

文章编号: 1007 4619(2007)01 0137-08

叶绿素 a 荧光遥感研究进展

邢小罡^{1,2}, 赵冬至², 刘玉光¹, 杨建洪², 沈红^{2,3}, 赵玲², 王林^{2,3}

(1. 中国海洋大学 物理海洋研究所, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023;

3. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 继叶绿素 a 反演的“蓝绿比值法”后, 叶绿素 a 荧光遥感成为海水叶绿素 a 浓度反演的重要方法, 对提高二类水体和赤潮水体的叶绿素 a 浓度的反演精度效果明显。本文回顾了人们对水体叶绿素 a 荧光的认识、测量和研究的历史过程, 介绍了荧光产生的生物学机理以及它随叶绿素 a 浓度的正相关和“红移现象”等主要光谱特征。本文还总结了荧光量子产量、不同藻种生理状态、水体其他物质及大气的吸收等多种因素对叶绿素 a 荧光遥感的影响。基于对叶绿素 a 荧光光谱特征和影响因素的认识, 人们相继建立了两种荧光遥感方法——基线荧光高度法和归一化荧光高度法。对于前景广阔的叶绿素 a 荧光遥感领域, 人们正进行着更深入的研究与探索, 积累更多的现场数据和卫星同步数据, 逐步完善和改进反演模型。

关键词: 叶绿素 a 荧光遥感; 基线荧光高度; 归一化荧光高度; MODIS MERIS

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Progress in Fluorescence Remote Sensing of Chlorophyll a

XING Xiao-gang^{1,2}, ZHAO Dong-zhi², LIU Yu-guang¹, YANG Jian-hong²,
SHEN Hong^{2,3}, ZHAO Ling², WANG Lin^{2,3}

(1. Institute of Physical Oceanography, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Liaoning Dalian 116023, China;

3. College of Environment Engineering, Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

Abstract Besides empirical algorithm with the Blue-Green Ratio, fluorescence remote sensing of Chlorophylls is also an important and valid method for retrieving chlorophyll a concentration in the ocean, especially for Case II waters and the sea with algal blooming. This study reviews the history of initial cognitions, investigations and detailed approaches towards chlorophyll fluorescence, introduces the biological mechanism of fluorescence remote sensing and main spectral characteristics such as the positive correlation between fluorescence and chlorophyll concentration, the Red-Shift phenomena. In addition, there are many influential factors which increase the complexity of fluorescence remote sensing such as fluorescence quantum yield, physiological status of various algae, substance with related optical property in the ocean, atmospheric absorption etc. Based on these cognitions, scientists have found two ways to calculate the amount of fluorescence detected by ocean color sensors, fluorescence line height and normalized fluorescence height. These two ways are currently the foundation to retrieve chlorophyll a concentration in the ocean. As the in-situ measurements and synchronous satellite data are accumulated, the fluorescence remote sensing of chlorophyll a concentration in Case II waters should be understood more deeply and new algorithm could be expected.

Key words chlorophyll a, fluorescence remote sensing, fluorescence line height, normalized fluorescence height, MODIS, MERIS

收稿日期: 2005-10-20 修订日期: 2006-01-25

基金项目: 国家 863 计划项目 (编号: 2005AA635200, 2005AA604150) 及 908 计划项目 (编号: 908-02-03-01) 资助。

作者简介: 邢小罡 (1982-), 男, 中国海洋大学海洋环境学院物理海洋博士研究生, 现参加国家海洋环境监测中心课题研究。主要研究方向为海洋水色遥感。E-mail: xingxiaogang2004@hotmail.com.

1 引 言

海洋水色遥感是利用水色卫星传感器获取可见光和红外波段的海面离水辐亮度并反演海表面水色信息的遥感技术。从 20 世纪 70 年代开始,人们对于水体叶绿素浓度反演的研究工作已有 30 多年的历史。第一、二代水色卫星 (CZCS SeaWiFS),使用的反演方法都是基于蓝绿波段的辐亮度比值,从第三代水色卫星 (MODIS MERIS GLI)开始,人们则尝试发展一种新的反演算法——荧光遥感算法,它是继蓝绿比值法后水体叶绿素 a 浓度反演的重要方法。

在开阔大洋的一类水体中,悬浮泥沙和黄色物质含量很少,海水的光学性质主要由浮游植物决定,且大洋中的叶绿素 a 浓度也不是很高,蓝绿比值法已相当成熟。但对于近岸的二类水体,由于悬浮泥沙和黄色物质的增多,悬浮泥沙的后向散射和黄色物质的强烈吸收直接影响了海水的光学性质,导致反演水色信息的工作变得十分复杂,使蓝绿比值法不再完全适用。加之近岸水体叶绿素 a 浓度较高,有时甚至发生赤潮,在叶绿素 a 浓度极高的富营养海域,蓝光信号降到了探测极限以下,使蓝绿比值法几乎不可用。对于复杂的二类水体以及富营养水体,荧光遥感是蓝绿比值法的重要补充,它为有效地解决这些复杂水体的叶绿素 a 遥感带来了新希望。

