

关于植被激光荧光遥感的 若干基本问题

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)

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)

摘 要

本文较系统地论述了应用激光荧光技术进行植被遥感的若干基本问题。其中包括原理、荧光探测的植物生理学基础、植物荧光光谱特征的意义及激光诱导荧光遥感方法的应用前景等。

关键词 激光诱导荧光光谱 植物生理学

建立在目标荧光光谱探测技术基础上的激光荧光技术,作为一种主动式遥感手段,近年来有了迅速的发展,受到越来越多的重视。

从已经发表的研究结果来看,激光诱导荧光技术(LIF)在植物的遥感探测研究领域,可考虑的实际应用有4类:(1)植被的分类(包括与其它地表下垫面之区分);(2)植物生长过程、长势与成熟程度的分析,农作物产量与森林蓄积量的评估;(3)植物生长环境因素,如旱涝和营养缺素、缺肥状况的分析;(4)植物病虫害监测。

为了弄清并掌握这种新的遥感探测手段,本文拟对LIF的原理(理论基础)、方法、实际应用可能范围与局限性以及工程应用系统等若干基本问题作一初步讨论。

一、原 理

在以合适波长的光照射植物(器官的某一部分或群体)时,将得到一种荧光光谱,它的光谱特征将表征植物的种属和生理特性(包括生长的季节以及生长是否健康等状态)。当我们以激光为光源并采用相应的荧光信息采集分析系统,就可以在室外进行激光诱导荧光遥感研究。

激光荧光遥感方法，其本质是研究植物光合色素的荧光光谱。扩展地说，激光荧光遥感方法是研究不同生长生理条件下植物光合色素的荧光光谱信息，并利用其规律与特点去解决具体的遥感应用问题。因此，对于光合色素功能的理解及对于荧光光谱的研究就构成了激光荧光遥感的基础。

同别的光谱方法一样，荧光光谱方法一直是植物生理学研究的工具^[1]。这些方法的使用主要集中在与光合作用有关的光合色素、叶绿体膜结构以及能量吸收、传递、贮存等基本问题的研究方面。

光合色素是指植物中参与光合作用的各种色素，它们主要存在于叶片等器官中。大致分成叶绿素、胡萝卜素与藻胆素三类。前两类广泛存在于各种植物中，藻胆素类仅存在于藻类。以上各类又包括多种不同化学结构的色素（表 1）。研究结果表明，大部分

表 1 光合色素的吸收峰值

Table 1 Absorbance of photosynthetic pigments

色素种类	吸收峰 (nm) (在有机溶剂内)	色素种类	吸收峰 (nm) (在有机溶剂内)	色素种类	吸收峰 (nm) (在有机溶剂内)
叶绿素类		胡萝卜素类		藻胆素类	
叶绿素a	420, 660	β -胡萝卜素	425, 450, 480	藻红蛋白	498, 545, 563
叶绿素b	435, 643	α -胡萝卜素	420, 440, 470	藻蓝蛋白	555, 617
叶绿素c	445, 652	叶黄素	425, 445, 475	别藻蓝蛋白	650
叶绿素d	450, 690	紫质黄	425, 450, 475		
细菌叶绿素a	365, 605, 770	岩藻黄素	425, 450, 475		
细菌叶绿素b	368, 583, 795				
细菌叶绿素c	432, 660				

叶绿素 a、全部叶绿素 b 及全部其它色素分子仅起吸收光能和传递能量的作用，它们并无光化学反应活性，因此被称为天线色素分子。少部分叶绿素 a（约占全部叶绿素 a 分子中的 1/300）具有光化学反应活性，即能进行电荷分离，它们被称为反应中心叶绿素 a。表 1 是几种主要光合色素的光吸收峰值^[2]。图 1 是溶剂为乙醚时叶绿素 a 的一张典型吸收光谱与荧光峰位图^[2]。

实验表明，同一种色素的吸收峰值，在细胞活体与在有机溶剂中处于游离状态时有些差别。如叶绿体中叶绿素 a 在可见光谱区中的几个吸收峰，均较溶剂状态红移几个 nm 至 30nm。产生红移的原因，不是叶绿素 a 在活体中存在不同的分子形式，而是由于细胞中的叶绿素具有不同的聚合状态或者叶绿素 a 分子与其它分子（例如蛋白质分子）形

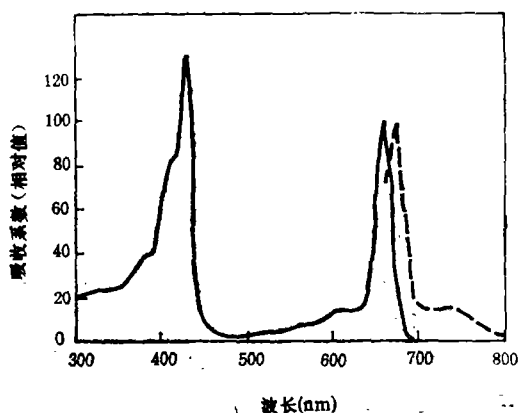


图 1 溶剂为乙醚时的叶绿素 a 的吸收光谱（实线）和荧光峰（虚线）

Fig. 1 Absorption spectra (solid-line) and fluorescence peak (dotted-line) of chlorophyll-a in ether solution

