

激光荧光技术用于地物遥感的 可能性研究

朱永豪 张崇静 吴 荣 刘南英

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

沈 玉 其

(中国科学院南京分院)

徐彬彬 石晓日 李德成 周 斌

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

本文从植被、土壤的荧光光谱特征和系统的信噪比等出发,分析讨论了激光荧光技术用于地物遥感的 possibility。

关键词 激光诱导荧光 地物遥感 信噪比

一、引 言

60年代末,加拿大多伦多大学宇航研究所的Measure和美国运输系统中心的Fantasia首先提出了利用激光荧光雷达探测海洋油溢的设想。1971年Measure研制成功一台实验性的激光荧光雷达系统,并用它进行了探测油污的实验^[1]。1973年Kim报道了用Hickman和Mare于1970年设计的机载激光荧光雷达(改进后)探测海水叶绿素a浓度的实验结果。该系统可在海平面上空30m探测海水中的叶绿素a浓度,极限探测浓度达 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 。

目前,在国际上较有代表性的机载激光荧光雷达系统有:(1)加拿大遥感中心O'Neil等人于1973年推出的改进型MKIII激光荧光雷达系统^[2]。它利用多通道探测加时间闸门,可全天工作。已用于海上油污染和叶绿素a浓度的遥测,而且是唯一能够探测有冰覆盖时水中油溢的系统。(2)美国NASA和阿夫科·埃费雷特实验室在1975年共同研制成功的机载海洋激光雷达(AOL)^[3]。由于它具有扫描机构,因而一次飞行可探测很大区域。它的信噪比高,光谱分辨率也高,具有多用途的特点,是目前同类系统中较有代表性的一种。(3)德国奥耳登堡大学的Reuter博士为德国海洋污染和水文参数航空测量研制的一套新的机载激光荧光系统^[4]。该系统利用XeCl准分子激光器加染料作激发光源,主要激发波长为308和382nm,其光脉冲的能量与脉宽,前者为150mJ和20ns,后

者为 20mJ 和 15ns, 脉冲重复频率分别达 200Hz 和 20Hz。该系统已成功地用于北海近海岸海水的油污染监测及水文参数的测量, 可昼夜工作, 飞行高度 100—200m。通过荧光信号可以获取海水表面污染物的类型(有毒的、无毒的、中性的)和油溢类型(重油、中油和轻油), 并可计算出油溢油膜的厚度(0.1—10 μ m); 可以探测到海面近表层内流动的药品和漂浮物质。例如, 308nm 激光对海水中的黄色物质比较灵敏, 用它可获得近海岸黄色物质的浓度分布图。382nm 染料激光对海水中的叶绿素有较好的荧光效率, 可以用它获得海水中浮游生物生长的动态变化。

由上可见, 激光荧光雷达系统经过近 20 年的发展, 已可用于海洋中油溢与叶绿素浓度 a 的探测。然而, 这一技术能否用于陆地, 仍是一个有待研究的问题。Segal 等人, 1972 年利用机载激光荧光雷达在含铀、锌、金等重金属矿露头的地区进行了探测试验, 发现能明显反映矿物指标特征, 且与地面实验的结果吻合得很好。植物学家在研究光合作用时, 早已采用了荧光光谱技术, 并且揭示了植物中各种色素在吸收太阳光能后的各种能量传递过程。这些研究结果, 无疑为利用激光荧光技术进行植物遥感提供了启示。Chappelle 等人于 1984 年发表了利用激光诱导荧光技术对植物不同受害状况和种类差别的研究结果, 这些结果为发展新的主动式植物遥感奠定了一定的基础^[5-7]。