利用荧光特征开展叶绿素 a 遥感最早始于 1966 年。Tyler 和 Smith^[1]在 San Vicente 水库进行水体光谱测量时,发现了自然水体的上行辐射在 683nm 附近有一个明显的峰。随着 Morel 和 Prieur^[2], Neville 和 Gower^[3]的进一步研究,人们逐渐认识到它是浮游植物叶绿素 a 的荧光辐射峰,且荧光峰高度同叶绿素 a 浓度之间存在很强的相关关系。几年后, Gower^[4]在 Saanich 港首次通过船载光谱仪测量的荧光高度与叶绿素 a 浓度建立了线性关系。多次机载叶绿素 a 荧光遥感的试验以及实验室的模拟研究反复证明了荧光卫星遥感的可行性^[5-7]。1999 年,第一颗携带荧光通道的水色传感器 MODIS 升空,标志着叶绿素 a 荧光已进入了卫星遥感的阶段。

长期试验研究表明,荧光法对于二类水体和赤潮水体的叶绿素 a 浓度反演精度的改善效果明显。首先,红光波段的叶绿素 a 荧光峰只携带了叶绿素 a 的信息,悬浮泥沙和黄色物质对其影响很小,有利于叶绿素 a 浓度的直接反演;其二,红光波段受大气

中气溶胶吸收的影响很小,基本不需要做大气校正;其三,对于高叶绿素 a 浓度的水体,蓝绿波段比值很小,基本降至探测极限以下,而荧光随叶绿素 a 浓度的增加而升高,仍是极为有效的探针^[8]。

2 叶绿素 a 荧光的机理与光谱特征

从叶绿素 a 荧光产生的机理上看,叶绿素 a 荧光是依存于叶绿素光合作用过程中产生的能量释放。像很多其他有机分子一样,叶绿素 a 也是荧光物质。叶绿素 a 体内包含两个光合作用反应中心:光系统 I 和光系统 II。在环境温度 (25°C) 下,叶绿素 a 的荧光主要来源于光系统 II,光系统 I 对荧光的贡献可以忽略不计。光合作用所需要的光能首先被光系统 II 中的聚光复合体吸收后,其中一部分能量参与光化学反应 (光合作用),另外一部分被用于非光化学过程 (通常是以热能的形式耗散掉),剩下的一小部分 (一般不足吸收光能的 5%) 以荧光的形式再发射出去。

从叶绿素荧光的光谱行为特征上看,活体叶绿素荧光是浮游植物在 400—700nm 太阳光的激发下,在 683nm 附近产生的红光辐射。它近似遵循高斯正态分布,其高度同叶绿素 a 的浓度有关。随着叶绿素 a 浓度的增大,荧光峰逐渐增高。不仅如此,荧光峰随叶绿素 a 浓度的变化还会出现“红移现象”——在荧光峰增高的同时伴随着峰值位置朝红外方向移动^[9]。当叶绿素 a 浓度小于 $3\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,荧光峰的位置大致在 683nm 处;当叶绿素 a 浓度增加至 $10\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,荧光峰缓慢移到 685nm 处;而当叶绿素 a 浓度达到 $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,荧光峰已在 700nm 处;达到 $300\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,荧光峰到达 705nm 甚至更远。Gitelson^[10]对“红移现象”进行了多年研究,得到荧光峰值位置和相应的叶绿素浓度相关关系的回归公式:峰值位置 = $683.51 + (0.268 \pm 0.0075) C_{Chl a}$ 。而且,随藻种的不同,红移幅度有所差异。2003 年 7 月 1 日在大连湾实测的赤潮异弯藻和甲藻的结果显示,每增加 $10\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 叶绿素 a 浓度,赤潮异弯藻赤潮荧光峰的移动幅度为 2.63nm,甲藻为 0.3nm^[11]。

3 荧光遥感的影响因素

然而,海水叶绿素 a 的荧光信息在到达水色传感器前,须经过海洋和大气两类介质,光学性质十分复杂,其中存在着诸多的影响因素,增加了海水中叶

叶绿素 a 荧光的不稳定性, 使叶绿素 a 的荧光遥感变得比较复杂。

3.1 荧光量子产量

叶绿素荧光量子产量 (Chlorophyll fluorescence quantum yield), 又称为叶绿素荧光效率 (Chlorophyll fluorescence efficiency), 是浮游植物体内的叶绿素细胞在吸收了太阳辐射后, 发射的荧光量子数与吸收的太阳光量子数之比。因此, 荧光量子产量将直接影响叶绿素 a 的荧光量, 从而影响叶绿素 a 与荧光特性的关系。活体叶绿素 a 的荧光量子产量是极易变化的, 它与观测条件和藻类的生理状态有很大的关系。Gordon^[12] 的现场观测表明, 量子产量的变化范围在 0.002 到 0.02 之间。Fischer 和 Kronfeld^[6] 通过辐射传输模式模拟的结果为 0.0015 到 0.01 之间, 其中 0.003 的量子产量对于现场的荧光测量最有效。Maritena 等^[13] 现场测量的剖面结果显示, 海水表层叶绿素荧光的量子产量在 0.01 左右, 随深度增加逐渐增大至 0.05 到 0.06。此外, 量子产量的一天内的变化与一周内的变化也相当显著, 通常说来, 一天中正午的量子产量最小, 清晨和日落前的量子产量最大^[14]。

