

# 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

李德成 徐彬彬 石晓日 周 斌

(中国科学院南京土壤研究所)

沈 玉 其

(中国科学院南京分院)

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

在不同的养分供应状况下,对水稻在几个生育期的荧光光谱特征的研究表明:氮素供应的减少会引起水稻叶片荧光光谱中蓝绿波段峰的强度在有效分蘖期时降低,无效分蘖期始升高,并使红波段峰的强度和特征峰之间的强度比值(如440nm/550nm)在各生育期均有所降低;利用水稻叶片荧光光谱特征的变化监测其养分供应状况是可能的;监测波段以400—800nm为宜,监测时期应为分蘖盛期—孕穗期。

**关键词** 水稻 荧光光谱 生长期 养分状况 遥感

## 引 言

应用遥感技术监测作物的养分供应状况,对于及时了解作物的长势,采取有效的增产措施等均具有积极的意义。作物养分失调的形态测量、症状诊断和化学分析适用于有限面积的作物与土壤的观察及分析<sup>[1]</sup>。被动式遥感技术(如利用反射光谱特性)尽管已成功地用于农业的许多方面,但在养分供应状况的监测方面尚未取得明显进展。80年代中,国外有学者利用激光诱导荧光技术研究了玉米缺素对荧光光谱特征的影响,提出了利用主动式遥感技术监测养分供应状况的可能性<sup>[2]</sup>。其理论基础在于绿色植物体内存在着进行光合作用的不同色素及它们之间的能量传递。在光照下,植物辐射出的荧光,其强度基本上由植物的色素含量和光合效率决定。养分供应状况将影响到植物体内的色素合成和对光能的利用效率<sup>[1,3]</sup>,因此,植物荧光光谱特征的变化可以在一定条件下反映出养分供应状况的变化。

本文着重报道不同养分供应状况对不同生育期的水稻的荧光光谱特征的影响,并初

步探讨其在遥感监测上的意义。

## 一、试验方法

为控制水稻的生长条件,减少非试验性因子干扰,试验采用盆栽土培方式进行。供试土壤为具有代表性的黄棕壤。从养分本底含量(表 1)来看,供试土壤缺氮,而磷、钾则略多。设置 4 种施肥处理条件,每种处理重复 4 次(表 2)。供试水稻品种为苏梗 02428。1987 年 7 月 18 日落谷,8 月 7 日插秧。分别在 8 月 29 日(I. 有效分蘖期)、9 月 11 日(II. 无效分蘖期)、10 月 5 日(III. 拔节期)、10 月 25 日(IV. 孕穗期)和 11 月 21 日(V. 蜡熟期),从各个处理的每个重复中随机选取一穴稻株,进行有关项目的测试。

表 1 供试土壤本底养分含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 1 Background contents of nutrients in experimental soil

对应级别	有机质	全氮	速效磷	速效钾
供试土壤分级	15.2	0.95	0.09	0.10
指标值 <sup>[1, 4, 5]</sup>	<20—40(低)	<1.00(低)	>0.01(丰富)	>0.10(丰富)

表 2 不同处理条件和施肥量 ( $\text{g}/\text{盆}$ )<sup>\*</sup>

Table 2 Various conditions of treatments and contents of fertilizer application ( $\text{g}/\text{basin}$ )

处 理	尿 素		过 磷 酸 钙		硫 酸 钾	
	a	b	a	b	a	b
1.施氮磷钾	1.7	1.0	1.1**	1.0	1.9	0.6
2.不施氮	—	—	3.3	1.0	1.9	0.6
3.不施磷	2.2	1.0	—	—	1.9	0.6
4.不施钾	1.7	0.7	1.1**	0.5	—	—

\* a、b 分别表示插秧前、后的施肥量

\*\* 表示磷酸铵的施用量

(1) 叶绿素含量测定: 分别从所取的一穴稻株中选 4 张具有代表性的叶片, 用上海第二光学仪器厂研制的 POA-1 型叶绿素测定仪快速测定每张叶片的叶绿素含量, 即将测试叶片与标准色片进行目视对比, 测得叶片含有的叶绿素量, 并取 4 张叶片测定结果的平均值作为该处理水稻的叶片叶绿素含量。