本文着重分析植物与土壤的光谱特征及激光荧光雷达系统, 以探讨该技术用于地物遥感的可能性。

二、从植物、土壤的荧光特性看激光荧光遥感地物的可能性

我们知道, 利用植物的可见和短波红外反射光谱, 可进行农作物种植面积估算、作物估产及某些植物种类的辨别, 但是, 反射光谱在监测植物受害和鉴别植物种属方面的能力较差。虽然高分辨光谱技术使解决上述问题的能力有所提高, 但仍受到诸如植物形状、植物对土壤背景的相互关系随时间的变化、叶子水分、植冠温度等因素的影响。反射光谱虽然能反映植物叶绿素浓度的变化, 但对反映因植物受害及种属差别引起的生物化学及生理变化并不十分灵敏。然而 Chappelle 和我们的研究都发现, 植物的某些荧光特征及其变化, 与植物固有的生物化学特征在不同受害条件下的变化及植物种类差别均有一定的联系。因此, 若能找到表征植物固有化学特征及其变化的荧光特征光谱, 并弄清它们与受害程度及种属的关系, 我们就可以发展一种更加有效的植物遥感技术。

1. 植物的荧光光谱特征^[8, 9]

我们利用 N_2 激光器的 337.1nm 激光和荧光光度计测得了几十种植物叶片、多种土壤以及玉米和水稻在不同施肥(氮、磷、钾)条件下的荧光光谱。根据实验结果, 植物的荧光光谱有以下特征:

(1) 一般绿色植物(包括藻类)通常在 400—800nm 内存在 4 个较为明显的荧光峰, 其峰值波长在 440, 525(550), 685 和 740nm 处。针、阔叶树, 单、双子叶等植物, 在上述各荧光峰强度上均有明显差异存在。

(2) 植物生长状况不良(如因施肥不足、缺水或受到病虫害所致)时, 一般在 685 和

740nm 处的荧光强度的变化最为明显。我们的试验表明, 在正常条件下, 685nm 处的荧光强度值低于或接近于 740nm 处的荧光强度。但是当植物受害时, 685nm 的峰强增加, 740nm 处的下降, 且随着受害程度的加深, 这两个峰强的反向变化幅度亦加大。

2. 土壤的荧光光谱特征^[10]

土壤既是主要地物, 又是植被遥感的背景, 因此了解它的荧光光谱特征是非常必要的, 特别是在植被覆盖度较低或裸露的情况下, 就更为突出。

对 25 个风干及新鲜的原状土样品的测量表明, 土壤在可见光波段的荧光一般存在一个宽荧光峰, 峰位波长处于 450nm 附近。研究表明, 其相对荧光强度与土壤有机质含量、水分含量以及土壤的化学组成密切相关。土壤的荧光强度通常要比植被小得多。

上述实验表明, 无论从荧光峰还是从强度看, 作为背景的土壤, 并不会严重干扰植物遥感。

3. 遥感应用中特征波长的选择

根据上述对土壤、植物荧光光谱特征的研究, 选择合适的波长进行遥感是有意义的。如把 440, 550, 685 和 740nm 作为激光荧光植被遥感的基本接收波长, 则对植物种类和生长状况均有良好的反映, 用以指导施肥、灌溉及病虫害的防治是有效的。至于如何切实选定乃至运用这些数据, 则还需考虑遥感的主要对象、时相、背景等因素, 加以选择和验证。同时, 考虑到接收能量的大小, 实用中往往也会以上述特征波长为中心波长, 向两侧适当扩展成一定宽度的波段。

三、激光荧光遥感系统的分析

上面讨论了土壤、植物的荧光光谱特征, 这是激光荧光遥感的物理基础。为了分析激光荧光遥感方法在技术上的可行性, 我们讨论三个问题。

1. 荧光参数

表征荧光特征的参数, 除了荧光光谱外, 还有以下 5 个重要参数。

(1) 荧光强度

荧光强度既是荧光的一个最基本的参数, 也是激光荧光遥感系统的重要参数。它一般表示为

$$F = K\Phi_0 I_0 (1 - e^{-A}) \quad (1)$$

式中 F 为荧光强度, K 是仪器常数, Φ_0 是被激发物质的量子产额(或称量子效率), I_0 是激发光强度, A 是吸收系数(在样品池分析时可表示为 $A = \epsilon bc$, 其中 ϵ 是摩尔吸收系数, b 是样品池的光径, c 是样品的浓度)。

