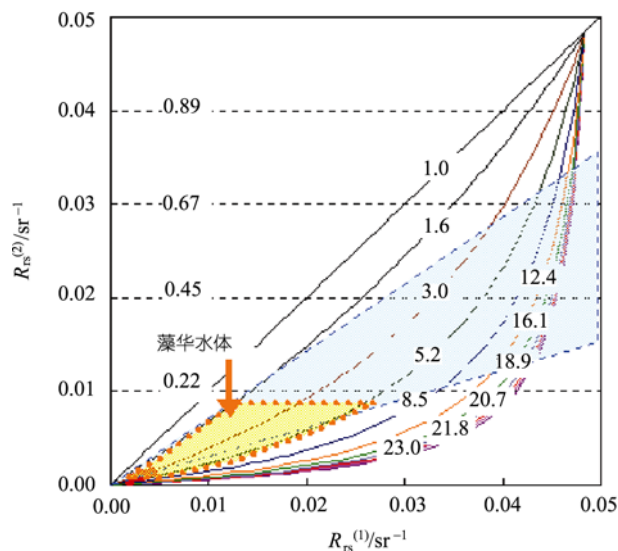


图 6

AVHRR波段 1 和波段 2 的 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图上的(14)式藻华水体识别窗(虚线框: $1.6 < \alpha_0 < 5.2$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$)和比值法(浅蓝色条带: $0.3 < R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)} < 0.7$)或NDVI法(浅蓝色条带: $0.18 < NDVI < 0.54$)分类窗。红色圆点为 2003 年 6 月 2 日藻华期间江口水体测量结果

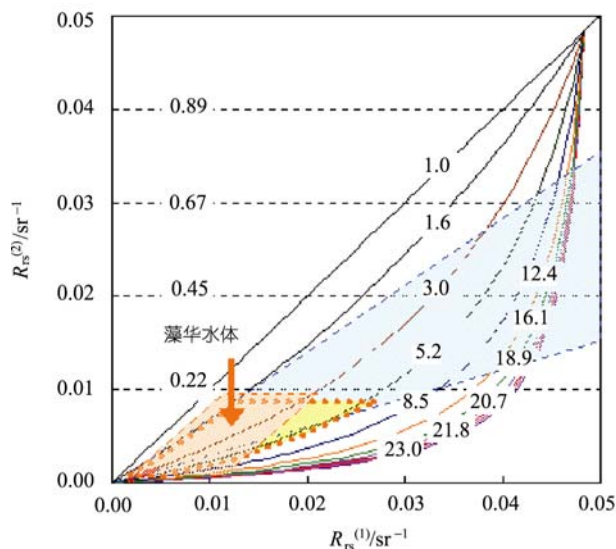


图 7

AVHRR波段 1 和波段 2 的 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图与(14)式表达的藻华水体识别窗(虚线框: $1.6 < \alpha_0 < 5.2$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$)、比值法分类窗(浅蓝色条带: $0.3 < R_{rs}^{(2)}/R_{rs}^{(1)} < 0.7$)和差值法分类窗(浅棕色条带: $0.002 < R_{rs}^{(1)} - R_{rs}^{(2)} < 0.012$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$)。红色圆点为 2003 年 6 月 2 日藻华期间江口水体测量结果

5.3 与差值法的比较

Gower [4]根据加拿大西海岸藻华遥感图像的分析提出, 当 $R_{rs}^{(2)}$ 小于某个经验阈值时, 水体AVHRR波段 1 与波段 2 遥感反射率的差 $R_{rs}^{(1)} - R_{rs}^{(2)}$ 与藻华密度正相关。在 $R_{rs}^{(1)} \sim R_{rs}^{(2)}$ 二维直方图上, 差值法的分类窗为 $R_{rs}^{(2)}$ 经验阈值与 $R_{rs}^{(1)} - R_{rs}^{(2)}$ 等值线族联合定义的四边形, 其中云或太阳耀光点群的 $R_{rs}^{(1)} - R_{rs}^{(2)} = 0$, 水体点群的 $R_{rs}^{(1)} - R_{rs}^{(2)} \geq 0$, 藻华水体的点群分布介于两者之间(图 7)。Gower [4]的差值法尽力突出波段 1 悬浮颗粒散射背景反射峰的正影响而忽略藻华水体 670 nm附近吸收峰的负影响, 尽管设置了 $R_{rs}^{(2)}$ 经验阈值限制高浊水体的误识别, 但该方法仍很难将藻华水体与悬浮泥沙颗粒占优势的低浊水体区分开。可能是这个原因, 差值法较少得到应用。有意思的是, Gower [4]在提出差值法的论文中, 仍同时进行了比值法分析, 并未作出明确取舍。实际上如果联用差值法和比值法, 将藻华水体定义为 $R_{rs}^{(1)}$ 与 $R_{rs}^{(2)}$ 的比值和差值在一定 $R_{rs}^{(2)}/g$ 范围内的并集, 与(14)式所识别的藻华水体点群已经相当接近(图 7)。

6 结论

通过藻华水体的近红外波段与红光波段遥感识别模式物理机理的研究, 提出了基于遥感反射

率关系函数 $R_{rs}^{(2)-1} = \alpha_0 R_{rs}^{(1)-1} + g^{-1} (1 - \alpha_0)$ 的双波段模式, 主要结论包括:

