

文章编号: 1007-4619 (2004) 02-0185-08

不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究

唐延林^{1,2}, 王人潮¹, 黄敬峰¹, 孔维姝², 程乾¹

(1. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029; 2. 贵州大学物理系, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 通过大田和室内试验, 测定了3个供氮水平下2个品种的水稻冠层、主茎叶片在不同发育期的高光谱反射率及对应的叶绿素、类胡萝卜素含量。结果表明: 不同供氮水平的水稻冠层和叶片光谱差异明显, 其光谱反射率随供氮水平的提高在可见光范围降低, 在近红外区域增高; 拔节期和孕穗期主茎倒三叶反射率在可见光和近红外区域均高于倒一叶; 冠层光谱红边位置 λ_{red} 、红边幅值 DA_{red} 和红边面积 S_{red} 孕穗前呈“红移”, 抽穗后呈“蓝移”现象; 叶面积指数 LAI 、地上鲜生物量 AFM 、地上干生物量 ADM 和鲜叶重 FLM 与冠层光谱变量 R_{1200}/R_{550} , R_{990}/R_{550} , R_{800}/R_{550} , R_{750}/R_{550} , λ_{red} , S_{red} 之间有极显著相关, 冠层和叶片色素含量与其光谱变量 R_{800}/R_{550} 和 λ_{red} 之间也存在显著相关。这说明用合适的高光谱变量来估算水稻 LAI , AFM , ADM , FLM 和冠层、叶片的色素含量。

关键词: 水稻; 供氮水平; 高光谱反射率; 光谱变量; 红边参数

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引言

光合作用过程中起吸收光能的植被色素有叶绿素(叶绿素 a、叶绿素 b)与类胡萝卜素(胡萝卜素和叶黄素), 其中叶绿素是主要的吸收光能的物质, 直接影响植被光合作用的光能利用。植被色素含量与其光合能力、发育阶段和氮素状况有较好的相关性, 已经成为评价植物长势的一种有效手段^[1,2]。由于植被和叶子反射光谱在可见光范围主要受植被色素(叶绿素和类胡萝卜素)的影响, 在近红外区域则主要受叶子内部结构、生物量、蛋白质、纤维素等影响^[3], 因此, 可以用植被冠层和叶片的反射光谱来估算其生化参数, 特别是色素含量^[4,5]。近年来, 随着高光谱分辨率遥感的应用, 使得遥感可以在光谱维上展开, 能直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析, 在植被遥感研究与应用中表现出强大优势^[6]。利用反射光谱数据来估测水稻叶绿素含量和氮素状况已经成为水稻长势监测的一种重要手段^[7-9]。本文结合水稻的生长发育规律, 测定水稻冠层和叶片的高光谱反射率和色素含量及生物物理参数, 分析不同供氮水平的水稻高光谱及其红边特征, 以及它们与叶面积指数、生

物量和色素含量相关性, 促进高光谱分辨率遥感技术在水稻长势监测和估产中的应用。

2 材料与方法

2.1 材料

2.1.1 试验材料

水稻品种为秀水 110(记为 S_1 , 常规粳稻)、协优 9308(记为 S_2 , 杂交籼稻), 2002 年 6 月 2 日播种, 6 月 25 日移栽。 S_1 品种全生育期株型挺立, 属直立紧凑型; S_2 品种叶型随发育期推移由披散转为直立。

2.1.2 肥料设计

设 3 个氮素水平: 0, 120, 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (折合成尿素分别为 0, 266.7, 533.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 分别记为 N_0 , N_1 , N_2 。氮肥分 3 次施放, 分别为基肥 50%、分蘖肥 35%、穗肥 15%, 人为造成无肥、氮肥适中、氮肥超量 3 种情况。另外, 施用过磷酸钙 533.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作基肥, 氯化钾 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作穗肥(等量分 2 次于孕穗始期和抽穗始期均匀施入)。供试土壤是砂壤土, 土壤全氮为 1.15 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮含量为 188.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 1.21 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 72.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质 9.96 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 6.78。

收稿日期: 2002-10-28; 修订日期: 2003-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 40171065, 40271078), 国家 863 计划(批准号: 2002AA24301)资助。rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 唐延林(1964—), 男, 副教授, 1991 年贵州大学理论物理专业毕业, 现为浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所在职博士生, 研究领域为农业高光谱遥感, 发表论文约 20 篇。Email: tyl-zju@163.com.

