

# 水稻叶面积指数和叶片生化成分的光谱法研究

唐延林, 王人潮, 王秀珍, 李云梅

(浙江大学 农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029)

**摘要:** 利用光谱仪通过大田试验和室内测量不同氮素水平及不同时期水稻叶片的光谱反射率, 测算叶面积指数  $LAI$ ; 利用生化方法测量相应叶片的叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量; 在此基础上分析了水稻叶面积指数与光谱变量、叶片生化成分与光谱变量及叶面积指数之间的相关性。结果表明: 水稻叶面积指数与比值植被指数  $RV1$  及归一化差值植被指数  $NDVI$  呈显著相关, 不同氮素水平的水稻叶片的叶绿素、蛋白质及纤维素含量与  $LAI$  之间的  $R^2$  在抽穗期均达到 0.75 以上, 其中叶绿素、纤维素含量与光谱变量的相关达显著水平, 不同时期纤维素与光谱变量及  $LAI$  之间相关达显著水平, 从而证明通过光谱法可以推算水稻叶片的叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量。

**关键词:** 生化成分; 叶面积指数; 光谱特征; 氮素水平; 水稻

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X (2003) 01-0004-04

水稻是我国的主要粮食作物之一, 在我国农业和国民经济中起着重要作用。近年来, 随着遥感技术的发展及水稻遥感长势监测与遥感估产机理的研究, 利用遥感监测水稻叶片化学成分已成为其中的重要内容。牛铮<sup>[1]</sup>等分析了叶片化学成分成像光谱遥感探测机理, 王人潮<sup>[2~4]</sup>等研究了不同氮素营养水平的水稻冠层、叶片和稻株的光谱反射特征曲线, 从光谱中找到了水稻冠层和叶片的敏感波段。过去对叶片中叶绿素含量与光谱的关系研究较多<sup>[5~6]</sup>, 而对水稻叶片中粗蛋白质及纤维素含量与其反射光谱的关系研究较少。研究不同氮素水平水稻叶片的生化成分与光谱反射率的关系, 有可能为利用光谱方法诊断水稻氮素营养状况开辟道路, 对水稻进行大面积氮素营养监测和长势监测具有一定的意义。研究叶片化学成分含量有 2 种方法: 一是建立包含化学成分含量的叶片散射和吸收模型, 二是利用统计分析方法, 由叶片的光谱特征估算化学成分含量。植物光谱分析法能快速、简便、较精确、非破坏性地监测植物氮素营养水平并能及时提供追肥所需的信息。本文的试验和分析采用第二种方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

水稻品种为秀水 63(一季中晚稻, 2000 年 6 月 20 日播种, 7 月 10 日移栽), 该品种株型挺立, 属直立紧凑型。

光谱仪选用美国 ASD (Analytical Spectral Device)

公司的 FieldSpec® 光谱仪和 1800-12 外部积分球(室内), 波段值为 333~1 056 nm, 光谱采样间隔(波段宽)为 1.41 nm, 光谱分辨率率为 3 nm。室外观测时, 光谱仪视场角为 25°, 太阳高度角约 50°。本试验选用的水稻冠层的敏感波段为 NIR(近红外)760~900 nm, R(红光)630~690 nm 和 G(绿光)520~550 nm; 叶片敏感波段为 NIR 760~900 nm, R 630~660 nm 和 G 530~560 nm, 大致与美国陆卫-5 上专题制图仪(Thematic Mapper)的波段 TM4(760~900 nm)、TM3(630~690 nm)、TM2(520~600 nm)相当。

### 1.2 试验方法

试验地点设在浙江大学试验场内, 东经为 120°10', 北纬为 30°14', 试验地 4.0 m×5.1 m 的小区, 行、株距为 0.20 m×0.17 m, 垄向为东西向, 设 5 个重复。供试土壤是小粉土, 土壤全氮量为 0.18% (w), 速效氮含量为 288 mg/kg。设 5 个氮素水平: 0、45、135、225、315 kg/hm<sup>2</sup>, 分别记为 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>。氮肥分 3 次施放, 分别为基肥 50% (w)、分蘖肥 35% (w)、穗肥 15% (w), 人为造成无肥、氮肥不足、氮肥适中、氮肥过量和氮肥超量 5 种情况。