3.2 不同藻种的影响

由于荧光的产生同浮游植物的光合作用及其生理状态有很大的联系, 因此, 不同藻类水体的光谱曲线并不相同, 其荧光峰的高度和位置同叶绿素 a 浓度的关系也不一致。赵冬至等^[11] 研究了高叶绿素 a 浓度藻类水体的光谱特征。其在 600—900nm 间的光谱曲线形态主要有三类, 第一类为单峰型, 即在 685nm 附近有一个独立荧光峰存在, 如赤潮异弯藻和叉角藻, 而叉鞭金藻和塔胞藻则在峰的右侧, 即靠近近红外方向随叶绿素 a 浓度的升高有反射率增强的趋势; 第二类为双峰型, 即在荧光峰的右侧 800nm 附近出现一个次峰, 如甲藻; 第三类为宽峰型, 即在 680—900nm 之间形成了一个宽反射峰, 并将荧光峰融为一体, 如海洋蓝绿藻、新月菱形藻、小球藻和扁藻。这就使得 680nm 处的反射率值有时不能完全反映荧光峰的真实强度, 甚至导致出现相反的结果。

3.3 悬浮泥沙

Fischer 和 Kronfeld^[6] 通过模型模拟了悬浮泥沙对于荧光辐射的影响。由于悬浮泥沙的后向散射, 使叶绿素 a 吸收的光能减少, 导致荧光量的减小, 但基

线上的荧光高度却会随着悬浮泥沙含量的增加而变大。Gower 等^[15] 认为, 悬浮泥沙虽然使水体的辐射光谱升高, 但基线之上的荧光高度却基本没有改变。

3.4 黄色物质

水中的黄色物质会强烈吸收入射光, 在可见光范围内主要是蓝光被吸收。它亦影响了叶绿素 a 用于光合作用的吸收, 从而间接影响了荧光量。Fischer 和 Kronfeld^[6] 发现, 虽然黄色物质的增大会导致荧光量的减少, 但对于基线荧光高度法来说, 基线亦随之改变, 使基线上的荧光高度受黄色物质的影响却是很小。

3.5 水体的衰减

不同波长的光在水中的衰减程度是不一样的, Gordon 和 McCluney^[16] 定义了信号的穿透深度 Z_{90} , 海洋光学上一般以这个深度表示光谱的穿透能力或介质的衰减能力。

$$Z_{90} = \frac{2.3}{k_t}$$

式中, k_t 是总的漫衰减系数。对于清洁的大洋水体, 穿透能力最强的是 445nm 的蓝光, 其穿透深度为 52.86m; 波长为 683—700nm 的荧光, 其穿透深度仅为 1.96m。而且, 随着悬浮泥沙和黄色物质的增多, 这一深度还将减小。因此, 由于水体对荧光的强衰减作用, 荧光信号仅能反映海水表面不足 2m 深度内的海水表层叶绿素 a 的信息^[9]。

3.6 观测角

太阳激发的叶绿素 a 荧光发射时是各向同性的, 但从海面射出后就变为各向异性了, 不同的观测角度收到的荧光辐射是不同的, 天底处的荧光辐射最强, 随着天底角的增大逐渐减小^[9]。

3.7 太阳高度

随着太阳天顶角的增大, 太阳光通过大气时的路程变长, 光学质量变大, 因此入射海面的辐照度随之减少, 将间接地导致叶绿素 a 荧光量的减少^[17]。

3.8 大气吸收

大气在荧光区间有几个窄的强吸收带, 主要包括 687nm 和 760nm 的氧气吸收带及 730nm 的水汽吸收带, 在设计卫星波段时要避开这些吸收带, 以保证最小的大气影响^[17]。对于荧光峰通道, 由于

687nm 的氧气吸收带距离 683nm 的荧光峰太近,因此必须取在 683nm 的左侧。如 MODIS 的 3 个通道分别选择 665.1、676.7 和 746.3nm; 而 MERIS 使用的是 665、681.25 和 709nm; GLI 选择的是 666.7、679.9 和 710.5nm。