(2) 将每穴稻株的叶片均匀平放于铝板上, 用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制组装的激光荧光遥感系统在室内近距测定其激光诱导荧光光谱(用 LIFS 表示)。

(3) 从每穴稻株中取多张(6—10 张)具有代表性的叶片, 剪成  $1\times 5\text{cm}^2$  大小, 重叠在一起, 用日立 F-3010 型荧光分光光度计测试其荧光光谱(用 FIFS<sub>1</sub> 表示)。

(4) 将步骤(3)中所取叶片仔细剪碎并混匀, 称取 1.0g, 放入 36ml 无水乙醇中, 避光浸取 48 h, 滤去叶片碎体, 用日立 F-3010 型荧光分光光度计测试叶片萃取液的荧光

光谱 (用 FIFS<sub>2</sub> 表示)。

上述测试中, LIFS, LIFS<sub>1</sub> 和 FIFS<sub>2</sub> 所用的激发波长均为 337nm。有关仪器的性能和参数详见参考文献[6]。

## 二、结果与讨论

### 1. 水稻的形态症状

在整个生长过程中, 不施氮处理的水稻在形态上明显表现出了因缺乏氮素所产生的影响: 稻株瘦小, 分蘖少, 叶片少而小, 呈黄绿色至黄色, 穗小而短等。其它 3 个处理的水稻生长基本正常, 长势之间无明显差异。

### 2. 水稻叶片的叶绿素含量

从图 1 中可看出, 在各生育期, 均以不施氮处理的叶绿素含量最低, 其它 3 个处理之间的差异虽不大, 但基本上反映出随磷、钾供应的减少, 叶绿素含量将有不同程度降低的趋势<sup>[1-3]</sup>。

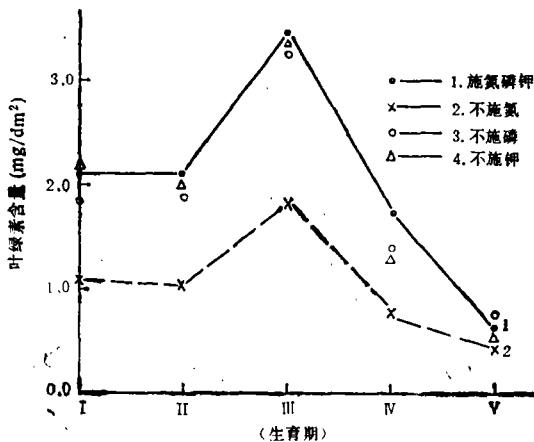


图 1 叶绿素含量比较

Fig. 1 Comparison of chlorophyll contents

和叶绿素含量上均明显表现出了缺氮的影响, 而不施磷、钾两个处理对缺磷、缺钾的影响表现不够明显, 从而与施氮磷钾的处理在长势和叶绿素含量上均基本一致。

各处理水稻叶绿素含量在水稻生长过程中所表现的变化趋势, 即有效分蘖期 (I) 至无效分蘖期 (II) 变化不大, 拔节期 (III) 达到最高, 之后, 孕穗期 (IV) 和蜡熟期 (V) 又依次明显降低, 这种变化趋势的特点是由水稻自身的生理变化趋势所决定的, 不受处理条件差异的影响<sup>[7]</sup>。

### 3. 水稻三种形式的荧光光谱特征

图 2 为所测得的正常生长的水稻的三种形式的荧光光谱, 即 LIFS, FIFS<sub>1</sub> 和 FIFS<sub>2</sub>。三者基本上均呈现出绿色植物的荧光光谱的共同特征, 即在蓝绿波段 (400—600nm) 和红波段 (600—800nm) 有荧光峰出现。