成不同的结合状态的缘故。即是说，微观环境的不同造成了叶绿素 a 的状态与能级的改变。

任何物质的荧光光谱的峰位值均比其相应的吸收峰位值要稍大，即产生通称之为斯托克斯位移的红移。每个荧光峰有其相应的吸收峰，但并非所有的吸收峰均有相应的荧光峰。如叶绿素的荧光光谱仅存在于红外区，而蓝光区则无荧光。这是由于高激发态的叶绿素 a 分子通过内转换形式驰豫的缘故。

在光合过程中，一个色素分子吸收光能被激发至一高能态后，其驰豫过程可取的主要途径有下列几种：(1) 内转换：高激发态以热的形式释放能量后跃迁至第一激发态；(2) 荧光：分子从第一激发态退激发时，常常发射光子，即荧光；(3) 能量传递：分子间的碰撞可以使激发态的分子把激发能传递给相邻的分子，自己回到基态，而该相邻分子则跃迁到激发态，这种退激途径称为能量传递。

前面已经提到，除了份额并不大的一部分叶绿素 a 分子（当然这部分非常重要，也可以讲起核心作用）外，绝大部分的光合色素都是起着吸收日光能的“天线”作用。应该强调的是，光合作用中全部有用的光能都是由这些色素从日光中吸收而来的。所以，光合色素能量的吸收、传递、贮存就成了光合过程中一个主要的研究课题，可惜的是这方面的研究尚不够深入。一个很有意义的研究是属于藻类的，紫球藻含的辅助色素主要有 B-藻红蛋白 (BPE)、R-藻蓝蛋白 (RPC) 与别藻蓝蛋白 (APC)。G. Porter 等人从紫球藻的类囊体膜中把含有这三种辅助色素的藻胆体分离出来，并研究它的吸收光谱与荧光光谱^[2]。他们根据两种光谱的波长大小，大致推测出了这些辅助色素间的能量传递顺序为：

BPE (575 nm) → RPC (636nm) → APC (660nm) → PS II Chla (685nm)

式中 PS II Chla 是光系统 II 叶绿素 a 的反应中心，括弧中的数字为各相应色素的荧光峰波长。E. Gantt 根据此能量传递顺序及色素的相对含量大小还提出了藻胆体的结构模型^[2]。

大量实验已经证实，天线色素吸收光能后可将能量传递给反应中心的叶绿素 a^[2]。例如，在紫菜中，以 520—560nm 光谱区的光照射时，能得到叶绿素 680—690nm 的荧光，而 520—560nm 的光很少为叶绿素 a 所吸收，它是经藻红蛋白吸收后再传递给叶绿素 a 的。又如，以单色光照射硅藻并测定叶绿素 a 的荧光产额时发现，所采用的单色光无论是叶绿素 a 能直接吸收的，或是硅藻中的一种色素——墨角藻黄醇所能吸收的，两者所得之叶绿素 a 的荧光产额几乎一样。这说明墨角藻黄醇所吸收的光能大部分都传递给了叶绿素 a。

结合光合作用及受激分子驰豫等方面的一般概念，对激光荧光遥感方法来说，以下几点结论是重要的和有用的：(1) 所有色素分子在可见光波段承担不同波长范围的能量收集作用，似乎可以讲，经过大自然千万年的选择之后，色素间有着合理的“分工”；(2) 能量传递过程总是从短波长区向长波长区推进，亦即吸收短波长光而受激之分子，在退激发时有可能被较长波长光量子所激发的分子激发，即有一能量传递“链”存在；(3) 从受激态分子的驰豫来看，荧光与能量传递是一对竞争过程，此长彼消，此消彼长；(4) 某一种色素分子的荧光强度，决定于受激态分子的数量以及它与能量传递的份额比，

前者基本上取决于该色素分子的含量及激发条件（如光质、光强、吸收因素等条件），后者则取决于光合色素之间以及光合条件与其它植物组成间之协调作用的程度。简而言之，在高光合效率的情况下，能量传递链的作用是有有效的，荧光强度就应该弱。

二、植物激光荧光遥感的植物生理学基础

从前面的讨论可以得出如下结论：激光诱导荧光方法的基础在于测量和分析植物光合色素的荧光光谱。荧光光谱特征中包含了大量有用的遥感信息，而这种荧光光谱特征（主要指强度、谱形及不同波长区的相对强度比等）不仅取决于色素的种类、浓度和不同色素的浓度比，而且取决于它们对光能的吸收与传递效率。而这两方面又都与植物的种属特性、季节、生长环境条件等因素有关。