1.2.1 水稻冠层光谱测定 选择晴朗无风天气, 分别在水稻分蘖、拔节、孕穗、抽穗和乳熟期测定水稻冠层光谱反射率。测量时, 传感器探头向下, 距冠层顶垂直高度约 0.7 m。每个小区内随机测 15 个不同点, 以其平均值作为该小区的光谱反射值, 测量时及时进行标准白板校正。冠层光谱数据测定后, 取样测定水稻生物化学参数和室内光谱。另外用尺直接测

定样本的叶长、叶宽和株高,计算叶形状参数。

1.2.2 室内光谱测量 分上(最上面完全展开叶)、中(倒三完全展开叶)、下(第一完全展开叶)叶片采样,及时进行光谱数据测量,然后进行平均,即为叶片光谱。叶面积指数(单位面积上植株的叶面积总和)测定是将叶片扫描输入计算机,矢量化后,用地理信息系统工具计算叶面积,然后换算成叶面积指数( $LAI$ )。比值植被指数(遥感上反映植被生长状况的一系列光学变量的综合指数)( $NDVI$ )= $NIR/R$ ,归一化植被指数( $NDVI$ )=( $NIR-R)/(NIR+R$ ),其中 $R$ 、 $NIR$ 表示对应波段的光谱反射率。

1.2.3 生化成分测量 叶绿素含量测定用混合液( $V_{丙酮}:V_{乙醇}:V_{水}=4.5:4.5:1$ )提取法于分光光度计

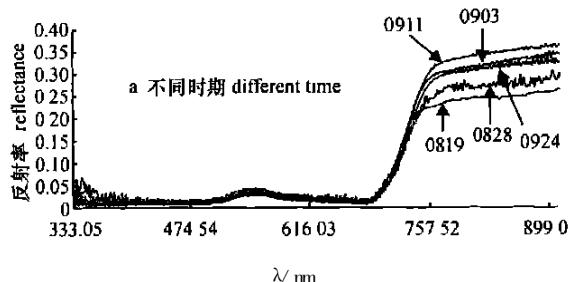


图1 不同时期、不同氮素营养水平的水稻冠层反射光谱

Fig. 1 Canopy reflectance spectra in different time and at different nitrogen levels

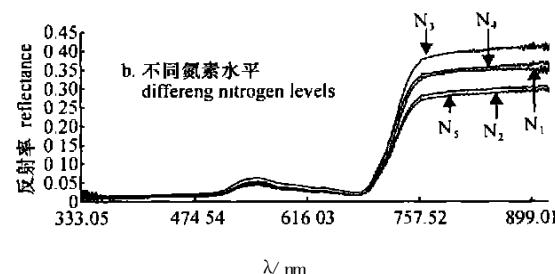
从图1a可以看出,在可见光区,从水稻移栽后到抽穗,水稻植株的持续生长,促使 $LAI$ 不断增加,因而整个群体的光合能力不断增强,对红光、蓝光的吸收增强,红光与蓝光波段的反射率逐渐减小,抽穗期时达到最小值,红光与蓝光波段的强吸收使绿色波段的反射逐渐突出,形成一个小的反射峰。在抽穗后,叶片的养分开始向穗部转移,冠层的叶绿素不断减小,此时,位于红波段、蓝波段的反射率开始上升,在乳熟期之后,下部叶片不断衰老、死亡, $LAI$ 持续下降,绿色叶片内的营养物质向穗部转移,叶绿素分解,叶片转黄,叶片已不能够进行较强的光合作用,而且继续向穗部提供养分,冠层叶绿素迅速减少,红波段、蓝波段的反射率上升加快。此时,水稻在绿色波段的反射率仍然比在红光和蓝光波段的反射率大,在可见光区域仍有一个小的反射峰。随水稻生育进程的推进,红光与蓝光波段的反射率逐渐增加,在550 nm的绿色反射峰逐渐变得不明显。在红光至近红外区,水稻从移栽后,随 $LAI$ 的增加,叶层增多,近红外的反射率不断增大,当 $LAI$ 达到一定值时,近红外反射率趋向稳定。灌浆乳熟时,因叶片向穗部提供大量的养分,叶片的内部组织结构开始发生变化,近红外的反射率也开始逐渐下降,持续到水稻成熟。可

