

荧光法遥感海面叶绿素浓度的 波段选择研究

潘德炉⁺ J. F. G. Gower⁺⁺ 林寿仁⁺

(⁺国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

(⁺⁺加拿大国立海洋研究所)

提要 本文从荧光波段范围内的大气效应出发, 提出了可能应用于荧光法遥感海面叶绿素浓度的波段。并且用同一高度的航空遥感资料建立了荧光高度值随波段中心位置和带宽变化的定量线性模式。其次, 通过对不同高度的航空遥感资料分析, 提出了最佳波段选择的判别式。最后得到了两组最佳波段, 基本上能满足遥感海面叶绿素 a (文中简称叶绿素浓度) 的使用要求。

在自然日光激励下, 海面荧光辐射量随叶绿素浓度的增高而增大(图1), 因此就可以通过遥感技术, 应用以下公式监测海面叶绿素的浓度^[2,3]:

$$CHL = a(FLH) + b \quad (1)$$

式中, CHL ——海面表层叶绿素的浓度 (mg/m^3); $|a, b|$ ——由多次航空飞行实验中得到的回归系数; FLH ——在飞机上传感器所测得的荧光高度 [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$], 如图2所示, 由下式计算。

$$FLH = F(B_s) - \frac{\lambda_s - \lambda_r}{\lambda_s - \lambda_q} [F(B_q) - F(B_s)] \quad (2)$$

$$F(B_i) = \frac{1}{\Delta\lambda_i} \int_{B_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}}^{B_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2}} f(B_i) dB_i \quad (3)$$

式(2)和(3)中, $\Delta\lambda_i$ ——波段 B_i 的带宽 (nm); $F(B_i)$ ——包含叶绿素信息的光谱辐射率函数; $f(B_i)$ ——波段 B_i 在带宽 $\Delta\lambda_i$ 范围内的平均辐射率 [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$]; $\lambda_q, \lambda_r, \lambda_s$ ——分别为波段 B_q, B_r 和 B_s 的中心波长 (nm)。

海面叶绿素本身的荧光辐射量很弱, 每 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 叶绿素浓度变化一般为 0.02×10^{-8} — $0.09 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, 而在遥感中受大气的程辐射影响却很大, 如在 6250m 高度下测得辐射值的 80—85% 来自大气^[6]。同时又受到氢气、氧气和水汽等吸收, 因此应用公式(1),(2)和(3)时, 必须选择受大气影响最小, 而包含叶绿素信息最大的三个波段, 包括每一波段的中心位置和带宽的最佳选择。

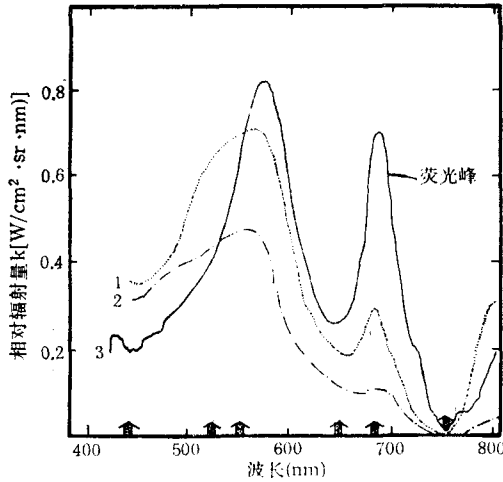


图 1 叶绿素浓度与荧光峰的关系

Fig. 1 Relationship between chlorophyll concentration and fluorescence peak
a. 6mg/m³; b. 2mg/m³; c. 18mg/m³.