从这个简单的表达式中我们可以看到: 首先荧光强度与仪器常数有关, 这就要求我们在利用荧光强度作定量分析时, 必须用标准样品确定仪器的工作曲线; 当利用荧光强度作相对测量时, 则须保持仪器工作参数稳定不变。其次, 荧光强度与被激发物质的量

子产额有关。量子产额是发射量子数与吸收量子数之比。因此,要获得高的量子产额,则应使激发光波长处在高吸收的波段内。第三,荧光强度与激发光强成正比,这对遥感来说也是十分重要的,然而在一般的荧光测量中并不是 I_0 越大越好。第四,荧光强度当然也与 A 有关。 A 除了直接表征物质的吸收系数外,还与物质的浓度与光程有关。当被激发物质的浓度很稀时, $e^{-A} = 1 - A$, 故(1)式可化简为:

$$F = K\Phi_0 I_0 A \quad (2)$$

从式(2)可知,在浓度很稀时,荧光强度与物质的浓度成正比。

(2) 荧光的量子产额

量子产额被定义为物质发射的荧光量子数 N_e 与产生发光所吸收的量子数 N_a 之比,即:

$$\phi_q = \frac{N_e}{N_a} \quad (3)$$

量子产额也可以用 S_1 激发态的寿命 τ 与荧光寿命 τ_F 之比得出,即

$$\Phi_F = \tau / \tau_F \quad (4)$$

利用定义,可以用测量荧光强度和吸收系数的方法与已知标准比较获得量子产额,也可以用极短的光脉冲激发被测体系后测定 τ , 再推算出量子产额。

(3) 荧光的寿命和衰减

荧光寿命是荧光特性中的一个重要参量。它不仅在荧光动力学的计算中十分重要,而且还能提供有别于光谱的许多有用信息。所以,时间荧光光谱学是一个重要的研究分支。

荧光寿命的简单定义是指,当发光过程符合指数衰减规律时,荧光的寿命就是分子处于激发态的平均时间,也就是发光强度衰减到 $1/e$ 时所需的时间。

(4) 荧光的偏振

荧光的偏振可以反映分子的结构状况及运动状况。对这个参数这里不作讨论。

(5) 荧光猝灭

荧光猝灭是荧光中一个广泛存在的现象,也是在分析荧光数据时需要注意的。猝灭通常可分两种,一种是由于分子内部相互作用而引起的,称为内部猝灭,另一种则是被激发的分子,因分子间的相互作用,将能量传递给非激发态分子的过程,即外部猝灭。此外,在分析遥感所得的荧光数据时,还应注意环境中的物质对目标物质荧光的猝灭,特别是氧和金属离子。

2. 激发波长的选择

根据上面的讨论,激发波长一要选在物质的主要吸收带,以提高荧光的量子效率,二要在大气中衰减小,三是激发器较易获得高的输出能量和高的重复频率。我们的实验表明,若要获得植物在 685 和 740nm 处的强荧光峰,则激发波长选在 430—450nm 为宜;如要获得植被在可见光波段的 4 个荧光峰,则激发波长应选在 300—350nm。

3. 遥感系统的信号噪音分析

激光荧光遥感系统,通常由包括激光器在内的发射系统和包括光电探测器在内的接

收系统两大部分组成。遥感系统通常工作在地球大气的环境中, 因此, 在讨论遥感系统的信号噪声问题时, 除了讨论系统本身的信号噪声外, 还要讨论太阳辐射、大气吸收和散射等的影响。