下比色分别测得叶绿素a(吸收峰为663 nm)和叶绿素b(吸收峰为645 nm)含量,然后计算总叶绿素含量;蛋白质用开氏法测得,蛋白质=蛋白氮×6.25;纤维素含量用质量法(原重量法)测得,用 $\varphi$ 为3.14% $H_2SO_4$ 处理样品,除去其中的糖、淀粉、半纤维素、果胶和蛋白质,剩余物干燥称质量即为纤维素质量。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻冠层和叶片的反射光谱

图1a是秀水63在不同时期冠层的光谱反射率曲线,图1b是秀水63在孕穗期不同氮素营养水平的水稻冠层反射光谱曲线,表现出一定的规律性。



以看出,水稻光谱反射率曲线变化的规律性与其生长发育的群体变化特征是对应的。从图1b可知不同氮素营养水平对水稻冠层光谱有一定的影响:在近红外区以 $N_3$ 最高, $N_5$ 较低;在可见光区以 $N_1$ 最高, $N_5$ 最低。

图2是秀水63水稻叶片在分蘖期和抽穗期的室内反射光谱曲线,光谱曲线平滑稳定,且反射率要高于在室外所测的冠层反射率。

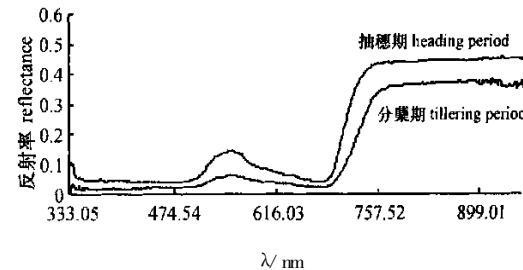


图2 水稻叶片的室内光谱

Fig. 2 Spectra of rice leaves in laboratory

### 2.2 叶面积指数与光谱变量的相关性分析

在氮素水平适中( $N_3$ )时,通过对水稻整个生育期各阶段的光谱测量数据计算,得出叶面积指数与光谱变量之间的散点图,如图3所示。

根据 $NDVI$ 的计算公式,由实验数据计算得

叶面积指数与光谱变量的相关系数,如表1所示.

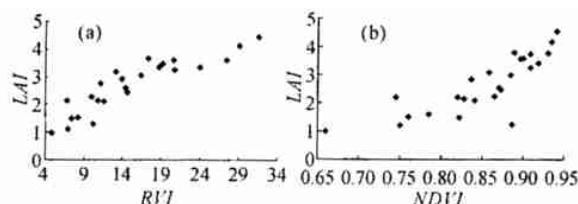


图3 叶面积指数与比值植被指数(a)、归一化植被指数(b)之间的散点图

Fig. 3 The plots of LAI and variables of RVI(a), NDVI(b), respectively

表1 水稻叶面积指数与光谱变量的相关系数<sup>1)</sup>

Tab. 1 Correlation coefficients between LAI and spectrum variable ( $n=20$ )

生长期 growing period	RVI	NDVI	NIR
分蘖期 tillering period	0.908 1 **	0.902 1 **	0.832 5 **
孕穗期 booting period	0.853 0 **	0.891 2 **	0.864 5 **
抽穗期 heading period	0.982 1 **	0.962 6 **	0.714 3
乳熟期 mature period	0.885 4 **	0.859 1 **	0.685 2

1)叶面积指数的估算模型为:  $LAI = 1.355 4 + 0.389 3 RVI$ ,  $R^2 = 0.892 2 **$ .

试验表明:水稻氮素营养水平明显影响叶片的光谱特性, RVI 随着生育期的变化与叶面积的变化趋势相近,在整个生育期,叶面积指数和 RVI 呈高度相关,这与前人试验结果一致<sup>4,7,8</sup>.