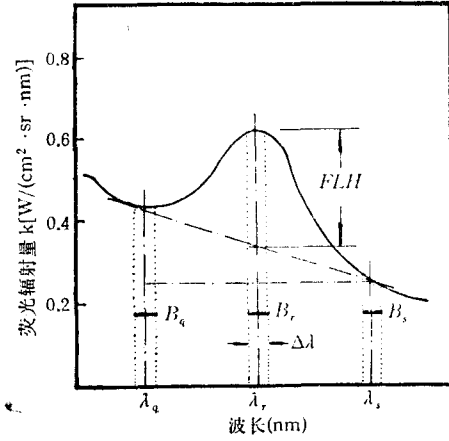


图 2 荧光高度计算示意图

Fig. 2 FLH computation graph

一、波段组合与荧光高度高度的关系

为了研究不同波段组合与荧光高度高度的关系，使用加拿大海洋渔业部研制的新一代水色传感器——荧光成像光谱仪 (FLI)。该传感器由二维电荷耦合器件 (CCD) 阵组成，实行推进式扫描，每扫描行具 1 925 个空间象元点，在光谱范围 430—800nm 内，有 288 个光谱通道，每一光谱通道宽 1.4nm，光谱分辨率为 2.5nm^[4]。图 3 是 1984 年 12 月美国切萨皮克 (Chesapeake) 湾口在 1 625m 高度下用 FLI 测得的荧光光谱曲线。由图 3 可看到，以 656.9nm 为中心有氢气的吸收带，以 689.3nm 为中心有氧气的吸收带，以 702 和 720nm 为中心有水汽的吸收带，以 761nm 为中心有氧气的吸收带。在不同日期、不同地点、不同高度下，所测得荧光光谱曲线的大气吸收特征与图 3 所示曲线十分相似。参照图 3 所测的荧光范围的光谱特征和大气吸收带，以尽可能避开以上所提的大气吸收带为原则，首先找到可能用于公式(2)中波段组合的 q, r, s 的波段 (如图 3 中粗黑线段所示)。这些波段的范围如表 1 所列，由以上找到的 7 个波段，由于它们中心波长决定，波段 3, 4 只能作为前基点波段，波段 5w, 5N 只能作为荧光峰波段，其它 3 个波段只能作为后基点波段。因此，适应于公式(2)中的 q, r 和 s 的波段组合可以有表 2 所列的前 12 种，波段组合中第 13 种是德国空间中心应用于测荧光高度高度的波段组合，三个波段为 643.5—

表 1 可能用于 q, r, s 波段组合的波段带宽

Tab. 1 Wavelength(nm) of potential bands by q, r, s combinations

波段	3	4	5w	5N	6	7	8
带宽 (nm)	633.4—643.9	659.5—672.5	673.5—688.5	677.7—682.8	708.8—713.9	746.2—757.8	772.0—782.3

654.5nm, 677—687nm 和 742—756nm。

表 2 可能出现的波段组合方式

Tab. 2 Potential band combinations

组合方式	采用的波段
1	3, 5w, 6
2	3, 5w, 7
3	3, 5w, 8
4	4, 5w, 6
5	4, 5w, 7
6	4, 5w, 8
7	3, 5N, 6
8	3, 5N, 7
9	3, 5N, 8
10	4, 5N, 6
11	4, 5N, 7
12	4, 5N, 8
13	1)FLR
14	I. O. S

波段组合第 14 种是加拿大国立海洋科学研究所通常用于普遍光谱仪测叶绿素浓度的波段组合,三个波段为645—659nm, 677.3—691.3 nm 和 709.5—723.5nm。用荧光范围内所得到的 14 种波段组合 q, r, s 分别求得在 1 625m 高度下对同一海面测得的荧光高度(如表 3 所列)。从表 3 结果发现第三种波段组合计算得的荧光高度为负值,在试验中又把飞行高度升到 3 375m,再升至 6 250m,发现第 3, 6, 9, 12 四种波段组合计算得到荧光高度为负值,对照表 2 发现,这四种波段组合中都有 B_8 波段参与,由于 B_8 (见图 3)波段作为后基点波段偏离荧光峰太远,以致基线高于荧光峰,所以 B_8 波段应该被排除。不考虑表 2 中的第 3, 6, 9, 12 四种波段的组合。对留下的 10 种波段组合所测得荧光高度间的关系进行分析。其方法是,挑选三个波段