4 叶绿素 a 荧光遥感的主要方法

依据上述原理和主要的影响因素,人们相继建立了两种荧光遥感的方法——基线荧光高度法和归一化荧光高度法。

4.1 基线荧光高度法

20 世纪 70 年代 Nevill 和 Gower^[3]通过机载光谱仪测量荧光,并首次提出了使用基线荧光高度法反演叶绿素 a 浓度的方案。此后, Gower^[4]又使用船载的方式证明了基线荧光高度法的可行性。潘德炉等^[17]在考虑了大气对于荧光的影响后,为卫星上使用基线荧光高度法提供了两组最佳的波段组合,可以有效地避开大气中水汽和氧气的吸收对荧光峰造成的影响。1990 年, Fischer 与其同事^[6-7]通过辐射传输模型模拟研究了影响基线荧光高度法的若干因素,包括浮游植物的物种和生理状态、叶绿素 a 吸收系数、荧光效率、太阳天顶角、波段选择、水中黄色物质和悬浮泥沙的含量以及大气成分等。Letelier 和 Abbott^[18]提出,荧光法的不确定性的主要来源在于浮游植物本身的生物学特征,并且分析了 MODIS 的基线荧光高度法的最小测量叶绿素 a 浓度为 0.5 mg m^{-3} 。与此同时,一些海洋学家从浮游植物生理学的角度对基线荧光高度法进行了生物学上的修正^[19-20]。Gower 等^[15]使用机载光谱仪、Hoge 等^[21]使用机载激光雷达数次证实了这种方法的有效性。Gower 等^[22]比较了 MODIS 和 MERIS 的不同波段组合,发现 MERIS 得到的真实荧光信号更多些。赵冬至等^[11]采用现场实测和室内培养两种方式测定了甲藻、赤潮异弯藻、叉角藻等赤潮藻和新月菱形藻、海洋蓝绿藻、叉鞭金藻、塔胞藻、扁藻和小球藻等非赤潮藻类光谱曲线,建立了不同藻类基线荧光高度与叶绿素 a 浓度的关系。在采用线性方程对不同藻类水体基线荧光高度与叶绿素 a 浓度进行回归分析时,不同藻类产生了明显不同的结果。其中赤潮异弯藻、海洋蓝绿藻和甲藻为负相关,其余为正相关。在正相关的关系中,除小球藻相关系数 0.4692 和新月菱形藻相关系数 0.8761 外,其余藻种相关系数都

达到了 0.95 以上。

如图 1 所示,基线荧光高度法的基本原理是使用荧光峰左右两侧通道 (λ_p , λ_s) 的离水辐亮度的连线为基线,计算荧光通道 (λ_r) 的离水辐亮度与基线之间的距离,称为荧光高度 (Fluorescence Line Height FLH), 单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。公式如下:

$$FLH = L_r - \left[L_s + \frac{\lambda_s - \lambda_r}{\lambda_s - \lambda_p} (L_p - L_s) \right]$$

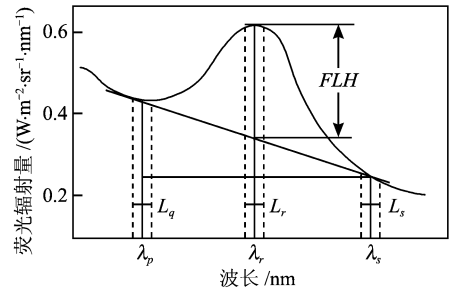


图 1 荧光高度线的基本原理

Fig. 1 The principle of fluorescence line height

在叶绿素 a 浓度不高的水体中,荧光峰高度同叶绿素 a 浓度呈现了良好的线性关系。随着叶绿素 a 浓度的增大,荧光高度的增加逐渐变缓,出现非线性的回归关系。Gower 和 King^[23]在加拿大西海岸研究的结果得到公式:

$$FLH = k + \frac{a * [Chla]}{1 + b * [Chla]}$$

式中,系数 a 与太阳高度角、叶绿素荧光效率、浮游植物的平均深度和仪器波段设置有关, k 是一个负的偏移量, b 是叶绿素荧光平均吸收率。

4.2 归一化荧光高度法

归一化荧光高度法最早是由 Vos^[24]和 Kishino 等^[25]于 1986 年提出的,他们认为 685nm 的辐射峰位于高叶绿素 a 浓度水体叶绿素吸收曲线的最小值,并因此建立了归一化反射率同叶绿素 a 浓度的关系。此后, Gilerson 等人^[26-29]继续进行归一化荧光高度法的研究工作,证实了该方法对于富营养水体特别适用,回归曲线的相关系数都很高 ($R > 0.87$)。赵冬至等^[30-31]也采用不同海藻分类研究的方法,采用度量太阳激发的叶绿素 a 荧光峰高度的 R_{\max} / R_{560} 比值法,建立了不同藻类 R_{\max} / R_{560} 与叶绿素 a 浓度的关系,发现相关系数 $R > 0.82$ 。 R_{\max} 代表荧光峰最大值处的辐射率。随藻类的不同, R_{\max} / R_{560} 与叶绿素 a 的关系发生较大的变化,其关系方程的系数 a 的变化范围为 0.037—1.135 之间, b 的变

化范围为 0.094—0.727 之间。同时建立了不同藻类荧光峰位置与叶绿素 a 浓度的关系,除海洋蓝绿藻为 0.57 外,发现相关系数 R 均大于 0.75。随叶绿素 a 浓度的增加,浮游植物反射光谱荧光峰的位置向红光方向移动。随藻类不同,移动的幅度有所差异,赤潮异弯藻的移动幅度最大,其他藻类每 $10 \text{ mg } \text{m}^{-3}$ 浓度的移动幅度介于 0.1—0.3 nm 之间。叉鞭金藻和塔胞藻在实验的浓度范围内未见移动。赵冬至等^[30,31]还比较了 R_{max} 、 R_{560} 同 R_{max} 、 R_{675} 与叶绿素 a 浓度的关系,认为在海洋现场测量中由于近岸二类水体其他水色组分以及大气校正误差的影响,比值 R_{max}/R_{675} 更适合用于实测的叶绿素 a 浓度估算。同时使用了 3 种不同的统计回归方程建立与叶绿素 a 浓度的关系。他们发现除个别藻种外,大部分的相关系数在 0.9 以上。其中 $NFH = a * [Chla]^b$ 回归方程得到的相关系数优于其他两种方法,相关系数大于 0.93。回归方程中 $b \neq 1$, 表明代表藻类水体的荧光特性的归一化荧光高度和叶绿素 a 浓度之间的普遍关系是非线性的。