光合色素在植物光合作用过程中起着非常重要的作用。它在一种植物中的具体组成状态，影响到该植物的光合作用过程的特性（二者互为因果关系），光合作用的进程又影响到色素的特性行为（如荧光之强度随光合效率而变），所以，研究植物器官的荧光，其实质是研究植物光合效率和色素的变化。

前人的大量研究工作已证明，植物光合色素的组成及光合效率随植物的种属、器官及其部位、生长环境和生长季节（不同生长期）等而改变。而植物的荧光光谱可以在动态过程（时相与生长条件等之变动）中反映以上诸因素的变化。

1. 植物光合色素的组成随植物的种属而变化

激光诱导荧光方法之所以有可能用来对植物的种属进行遥感分类，是由于各植物种属遗传特性的差异，这种差异表现在限制（影响）植物光合效率的因素之不同及产生荧光的光合色素组合（包括配比与相对浓度）之不同^[3-6]。换言之，植物在漫长的生物演化过程中发展和保留下来的遗传属性，对植物荧光的特征及消长关系起着先决作用。

图 2 是各种光合色素的吸收光谱及太阳光的光谱。从图中可以看到，生物在长期的进化中所选择的各种色素使得太阳光谱的各个谱区都能被吸收与利用，充分利用太阳能，表现出了生物之精巧绝伦。如果我们注意到植物相互之间在色素组合上的不同（例如藻蓝素、藻红蛋白只存在于藻类而不存在于高等植物），就不难考虑到利用荧光（或反射光）来加以区别之可能。

不同植物种属在光合作用特性方面呈现出的差异可简要地从两方面加以叙述^[7]：一是光合作用器官与反应系统的种间差异；二是光合作用对主要环境因子反应的种间差异。前者包括光合作用效能、光化学反应系统、叶子组织形态以及暗反应系统的

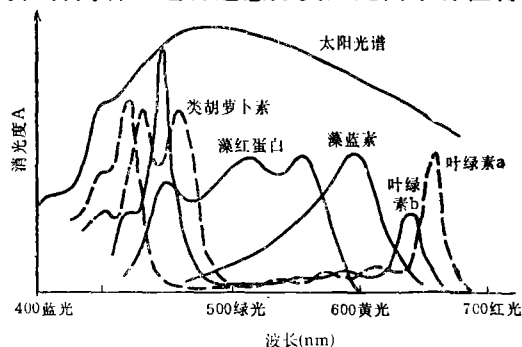


图 2 光合色素的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectra of photosynthetic pigments

差异等；后者包括对光条件、温度条件、水分条件、CO₂ 浓度以及 O₂ 浓度反应的差异等。

植物体光合作用利用光能的一个特点是它具有结构的色素系统，有着各种色素配合在一起吸收“全光谱”的能力^[8]。所以造成上述各种差异的一个主要因素乃是不同种属植物的色素系统的不同。

从光化学反应系统差异来讲，人们从 60 年代即认识到高等植物中存在着两个光化学反应系统：光系统 I（反应中心叶绿素为 P700）和光系统 II（反应中心叶绿素为 P680）。两者通过醌类和细胞色素等电子传递体联系，这两个系统偶联并协调作用。这种基本的光化学反应机理极少因植物种属而产生差异。但是，参与色素系统的色素则因植物种类而有所不同^[7]。叶绿素 a 参与光系统 I，没有发现它因植物种属而出现差异，而参与光系统 II 的色素，却常因植物种类而不同。如高等植物为叶绿素 b 和胡萝卜素，但在红藻类和蓝藻类，则是藻胆素系统的色素，而在褐藻和硅藻，则是叶黄素。由于色素系统之不同，它们的吸收光谱、作用光谱及荧光光谱均有显著的差异。

植物体内所含的色素种类，尤其是含量各不相同。已曾阐明，色素比例（叶绿素成分含量比值）因不同植物种类而异（表 2），同一种植物越是阳叶，它的叶绿素 a 与叶绿素 b 的浓度比值也就越大；在植物种间也曾阐明，越是在强光地方生育的植物，该比值也越大。比如高山植物，是在强光地方生育的，其比值最高达 9.3，平均为 5.5，相反阴地植物为 4.4，蓝色阴地植物为 3.0，绿色阴地植物为 2.6，深水植物为 2.2，浅水植物为 4.4。