q, r, s 中其中两个波段的中心位置与带宽相同条件下,而另一波段位置或带宽不同的两种组合测得 FLH 进行对比(如图 4 所示)。由图 4 可见,在两基点波段 q, s 不变的情况下,荧光峰 r 波段取窄的带宽要比取宽的带宽所测得的荧光高度值平均增大 $66.3 \times 10^{-10} W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$, 在 q, r 两波段不变的情况下, s 波段取 B_6 比取 B_7 测得的荧光高度平均增大 $10.5 \times 10^{-10} W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$ 。在 r, s 两波段不变的情况下, q 波段取 B_3 比 B_4 测得的荧光高度平均增大 $40.75 \times 10^{-10} W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$ 。各波段组合在离开海岸 50km 同一飞行航线的相同海区下,所测得荧光高度的关系如图 5 所示。由图 5 可见,10 种不同波段组合所测得荧光高度的斜率较为一致,只是截距不同,由计算机对不同波段组合得到的荧光高度图象统计平均,求相关关系,可以得到以下不同波段组合与测得荧光高度值间的线性相关。

$$FLH(A_i) = K \cdot FLH(A_5) + C_i \tag{4}$$

$$C_i = (C_7 - C_5)(0.35x + 0.56y + 0.09z) - C_5 \tag{5}$$

式(4)和(5)中, $FLH(A_i)$ ——在第 i 种波带组合时的荧光高度; C_i ——波段组合 A_i 与波段组合 A_5 测得荧光高度间的截距; K ——波段组合 A_i 与波段组合 A_5 测得的荧光高度

表 3 在 1 625m 高度下,不同波段组合下测得的荧光高度值[单位 $10^{-10} W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$]

Tab. 3 FLH calculated by different band combinations at altitude 1 625m [unit $10^{-10} W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$]

组合方式	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	685nm 处辐射
FLH	184	142	①	146	120	48①	243	205	405①	210	180	110	213	251	3 569

注: ①表示出现负值。

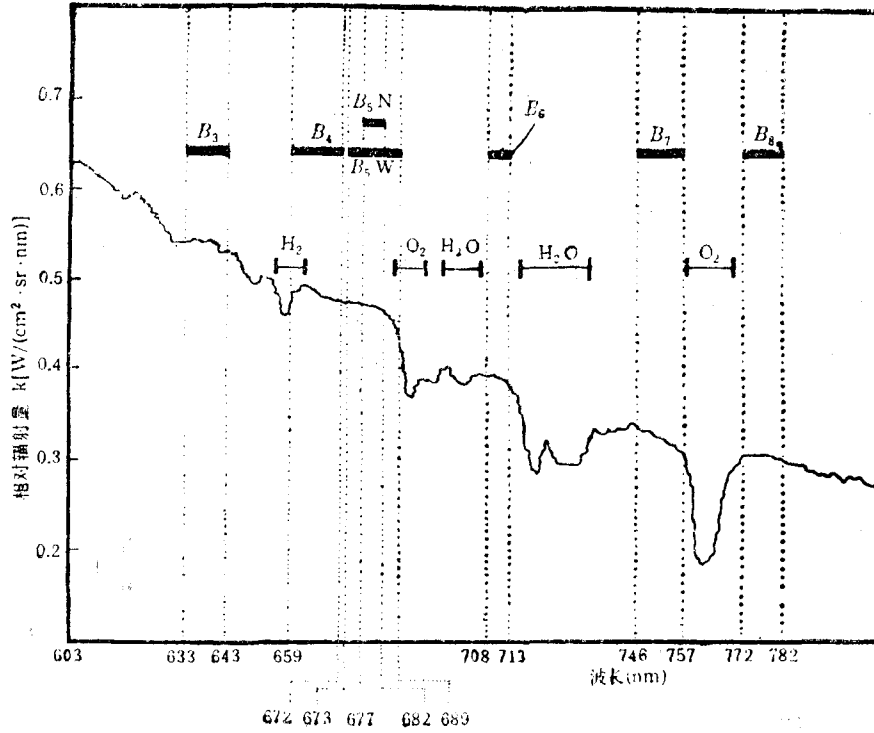


图 3 荧光范围的大气吸收和可能用于测荧光高度的波段

Fig. 3 Atmospheric absorption and potential bands for measuring FLH by fluorescence spectra