如图 2 所示,归一化荧光高度法的基本原理是通过 680 nm 外的荧光峰最大值的辐射率 R_{max} 除以 560 nm 的反射峰或 675 nm 的吸收峰处的辐射率,得到一个无量纲的量,称为归一化荧光高度 (Normalized Fluorescence Height):

$$NFH = R_{\text{max}} / R_{560} \text{ 或 } NFH = R_{\text{max}} / R_{675}$$

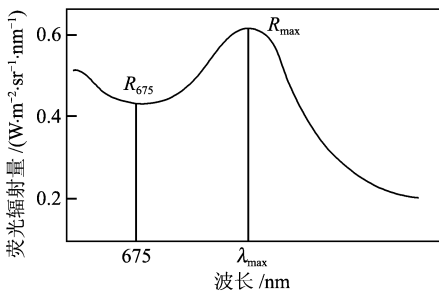


图 2 归一化荧光高度的基本原理

Fig 2 The principle of normalized fluorescence height

人们尝试过很多归一化荧光高度同叶绿素 a 浓度的相关关系,有线性关系、指数关系和多项式关系等等,其中使用较多的是指数回归关系:

$$NFH = a * [Chla]^b$$

5 主要卫星的荧光遥感模型

人们通过船载或机载光谱仪在不同海区进行了

叶绿素 a 的荧光测量,得到了荧光高度与叶绿素 a 浓度变化的回归模型,证明了荧光卫星遥感的可行性。因此,第三代水色卫星传感器都增加了为荧光遥感而特别设计的通道,将荧光研究带入了卫星遥感阶段。

5.1 荧光通道

如今携有荧光通道的卫星传感器有 MODIS、MERIS 和 GLI 另外还有韩国计划于 2008 年发射的地球同步水色成像仪 GOCI。它们都使用基线荧光高度方法进行荧光遥感,因此都设计有三个荧光通道:一个荧光峰值通道和两个基线通道,但通道的波段设置不尽相同。

MODIS 用于荧光遥感的 3 个波段为 665.1、676.7 和 746.3 nm。其中,荧光峰值通道 676.7 nm 距离真实的荧光峰 683 nm 比较远,是所有传感器中偏离荧光峰最远的。这样的设计充分避开了 687 nm 的氧气吸收带,将大气的影 响减少到最低,但由于距离真实的荧光峰太远,荧光信号对其影响较弱,因此理论上只能接收到 57% 的荧光信号^[22],而且 676.7 nm 又距离叶绿素 a 的吸收峰 670 nm 很近,很容易受到叶绿素 a 吸收的影响,因而降低了真实的荧光信号。

MERIS 荧光通道的设计是 665、681.25 和 709 nm。荧光峰波段 681.25 nm 是所有水色传感器中最接近真实荧光峰的,理论上可以反映 78% 的真实荧光信号^[22]。但可能因此受大气的影 响会多一些。709 nm 的基线通道与其他传感器相比,是最靠近荧光峰的,这样的设计会导致 MERIS 的基线较高,FLH 就会相对较小,而降低了算法的灵敏度。但 709 nm 通道却有其独特的作用。由于随叶绿素 a 浓度的增大会导致荧光峰出现向红外方向移动的“红移现象”,荧光峰将逐渐偏离峰值通道。当叶绿素浓度到 $300 \text{ mg } \text{m}^{-3}$ 时,荧光峰已移动到 705 nm 附近,此时的 709 nm 通道反而更接近于荧光峰值,因此 Gower 等^[32]提出,以 681 nm 和 753 nm 通道的离水辐亮度的连线为基线,计算 709 nm 通道在基线之上的离水辐亮度,称为最大叶绿素指数 (Maximum Chlorophyll Index MCI),检验结果表明它对赤潮有较好的灵敏度。

GLI 的荧光通道是 666.7、679.9 和 710.5 nm,基线设计与 MERIS 很相似,荧光峰通道取在 MODIS 和 MERIS 的通道中间,但更接近于 MERIS。GOCI 的设计为 660、680 和 745 nm,基线设计与 MODIS 更相近,

荧光峰值通道和 GLI 一致,也更接近于 MERIS。

赵冬至等^[33]通过现场实测和室内培养两种方式测定了多种藻类光谱曲线。按照 MODIS MERIS 和 GLI 的波段提取光谱反射率,得到了荧光峰高度。同时,采用统计分析方法建立荧光高度与叶绿素 a 浓度的关系。结果显示:对于荧光峰波段的选择,MODIS 与实际情况偏离最远;而对于计算基线需要的红外波段的选择,MODIS 最佳,基本满足了赤潮水体基线的计算。非常好的是, MERIS 的波段选择充分考虑到了一点,增加了 620nm 和 753.75nm 这两个备选基线波段,同时辅以 705nm 作为备用的荧光峰波段,能更好地反映赤潮水体的实际叶绿素 a 的荧光特性。

5.2 荧光产品

由于荧光遥感的复杂性,各海区的回归公式并不相同,还没有成熟的反演算法,因此 MODIS 和 MERIS 目前并没有荧光反演的叶绿素浓度产品,现在只提供基线荧光峰高度 FLH 产品。