### 2.3 不同氮素水平叶片的生化成分

不同氮素水平水稻叶片生化成分测定结果如表2 所示,测量时间为2000年9月16日(抽穗期),测量样本为20个.

表2 不同氮素水平叶片的生化成分

Tab. 2 Biochemical concentrations of rice leaf under different nitrogen levels ( $n=20$ , 20000916)

氮素水平 nitrogen levels	叶绿素 chlorophyll			蛋白质 protein	纤维素 cellulose
	RVI	NDVI	LAI	/( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	/( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
N <sub>1</sub>	12.5	0.85	4.0	22.5	0.88
N <sub>2</sub>	14.1	0.88	4.8	23.8	0.96
N <sub>3</sub>	21.9	0.91	5.9	28.5	1.00
N <sub>4</sub>	26.2	0.92	6.2	29.3	0.84
N <sub>5</sub>	28.6	0.94	6.9	30.5	0.74

根据线性与非线性回归分析法<sup>9</sup>,对抽穗期不同氮素水平水稻叶片生化成分与叶面积指数的回归分析,得叶绿素含量( $y_1$ )、蛋白质含量( $y_2$ )和纤维素含量( $y_3$ )的回归方程分别为:  $y_1 = 10.106 6 + 3.024 LAI$ ,  $R^2 = 0.970 4 **$ ;  $y_2 = -1.151 8 + 0.830 2 LAI - 0.080 68 (LAI)^2$ ,  $R^2 = 0.803 6 **$ ;  $y_3 = 4.732 64 (LAI) \exp(-0.326 79 LAI)$ ,  $R^2 = 0.765 7 ^*$ .

不同氮素水平叶片的生化成分与光谱变量之间的相关系数(用 SPSS8.0 软件计算,下同)计算结果表明: RVI 与叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量的相关系数分别为 0.987、-0.583 和 -0.906; NDVI 与叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量的相关系数分别为 0.978、-0.470 和 -0.824. 可见,在抽穗期,不同氮素水平的水稻叶片的生化成分与叶面积指数具有较好的相关性,这表明可以用光谱法来监测水稻叶片的生化成分.

### 2.4 不同时期叶片的生化成分

氮素水平适中(N<sub>3</sub>)时,不同时期水稻叶片的生化成分的测量结果如表3所示.

表3 不同时期叶片的生化成分

Tab. 3 Biochemical concentrations of rice leaf in different time ( $n=20, 2000$ )

观测日期 observing date	叶绿素 chlorophyll			蛋白质 protein	纤维素 cellulose
	RVI	NDVI	LAI	/( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	/( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
19/8(分蘖盛期)	13.2	0.85	2.1	39.6	1.06
28/8(孕穗期)	14.8	0.87	3.4	39.4	1.01
11/9(抽穗期)	18.6	0.90	6.0	38.6	0.96
24/9(乳熟期)	16.3	0.89	5.3	25.0	0.85

在氮素水平适中时,对不同时期水稻叶片生化成分与叶面积指数的回归分析表明,叶绿素含量( $y_1$ )、蛋白质含量( $y_2$ )和纤维素含量( $y_3$ )的回归方程分别为:  $y_1 = 63.297 5 - 13.269 9 LAI + 1.403 25 (LAI)^2$ ,  $R^2 = 0.329 5$ ;  $y_2 = 1.369 2 - 0.174 5 LAI + 0.016 67 (LAI)^2$ ,  $R^2 = 0.697 1$ ;  $y_3 = 3.268 24 (LAI) \exp(-0.321 66 LAI)$ ,  $R^2 = 0.996 8 **$ .

不同时期叶片生化成分与光谱变量之间的相关系数计算结果表明: RVI 与叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量的相关系数分别为 -0.226、-0.585 和 -0.867; NDVI 与叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量的相关系数分别为 -0.430、-0.753 和 -0.911. 可见,氮素水平适中时,蛋白质和叶绿素在不同时期与叶面积指数的相关性较差,未达显著水平,这可能与测量次数过少有关,也与所选测量波长范围窄没有完全包含蛋白质的吸收峰有关,但纤维素与叶面积指数的相关达到极显著水平,这说明仍可用光谱方法来监测不同时期水稻叶片的纤维素含量.