2.1.3 试验地点

试验地点设在浙江大学试验场内,东经 $120^{\circ}10'$,北纬 $30^{\circ}14'$,试验小区 $4.76\text{m} \times 4.68\text{m}$,株行距为 $0.13\text{m} \times 0.17\text{m}$,单本插,设 4 个重复,按完全随机布置。

2.2 测量方法

2.2.1 测量仪器

光谱仪选用美国 ASD 公司的 ASD FieldSpec Pro FRTM 光谱仪,分光光度计选用 BECKMAN DU-600 核酸蛋白质分析仪,数据分析软件用 SPSS10.0。

2.2.2 光谱测定

冠层光谱 选择晴朗无云无风天气,于上午 10:00—12:00,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,光谱仪视场角为 25° ,传感器探头垂直向下,距冠层顶高度约 0.7m ,稻田水深 10cm 以上。每个小区内选定一固定位置,光谱采样以 10 个光谱为一采样光谱,每次记录 10 个光谱,以其平均值作为该小区的光谱反射率值,测量时及时进行标准白板校正(即所测得的目标物光谱反射率是相对反射率)。冠层光谱数据测定后,对应测冠层光谱的位置取样测定水稻生物物理参数。采样后按器官分离,测鲜生物量,然后置于 105°C 烘箱中杀青半小时,以 70°C 恒温烘干至恒重,测干生物量。

叶片光谱 根据水稻发育期,每隔一段时间进行采样,每次从每个氮素处理的小区各选取长相适中的水稻植株数穴,连根一起取回实验室,分别测主茎上(最上面完全展开叶)、下(倒三完全展开叶)叶片中部的光谱。测量时,叶片样品置于反射率近似为零的黑色橡胶上,光谱仪视场角为 8° ,探头垂直向下,距样品表面距离 0.10m ;光源用光谱仪所带的 50W 卤化灯,光源距样品表面距离 0.45m ,方位角 70° (与样品表面的夹角)。光谱仪、控制计算机和室内光源连接在 UPS 上,每次数据采集前都进行标准白板校正(标准白板反射率视为 1,这样所测得的目标物光谱是无量纲的相对反射率和相对透射率),光谱采样以 10 个光谱为一采样光谱,每次记录 10 个光谱,然后取平均值。

2.2.3 色素测量

对应测光谱的叶片,剪取包含测光谱的叶片中部 0.100g 成细丝,用混合液(丙酮:无水乙醇:蒸馏水 = 4.5:(4.5:1))提取法提取色素,用 BECKMAN DU

600 比色,测光密度 OD 值,然后计算叶绿素和类胡萝卜素含量。

$$Chla(\text{mg/L}) = 12.7 OD_{663} - 2.69 OD_{645},$$

$$Chlb(\text{mg/L}) = 22.9 OD_{645} - 4.68 OD_{663},$$

$$Chl_{T(a+b)}(\text{mg/L}) = 8.02 OD_{663} + 20.2 OD_{645},$$

$$Car(\text{mg/L}) = 4.7 OD_{440} - 0.27(Chla + Chlb),$$

$$Chl(Car)(\text{mg/g}) = \text{浓度}(\text{mg/L}) \text{提取液体积}(\text{ml}) / \text{质量}(\text{g}) / 1000.$$

Chla, *chlb*, *chl*, *Car* 分别表示叶绿素,叶绿素,总叶绿素和类胡萝卜素含量。冠层色素含量测定时,将全部冠层叶片采下,分段从叶上部、叶中部和叶基部各剪取约三分之一,共 0.400g ,加混合提取液 50ml ,比色前按叶绿素原液:提取液 = 1:4 释稀。

3 结果与分析

3.1 冠层和叶片光谱

从图 1 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,促使叶面积指数 *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,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、枯萎、脱落,*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。在红边至近红外区,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,但 *S*₂ 品种的叶型随发育期由分蘖期的披散型转为拔节期的直立紧凑型,尽管分蘖期的 *LAI* 小于拔节期的 *LAI*,但披散型叶片对光的反射面积远大于直立紧凑型,所以,它的近红外反射率在分蘖期要高于拔节期。http://www.cnki.net

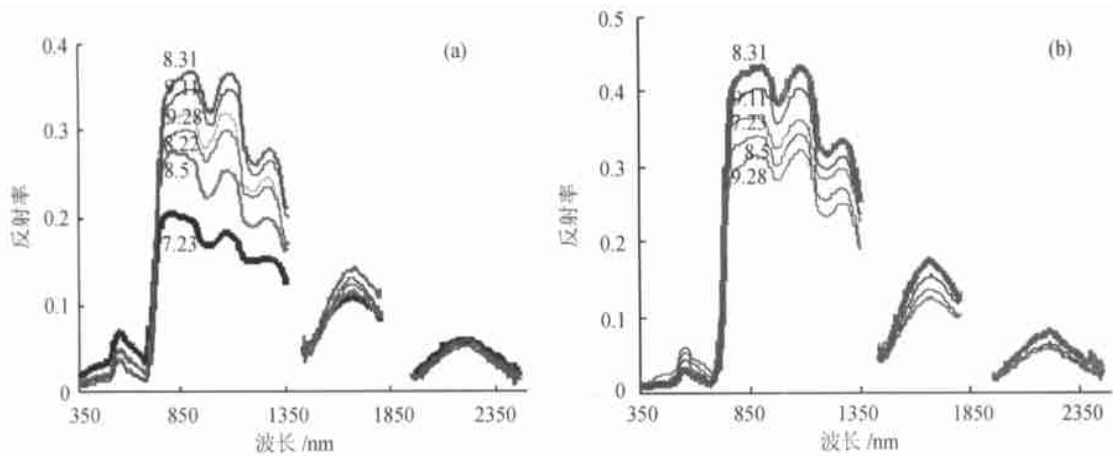


图1 同发育时期水稻的冠层光谱(N_1)