MODIS 除 FLH 产品外,还提供叶绿素 a 荧光效率 (Chlorophyll a Fluorescence Efficiency CFE) 产品,它是入射的太阳光到叶绿素 a 荧光的转化效率。传感器所测量的荧光信号是海面表层浮游植物吸收入射太阳辐射后产生的,因此 CFE 的计算要先估计表层浮游植物吸收的太阳入射辐射量 (Absorbed Radiation by Phytoplankton ARP)。算法是建立在对叶绿素浓度、瞬时光合作用利用辐射和叶绿素吸收系数等量的估算基础之上的。因为有时荧光峰会落在基线以下,所以给 FLH 加上一个辐射常量 (FLH_{min}),这一常量 ($0.05W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$) 是根据历史上的观测资料中的最低值设定的。这样,修改后的 FLH 再使用 ARP 归一化处理,则可以获得 CFE。值得注意的是,这里的 CFE 并不同于叶绿素 a 的荧光量子产量,它只是后者的一个估算值。

$$CFE = \frac{FLH + FLH_{min}}{ARP_{radiance}}$$

MERIS 除 FLH 产品外,还提供最大叶绿素指数产品,它是以 681nm 和 753nm 通道的离水辐亮度的连线为基线,计算 709nm 通道在基线之上的荧光峰高度,它对于赤潮水体的高叶绿素 a 浓度有很好的回归关系。

5.3 不确定性分析

有 3 个过程会影响到 FLH 的精度。第一个过

程是大气在荧光区的几个强吸收带,传感器在仪器设计时已经考虑了这些吸收并尽量减少这种影响。第二种过程是传感器自身的仪器性能。最后一个过程是浮游植物中发生的生理学变化,这些变化会导致 FLH 的变化。当单位叶绿素荧光化的数量不是常数时,如果根据 FLH 来估算叶绿素浓度,就会有问题。荧光量将作为光吸收量和荧光量子产量的函数而发生变化。这些量将随藻类的种类和生理学状态而改变。

根据 FLH 的定义,基线和 FLH 的信噪比可表述如下:

$$\frac{1}{SNR_{Base\ line}} = \frac{1}{SNR_s} + \left(\frac{1}{SNR_p} - \frac{1}{SNR_s} \right) (\lambda_s - \lambda_r) / (\lambda_s - \lambda_p)$$

$$\frac{1}{SNR_{FLH}} = \frac{1}{SNR_r} + \frac{1}{SNR_{Base\ line}}$$

式中,下标 p r s 表示传感器的三个荧光波段的波段号,MODIS 三个通道的信噪比分别为 1368 1683 1290 计算得到 MODIS 的 $SNR_{FLH} = 752$

在大气顶部波长 685nm 处,太阳天顶角 50.7° 时,上行辐射的变化范围可从 8 到 $20W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ^[7]。这一变化范围对应了大气混浊度系数从 0.5(能见度 88km)到 10(能见度 6km)的范围。如果能见度为 50km,太阳天顶角 60° 时,Letelier 和 Abbott^[14 18] 计算出的 676.7nm 处的大气顶部的辐射量是 $9.05W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。用这个量除以 FLH 的信噪比,得到最小探测信号 MSD (Minimum Signal of Detection) 为 $0.012W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。

$MSD = \text{大气顶部辐射量} \cdot \text{荧光高度信噪比}$

但这里计算 MSD 的大气状况是对应着大气混浊度比较低的情况。当大气混浊度比较高时,MSD 将增加到 $0.026W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, FLH 的灵敏度将降低。

6 叶绿素 a 荧光遥感的主要难题和改进方向

从 1977 年 Neville 和 Gower 首次提出荧光遥感叶绿素设想至今^[3],叶绿素荧光遥感已经历了近 30 年的发展。许多海洋遥感学、海洋光学、浮游植物生理学、生物化学、水生生物学和生态学的研究工作者为这一领域的发展做出了巨大的贡献,使荧光遥感已成为遥测自然水体叶绿素浓度的重要途径和新的趋势。

然而,荧光遥感目前仍然存在一些急需解决的

难题。

首先, 活体叶绿素荧光过程的复杂性和多变性增加了荧光遥感的难度。活体叶绿素荧光的产生是一个非常复杂的过程, 涉及浮游植物生理学、生物化学、植物细胞学、水生生物学和生态学等诸多领域, 虽然现今已有很多活体叶绿素荧光的模型(如 Butler 模型、Kiefer Reynolds 模型等), 但人们仍然没有完全了解它的产生机制和整个过程。正如 Lavorel 和 Etienne^[34] 所说:“(叶绿素荧光)最初直接与光化学步骤有关, 而后由渐增的复杂因素所影响, 最终为整个机构所控制。”活体叶绿素荧光复杂的产生机制导致荧光量子产量极易变化, 不同季节、不同海区、不同站位的荧光量子产量可能并不相同。荧光量子产量的不同将直接导致单位叶绿素荧光化的数量不同, 从而影响荧光算法的准确性。因此, 需要对活体荧光量子产量进行更多的现场观测和更深入的研究, 了解其季节性、局地性的变化规律, 才能发展出更精确的反演算法。

