

水稻遥感估产模拟模式比较

唐延林^{1,2}, 黄敬峰¹, 王人潮¹, 王福民¹

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

摘 要: 通过大田小区试验, 测定了 2 个品种 3 个供氮水平处理的水稻抽穗后不同时期冠层的光谱反射率、叶面积指数及最后的理论产量和实际产量, 模拟 MSS、TM、SPOT、资源一号 CCD 相机、IKONOS、MODIS 和高光谱的波段来构建光谱差值植被指数 DVI、比值植被指数 RVI、差值归一化植被指数 NDVI 和绿度 G, 并模拟建立遥感估产模式。结果表明: 单变量估产模式以差值植被指数 DVI 效果最好, 蜡熟期估产效果要优于抽穗期和灌浆期; 多时期复合估产模式估产效果要优于单一生育期; 成熟期各种数据的 DVI 估产模式具有相近估产精度, 达 91% 以上, 其中 MSS 波段的估产精度最高。

关键词: 水稻; 估产; 光谱反射率; 模式; 植被指数

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0166-06

0 引言

通过监测农作物生育期内的光谱变化, 研究农作物的反射光谱与叶面积指数、地上生物量、产量、色素含量等农学参数之间的关系, 可以为作物遥感长势监测和遥感估产提供依据^[1]。由于植被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)和覆盖度的影响, 在近红外区域则主要受冠层和叶片结构、生物量、生化成分等影响^[2], 因此, 可以用农作物冠层的反射光谱及其变量来估算其农学参数。利用宽波段遥感技术和方法来进行水稻长势监测和估产在国内外已有研究, 并取得了较好效果^[3-7]。王人潮等^[8]分析了水稻产量与其光谱的关系, 建立单产估算模式, 并利用 NOAA 资料进行水稻总产估计; Patel 等利用卫星数据进行县级水稻估产^[9], Shao 等^[10]利用多时相雷达卫星来进行水稻长势监测和估产。近年来, 随着高空间分辨率和高光谱分辨率遥感的应用, 它们在水稻遥感长势监测和估产研究与应用中表现出强大优势^[11-13]。本文结合水稻的生长发育规律, 对水稻抽穗后冠层进行光谱反射率测定, 根据 Landsat 的 MSS、TM 波段、SPOT 波段、资源一号 CCD 波段、IKONOS 波段和 MODIS 波段进行光谱反射率模拟和构建相应的植被指数, 同时根据冠层高光谱数据构建光谱植被指数, 利用相关分析方法分析水稻理论产量和实际产量与这些光谱植被指数的相关关系, 建立不同的水稻遥感单产估算模型并予以比较, 促进遥感技术在水稻长势监测和估产中的应用。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1) 试验材料 试验水稻品种为秀水 110(记为 S1,

常规粳稻, 全生育期约 145 d)、协优 9308(记为 S2, 杂交粳稻, 全生育期约 140 d), 一季中晚稻, 6 月 2 日播种, 6 月 25 日移栽, S1 于 9 月 3 日开始抽穗, S2 于 8 月 31 日开始抽穗。10 月 15 日收割。

2) 试验地点 试验于 2002 年在浙江大学试验场内进行, 东经 120°10', 北纬 30°14', 小区设计为 4.76 m × 4.68 m, 株行距为 0.13 m × 0.17 m, 单本插, 设 4 个重复, 试验小区按完全随机排列布置。

3) 肥料设计 设 3 个氮素水平: 0、120、240 N kg · hm⁻² (折合成尿素分别为 0、266.7、533.3 kg · hm⁻²), 分别记为 N0、N1、N2。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 kg · hm⁻² 作基肥, 氯化钾 300 kg · 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 g · kg⁻¹, 速效氮含量为 188.5 mg · kg⁻¹, 全磷 1.21 g · kg⁻¹, 全钾 72.7 mg · kg⁻¹, 有机质 9.96 g · kg⁻¹, pH 值 6.78。

1.2 测量方法

1) 测量仪器 光谱仪选用美国 ASD (Analytical Spectral Device) 公司的 FieldSpec Pro FRTM 光谱仪, 波段值为 350~2500 nm, 其中, 350~1000 nm 光谱采样间隔(波段宽)为 1.4 nm, 光谱分辨率为 3 nm, 1000~2500 nm 光谱采样间隔(波段宽)为 2 nm, 光谱分辨率为 10 nm。数据分析软件用 SPSS10.0。