(a) S_1 , (b) S_2

Fig.1 Spectra of rice canopy in different development stages (N_1)

从图2可知,不同供氮水平的水稻冠层光谱差异明显,随供氮水平提高,反射率在可见光范围隆

低、在近红外区域增大,这是由于叶面积指数和叶绿素含量随施氮量增加而增加。

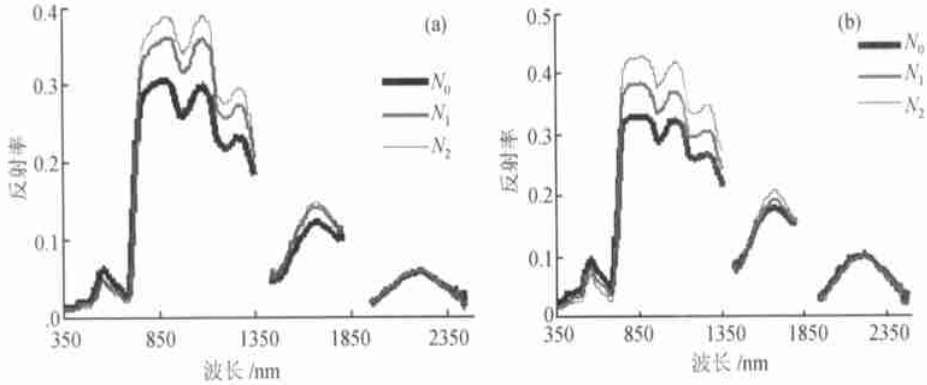


图2 孕穗期的冠层光谱(2002-08-31)

(a) S_1 , (b) S_2

Fig.2 The canopy spectra in booting stage (2002-08-31)

下, S_1 在孕穗期的叶片光谱形状相似,但反射率大

小存在明显的差异,孕穗期的倒一叶(剑叶)的光谱反射率峰值要低于倒三叶的光谱反射率峰值,两个

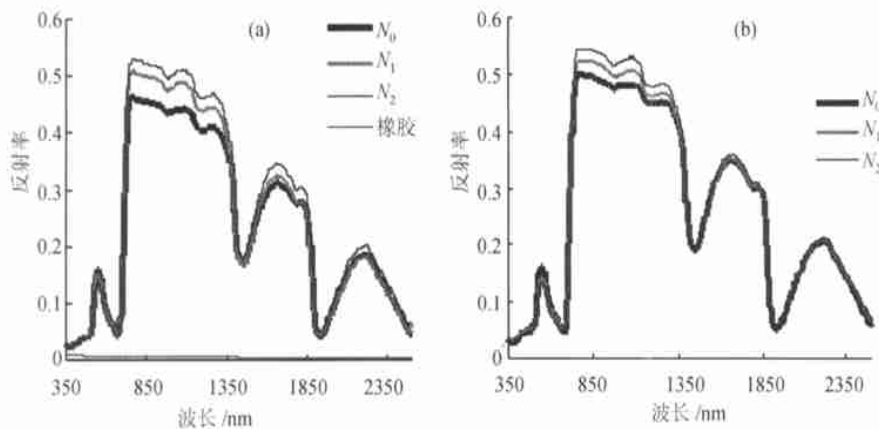


图3 水稻孕穗期的叶片光谱(S_1 , 2002-08-31)

(a) 剑叶(flag leaf); (b) 倒三叶(the third leaf from the top)

Fig.3 The leaf spectra of rice at booting stage (S_1 , 2002-08-31)

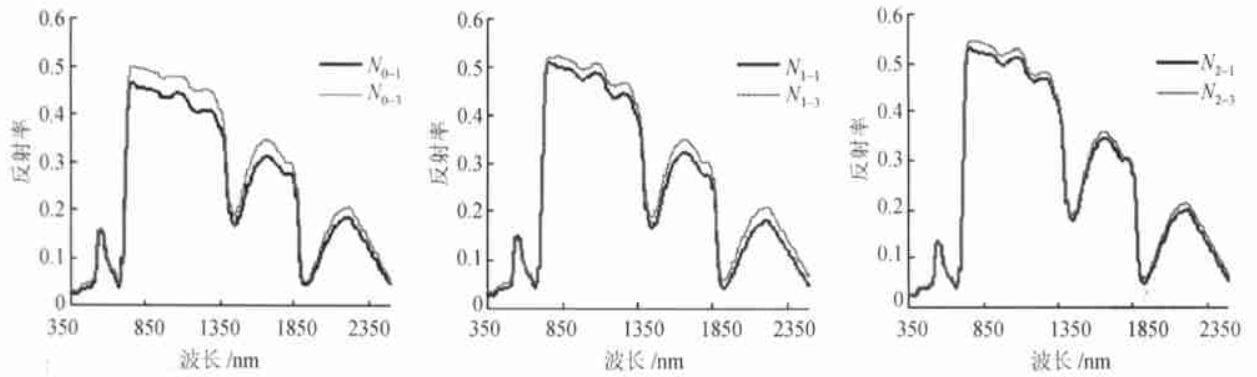


图 4 水稻孕穗期剑叶光谱和倒三叶光谱的比较(S₁, 2002-08-31)