其次, 活体叶绿素荧光很微弱, 增加了贫营养海区荧光遥感的难度。活体叶绿素吸收的光能大部分用于光合作用, 发射的荧光光能不足吸收光能的 5%。当叶绿素浓度比较低的时候, 荧光峰就很难被探测到了。Letelier 和 Abbott^[14-18] 估算了 MODIS 荧光算法在晴空条件下叶绿素浓度的探测极限为 $0.5 \text{ mg } \text{m}^{-3}$, 而在浑浊大气条件下, 这一探测极限将升至 $1.3 \text{ mg } \text{m}^{-3}$ 。上述结果是在假定荧光量子产量为 0.003 的情况下计算的, 当荧光量子产量小于 0.003 时, 叶绿素浓度的探测极限将进一步上升。

第三, 荧光峰的“红移现象”, 增加了富营养海区荧光遥感的难度。荧光峰值位置随叶绿素浓度的增加发生红移, 而水色卫星传感器上的通道却是固定的, 所以当叶绿素浓度较大时, 荧光峰将偏离原来的荧光峰值通道, 峰值通道的辐射量已经不能反映真实的荧光峰辐射量时, 算法的准确性也就大大降低了。MERIS 比 MODIS 的优势在于, 对于高叶绿素水体或赤潮水体, 可以用 MCI 代替 FLH 建立与叶绿素浓度的相关关系。关于“红移现象”, 还需进一步探求其机理和移动规律, 为下一代的水色传感器设计出更合理的荧光通道, 才能从根本上解决富营养水体荧光算法的难题。

叶绿素 a 荧光遥感是解决二类水体和赤潮水体叶绿素 a 浓度反演的一个重要途径, 是水色遥感研究的新趋势。然而, 它现在仍然还是一种探索性的方法, 由于现场数据的有限、荧光机理的复杂性以及

荧光量子产量的不确定性, 在大部分海区还并没有建立起成熟的回归公式。需要不断地积累各海区的现场数据和同步数据, 在具备一定数量的数据基础上建立起各海区的经验反演模型。同时, 进行更深入的荧光机理、荧光量子产量的研究, 在物理上逐步完善和改进对叶绿素 a 荧光遥感的理解。

参 考 文 献 (References)

- [1] Tyler J E, Smith R C. Measurements of Spectral Irradiance under Water[M]. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1970.
- [2] Morel A, Prieur L. Analysis of Variations in Ocean Color[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**: 709-722.
- [3] Neville R A, Gower J F R. Passive Remote Sensing of Phytoplankton via Chlorophyll Fluorescence [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**: 3487-3493.
- [4] Gower J F R. Observation of in Situ Fluorescence of Chlorophyll a in Saanich Inlet [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, **18**: 235-245.
- [5] Gower J F R, Borstad G A. Mapping of Phytoplankton by Solar Stimulated Fluorescence Using an Imaging Spectrometer [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**: 313-320.
- [6] Fischer J, Kronenberg H U. Sun Stimulated Chlorophyll Fluorescence - Influence of Oceanic Properties [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**: 2125-2147.
- [7] Fischer J, Schliessel P. Sun Stimulated Chlorophyll Fluorescence - 2. Impact of Atmospheric Properties [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**: 2149-2162.
- [8] DCCG Report Number 2. Status and Plans for Satellite Ocean Color Missions. Considerations for Complementary Missions [R]. 1999.
- [9] Zhao D Z, Cong P F. Spectrum Character of Ceratium Furca (Her) Clavariae et Lachmann in the Bohai Sea [C]. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集, Ocean Press, Zhao Dongzhi, 2000. [赵冬至, 丛丕福. 渤海叉角藻赤潮的光谱特征研究 [C]. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集, 海洋出版社, 赵冬至, 2000.]
- [10] Gitelson A A. Algorithms for Remote Sensing of Phytoplankton Pigments in Inland Waters [J]. *Adv Space Res*, 1993, **13**: 197-201.
- [11] Zhao D Z, Zhang F S, Du K, et al. Fluorescence Peak Near 700 nm on the Reflectance Spectrum of Algae in Water: the Relationship of Fluorescence Line Height with Chlorophyll a Concentration [J]. *High Technology Letters*, 2004, **5**: 68-72. [赵冬至, 张丰收, 杜飞等. 基于高光谱反射率的藻类水体基线荧光峰高度与叶绿素 a 浓度关系研究 [J]. 高技术通讯, 2004, **5**: 68-72.]
- [12] Gordon H R. Diffuse Reflectance of the Ocean: the Theory of Its Augmentation by Chlorophyll a Fluorescence [J]. *Applied Optics*, 1979, **21**: 2489-2492.