表 2 若干植物的色素含量

Table 2 Pigment contents of some kinds of plants

植 物 种 类	叶 绿 素		胡 萝 卜 素*	
	a	b	x	c
印度橡胶树	5.7	1.3	1.0	0.3
洋常春藤	5.6	1.3	1.0	0.3
米心树(阳叶)	5.3	1.2	1.5	0.3
西洋接骨木	5.1	1.0	0.6	0.2
米心树(阴叶)	3.4	0.9	0.8	0.2
欧洲榛	2.7	0.6	0.8	0.2
药用墙草	2.5	0.6	0.5	0.1
金黄欧洲榛	0.8	0.1	0.5	0.1
金边西洋接骨木	0.41	0.05	0.18	0.03
石 花	1.5	0.6	0.4	0.1

* X 表示叶黄素，C 表示胡萝卜素；含量为 mg/dm²·mg

E. W. Chappelle 等利用氮分子激光（337nm）对若干不同种属植物的激光诱导荧光作了研究^[6]，他们认为，实验结果以相当高的一致性反映了所给定植物群体的种属变异特性。所有实验的植物均在 440nm 处有荧光发射峰，而在 525nm 处可测出荧光的只有针叶和阔叶树木。针叶树与其它种类植物的区别在于观察不到 685nm 处的荧光峰。所有植物在 740 处均有荧光。因而他们认为，这些差异具有鉴别同一植物种类中某些种

属的能力。但也认为，并不是说这些差异可毫不含糊地鉴别一种植物种类范围中的各个种属。原因是荧光强度的改变还与一系列其它生态条件有关，如本文下面将要讨论到的植物的四季交替、不同的养分条件以及病虫害等等，均会引起植物荧光强度的改变。

2. 植物荧光光谱的时相特点

研究和应用植物的荧光遥感技术时，不能不对时相问题给以充分的注意。在光照条件不同时，如昼间和夜间，植物在光合作用方面表现的差别已是人们熟知的事实。但尚有两种时相变化更要加以注意，一是任何一种植物在不同生长期表现出来的差异；二是不同植物在各个不同季节所表现出来的差异。

植物的光合作用效率与光合色素均随植物的生长发育过程而变化。每一个高等植物的叶肉细胞大约含有 50—200 个叶绿体，光合色素集中在叶绿体中的类囊体膜里。当植物茎端的分生组织形成叶原基时，逐步合成叶绿体。而色素中之叶绿素在新陈代谢过程中，一边合成，一边分解，不断更新，其浓度则随叶龄而变化。新生成的嫩叶，叶绿素含量低，呈黄绿色，光合作用效率亦低。随着叶龄的增加，叶绿素的含量也增大，叶片固定 CO_2 的能力也很快增长，其净光合效率达到最大值。其后，随着叶子的衰老，叶绿素含量又降低，光合作用效率也逐渐降低^[7, 9, 10]。从表观上看，光合作用强度与叶片伸展的程度是一致的，但也有些具体差别。例如，豌豆光合作用的最大强度是在叶片面积伸展到最大之前；水稻、大麦、烟草则是在叶片结束伸展之后；而高株狐茅则在完全伸展 10 天之后才逐渐达到最强^[6]。但即使同一种植物，也往往因叶片的着生部位不同而有所不同^[7]。

山川 宽等对水稻叶片叶绿素含量与光合作用的关系作了详细地研究后认为，在一定条件下，水稻叶片的叶绿素含量与光合作用呈较明显的正相关^[11]。他们采用三个水稻品种所作试验的结论是一样的：叶绿素含量 (a + b) 均在插秧成活后急剧增加，最高分蘖期前达到最高峰，此后急速减少，到幼穗形成期达到极低，随后，又再度增加，大约在抽穗期出现第二个高值，随着灌浆的进行，又再度降低。他们还证明：a, b, (a + b) 和 a/b 的变化是并行的。叶绿素含量在水稻生长发育过程中的消长，看来是水稻自身的生理变化所引起的，而与各种栽培条件无关（这种特性处理得恰当自然也是荧光区分种属之基础）。

我们在水稻荧光光谱研究工作中所测得的叶绿素变化趋势与参考文献^[11]中的结果是完全一致的^[12]。很有意义的是，以 337nm 的光激发所得的水稻叶片之荧光光谱中，440 和 550nm 荧光峰强等与水稻叶片叶绿素含量之间在变化趋势上也呈现相当一致的关系。

掌握确定统一而又合适的时相因素（如在作物研究时，选定某一合理的生长发育期），可以得到比较可靠的数据，其结论的实用意义也更大。比如，我们在进行水稻的营养条件试验时，应选在叶绿素含量最高的分蘖期，此时若发现严重缺肥，则尚来得及追肥补救。

不言而喻，在进行植物种属区分或估产的研究时，注意季节的选择和季节差异的利用是很有意义的。

3. 植物的不同器官、不同部位叶片与叶片不同部位的荧光特性

前人的工作已经肯定, 高等植物的光合作用器官以叶片为主, 但一般不限于叶片^[7]。如麦穗的光合作用强度大致等于剑叶、剑叶鞘和花梗露出部位三者之和; 稻穗也能进行光合作用, 但比叶片弱许多; 禾谷类的叶鞘外侧部位也能进行相当明显的光合作用。