Fig.4 Comparison of the spectra of flag leaf and the third from the top for rice in booting stage(S₁, 2002-08-31)

叶位叶片光谱反射率的差值随供氮水平提高而减小,拔节期的叶片光谱也有相似的结果。另外, S₂ 的叶片光谱也有类似的规律。

3.2 冠层和叶片光谱的红边特征

定量描述植被光谱红边特征的红边参数主要有 (1)红边位置 λ_{red} :红光范围(680—760nm)内反射光谱一阶导数(即一阶导数光谱)最大值所对应的波长;(2)红边幅值 $D\lambda_{red}$:红光范围(680—760nm)内一阶导数光谱的最大值;(3)红边峰值面积(简称红边面积) S_{red} :680—760nm 之间的一阶导数光谱所包围的面积。本文一阶导数采用差分计算, $D\lambda = \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$,其中 R_i 表示波长为 i 处的相对反射

率。有人认为有两个因素决定着红边位置和红边斜率:一个是叶绿素含量,它能引起 700nm 附近的光谱变化;另一个是作物对近红外波段的散射特性,它由冠层结构和叶片结构等因素决定^[10, 11]。

从图 5 可见,水稻冠层光谱的红边具有“双峰”现象。在生长早期,由于冠层叶面积指数较小,受土壤背景的影响,冠层光谱的“双峰”现象并不明显,随着发育期推移,生物量增加、叶面积指数增大,土壤背景对冠层光谱的影响减小,“双峰”现象愈来愈明显,到抽穗期达到最大,以后随着抽穗、乳熟,下部叶片开始变黄、脱落,“双峰”现象逐渐减弱。此外,水稻冠层光谱还存在多峰现象,并且主、次峰位置随发育期而变。

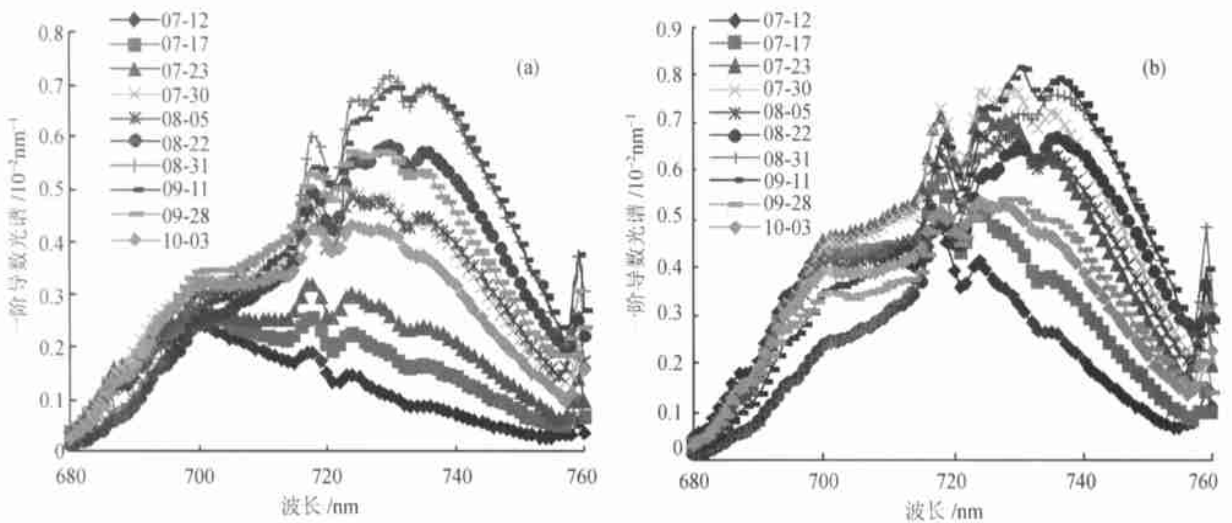


图 5 水稻在不同生育期的冠层红边一阶导数光谱

从图 6 可见, 试验的两个品种水稻冠层反射光谱有红边位置在整个生育期内处于 695—740nm 之间, 且红边位置随施氮量增加向长波方向移动。不同施氮处理下随发育期推移, 红边位置、红边幅值和红边面积都出现“红移”, 到孕穗期时, 红边波长、红边幅值和红边面积达到最大, 抽穗后, 3 个红边参数逐渐减小, 呈“蓝移”现象。在 S_1 抽穗以前, 同一氮

肥处理下 S_2 的 3 个红边参数值均大于 S_1 ; S_1 抽穗后, S_1 的红边位置值略高于 S_2 , 这可能是 S_2 的生育期比 S_1 略短, S_2 抽穗比 S_1 早的缘故。随着施氮量增加, 水稻冠层叶绿素含量增加、叶面积指数增加, 冠层结构发生变化, 由此而引起红边参数改变, 结果是红边吸收波段带变宽, 红边幅值、红边峰值面积随之增加, 红边位置向长波方向移动。