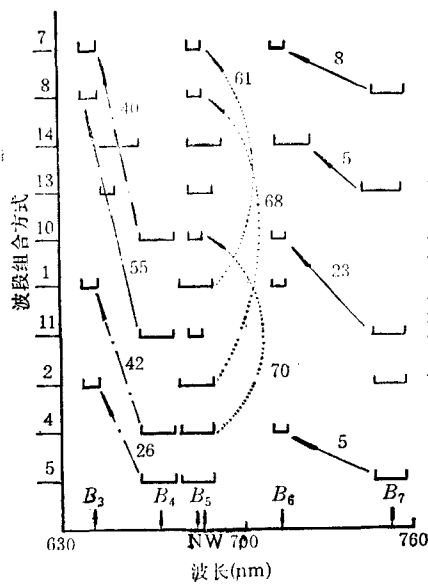


图 4 在两个波段完全相同条件下,由于另一波段不同所引起荧光高度的变化

Fig. 4 FLH variance with the third band under two identical bands

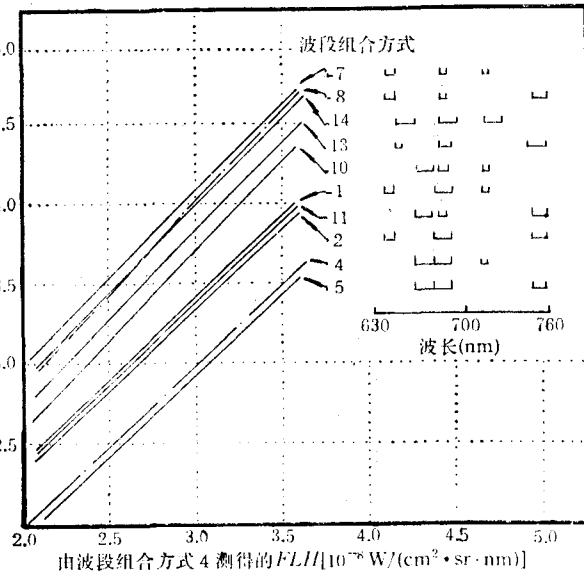


图 5 由各种波段组合得到的荧光高度间关系

Fig. 5 Relationship of FLH calculated by different band combinations

间的斜率, $K \approx 1$; x —— B_q 波段选择的加权系数, 为 $x = \begin{cases} 0 & B_q = B_3 \\ 1 & B_q = B_4; \end{cases}$ y —— B_r 波段

选择的加权系数, 为 $y = \begin{cases} 0 & B_r = B_{5W} \\ 1 & B_r = B_{5N}; \end{cases}$ z —— B_s 波段选择的加权系数, 为 $z =$

$\begin{cases} 0 & B_s = B_7 \\ 1 & B_s = B_6. \end{cases}$ 在其它海域, 用式(4)和(5)计算所得到荧光高度值与实测荧光高度值

间的相关系数达 0.98。进行波段删选, 去掉 B_3 后, 从式(5)可见, 荧光峰波段 B_r 的宽度对所测荧光高度影响最大, 占 56%; 其次是前基点波段的位置选择对荧光高度影响占 35%; 而后基点波段的位置选择对荧光高度影响最小, 仅占 9%。

二、最佳波段选择的原则和方法

通常在遥感图象解译中的波段选择仅在几个固定波段中选择两三个中心波长的不同波段。而在本研究中, 最佳波带的选择包括两个方面: 一是确定测荧光高度三个波段的中心波长位置; 二是确定三个波段的带宽。在陆地卫星分类中最佳波段选择的原则是各种类、各波段的最佳可分性, 通常用种类间的离散度协方差矩阵或类间的距离来衡量^[1]。对于极弱荧光信息监测的最佳波段选择不能用分类的途径, 本研究采用最佳可分