我们曾对植物的不同部位作过荧光测量, 所用激光光源的波长是 337nm, 部分结果见图 3。由图 3 可见, 麦穗在 440 和 740nm 两处有峰 (440nm 处峰图中未完全显示), 而白菜梗不仅有相当强的荧光, 而且在 440, 680 和 740nm 呈现了一般绿色植物均有的荧光峰。

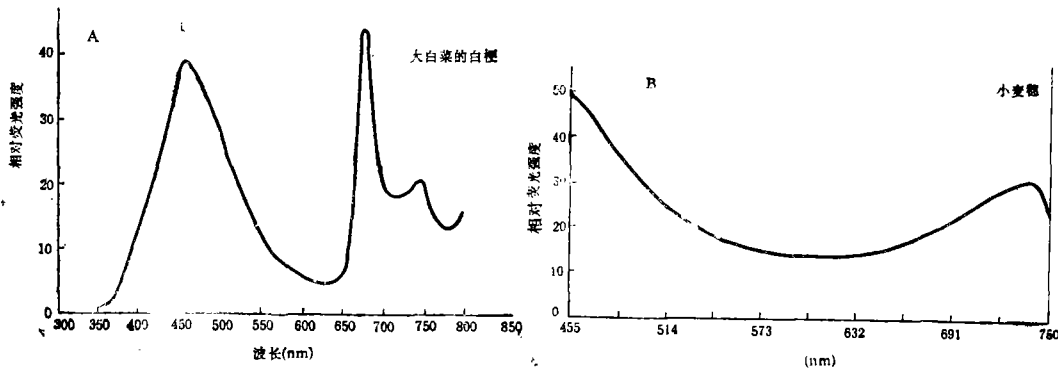


图 3 植物不同部位的荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of different locations in plants

在对不同生长部位的叶片特性进行研究时发现: (1) 甜菜的光合作用强度与叶位的关系不大, 大豆的上叶位与下叶位的光合作用强度差别较大, 而且持续时间长^[7]; (2) 从叶绿素浓度来看, 水稻在最初分蘖期时, 以上部第 2 叶、第 3 叶含量为最大, 下叶片甚低, 一到抽穗期, 顶叶的叶绿素含量则最大, 而下位叶片的含量逐渐减少^[10]; (3) 植物不同部位的叶绿体的片层结构不同。冬小麦的上位叶片, 其结构更能有效地利用光能^[8]; (4) 对水稻的不同部位叶片的衰老次序的研究表明, 在谷物发育阶段, 首先衰老的是剑叶 (第一叶), 其次是第二叶^[13]。

遥感技术所依赖的信息是群体的集合反映, 是不同部位的综合贡献。而我们在实验室进行方法的基本规律研究时, 又不得不取代表性的样品, 即采集一定数量的叶片的方法进行实验, 因而所得之结果肯定与室外的大面积实况遥感有相当的差距, 但从另一角度来讲, 如果充分注意了样品采集的一致性, 则仍然有很高的代表性。

叶片的腹面与背面的光学特性和光合作用特性早就引起了前人的注意^[7], 当分别取腹面与背面的光照时, 禾本科类作物 (如玉米、水稻、甘蔗等) 的光合作用强度大致相等; 而烟草、向日葵、葡萄这类双子叶植物, 腹面的光合作用强度要大于背面。其解释是双子叶植物叶子分化出了上下叠合的海绵组织与栅栏组织, 而禾本科植物则未发现有这种分化现象; 双子叶植物叶片背面的光反射率相当于腹面的两倍。另外叶面是茸毛与蜡状物时也能增加反射率^[7]。我们对叶片的腹面与背面所作的荧光测量结果^[14], 与这

一结论完全一致。

4. 不同养分条件对植物荧光光谱的影响

植物中光合色素的合成及光合作用的能力, 在很大程度上决定于具体生长条件。植物生成所必需元素之缺乏, 将引起植物的不规则生长, 从而出现症状^[15]。已经查明, 高等植物体内含有 10 余种元素, 从生长环境出发, 这些元素有时被称为矿质营养。它们在光合作用中的功能非常广泛^[9], 如 N, P, S, Mg 是叶绿体和叶绿素的组成部分; Fe, Cu 是组成光合链的成分; 磷酸基团对于同化力的形成及整个碳素的同化具有重大作用; Mn, Cl 等构成光合作用所需的辅酶和辅助因子等等; N, P, K 之作为肥料三要素更是普通常识。在广泛范围内水稻内的氮素与光合作用强度呈正相关, 水稻叶片内的含氮量增高, 光合能力也随之显著提高(图 4); 而甘薯与其说是叶片的含氮量、不如说是含钾量在广阔范围内与光合作用强度呈显著正相关^[7]。