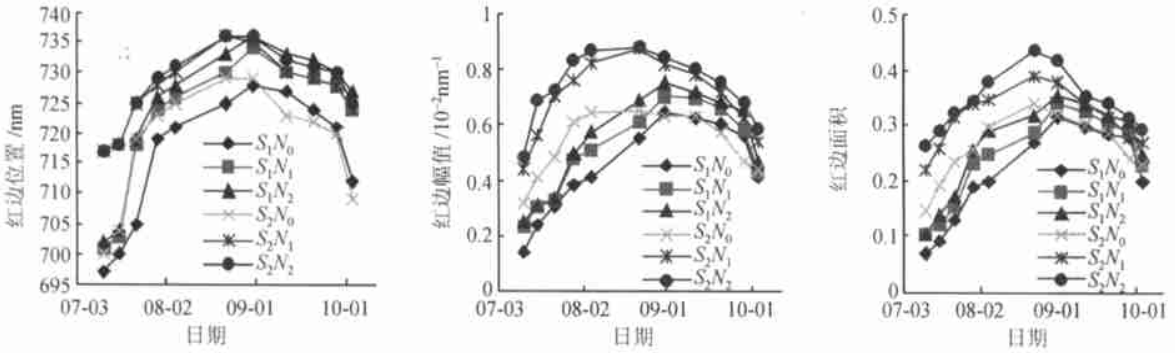


图 6 不同供氮水平水稻冠层光谱红边参数的变化

Fig.6 The change of parameters of red edge of canopy spectra for rice under different nitrogen support levels

从图 7 可见, 水稻抽穗时, 其主茎剑叶反射光谱红边位置出现“蓝移”, 从齐穗期到灌浆期有一个反常“红移”。从灌浆期开始, 主茎剑叶反射光谱红边出现明显较快的“蓝移”现象。而主茎剑叶的红边幅值变化与红边位置的

变化具有相反的趋势。随施氮量增加, 同一品种剑叶的红边波长增大, 但红边幅值却减小。 S_2 的剑叶红边波长大于 S_1 , 而 S_1 的红边幅值大于 S_2 , 这可能是 S_2 的叶色较深, 叶片较薄和叶绿素含量较高引起的。

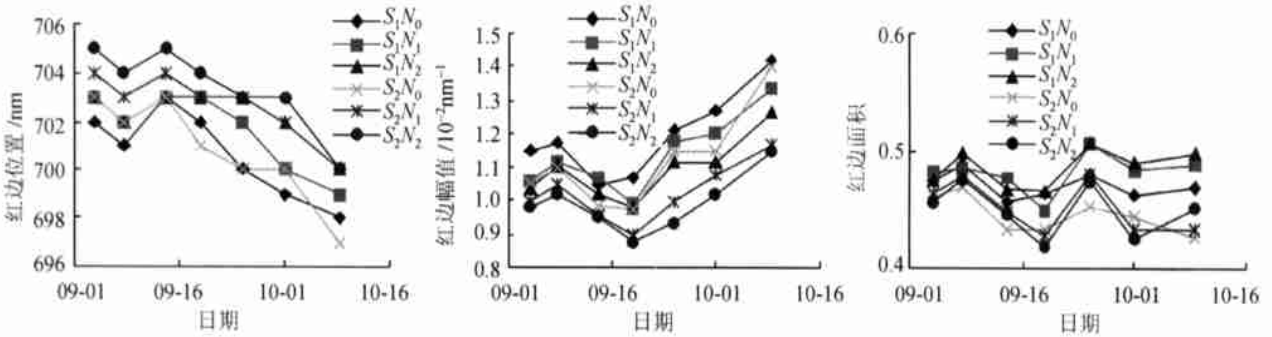


图 7 不同供氮水平水稻成熟过程中主茎剑叶红边参数的变化

Fig.7 The change of parameters of red edge of sword leaves on main stem for rice in mature process under different nitrogen support levels

3.3 叶面积指数、地上生物量和鲜叶重与高光谱数据的相关性

为了分析叶面积指数 LAI 、地上鲜生物量 AFM 、地上干生物量 ADM 和鲜叶重 FLM 与高光谱数据的关系, 根据水稻的光谱曲线特征, 本文用特定波长的反射率之比及红边参数来构建以下光谱变量: (1) 植被指数 R_{1200}/R_{550} , R_{990}/R_{550} , R_{800}/R_{550} , R_{750}/R_{550} , R_{670}/R_{550} , R_{800}/R_{680} , R_{670}/R_{440} ; (2) 红边位置 λ_{red} 、红

边振幅 $D\lambda_{red}$ 和红边峰值面积 S_{red} 。

从表 1 可知, LAI , AFM , ADM , FLM 与光谱变量 R_{1200}/R_{550} , R_{990}/R_{550} , R_{800}/R_{550} , R_{750}/R_{550} , λ_{red} , S_{red} 之间都达到了极显著相关, 但与 R_{670}/R_{550} , R_{670}/R_{440} 的相关性较差, 其原因可能是 670nm 和 440nm 的吸收是由冠层色素决定, 与生物量没有直接关系。