已经确认, 决定红波段荧光峰的是光系统 I (决定较长波长处峰) 和光系统 II (决定较短波长处峰) 的叶绿素 a-蛋白质的复合体, 其强度与光合效率成反向关系, 与叶绿素含量成正向关系<sup>[2, 8, 9]</sup>。而决定蓝绿波段荧光峰的色素种类却至今尚未鉴别出。

#### 4. 不同养分供应状况对水稻荧光光谱特征的影响

对所测得的结果分析研究表明：

第一，氮、磷、钾养分供应的减少，并没有引起水稻同一种形式的荧光光谱在峰数和峰位上产生变化，仅在峰强上有所不同。这表明养分供应的差异可能只影响到水稻体内的色素含量及对能量的利用和传递效率。

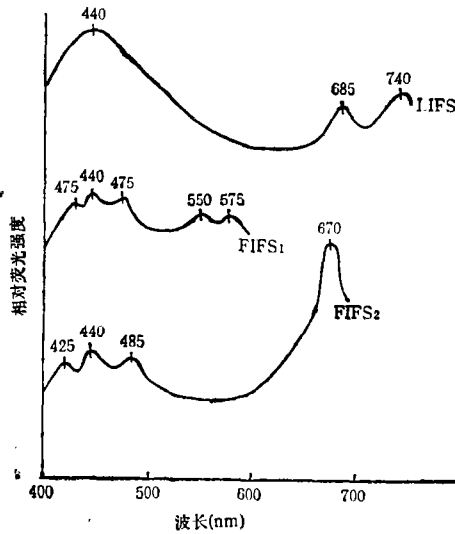


图 2 正常生长的水稻叶片的荧光光谱  
Fig. 2 Fluorescence spectra of normal rice leaves

第二，同一波段内诸峰之间，在强度变化上，存在着高度正相关的特点。图 3 是以无效分蘖期 (II) 为例，说明蓝绿波段内各峰之间在强度变化上的相关性 (以 FIFS<sub>1</sub> 为例)。根据文献[2]的结果，红波段内各峰之间在强度变化上也具有高度的相关性。

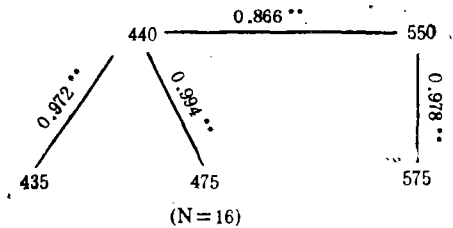


图 3 FIFS、蓝绿波段各峰之间的相关性  
Fig. 3 Correlations among peak intensities in blue-green waveband

表 3 440 和 550nm 处峰强 (FIFS<sub>1</sub>)

Table 3 Peak intensities at 440nm and 550 nm (FIFS<sub>1</sub>)

处 理	生育期 I		生育期 II		生育期 III		生育期 IV		生育期 V	
	440	550	440	550	440	550	440	550	440	550
1.施氮磷钾	0.55	0.26	1.50	1.78	2.97	2.57	2.05	1.67	2.47	2.09
2.不施氮	0.25	0.13	1.87	2.33	3.31	3.69	2.06	2.32	5.50	3.87
3.不施磷	0.29	0.17	2.20	1.94	2.35	2.02	3.59	2.91	2.57	3.40
4.不施钾	0.59	0.24	3.82	2.31	2.09	2.00	2.98	2.17	3.10	2.76

第三，表 3 为 4 种处理水稻叶片在 5 个生育期所选择出的作为特征峰的 440 和 550 nm 处峰的强度值 (为 FIFS<sub>1</sub> 的数据)，表中各数据均为 4 次重复的平均值。由表 3 可相应地得到图 4 和图 5。

由图 4 和图 5 可以看出：(1) 施氮磷钾处理和不施氮处理两者的 440 和 550nm 峰强在拔节期均有一个极大值，它们在有效分蘖期 (I) 至孕穗期 (IV) 期间内表现出的变化规律