叶片氮含量与叶绿素含量之间也存在着正相关。各种试验均表明, 在肥料三要素中, 氮素在广阔范围内对光合作用起着支配作用, 而磷和钾的影响一般不太显著。磷只是在氮素高水平情况下、钾素只是在氮磷两者水平平均高的情况下, 才分别对光合作用起限制作用^[10]。

缺素或营养不良的植物在生长过程中, 它的荧光光谱特征是否会有变化, 而这些变化是否显著到足以判断, 是本研究中至关重要的问题。为此, 我们对玉米和水稻分别作了两批实验^[12, 16], 结果表明, 无论是玉米, 还是水稻, 在不同施肥条件下, 不仅在长势上有差别, 而且还会引起光合作用效率和叶绿素含量等的变化, 并导致叶片的荧光光谱产生有规律的显著的变化。如水稻, 无论是氮肥还是磷肥, 其 440 或 550nm 的荧光强度均随施肥量的减少而上升, 而上述两波长上的荧光强度比值与施肥量多少的相关性则更高。因此, 可利用 440, 550 和 685nm 等处的荧光强度以及它们间的线性组合, 来有效地探测养分供应状况, 乃至进行作物长势监测和估产。应该讲, 这些结论与前人所作的工作是基本一致的。如 E. W. Chappelle 等人对玉米作过 N, P, K, Ca, Mg, S, Fe 等 7 种养分实验。在激光荧光光谱上发现, 缺素导致荧光强度发生最明显变化的是在 690nm 处。N, P, Fe 的缺少所引起的荧光强度的降低, 主要是由于叶绿素浓度的降低所致。

5. 干旱、衰老及病虫害对植物荧光光谱的影响

水分是植物生长的极其重要的因素。叶子水分欠缺对光合作用强度的影响的研究表

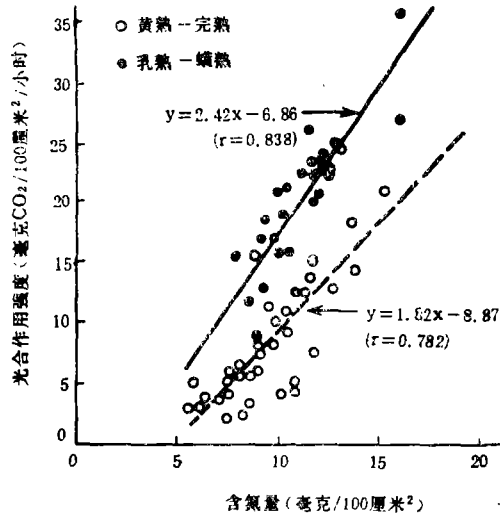


图 4 水稻叶片含氮量与光合作用强度的关系
Fig. 4 Relation between nitrogenous content and photosynthetic intensity of rice leaves

明：(1) 随着叶子含水量的降低，光合作用强度下降，其下降的快慢随作物的品种而异。在向日葵、萝卜、玉米和桑树中，向日葵的变化最快，其余次之；(2) 在同一作物品种的情况下，其变化因叶子的叶龄而异，嫩叶通常比老叶敏感。嫩叶，只要水分稍为欠缺，气孔就马上关闭，光合作用亦随之降低^[7]。

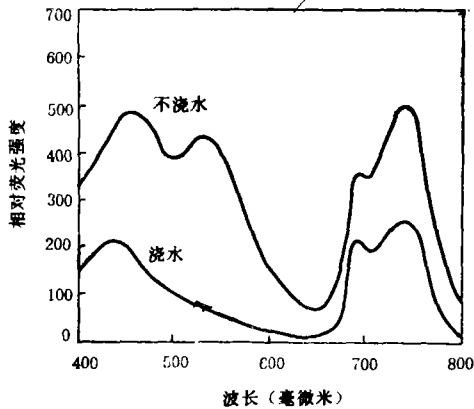


图 5 脱水作用对大豆叶子荧光光谱的影响

Fig.5 Dehydration influence on fluorescence spectra of soybean leaves

在激光诱导荧光研究工作中，曾作过大豆缺水影响的研究^[3,4]，测过因缺水而引起枯萎的大豆叶片的荧光光谱(图5)。干枯叶子荧光的增强与光合作用强度下降是一致的。特别值得注意的是，在干枯叶荧光光谱的525nm处明显出现了峰，而740nm峰与690nm峰的相对强度也比正常叶的要高。我们用活体叶片与分别放置1—5天的叶片所做的类似实验表明，叶片的荧光强度显然随放置时间的增加而升高^[14]。