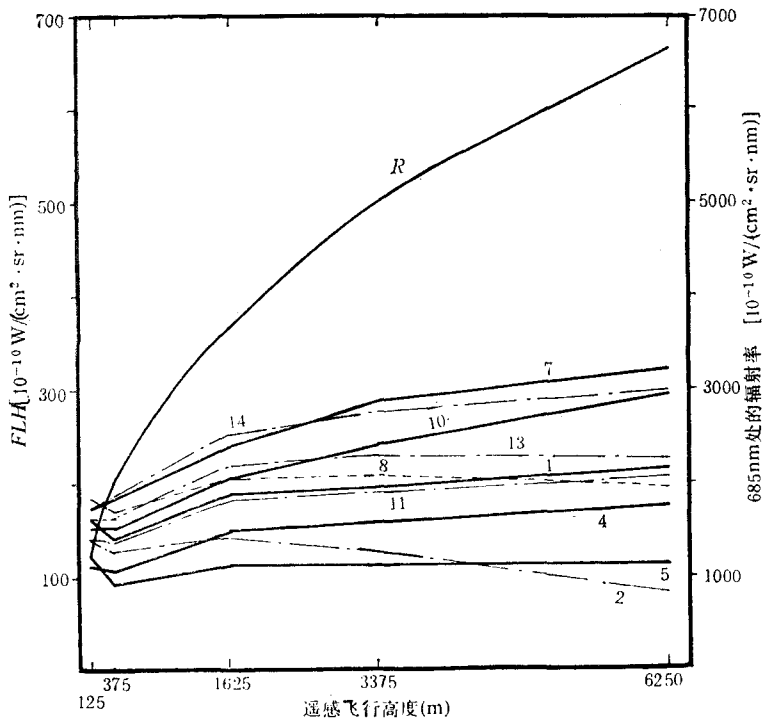


图 6 连线 1,2,4,5,7,8,10,11,13,14 分别为不同高度下,不同波段组合方式 1,2,4,5,7,8,10,11,13,14 所测得的 FLH 值(曲线 R 是 685nm 处的辐射率值)

Fig. 6 The FLH values calculated by different band combinations 1,2,4,5,7,8,10,11,13,14 at different altitudes 1,2,4,5,7,8,10,11,13,14 (curve R is the radiance at 685 nm wavelength)

性为原则。在这儿, 波段选择的原则受大气影响最小, 而监测得到叶绿素浓度的精度最佳的波段组合, 即当波段 i, j, k 能满足下式时, 为最佳波段。

$$\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n [\Delta FLH_{i,j,k}(H_{l+1} - H_l)]^2 \leq \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n [\Delta FLH_{q,r,s}(H_{l+1} - H_l)]^2 \quad (6)$$

式中, q, r, s ——所有可能波段组合; i, j, k ——最佳的波段组合; $\Delta FLH_{q,r,s}(H_{l+1} - H_l)$ ——从相邻两高度 H_{l+1} 和 H_l 由 q, r, s 三个波段计算所得到的荧光高度差值; k ——象元点序号; m ——象元点个数; n ——飞行高度的层次数。

1984年12月, 在美国北卡罗来纳州的 Cape Hatteras 东海岸, 离海岸线方向准同步在同一航线进行不同高度的飞行, 飞行的高度为 125, 375, 1 625, 3 375 和 6 250m, 同时在荧光范围如表 2 所列 14 种可能波段组合 q, r, s , 利用公式(2)和(3)分别求得各层次下相邻的 100 个空间象元点的荧光高度平均值, 在不同高度下计算得到结果如图 6。然后将结果代入判别式(6)计算, 得到最佳波带 i, j, k 为第 5 组波带组合 B_4, B_{5w}, B_7 。其次是第 4 组波带组合 B_4, B_{5w}, B_6 。从图 6 可以清楚地看到, 在 685nm 荧光中心波长处的辐射量, 从 125m 飞行高度升到 6 250m 时, 大气路程辐射测得的辐射信号值由 $1 258 \times 10^{-10} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 增大到 $6 555 \times 10^{-10} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 。而利用第 5 组波段组合测得荧光高度在 125m 高度时为 $114 \times 10^{-10} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, 在 6 250m 时, 测得荧光高度为 $108 \times 10^{-10} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 。两种不同高度下测得的荧光高度值只相差 7.5%。这些充分说明, 利用判别式(6)作为最佳波带组合后测得的荧光高度值受大气影响最小, 这是保证准确测定海洋叶绿素浓度的一个十分关键的问题。用以上选择得到的最佳波带组合从 1984 年 6 月以来, 在加拿大、美国和西德等进行遥感飞行测量海面叶绿素, 遥感测得的叶绿素浓度值和实测值间相关系数达到 0.89 左右^[5]。