分析遥感系统接收到的信号噪声, 是把接收系统的光探测器的输出, 作为具有正比于探测到的光功率 P 的速率参量为泊松过程来进行模拟的。用功率 $P(W)$ 表示的平均探测电流 $I(A)$ 为:

$$I = \frac{\eta q}{h\nu} P \quad (5)$$

式中 η 为探测器的量子效率, q 是基元载流子的电荷 ($1.6 \times 10^{-19} C$), h 是普朗克常数 ($6.63 \times 10^{-34} J \cdot S$), ν 是入射光的频率(Hz)。在我们讨论的激光荧光遥感系统中, 电流 I 通常由三个电流分量组成: 即由探测到的传递信息的信号 p_s 产生的电流 I_s , 由入射到探测器的不希望有的背景功率 P_b 所产生的电流 I_b 和暗电流 I_d 。由(5) 式得:

$$I = I_s + I_b + I_d = \frac{\eta q}{h\nu} (P_s + P_b) + I_d \quad (6)$$

下面我们分别对 P_s 和 P_b 作进一步讨论。

信号功率 P_s , 就是被激发目标发出荧光的功率。设激光发射系统发出的激发光功率为 P_e , 则用雷达方程表示的达到接收系统的信号功率为:

$$P_s = \frac{P_e \phi_0 K_r A_r}{2\pi H^2} \exp[-(\beta_e + \beta_f) H] \quad (7)$$

如果考虑到接收系统的探测灵敏度 $S(\lambda)$ 和放大倍数 G , 以及物质的荧光寿命 τ 和接收系统的积分时间 t_d , 并把信号功率 P_s 写成信号电流 I_s , 则由(5) 和(7) 式得

$$I_s = \frac{\eta q}{h\nu} \cdot \frac{P_e \phi_0 K_r A_r}{2\pi H^2} \exp[-(\beta_e + \beta_f) H] \cdot \exp\left(\frac{t_d}{\tau}\right) \quad (8)$$

上两式中, ϕ_0 为被激发物质的量子效率, K_r 为接收光学系统的传输效率, A_r 为接收系统的有效面积, H 为接收系统与被测目标的距离, β_e 和 β_f 分别为大气对激发光和荧光的衰减系数。

下面我们再来讨论背景功率 P_b 。进入接收系统的背景光通常由三部分组成, 一是照射到目标上的太阳光和天空光经反射进入接收系统的光, 这是最主要的部分; 二是太阳光照射大气被大气散射后进入光学系统的光; 三是接收视场之外的物体经太阳光与天空光照射再向天空反射散射后进入接收系统的光。由于我们目前所讨论的问题的光程比较短(即 H 在数百米内), 故只讨论第一项。

$$P_b = \frac{B(\nu\lambda) \Omega_r \cdot A_r \cdot K_r \cdot \rho}{4\pi} \exp(-B_f H) \cdot t_d \quad (9)$$

其中, $B(\lambda)$ 是目标平面上的光谱辐照度, Ω_r 为接收视场角, ρ 为目标的反射率。将(9) 式表示为背景电流, 则为:

$$I_b = \frac{\eta q}{h\nu} \frac{B(\lambda) \cdot \Omega_r \cdot A_r \cdot K_r \cdot \rho}{4\pi} \exp(-\beta_f H) \cdot t_d \quad (10)$$

根据信噪比的定义, 激光荧光遥感系统的信噪比为

$$SNR = \frac{I_s^2}{I_s^2 + I_b^2 + I_d^2} = \frac{I_s^2}{2e[I_s + I_b + I_d]\Delta f} \quad (11)$$

其中 e 为电子电量, Δf 为放大器和探测器的带宽。如果我们不讨论探测系统的暗电流 i_s , 则将(8)和(10)式代入(11)式, 即可讨论系统的信噪比问题。

利用(8)、(10)和(11)式我们可以计算不同激发波长和不同荧光波长在不同背景亮度条件下, 如晴天中午、黄昏、月夜的信噪比或最大探测距离等。当然, 光背景的抑制我们还可以采用距离选通等技术。