3.4 叶片色素含量与叶片光谱的相关性

为了从反射光谱来估算作物冠层和叶片的色素

表 1 LAI, 地上生物量及鲜叶重与冠层光谱的相关系数 (样本数 $n=156$)

Table 1 Correlation coefficient between LAI, above ground matter and leaf fresh mass and the canopy spectra variables

生物物理参数	光谱变量									
	R_{1200}/R_{550}	R_{990}/R_{550}	R_{800}/R_{550}	R_{750}/R_{550}	R_{670}/R_{550}	R_{670}/R_{440}	R_{800}/R_{680}	λ_{red}	$D\lambda_{red}$	S_{red}
LAI	0.688**	0.700**	0.672**	0.682**	-0.324**	-0.188*	0.566**	0.708**	0.616**	0.654**
AFM	0.496**	0.528**	0.491**	0.498**	-0.039	0.128	0.330**	0.551**	0.606**	0.638**
ADM	0.238**	0.273**	0.228**	0.238**	0.168*	0.406**	0.066	0.345**	0.155*	0.230**
FLM	0.692**	0.711**	0.685**	0.688**	-0.258**	-0.181*	0.544**	0.635**	0.553**	0.512**

*表示通过 0.05 显著性检验, **表示通过 0.01 显著性检验, 以下同。

含量, 高光谱遥感以其高光谱分辨率、波段多、波段连续、数据量丰富等特点为量化植被体内色素开辟了一条新的途径^[12]。原始光谱, 特别是光谱变量和色素指数与冠层和叶片色素含量有一定的相关性, 刘伟东等研究表明水稻叶绿素密度与冠层光谱及其一阶微分光谱存在较好的相关性^[13], Blackburn 研究表明冠层和叶片单位重量色素浓度和 $\log(1/R)$ 的一阶导数、二阶导数强相关^[14]。试验发现: 不同供氮水平下, 叶片的叶绿素、类胡萝卜素含量具有显著差异, 并且冠层和叶片的色素含量与供氮水平之间极显著相关。本文选用以下光谱变量和色素指数: (1)光谱变量 R_{800}/R_{550} 和 R_{673}/R_{640} ; (2)色素比值指

数 $PSSR_a$, $PSSR_b$, $PSSR_c$ 和色素归一化差值指数 $PSND_a$, $PSND_b$, $PSND_c$ ^[15]; (3)叶绿素指数 R_{Ch} ^[16] 和叶绿素吸收比值指数 $CARI$ ^[17]; (4)红边位置 λ_{red} 和红边振幅 $D\lambda_{red}$ 。

从表 2 可以看出, 孕穗期叶片色素含量与其光谱的相关性以光谱变量 R_{800}/R_{550} , R_{Ch} , λ_{red} , $D\lambda_{red}$ 为最好, 相关系数都在 0.500 以上, 通过了 0.01 显著性检验, 这说明可以用光谱变量 R_{800}/R_{550} , R_{Ch} , λ_{red} , $D\lambda_{red}$ 来估算水稻叶片的色素含量, 以 R_{800}/R_{550} 为倒, 其回归估算方程如表 3。拔节期叶片色素含量与光谱变量的相关性检验也有相同的结论。

表 2 孕穗期叶片色素含量与叶片光谱的相关系数 (样本数 $n=60$)

Table 2 Correlation coefficients between the pigment contents of leaf and their spectra in booting stage

叶片	色素含量 $/mg \cdot g^{-1}$	光谱变量											
		R_{800}/R_{550}	$PSSR_a$	$PSSR_b$	$PSSR_c$	R_{673}/R_{640}	R_{Ch}	$CARI$	$PSND_a$	$PSND_b$	$PSND_c$	λ_{red}	$D\lambda_{red}$
S_{1-1}	Chla	0.776**	0.412**	0.733**	0.686**	0.636**	-0.626**	-0.764**	0.431**	0.728**	0.682**	0.763**	-0.714**
	Chlb	0.795**	0.452**	0.748**	0.686**	0.633**	-0.621**	-0.795**	0.472**	0.742**	0.681**	0.792**	-0.748**
	Chl	0.783**	0.423**	0.739**	0.689**	0.638**	-0.627**	-0.774**	0.442**	0.734**	0.685**	0.773**	-0.724**
	Car	0.665**	0.302*	0.617**	0.581**	0.552**	-0.539**	-0.620**	0.322*	0.609**	0.575**	0.659**	-0.579**
S_{1-3}	Chla	0.893**	0.318*	0.845**	0.522**	0.793**	-0.791**	-0.832**	0.326*	0.834**	0.532**	0.795**	-0.766**
	Chlb	0.898**	0.311*	0.849**	0.527**	0.806**	-0.802**	-0.824**	0.317*	0.838**	0.537**	0.806**	-0.772**
	Chl	0.895**	0.317*	0.847**	0.524**	0.797**	-0.795**	-0.831**	0.325*	0.836**	0.534**	0.801**	-0.769**
	Car	0.876**	0.292*	0.826**	0.515**	0.786**	-0.783**	-0.812**	0.301*	0.812**	0.515**	0.784**	-0.755**