### 2.5 叶片生化成分之间的相关性分析

水稻叶片中各种生化成分是光合作用的间接产物,它们的合成与转化由水稻生理特征和生长状况决定,相互之间具有一定的联系,其相关性如表4示.

表4 水稻叶片各生化成分间的相关系数<sup>1)</sup>Tab. 4 Correlation coefficients between the biochemical concentrations ( $n=20$ )

生化成分 biochemical contents	叶绿素 chlorophyll		蛋白质 protein		纤维素 cellulose	
	I	II	I	II	I	II
叶绿素 chlorophyll	1.000	1.000	-0.452	0.915	-0.827	0.625
蛋白质 protein	-0.452	0.915	1.000	1.000	0.801	0.836
纤维素 cellulose	-0.827	0.625	0.801	0.836	1.000	1.000

1) I 指不同氮素水平, II 指不同时期

### 3 结论

在田间试验中, 通过人为控制施氮量, 可导致水稻  $LAI$ 、叶色和叶片生化成分的显著差异, 这些差异必然导致不同氮素营养水平水稻的冠层光谱差异。另一方面, 随着水稻生育进程的推进, 水稻植株大小、盖度、冠层结构、地上生物量和叶片生化成分含量发生变化, 这也将导致其冠层光谱差异。通过2年的田间小区试验与分析, 结果表明, 水稻光谱反射率曲线变化的规律性与其生长发育的群体变化特征是对应的, 水稻叶片生化成分含量与冠层光谱特征之间具有较好的相关性, 其中尤以不同氮素水平的结果最佳。这表明可用遥感方法来估算水稻叶片的生化成分含量。利用光谱遥感法估测水稻叶片生化成分含量是有意义和潜力的, 它可以实时监测水稻的长势, 分析水分和肥力状况, 指导水稻科学种植。

#### 参考文献:

- [1] 牛 锋, 陈永华, 隋洪智, 等. 叶片化学成分成像光谱遥感探测机理分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 125—129.
- [2] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研

究: I. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 7—14.

- [3] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究: II. 农学参数与光谱变量的相关分析[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 15—22.
- [4] 周启发, 王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特性的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 40—45.
- [5] 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228—232.
- [6] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 279—283.
- [7] QI J, KERR H, MORAN M S, et al. Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semi-arid region[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73: 18—30.
- [8] SHIBAYAMA M, AKIYAMA T. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 27: 119—127.
- [9] 辛淑亮, 蔡秋芳. 现代农业试验统计[M]. 北京: 中国计量出版社, 1999. 246—309.

## Study on the Leaf Area Index and Biochemical Contents of Rice Blade by the Spectral Method

TANG Yan-lin, WANG Ren-chao, WANG Xiu-zhen, LI Yun-mei

(Institute of Agriculture Remote Sensing & Information System Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** The spectral reflectances of rice blade were measured by the spectrometer FieldSpec® in field and indoor at different nitrogenous levels and different periods. The leaf area index ( $LAI$ ) was estimated by GIS tools. The biochemical method was used to determine the chlorophyll content, protein and cellulose content of relevant rice blade. According the results above, the analyses between the rice leaf area index and the spectral variables, and between the biochemical content of rice blade and spectral variables and  $LAI$  were done. The results showed that  $LAI$  was remarkable correspondent to the ratio of vegetation index ( $RV$ ) and normalized difference vegetation index ( $NDVI$ ), and all  $R^2$  among  $LAI$  and the contents of chlorophyll, protein and cellulose were above 0.75 in heading stage, and the correlation coefficients among spectral variables and chlorophyll and cellulose content at different nitrogen levels and among cellulose and spectral variables and  $LAI$  at different periods were all in significant level, respectively. The results above proved that the chlorophyll, protein and cellulose content of relevant rice blade may be calculated by spectral method.

**Key words:** biochemical composition; leaf area index; spectral characteristic; nitrogen level; rice

【责任编辑 周志红】