三、结 果

通过选择避开大气光谱吸收带进行最佳波段组合, 用以测量海面的荧光高度, 发现不同波带组合与测得荧光高度之间有线形关系, 这种线性关系为不同波带组合配置的传感器测得的叶绿素浓度值间转换提供依据。

通过同一海域, 5 个高度准同步飞行, 对不同波段组合测定的荧光高度值, 以受大气影响最小为原则的最佳波段选择判别式(6)进行最佳波段选择后, 得到以下两种波段组合选择为最佳:

659.5—672.5nm
673.5—688.5nm
746.2—757.8nm

或者

659.5—672.5nm
673.5—688.5nm
708.8—713.9nm

为验证这两种波段组合, 选择在 125 至 6 250m 航空高度实际飞行, 测得的荧光高度差值很小, 基本上避免了大气影响, 从而大大减少了大气校正的工作量, 节省了人力和计

算机用时,并且已用上述波段组合测量海面叶绿素浓度,精度基本满足使用要求,另外最佳波段选择为荧光测量海面叶绿素传感器波段选择提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 潘德炉、施纪青,1984。海岸带遥感计算机地物分类原理及结果评价。海洋学报 6(4): 521—530。
- [2] Borstad, G. A., J. F. R. Gower et al., 1985. Analysis of test and flight data from the fluorescence line imager. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* 83: 1—10.
- [3] Gower, J. F. R., 1980. Observations of in-situ fluorescence of chlorophyll *a* in Saanich inlet. *Boundary Layer Meteorology* 18: 235—245.
- [4] Gower, J. F. R., G. A. Borstad, D. L. Pan, et al., 1986. Remote sensing using the fluorescence line imager. Proceeding of the Beijing International Symposium on Remote Sensing. CAST China, pp. 593—606.
- [5] Gower, J. F. R., 1986. The use of chlorophyll fluorescence measurements from space for separating constituents in water. ESA/GKSS/DFVFR Report. No. 55315/V8537, pp. 5—15.
- [6] Pan Delu, J. F. R. Gower, 1987. Analysis of FLI and Satellite Data. Contract Final Report. Canada D. S. S. File, No. 06SB FP-941-5-2925, pp. 69—90.

A STUDY OF BAND SELECTION FOR FLUORESCENCE REMOTE SENSING OF OCEAN CHLOROPHYLL A

Pan Delu⁺, J. F. R. Gower⁺⁺ and Lin Shouren⁺

(⁺Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou)

(⁺⁺Institute of Ocean Sciences, Canada)

ABSTRACT

The atmospheric effective is first discussed, such as the path radiance and the absorption of hydrogen oxygen and water vapor in the fluorescence wavelength. Then the possible band combinations for fluorescence remote sensing of ocean chlorophyll *a* are proposed, and the linear model responded to the relationship between fluorescence line height (*FLH*) and band's center position and width is found, based on the same altitude data of airborne remote sensing. It is obvious from model that the *FLH* is first affected by the wavelength width of fluorescence peak band, then the wavelength center position of front base band, and finally the center position of rear base band last.

Considering the principle that *FLH* is least affected by the atmospheric effectives and most related to the chlorophyll *a* concentration, the judgment function for best band selection is derived with analysis of the different altitude data.

Finally, comparing the *FLH* computed from the data at 125, 175, 1 625, 3 375 and 6 250 m with 14 kinds of band combinations, two optimum sets of band combinations are selected by the judgment function, which is quite good for fluorescence remote sensing of ocean chlorophyll *a*.