440nm 峰强, 除在拔节期与施氮磷钾处理相当外, 其它生育期均高于施氮磷钾处理; 不施氮处理的 550nm 峰强则在各生长期 (II-V) 均高于施氮磷钾处理。(3) 蜡熟期 (V)

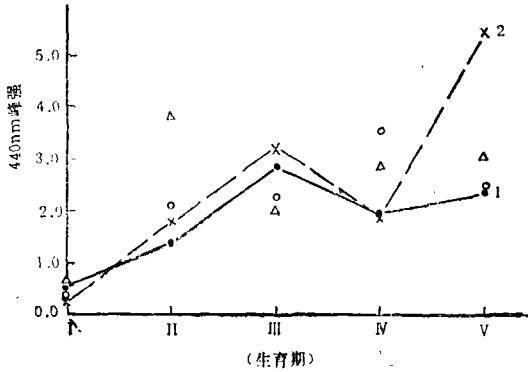


图4 440nm 峰强比较

Fig. 4 Comparison of peak intensities at 440 nm

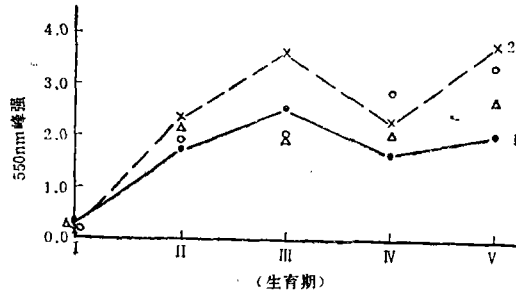


图5 550nm 峰强比较

Fig. 5 Comparison of peak intensities at 550 nm

的峰强与图1中叶绿素含量在表现上看不一致。从叶绿素含量来看, 这一时期是最低的, 然而440和550nm处的峰强却与前几个生育期相当, 甚至更大。这恰好说明处于这一生育期的水稻已进入成熟衰老阶段, 光合作用效率, 即利用光能进行光化学反应的能力已极弱, 所吸收的光能中, 大部分以荧光形式逸出, 从而导致440和550nm处峰强的升高。同样的道理可以用来解释有效分蘖期(I)荧光之所以弱的原因, 从叶绿素含量来看虽不太低, 但此时水稻正处于旺盛的生长期, 光合作用效率很高, 所吸收的光能中, 仅有少量才以荧光形式逸出。

由上述讨论可以导出如下结论: (1) 水稻叶片荧光光谱中蓝绿波段的峰强随着生育期的变化而变化。(2) 这种变化是以叶绿素为代表的光合色素变化及光合效率变化的一种反映。(3) 对我们来讲尤为重要的是, 通过对这种荧光强度变化(包括特征峰强度,

不同峰之间的强度比值等)的监测和研究, 可以了解和掌握植物的生长状况。

本项试验着重研究不施氮对水稻叶片荧光光谱特征的影响, 在蓝绿波段我们初步得到的有用启示是: (1) 不施氮处理的440和550nm处峰强一般均比施氮磷钾处理(II-V)高, 平均分别高出40%和50%。(2) 从图6的440nm/550nm峰强比中可以看出, 按照比值差异, 可以区分出氮素丰缺的情况, 尤以拔节期(III)至孕穗期(IV)较为明显。

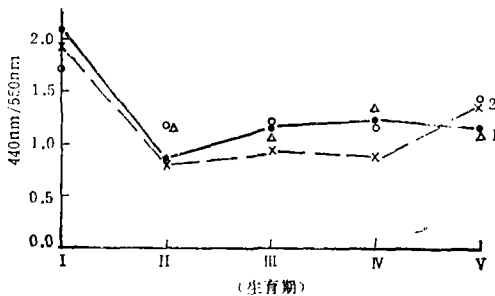


图6 440nm/550nm 峰强比的比较

Fig. 6 Comparison of ratios of 440 nm/550 nm

在这两个时期, 不施氮处理的440nm/550nm峰强比值均明显低于施氮磷钾处理, 拔节期

低 22.4%，孕穗期低 27.6%。很有意义的是，我们在缺氮对玉米荧光光谱特征的影响研究中，也得出了同样的结论，即缺氮施肥处理的玉米，其 440nm/550nm 峰强比值要低于正常施肥的玉米<sup>[10]</sup>。