前面已经讲到，叶片的光合作用强度随叶龄而变化，同时，不同部位叶片的衰老顺序也不同。我们对各种不同叶龄的叶片所作的荧光测试显示了这样一个规律：随着叶片的成长，其荧光强度也相应增加。表3是不同叶龄叶片的相应荧光强度的平均值。老叶和自然枯萎的叶片的荧光光谱特征与前述是一致的。

表 3 不同叶龄叶片的相对荧光强度的平均值

Table 3 Average relative fluorescence intensities of leaves at different ages

种 类		440nm	550nm	680nm
亮叶冬青	嫩 叶	1.70	0.81	0.85
	老 叶	4.58	1.47	0.95
大 豆	嫩 叶	0.11	0.42	
	老 叶	0.45	1.01	
棉 花	嫩 叶	0.28	0.80	
	老 叶	0.47	0.90	

研究表明，许多患病植物(如小麦白粉病、水稻胡麻斑病、稻瘤病、烟草花叶病等)的呼吸作用异常亢进；患水稻黄花萎缩病的水稻叶子的叶绿素含量降低；患烂蔓病的瓜类的叶蔓，其组织部分坏死，叶绿素减少，所有这些均导致植物光合作用强度的降低，并在植物的荧光光谱上表露出来。

测量女贞健康叶和病叶的荧光光谱(图6)的结果表明，受害植物在685nm处的

荧光强度增加, 在 740nm 处的荧光下降, 并随着受害程度的加深, 这两个荧光强度的反向变化也趋剧烈。这是由于 685nm 处的叶绿素 a 到 740nm 处的能量转移效率降低所造成的。

三、植物荧光光谱特征及其在遥感应用上的意义

不同属种的植物, 甚至不同作物品种、和不同条件及不同时相生长下的植物, 它们的荧光光谱均有所不同。植物荧光光谱的特征主要表现在光谱廓形、荧光强度和特征峰(或区)的强度变化上。其中尤以特征峰强度与相应强度比的变化在遥感应用上更有意义。根据本研究中大量试验工作的归纳, 主要的特征峰是 440nm (F440), 550nm (F550), 685nm (F685) 与 740nm (F740)。前人提出的是 440, 525, 690 和 740nm^[3, 74], 除波长上稍有差别外, 二者是十分一致的。由于内转换的缘故, 叶绿素 a 在短波长区无荧光, 只在红区有荧光。这 4 个荧光峰中, 已证明 740 和 690nm 分别为光系统 I 和光系统 II 的反应中心叶绿素分子 a (可称为 P740 和 P690)。前边已简单提到过这两个光反应系统, 它们分别有独立的功能。光系统 I 与生成高还原能力的物质有关, 光系统 II 与光合放氧相联系。光系统 I 和光系统 II 是通过一系列电子体相互串联的, 并可由实验证明。P690 的能量可向 P740 转移^[14]。

F440 与 F550 (或 F525) 究竟属于何种色素, 尚无肯定的结论, 一种看法是, F440 属于维生素 K, 或一种类似的苯醌。而 F550 (或 F525) 的色素为水溶性维生素核黄素^[3, 74]。不管怎样, 这些色素均参与光合作用过程, 而且灵敏地反映了光合作用进程的有效程度。

根据大量的实验数据及植物生理生态学的一些基本理论来分析, 概括起来讲, 植物的荧光光谱变化反映了植物光合作用进程及其有效程度。红区的荧光强度变化, 尤其是 F740 与 F680 之强度比反映了光系统 I 与光系统 II 的匹配程度。F680 的增大是一种不良的信号。蓝区的荧光强度, 则反映了短波长区色素对叶绿素 a 能量传递的有效程度。相当多的实验表明, F440 与 F550, 尤其是后者之增强反映了植物的伤病或者衰老。

四、激光荧光方法及其在植物研究方面的可能应用

(1) 考虑到工作上的方便以及进行大量基础性试验的需要, 我们的荧光实验工作分成三种类型: 一是以离体鲜叶片等为样品在荧光光度计上进行; 二是同样以叶片等为样品, 以激光为光源进行激光诱导, 测荧光光谱; 三是在室外模拟自然状况, 测量激光

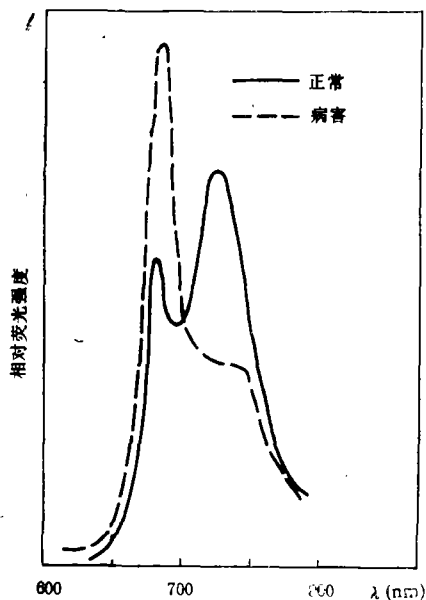


图 6 生长正常和受害的叶片的荧光光谱
Fig. 6 Fluorescence spectra of normal leaves and stressed leaves