表 3 水稻孕穗期叶片色素含量对光谱变量的回归方程 (样本数 $n=240$)

Table 3 Regression equations relating spectral variables to leaf pigment concentration ($mg \cdot g^{-1}$) for rice at booting stage

回归方程	R^2	F	Sig.	估计标准误
$Chla=1.130R_{800}/R_{550}-0.818$	0.532**	270.249	0.000	0.3778
$Chlb=0.324R_{800}/R_{550}-0.239$	0.605**	364.054	0.000	0.0934
$Chl=1.455R_{800}/R_{550}-1.057$	0.552**	292.817	0.000	0.4671
$Car=0.251R_{800}/R_{550}-0.127$	0.530**	268.039	0.000	0.0841

3.5 冠层叶片色素含量与冠层光谱的相关性

从表 4 可知,拔节期冠层色素含量与其光谱的相关性以光谱变量 R_{800}/R_{550} , $PSSR_a$, $PSSR_b$, $PSSR_c$, $PSND_b$ 为最好,相关系数都在 0.500 以上,通过了 0.01 极显著检验,其次是 $PSND_a$, $PSND_c$, λ_{red} , 通过

了 0.05 显著性检验。冠层色素含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)与光谱变量 R_{800}/R_{550} 的回归方程为(样本数 $n=24$)

$$Chla = 2.649 \times 10^{-2} R_{800}/R_{550} + 2.784$$

$$Chlb = 8.198 \times 10^{-3} R_{800}/R_{550} + 0.847$$

$$Chl = 3.514 \times 10^{-2} R_{800}/R_{550} + 3.631$$

$$Car = 1.577 \times 10^{-2} R_{800}/R_{550} + 0.719$$

表 4 拔节期冠层色素含量与冠层光谱的相关系数(样本数 $n=24$)

Table 4 Correlation coefficients between the pigment contents of canopy and their spectra in jointing stage

色素含量 / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	光谱变量											
	R_{800}/R_{550}	$PSSR_a$	$PSSR_b$	$PSSR_c$	R_{673}/R_{640}	R_{Ch}	$CARI$	$PSND_a$	$PSND_b$	$PSND_c$	λ_{red}	$D\lambda_{red}$
Chla	0.593**	0.614**	0.603**	0.595**	-0.434*	0.438*	-0.103	0.612**	0.163**	0.584**	0.632**	-0.487*
Chlb	0.584**	0.602**	0.594**	0.583**	-0.403*	0.405*	-0.136	0.592**	0.599**	0.563**	0.616**	-0.452*
Chl	0.591**	0.611**	0.601**	0.592**	-0.418*	0.423*	-0.118	0.605**	0.609**	0.577**	0.627**	-0.474*
Car	0.554**	0.571**	0.559**	0.562**	-0.289	0.308	-0.180	0.467*	0.609**	0.494**	0.467*	-0.379

总的来说,冠层叶绿素与光谱变量的相关性要好于类胡萝卜素与光谱变量的相关性。冠层色素含量与冠层光谱的相关性要差于叶片色素与叶片光谱的相关性,这可能与测量冠层色素的取样方法有关,因为它不能像叶片那样光谱与色素含量准确对应,同时还可能与测量冠层光谱时光照强度和气候的波动有关。

4 结论与讨论

通过上述实验与分析,可以得到以下结论:

(1) 不同品种水稻的反射光谱形状相似,其值随发育期推移而变。在近红外范围,水稻孕穗期冠层光谱反射率要比拔节期的冠层光谱反射率高,而在可见光范围,孕穗期冠层光谱反射率要比拔节期的冠层光谱反射率略高,这是因为近红外反射率主要取决于生物量和叶面积指数,可见光反射率主要取决于冠层叶绿素含量和盖度,在拔节期,水稻已满行,盖度已无明显变化,但孕穗期的叶面积指数大于拔节期的叶面积指数。

(2) 试验中 3 种供氮水平下水稻冠层和叶片的色素具有极显著差异,色素含量随供氮水平的提高而增大,两者之间存在极显著相关,这为用反射光谱诊断水稻氮素营养状况提供了可能。

(3) 不同供氮水平下水稻冠层和叶片光谱差异明显,反射率随供氮水平提高在可见光范围降低、近红外区增高,引起这种现象的原因是供氮水平高的叶面积指数大、同位叶片厚度最大、叶绿素含量高。

(4) 在拔节期和孕穗期,水稻叶片在可见光和

近红外区域的倒三叶反射率均大于倒一叶反射率,其反射率差值随供氮增加而减小,这可能是由倒三叶的厚度大、叶脉比例高及两叶内部结构差异引起的。

(5) 水稻冠层光谱的红边具有“双峰”和“多峰”现象。随发育期推移,冠层光谱红边位置、红边幅值和红边面积呈先“红移”、后“蓝移”现象,其值一般随供氮水平提高而增大;抽穗后主茎剑叶光谱红边有反常“红移”。

(6) LAI , AFM , ADM , FLM 与冠层光谱变量 R_{1200}/R_{550} , R_{990}/R_{550} , R_{800}/R_{550} , R_{750}/R_{550} , λ_{red} , S_{red} 之间有极显著相关,叶片色素含量与叶片光谱、冠层色素含量与冠层光谱之间也存在显著相关。这说明可以用合适的高光谱变量来估算水稻 LAI , AFM , ADM , FLM 和冠层、叶片的色素含量。

参考文献 (References)

[1] Filella D, Penuelas J. The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plant Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(7): 1459-1470.