2) 光谱测定 选择晴朗无云无风天气, 于上午 10:00~12:00, 分别在抽穗期(9 月 3 日)、齐穗期(9 月 11 日)、灌浆期(9 月 20 日)、乳穗期(9 月 28 日)和蜡熟期(10 月 4 日)测定水稻冠层光谱反射率(以上生育期是针对 S1 而言)。测量时, 光谱仪视场角 25°; 传感器探头向下, 距冠层顶垂直高度约 0.7 m。光谱采样以 10 个光谱为一采样光谱, 每个小区内每次记录 10 个采样光谱, 以其平均值作为该小区的光谱反射值, 每次数据采集前都进行标准白板校正。

水稻完全成熟后, 分小区收割。收割时, 测穴穗数,

收稿日期: 2003-05-23 修订日期: 2003-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(40171065, 40271078); 国家“863”2002AA243011 项目资助

作者简介: 唐延林(1964-), 男, 副教授, 湖南祁阳人, 理学硕士, 主要从事农业高光谱遥感。杭州 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 310029

穗粒数、千粒重和小区实际产量, 分别计算单位面积的理论产量和实际产量:

单位面积理论产量= 穴穗数 × 穗粒数 × 千粒重 ×
单位面积穴数/1000

单位面积实际产量= 小区实际产量/小区面积

2 数据处理与分析

2 1 冠层光谱与叶面积指数变化

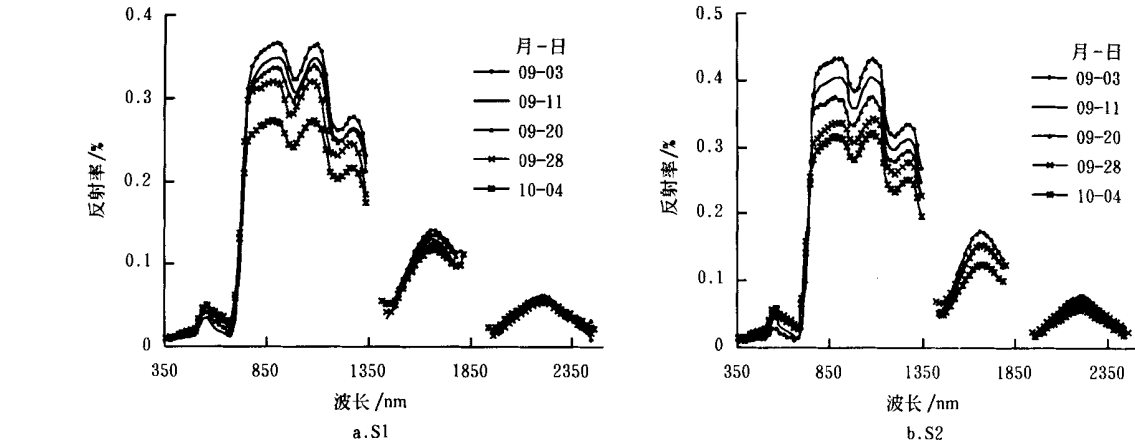


图 1 水稻成熟过程中的冠层光谱(N 1)
Fig 1 The canopy spectra of rice in mature process(N 1)