诱导荧光光谱。在第三种情况中,样品置于离激光光源 25m 处,采用的是活的成批植株。

激光荧光光谱与荧光光谱存在某些差异,主要是:(1)荧光光谱的光谱结构比激光荧光光谱来得精细,表现在峰的陡度上,在短波长区激光光谱往往表现为馒头状,而荧光光谱有时会有几个小峰。这说明,实际的色素组成比较复杂,可能是多样的。激光荧光实验所以未能分解出光,不在于该装置光谱部分的分辨本领,而可能在于所用光源的光斑比荧光光度计实验中的大,以及背景光的干扰;(2)在激光荧光实验中,有时有些波长的峰(尤其是 F550)不出现或不明显,其中背景光的干扰可能是一个因素,但更主要的原因可能是植株各部位对荧光的不同贡献。

然而,所幸的是由以上这些方法所得出的(如各波段荧光强度消长)基本规律是完全一样的,也是我们最感兴趣的。这给我们的实验工作带来许多好处。

(2) 激光光源问题。氮分子激光器是较易得到的,所以我们也采用了这种光源。但实验证明,337nm 激发的效率不是最高的。这是由于属于紫外区的 337nm 的光不能为光合色素所直接吸收。如果能采用 $\leq 400\text{nm}$ 光作光源(如染料激光器),则可能更佳。

(3) 植物的荧光光谱反映了植物光合作用进程及其有效程度。从一种植物的生长过程来看,它是一种大量的、有规律的动态演变的信息,主要与植物生长的两种状况相关:在正常状况下,它将反映植物由幼小、成长、熟化、衰老的各个阶段;在不正常状况下,它将反映营养欠缺、旱与涝、病与害以及酷热、严寒等不利于生长的环境因素。这些都建立在荧光方法基础上的遥感技术和遥测技术的应用带来良好前景。

五、结 语

与通常的建立在反射光谱基础上的被动式遥感方法相比,荧光方法具有以下优点:

(1) 信息量大且丰富;(2) 光谱信息所包含的物理涵义更为清晰,而且直接与植物光合作用这一重要的生理过程相联系;(3) 对植物生长的环境因素反应灵敏。正是由于这些根本性的优点,所以激光诱导荧光技术在遥感,尤其是在植物遥感方面的应用将是多方面的,如种属的区分,成熟程度的判别,生长环境因素的改变与监测,以及生物量的估计等等。同时我们认为,这种方法对植物生理学来讲也是一种值得重视并予以发展的研究手段。总之,这种遥感技术的应用前景将是十分广阔的。

参 考 文 献

- [1] 程极济,光生物物理学,高等教育出版社,1987年。
- [2] 魏国光、周佩珍等,光合作用原初过程,科学出版社,1987年。
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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。

- [7] 户靖义次主编(薛德榕译),作物的光合作用与物质生产,科学出版社,1987年。
- [8] 周佩珍,光合作用中能量转化及调节,光合作用研究进展(第二集),科学出版社,1980年。
- [9] 江苏农学院编,植物生理学,农业出版社,1984年。
- [10] 石原 邦等(李建民译),水稻光合作用与物质生产研究,国外农学·水稻,(3),1985。
- [11] 山川 宽等(马德媛译),水稻叶片叶绿素含量的品种间差异及其在生育期间的消长,国外农学·水稻,(3),1982。
- [12] 李德成等,不同养分供应状况对水稻荧光光谱特征的影响及其在遥感应用上的意义,本期增刊。
- [13] Biswas, A.K. 等(郑康乐等译),水稻叶片的衰老机理,国外农学·水稻,(4),1981。
- [14] 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。
- [15] 刘芷宇等,主要作物营养失调症状图谱,农业出版社,1982年。
- [16] 徐彬彬等,不同施肥条件下玉米的荧光光谱特征及其在遥感中应用的可能性,本期增刊。

On Some Basic Problems of Laser Fluorescence Remote Sensing on Vegetations

Shen Yuqi

(Nanjing Branch of Academia Sinica)

Xu Binbin Shi Xiaori Li Decheng Zhou Bin

(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing)

Zhu Yonghao Zhang Chongjing Wu Rong Liu Nanying

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

Abstract

This paper described systematically some basic problems of vegetation remote sensing using technology of laser induced fluorescence, its contents included: principles, plantphysiological bases of fluorescence detecting, characteristic significance of plant fluorescence spectra, as well as application prospects of remote sensing methods using laser induced fluorescence etc.

Key words Laser induced fluorescence spectra Plant physiology