- [13] Maritorena S Morel A Gentili B. Determination of the Fluorescence Quantum Yield by Oceanic Phytoplankton in Their Natural Habitat[J]. *Applied Optics* 2000 **39** 6725—6737.
- [14] Abbott M R Letelier R M. MODIS ATBD No 22 Chlorophyll Fluorescence[R]. 1996.
- [15] Gower J F R Doerffer R Borstad G A. Interpretation of the 685nm Peak in Water leaving Radiance in Terms of Fluorescence Absorption and Scattering and its Observation by MERIS[J]. *International Journal of Remote Sensing* 1999 **20** 1771—1786.
- [16] Gordon H R McCluney W R. Estimation of the Depth of Sunlight Penetration in the Sea for Remote Sensing[J]. *Applied Optics* 1975 **14** 417.
- [17] Pan D L Gower J F R Lin S R. A Study of Band Selection for Fluorescence Remote Sensing of Ocean Chlorophyll a[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 1989 **20** 564—570 [潘德林, Gower J F R 林寿仁. 荧光法遥感海面叶绿素浓度的波段选择研究[J]. 海洋与湖泊, 1989 **20** 564—570.]
- [18] Letelier R M, Abbott M R. An Analysis of Chlorophyll Fluorescence Algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer(MODIS)[J]. *Remote Sensing of Environment* 1996 **58** 215—223
- [19] Babin M, Morel A, Gentili B. Remote Sensing of Sea Surface Sun-induced Chlorophyll Fluorescence: Consequences of Natural Variation in the Optical Characteristics of Phytoplankton and the Quantum Yield of Chlorophyll a Fluorescence[J]. *Int. J. Remote Sensing* 1996 **17**: 2417—2448
- [20] Huot Y, Brown C A, Cullen J J. New Algorithms for MODIS Sun-induced Chlorophyll Fluorescence and a Comparison with Present Data Products[J]. *Limnology and Oceanography: Methods* 2005 **3** 108—130
- [21] Hoge F E, Lyon P E, Swift R N, et al. Validation of Terra MODIS Phytoplankton Chlorophyll Fluorescence Line Height. Initial Alaboma Lilar Results[J]. *Applied Optics* 2003 **42** 2767—2771.
- [22] Gower J F R, Brown L, Borstad G A. Observations of Chlorophyll Fluorescence in West Coast Waters of Canada Using the MODIS Satellite Sensor[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing* 2004 **30** 17—25
- [23] Gower J F R, King S. Validation of Chlorophyll Fluorescence Derived from MERIS on The West Coast of Canada[M]. Proc. MERIS User Workshop, Frascati, Italy, 10—13 November 2003
- [24] Vos W L, Donze M, Buitveld H. On the Reflectance Spectrum of Algae in Water: The Nature of the Peak at 700nm and Its Shift with Varying Concentration[R]. Communications on Sanitary Engineering and Water Management. Delft: The Netherlands Technical Report, 1986.
- [25] Kishino M, Sugihara S, Okami N. Theoretical Analysis of the In-situ Fluorescence of Chlorophyll a on the Underwater Spectral Irradiance[J]. *Bulletin de la Société Franco-Japonaise d'Océanographie* 1986 **24** 130—138
- [26] Gilterson A A, K Ya Kondrat' et. On the Mechanism of Formation of Maximum in the Reflectance Spectra Near 700nm and its Application for Remote Monitoring of Water Quality[J]. *Transactions Doklady of the USSR Academy of Sciences Earth Science Sections* 1991 **306** 1—4
- [27] Gilterson A A. The Peak Near 700nm on Reflectance Spectra of Algae and Water: Relationships of Its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration[J]. *International Journal of Remote Sensing* 1992 **13** 3367—3373
- [28] Mitzenvey K H, Gilterson A A, Kondratiev K Y. Determination of Chlorophyll a of Inland Waters on the Basis of Spectral Reflectance[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992 **37** 147—149
- [29] Gilterson A A, Yacobi Y Z, Rundquist D G, et al. NWQMC CONFERENCE 2000: Monitoring for the Millennium[R]. 2000.
- [30] Zhao D Z, Zhang F S, Du F, et al. The Optimized Spectral Bands Ratio for the Relation of Sun-induced Chlorophyll Fluorescence Height with High Chlorophyll a Concentration of Algal Bloom Waters[J]. *Acta Oceanologica Sinica* 2005 **6** 146—153 [赵冬至, 张丰收, 杜飞等. 表征赤潮水体太阳激发的叶绿素荧光高度的波段优化——归一化荧光高度法[J]. 海洋学报, 2005 **6**, 146—153.]
- [31] Zhao D Z, Zhang F S, DU F, et al. Interpretation of Sun-induced Fluorescence Peak of Chlorophyll a on Reflectance Spectrum of Algal Waters[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005 **9** 265—270. [赵冬至, 张丰收, 杜飞等. 不同藻类水体太阳激发的叶绿素荧光(SICF)峰特性研究[J]. 遥感学报, 2005 **9** 265—270.]
- [32] Gower J F R, King S, Yan W, et al. Use of the 709nm Band of MERIS to Detect Intense Plankton Blooms and Other Conditions in Coastal Waters[R]. Proc. MERIS User Workshop, Frascati, Italy, 10—13 November 2003.
- [33] Zhao D Z, Du F, Zhao L, et al. On the Reflectance Spectrum of Algae in Water: Comparison of Chlorophyll Fluorescence Algorithms for Three Remote Sensing Red Tide Sensors[J]. *High Technology Letters* 2004 **14** 93—97 [赵冬至, 杜飞, 赵玲等. 基于表面反射率的赤潮卫星荧光高度算法比较[J]. 高技术通讯, 2004 **14** 93—97.]
- [34] Lavorel J, Etienne A L. In Vivo Chlorophyll Fluorescence[A]. Baker J. Primary Process of Photosynthesis[C]. Elsevier North Holland Biomedical Press, 1977.