[2] Minolta Co. Ltd. Chlorophyll SPAD-520 Instruction Manual [M]. Tokyo, Radiometric Instruments Operations, 1998.

[3] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R, et al. Relation of Light Reflectance to Histological and Physical Evaluations of Cotton Leaf Maturity[J]. *Application of Optics*, 1970, 9(3): 545-552.

[4] Card D H, Peterson D L, Matson P A, et al. Prediction of Leaf Chemistry by the Use of Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 26(1): 119-123.

[5] Thomas J R, Gausman H W. Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll

- and Carotenoid Concentrations for Eight Crops[J]. *Agronomy Journal*, 1977, **60**(6): 799—802.
- [6] Vane G. Terrestrial Imaging Spectrometry: Current Status, Future Trends[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44**(2): 109—127.
- [7] Ladha J K, Tirol-Padre A, Punzalan G C, *et al.* Nondestructive Estimation of Shoot Nitrogen in Different Rice Genotypes[J]. *Agronomy Journal*, 1998, **90**(1): 33—40.
- [8] Takebe M, Yoneyama T, Inada K, *et al.* Spectral Reflectance Ratio of Rice Canopy for Estimating Crop Nitrogen Status[J]. *Plant and Soil*, 1990, **122**(2): 295—297.
- [9] Zhou QF, Wang JH. Comparison of Adaxial and Abaxial Surface Reflectance under Different Nitrogen Level [J]. *Transactions of the CASE*, 2002, **18**(5): 34—38.
- [10] Boochs F, Kupfer G, Dockter. Shape of the Red Edge as Vitality Indicator for Plants [J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**(12): 1741—1753.
- [11] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red Edge of Plant Leaf reflectance [J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1983, **4**(3): 273—288.
- [12] Penuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll a Ratio from Leaf Spectral Reflectance[J]. *Photosynthetica*, 1995, **31**(2): 221—230.
- [13] Liu W D, Xiang Y Q, Zheng L F, *et al.* Relationships between Rice LAI, CHL D and Hyperspectral Data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(4): 279—283. [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.]
- [14] Blackburn G A. Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: An Evaluation of Some Hyperspectral Approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **66**(2): 273—285.
- [15] Blackburn G A. Spectral Indices for Estimating Photosynthetic Pigment Concentrations: a Test Using Senescent Tree Leaves[J]. *Internal Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(4): 657—675.
- [16] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. New Hyperspectral Vegetation Characterization Parameters[J]. *Advances of Space Research*, 2001, **28**(1): 201—206.
- [17] Broge N H, Mortensen J V. Deriving Green Crop Area Index and Canopy Chlorophyll Density of Winter Wheat from Spectral Reflectance Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**(1): 45—57.

Hyperspectral Data and Their Relationships Correlative to the Pigment Contents for Rice Under Different Nitrogen Support Level

TANG Yan-lin^{1,2}, WANG Ren-chao¹, HUANG Jing-feng¹, KONG Wei-shu², CHENG Qian¹

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

2. Department of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The hyperspectral reflectances of the canopy, the leaf on the main stem of two varieties of rice are measured by a ASD FieldSpec Pro FR^{FM} in field and indoor under ³ nitrogen support levels in different stages. The contents of chlorophyll and carotenoid of canopies and leaves corresponding to the spectra were determined. The spectral difference are clear for the canopy and leaves of rice under different nitrogen levels, and the spectral reflectance are gradually getting smaller in the visible region and bigger in the near infrared region along with nitrogen level increasing. The spectral reflectance of the third unfolding leaf from the top on the main stem were bigger than that of the first one from the top in the visible region and the near infrared region at jointing stage and booting stage. There were ‘red shift’ phenomena before booting and ‘blue shift’ after heading for the position of red edge λ_{red} , slope of red edge $D\lambda_{red}$ and area of red edge S_{red} of the canopy spectra. The leaf area indices (LAI), above ground fresh biomass (AFM), above ground dry biomass (ADM) and fresh leaf mass (FLM) were very significantly correlative to the spectral variables R_{1200}/R_{550} , R_{990}/R_{550} , R_{800}/R_{550} , R_{750}/R_{550} , λ_{red} and S_{red} . The pigment contents of canopies and leaves were also significantly correlative to the spectral variables R_{800}/R_{550} and λ_{red} . This indicated that some right spectral variables would be used to estimate the LAI, AFM, ADM, FLM and the pigment contents of canopy and leaf for rice.

Key words: rice; nitrogen support level; hyperspectral reflectance; spectral variable; red edge parameter