关于磷、钾处理的情况，我们在前文已提及，由于供试土壤中含有相当量的本底磷和钾，所以虽然在试验中分别布置了不施磷和不施钾两个处理条件，但所得结果的把握性可能要比不施氮处理差。在图 4 和图 5 中可以看出，不施磷和不施钾两个处理的 440 和 550nm 处峰强除拔节期 (III) 之外，均与不施氮处理表现出同样的规律：即强度要高于施氮磷钾处理 (II—V)。至于拔节期 (III) 所表现出的相反趋势，还有待进一步探讨。

第四，植物叶绿素 a 在红波段一般有两个重要的荧光峰，它们包含着重要的信息。遗憾的是本试验没有能在测取叶片蓝绿波段荧光光谱的同时，测取叶片红波段的荧光光谱。但我们可以用所测得的叶片萃取液在 400—700nm 波段内的荧光光谱来进行讨论。

叶片萃取液荧光光谱中 440 和 670nm 处的峰强见表 4。从 670nm 峰强来看，施氮磷钾处理一般均为最大，不施磷、不施钾两个处理次之，而不施氮处理明显最小，这一趋

表 4 440 和 670nm 处峰强 (FIFS<sub>2</sub>)

Table 4 Peak intensities at 440 nm and 670 nm (FIFS<sub>2</sub>)

处 理	生育期 II		生育期 III		生育期 IV		生育期 V	
	440	670	440	670	440	670	440	670
1.施氮磷钾	0.96	5.68	2.13	5.33	2.96	5.92	6.93	5.13
2.不施氮	3.04	3.56	7.87	1.60	7.67	2.80	6.80	3.10
3.不施磷	1.12	5.04	2.33	4.53	5.08	4.88	9.00	5.20
4.不施钾	1.32	5.52	2.04	5.80	4.33	4.27	13.00	4.20

势与叶片的叶绿素含量的变化一致。图 7 是 670nm/440nm 峰强比值的变化趋势。有趣的是，从无效分蘖期至孕穗期，均为施氮磷钾处理的比值最高，不施氮处理则最低，而不施磷和不施钾处理则介于上述两者之间，且略接近于施氮磷钾处理，这是合理的，也是很有意义的。它说明不同波段间峰强的比值，在荧光遥感技术中的利用潜力是很大的。

第五，表 5 是用激光荧光遥感系统在有效分蘖期 (I) 时所测得的水稻叶片的激光诱导荧光光谱中 440 和 685nm 处的峰强，均为 4 次测定的平均值。结果表明，LIFS 中 440nm 峰强高低与相应的 FIFS<sub>1</sub> 中 440nm 峰强高低在各处理中的顺序是一致的，即以不施钾处理最高，施氮磷钾处理次之，不施磷处理再次之，不施氮处理最低。另外，在有效分蘖期，LIFS 中不施氮处理同其它三个处理之间在蓝绿波段的峰强差异和红波段的峰

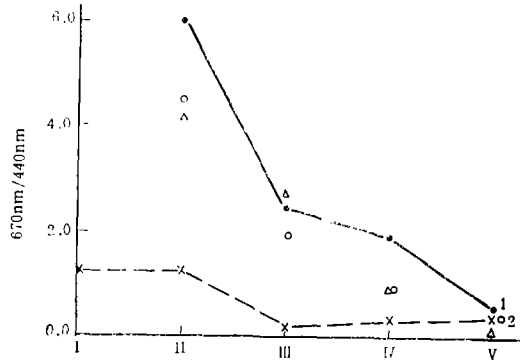


图 7 670nm/440nm 峰强比值比较

Fig. 7 Comparison of ratios of 670 nm/440 nm

强差异均已达到显著水准,如不施氮处理与施氮磷钾处理的 440 和 685nm 处峰强差异的  $t$  值分别为:  $t_{440} = 3.45^*$ ,  $t_{685} = 13.33^{**}$  ( $N = 6$ )。这表明,利用激光诱导荧光技术监测水稻生长过程中的氮素供应状况是可行的。至于监测磷、钾供应状况,因供试土壤本底的特点而尚难得出较为明确的结论。