四、结 论

以上简要介绍了激光荧光遥感技术发展的概况, 并根据我们所获得的大量的土壤和植物荧光光谱数据讨论了它们的荧光特征及其在种属分类和植物长势监测中的作用, 还从工程技术的角度讨论了信号噪声问题。其简要结论如下:

(1) 植物的荧光光谱能直接反映植物固有的生物化学特征。因此利用植物荧光光谱特征及其变化就可以揭示植物生长的状况和进行植物种属的分类。与利用反射光谱进行遥感相比, 存在着信息丰富和直接受其它因素影响小的优点。所以, 激光荧光植被遥感具有潜在的应用前景。

(2) 作为植被激光荧光遥感技术基础的光谱特征, 已经得到了较广泛深入的研究, 我们认为植被激光荧光遥感的基本信息在 440, 525, 685 和 740nm 4 个特征峰中得到了较好的反映, 因此这 4 个特征峰可作为遥感系统接收系统的光谱通道。

(3) 土壤的荧光在光谱特征和强度上与植被都有较大的差别, 所以作为植被遥感背景的天空不会严重干扰植被的信号。而土壤因组分、水分和有机质含量等因素的不同, 会导致荧光强度的差异。这些均有助于激光荧光遥感的地物分类。

(4) 植被和土壤的荧光, 虽有较明显的光谱特征, 但在强度上比海面油膜小得多, 并且表面几何状态和荧光传输也要比油膜复杂得多, 因此在使用时应有足够的考虑。

土壤和植被荧光光谱特征的研究, 为激光荧光遥感提供了物理基础, 显示出了这一技术的优越性和发展的可能性, 但要实现这一技术并使之在实际中得到应用, 则还有许多基础问题与技术问题有待进一步地深入研究。

参 考 文 献

- [1] Measures, R. M., *Laser Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [2] O'Neil, R. A., et al., Field Performance of a Laser Fluorosensor for the Detection of Oil Spills, *Appl. Opt.*, 1980, Vol. 19, No.6, 863—870.
- [3] Hoge, F.E., Feasibility of Airborne Detection of Laserinduced Fluorescence Emissions from Green Terrestrial Plants, *Appl. Opt.*, 1983, Vol.22, No.19, 2991—3000.
- [4] Gruner, K., et al., A New Sensor System for Airborne Measurements of Maritime Pollution and Hydrographic Parameters, *Geojournal*, 1991, Vol. 24, No.1, 103—117.
- [5] Chappelle, E.W., et al., Laser-Induced Fluorescence of Green Plants, 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation, *Applied Optics*, 1984, 23(1):134—138.
- [6] Chappelle, E.W., et al., Laser-Induced Fluorescence of Green Plants, 2: LIF caused by nutrient deficiencies in corn, *Applied Optics*, 1984, 23(1):139—142.

- [7] Chappelle, E. W., et al., Laser-Induced Fluorescence of Green Plants, 3; LIF spectral signatures of five major plant types, *Applied Optics*, 1985, **24**(1):74—80.
- [8] 吴荣等, 植物在不同形态和不同状态下的荧光光谱特征研究, 本期增刊。
- [9] 张崇静等, 不同植物的激光诱导荧光光谱特征及其在遥感上的意义, 本期增刊。
- [10] 石晓日等, 土壤激光诱导荧光遥感研究初探, 本期增刊。

Research on the Application Possibility of Laser Fluorescence Technology on Remote Sensing of Terrestrial Features

Zhu Yonghao Zhang Chongjing Wu Rong Liu Nanying

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

Shen Yuqi

(*Nanjing Branch of Academia Sinica*)

Xu Binbin Shi Xiaori Li Decheng Zhou Bin

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing*)

Abstract

This paper analysed and discussed the application possibility of laser fluorescence technology on remote sensing of terrestrial features from the aspects of fluorescence spectra of vegetations and soils, as well as from signal to noise ratio of the system etc.

Key words Laser induced fluorescence Remote sensing of terrestrial features
Signal to noise ratio