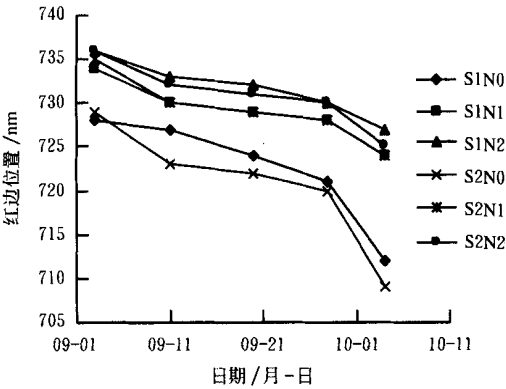


图 2 冠层光谱的红边位置
Fig 2 Positions of red edge for canopy spectra

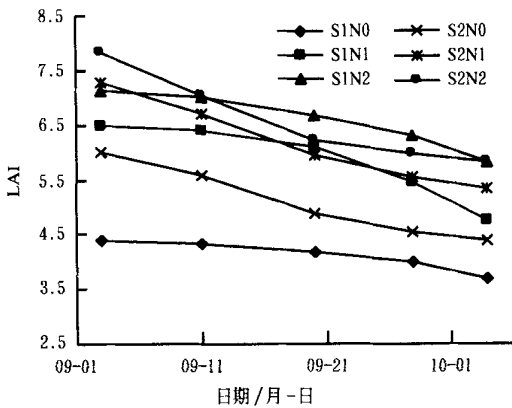


图 3 水稻抽穗后的叶面积指数变化
Fig 3 Change of Leaf Area Index (LAI) for rice ear heading

2 2 波段选择与光谱植被指数构建

由于水稻的产量能力和产量潜力的大小, 在抽穗前基本确定, 而单株充实谷粒的淀粉数量的积累和最后产量的确定, 还取决于抽穗后的成熟过程^[14], 因此, 考虑到后期天气等因素可能对水稻产量造成的影响, 这里我们只选用水稻抽穗后的冠层光谱。本文拟根据Landsat的MSS、TM 波段、SPOT 波段、资源一号 CCD 波段、IKONOS 波段和MODIS 波段来模拟构建以下光谱植被指数, 如表 1 示, 用来分析不同卫星资料水稻遥感估产效果。

2 3 产量与光谱的相关性分析

2 3 1 产量与冠层光谱的相关性分析

由于受气候等因素的影响, 实际产量 P_r 与理论产量 P_t 略有不同, 试验发现: 实际产量 P_r 与理论产量 P_t

从图 1 可见, 水稻抽穗后, 其冠层光谱的反射率在近红外区逐渐减小, 在可见光范围逐渐增大, 分析发现其红边位置随发育期推移呈现向短波方向的“蓝移”, 如图 2 示。从图 3 知, 水稻抽穗后, 其下部叶片逐渐变黄, 叶面积指数逐渐减小, 不同氮素处理下, 同一品种的叶面积指数减小的趋势是相同的。

之间有极显著相关, 回归方程为

$$P_r = 0.711P_t + 1225.7 \quad R^2 = 0.934 \quad F = 312.0$$

分别计算不同时期的理论产量和实际产量与冠层光谱的相关系数, 从图 4a 可知, 水稻产量与冠层光谱反射率的相关性随生育期而变, 变化的总趋势是随发育期推移, 相关系数数值增大, 这说明水稻最终产量不但与抽穗前的生长状况有关, 而且还与抽穗后的成熟过程有关; 从图 4b 可知, 水稻实际产量和理论产量与冠层光谱有相同的相关性, 与蜡熟期的所有波段的冠层光谱反射率有显著相关, 其中以近红外波段的相关性最好; 另外试验发现, 水稻产量与冠层的一阶导数光谱的某些波段如红光波段也有显著相关。这说明可以通过原始光谱或一阶导数光谱来进行水稻遥感估产, 且后期估产效果比前期估产效果好。

表 1 各种卫星资料的光谱植被指数

Table 1 The spectral vegetation indices for all satellite data			
卫星资料	选用波段/ μm	植被指数	
MSS	$G=0.5\sim0.6$	$DV_{MS}=NIR-R$	$RV_{MS}=NIR/R$
	$R=0.6\sim0.7$	$NDV_{MS}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.8\sim1.1$	$G_{MS}=NIR/G$	
TM	$G=0.52\sim0.60$	$DV_{IT}=NIR-R$	$RV_{IT}=NIR/R$
	$R=0.63\sim0.69$	$NDV_{IT}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.76\sim0.90$	$G_T=NIR/G$	
SPOT	$G=0.50\sim0.59$	$DV_{IS}=NIR-R$	$RV_{IS}=NIR/R$
	$R=0.61\sim0.68$	$NDV_{IS}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.79\sim0.89$	$G_S=NIR/G$	
资源一号	$G=0.52\sim0.59$	$DV_{IC}=NIR-R$	$RV_{IC}=NIR/R$
	$R=0.63\sim0.69$	$NDV_{IC}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.77\sim0.89$	$G_C=NIR/G$	
IKONOS	$G=0.52\sim0.60$	$DV_{IT}=NIR-R$	$RV_{IT}=NIR/R$
	$R=0.60\sim0.69$	$NDV_{IT}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.76\sim0.90$	$G_I=NIR/G$	
MODIS	$G=0.545\sim0.565$	$DV_{MO}=NIR-R$	$RV_{MO}=NIR/R$
	$R=0.620\sim0.670$	$NDV_{MO}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.841\sim0.876$	$G_{MO}=NIR/G$	
高光谱	$G=0.550$	$DV_{IH}=NIR-R$	$RV_{IH}=NIR/R$
	$R=0.680$	$NDV_{IH}=(NIR-R)/(NIR+R)$	
	$NIR=0.800$	$G_H=NIR/G$	