表 5 440nm 和 685nm 处峰的相对强度 (I)  
Table 5 Relative peak intensities at 440 nm and 685 nm (I)

处 理	有 效 分 蘖 期		
	440	685	685/440
1.施氮磷钾	18 334	12 514	0.68
2.不施氮	11 224	7 539	0.67
3.不施磷	16 078	11 546	0.72
4.不施钾	20 960	14 149	0.68

### 三、在遥感监测上的意义

上述研究结果表明,利用水稻的荧光光谱特征来监测其养分供应状况是可能的,激光荧光遥感系统在这方面的应用潜力是十分诱人的。就监测波段的选择而言,以 400—800nm 较为适宜,因为这一波长范围是植物体中多种色素,尤其是叶绿素 a 的荧光峰所处的波段,该波长范围内的荧光峰强与养分供应状况、叶绿素含量、光合效率和长势等方面均具有直接或间接的联系。就监测时期而言,应以分蘖盛期至孕穗期为宜,这是考虑到分蘖盛期前,稻株稀小不利于大田测试,蜡熟期的测试对增产又无多大意义<sup>[11]</sup>,而分蘖盛期至孕穗期,水稻已处于封行状态,对养分需求量较多,且养分供应状况上的差异可以通过荧光光谱特征的变化而较好地反映出来,因此对指导增产有意义。有关监测指标的选取,当然,除了本文中所采用的峰强差异和峰强比值差异之外,还可以采用峰的半坡宽度、响应曲线的斜率以及上述变量之间的不同组合形式等等。

### 参 考 文 献

- [1] 刘芷宇等主编,主要作物营养失调症状图谱,农业出版社,1982年。
- [2] Chapple, 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.
- [3] Roy K.N. (詹长庚译),水稻营养和施肥,国外农学·水稻,(6),1982.
- [4] 南京农学院等编,作物栽培学(上册),上海科学技术出版社,1983年。
- [5] 熊毅、李庆远主编,中国土壤(第二版),科学出版社,1990年。
- [6] 刘南英等,激光荧光雷达系统的测量方法与应用,本期增刊。
- [7] 山川 宽(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.
- [8] 程极济,光生物物理学,高等教育出版社,1984年。
- [9] 张其德等,叶绿体膜的结构与功能,植物学报,24(4),1982.
- [10] 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。
- [11] 史瑞和等主编,植物营养原理,江苏科学技术出版社,1990年。

## Influence on Fluorescence Spectral Characteristics of Rice under Various Conditions of Nutrient Application and Its Significance on Application of Remote Sensing

Li Decheng Xu Binbin Shi Xiaori Zhou Bin

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

Shen Yuqi

*(Nanjing Branch of Academia Sinica)*

Zhu Yonghao Zhang Chongjing Wu Rong Liu Nanying

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

### Abstract

Research on fluorescence spectral characteristics of rice under various conditions of nutrient application at several growth stages showed: nitrogen deficiency cause the peak intensities in the blue-green waveband decrease at effective tillering stage and increase from invalid tillering stage, it also cause the peak intensities in the red waveband and the ratios between peak intensities (such as 440 nm/550 nm) decrease during the whole growth stages. It is possible to monitor the conditions of nutrient supply through characteristic changes in fluorescence spectra of rice leaves, the optimum monitoring waveband is between 400 nm and 800 nm and the optimum monitoring period is between flourishing tillering stage and booting stage.

**Key words** Rice Fluorescence spectra Growth stage Nutrient condition Remote sensing