() AVHRR波段 1 和波段 2 的藻华水体识别窗为 $1.6 < \alpha_0 < 5.2$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$;

() 提出确定校准点 $R_{rs}^{(1)} \approx R_{rs}^{(2)} \approx 0$ 和 $R_{rs}^{(1)} = R_{rs}^{(2)} = g$, 在AVHRR波段 1 和波段 2 遥感图像上实现藻华水体识别窗信息提取的步骤;

() 以 $1.6 < \alpha_0 < 5.2$ 和 $0.01 < R_{rs}^{(2)}/g < 0.2$ 定义的藻华水体识别窗比现有的单波段模式和双波段模式(括比值法、NDVI法、差值法等)准确稳定, 可发展成为藻华水体遥感识别的规范化模式。

致谢 多年来与国内外同行在海洋遥感监测和二类水体遥感研讨会上的交流, 对上述模式的形成帮助很大, 作者借此对研讨会组织者和参加者表示感谢。本项研究受国家自然科学基金项目(批准号: 40176039)和国家高技术研究发展计划项目(批准号: 2001AA630601, 2002AA639540)资助。

参 考 文 献

- 1 Stumpf R P, Tyler M A. Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries. Remote Sensing of Environment, 1988, 24: 358~404
- 2 Stumpf R P, Megan L F. Use of AVHRR imagery to examine long-tem trends in water clarity in coastal estuaries: example in

- Florida Bay. In: Kahru M, Brown C W, eds. Monitoring Algal Bloom: New Techniques for Detecting Large-scale Environmental Change. Spring-Velag and Landes Bioscience, 1997. 3~23
- 3 Stumpf R P, Culver M E, Tester P A, et al. Monitoring *Karenia brevis* blooms in the Gulf of Mexico using satellite ocean color imagery and other data. Harmful Algae, 2003, 2: 147~160
- 4 Gower J F R. Red tide monitoring using AVHRR HRPT imagery from a local Receiver. Remote Sensing of Environment, 1994, 48:309~318 [\[DOI\]](#)
- 5 Gower J F R. Bright plankton blooms on the west coast of North America observed with AVHRR imagery. In: Kahru M, Brown C W, eds. Monitoring Algal Bloom: New Techniques for Detecting Large-scale Environmental Change. Spring-Velag and Landes Bioscience, 1997. 25~41
- 6 Kahru M. Using satellites to monitor large-scale environmental change: a case study of cyanobacteria blooms in the Baltic Sea. In: Kahru M, Brown C W, eds. Monitoring Algal Bloom: New Techniques for Detecting Large-scale Environmental Change. Spring-Velag and Landes Bioscience, 1997. 43~61
- 7 黄伟良, 毛显谋, 张鸿翔, 等. 赤潮卫星遥感监测与实时预报. 海洋预报, 1998, 15:111~115
- 8 Huang W G, Lou X L. A method for detecting red tides using AVHRR Imagery. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, JUL 09-13, 2001, IGARSS 2001: Scanning the Present and Resolving the Future, 2001, Vols 1-7, Proceedings: 2805~2807
- 9 赵冬至. AVHRR 在赤潮海表浮游植物细胞数探测中的应用. 海洋环境科学, 2003, 22(1): 10~14;
- 10 赵冬至, 张丰收, 赵玲, 等. 近岸海域叶绿素和赤潮的 AVHRR 波段比值探测方法研究. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 9~12
- 11 Gower J F R. Observation of *in situ* fluorescence of chlorophyll in Senanich Inlet. Boundary-layer Meteorology, 1980, 18: 235~245 [\[DOI\]](#)
- 12 Gower J F R, Borstad G A. Use of *in vivo* fluorescence line at 685 nm for remote sensing surveys of surface chlorophyll a, in Oceanography from Space, Gower J F R ed. Plenum, New York, 1981. 329~338
- 13 Richardson L L. Remote sensing of algal bloom dynamics: New research fused remote sensing of aquatic ecosystems with algal accessory pigment analysis. BioScience, 1996, 46(7): 492~501
- 14 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. 遥感学报, 2000, 4(1): 41~45
- 15 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. 科学通报, 1999, 44(17): 1892~1897
- 16 Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. A semianalytic radiance model of ocean color. Journal of Geophysical Research, 1988, 93, 10909~10924
- 17 Carder K L, Chen F R, Lee Z P, et al. Semianalytic moderate-resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C3): 5403~5421 [\[DOI\]](#)
- 18 Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. Applied Optics, 1999, 38(18): 3831~3843
- 19 Li Y. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters: comment. Applied Optics, 2003, 42 (6): 893~895
- 20 Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. Applied Optics, 1994, 33(12): 2369~2378
- 21 Pope R, Fry E. Absorption spectrum (380-700nm) of pure water: II. Integrating cavity measurements. Applied Optics, 1997, 36(33): 8710~8722
- 22 Palmer K F, Williams D. Optical properties of water in the near infrared. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64: 1107~1110
- 23 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式. 科学通报, 2003, 48(17): 1876~1882
- 24 Prangma G J, Roozekrans J N. Using AVHRR HRPT imagery in assessing water quality parameters, International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(4-5): 811~818

(2005-04-05 收稿, 2005-08-29 收修改稿)