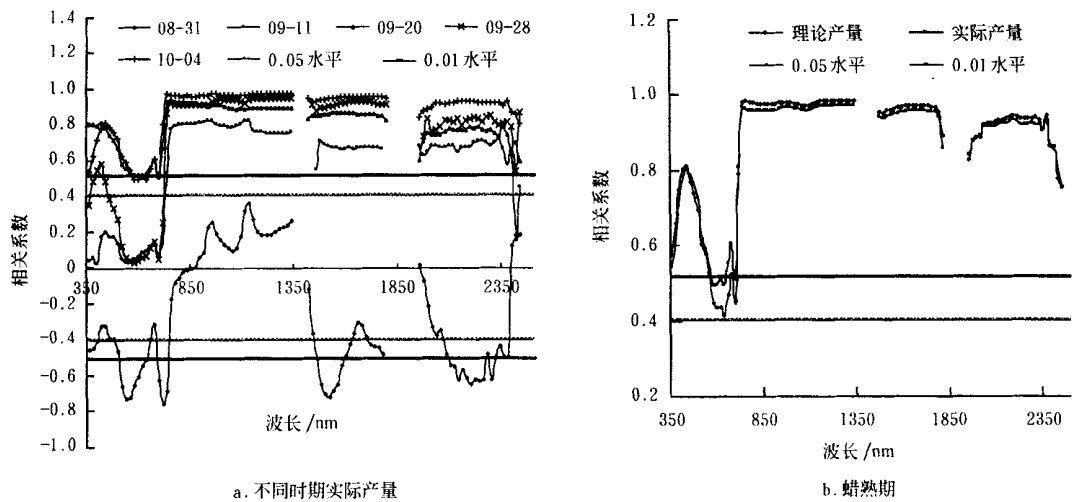


图 4 水稻产量与冠层光谱的相关系数图

Fig 4 Correlogram of rice yields to their canopy spectra

分别计算水稻产量与上述各种卫星资料相应波段的模拟反射率的相关系数,如表 2 示,可以看出,除抽穗期 $R_{0.680}$,其余的都达到了显著和极显著水平。

2.3.2 产量与光谱植被指数的相关性分析

分别计算理论产量与抽穗期、灌浆期和蜡熟期水稻冠层上述光谱植被指数的相关关系,从表 3 可知,无论是理论产量还是实际产量与水稻成熟过程中不同时期冠层光谱所有形式的差值植被指数之间都有极显著相关,而与其它植被指数的相关性不稳定,其原因可能是试验所用的两个水稻品种的生育期不一样引起的。S2

抽穗要早于 S1,成熟也早,在抽穗期时,两个品种的上层叶片和穗都是绿色的,色素对光谱的影响基本相同;后来 S2 的叶片及穗要先于 S1 变黄,色素对两个品种冠层光谱的影响产生差异,先变黄的 S2 的叶绿素含量减少快,使得其在可见光范围的反射率增大明显快些,而近红外范围反射率与色素无关,这样就引起 RV_{IND-VI} 和绿度 G 相对减小,使相关性降低;到蜡熟期后,两个品种的穗都已变黄,其上部叶片也都基本变黄,此时色素对可见光的影响又趋于相同。

表 2 水稻产量(kg · hm⁻²)与光谱反射率的相关系数 (n = 24)

Table 1 Correlation coefficient between the yield (kg · hm⁻²) and spectral reflectances for rice (n = 24)

编号	光谱反射率	生育期					
		抽穗期		灌浆期		蜡熟期	
		理论产量	实际产量	理论产量	实际产量	理论产量	实际产量
1	R _{0.5~0.6}	- 0.758**	- 0.684**	0.492*	0.554**	0.548**	0.578**
2	R _{0.50~0.59}	- 0.764**	- 0.690**	0.497*	0.558**	0.559**	0.586**
3	R _{0.52~0.60}	- 0.771**	- 0.697**	0.478*	0.541**	0.524**	0.553**
4	R _{0.52~0.59}	- 0.779**	- 0.706**	0.482*	0.544**	0.534**	0.559**
5	R _{0.545~0.565}	- 0.801**	- 0.730**	0.486*	0.546**	0.545**	0.562**
6	R _{0.550}	- 0.806**	- 0.737**	0.493*	0.551**	0.562**	0.575**
7	R _{0.6~0.7}	- 0.590**	- 0.503*	0.466*	0.540**	0.459*	0.535**
8	R _{0.60~0.69}	- 0.578**	- 0.490*	0.470*	0.544**	0.462*	0.538**
9	R _{0.61~0.68}	- 0.567**	- 0.479*	0.470*	0.545**	0.457*	0.535**
10	R _{0.63~0.69}	- 0.522**	- 0.430**	0.484*	0.558**	0.470*	0.551**
11	R _{0.620~0.670}	- 0.567**	- 0.478*	0.466*	0.541**	0.445*	0.524**
12	R _{0.680}	- 0.409*	- 0.313	0.531**	0.602**	0.526**	0.607**
13	R _{0.8~1.1}	0.786**	0.717**	0.960**	0.910**	0.978**	0.963**
14	R _{0.76~0.90}	0.807**	0.738**	0.970**	0.926**	0.978**	0.961**
15	R _{0.77~0.89}	0.806**	0.737*	0.970**	0.925**	0.978**	0.960**
16	R _{0.79~0.89}	0.804**	0.735**	0.968**	0.924**	0.977**	0.960**
17	R _{0.841~0.876}	0.801**	0.732**	0.967**	0.922**	0.976**	0.960**
18	R _{0.800}	0.809**	0.741**	0.972**	0.929**	0.979**	0.960**

*, ** 分别表示达 P < 0.05 和 P < 0.01 水平, 下同。

表 3 水稻产量(kg · hm⁻²)与光谱植被指数的相关系数 (n = 24)

Table 3 Correlation coefficient between the yield (kg · hm⁻²) and spectral vegetation indices for rice (n = 24)

编号	光谱植被指数	生育期					
		抽穗期		灌浆期		蜡熟期	
		理论产量	实际产量	理论产量	实际产量	理论产量	实际产量
1	DV _{Ms}	0.765**	0.691**	0.891**	0.822**	0.970**	0.947**
2	RV _{Ms}	0.673**	0.589**	- 0.089	- 0.168	0.657**	0.592**
3	NDV _{Ms}	0.641**	0.557**	- 0.037	- 0.035	0.696**	0.636**
4	G _{Ms}	0.801**	0.722**	0.047	- 0.030	0.702**	0.669**
5	DV _{Ir}	0.782**	0.708**	0.914**	0.851**	0.968**	0.941**
6	RV _{Ir}	0.622**	0.536**	- 0.154	- 0.231	0.527**	0.447*
7	NDV _{Ir}	0.591**	0.503*	- 0.098	- 0.194	0.564**	0.483*
8	G _{Ir}	0.816**	0.737**	0.051	- 0.024	0.668**	0.631**
9	DV _{Is}	0.782**	0.708**	0.908**	0.844**	0.967**	0.941**
10	RV _{Is}	0.659**	0.574**	- 0.121	- 0.197	0.565**	0.491**
11	NDV _{Is}	0.626**	0.540**	- 0.067	- 0.163	0.606**	0.533**
12	G _{Is}	0.810**	0.731**	0.034	- 0.040	0.628**	0.592**
13	DV _{Ic}	0.781**	0.707**	0.913**	0.851**	0.968**	0.941**
14	RV _{Ic}	0.621**	0.535**	- 0.154	- 0.231	0.524**	0.445*
15	NDV _{Ic}	0.591**	0.503*	- 0.098	- 0.195	0.561**	0.480*
16	G _c	0.821**	0.742**	0.060	- 0.015	0.666**	0.632**
17	DV _{Ii}	0.785**	0.711**	0.910**	0.846**	0.968**	0.941**
18	RV _{Ii}	0.669**	0.584**	- 0.116	- 0.193	0.569**	0.496*
19	NDV _{Ii}	0.635**	0.550**	- 0.063	- 0.159	0.610**	0.538**
20	G _i	0.816**	0.737**	0.051	- 0.024	0.668**	0.631**
21	DV _{Mo}	0.778**	0.704**	0.905**	0.841**	0.967**	0.941**
22	RV _{Mo}	0.658**	0.573**	- 0.118	- 0.195	0.584**	0.511*
23	NDV _{Mo}	0.624**	0.539**	- 0.064	- 0.160	0.625**	0.554**
24	G _{Mo}	0.833**	0.756**	0.094	0.019	0.693**	0.665**
25	DV _{Ih}	0.781**	0.706**	0.926**	0.867**	0.968**	0.939**
26	RV _{Ih}	0.527**	0.439*	- 0.232	- 0.307	0.368	0.279
27	NDV _{Ih}	0.508*	0.415*	- 0.171	- 0.267	0.396	0.299
28	G _h	0.839**	0.768**	0.092	0.018	0.670**	0.642**

2 3 3 估产模型及精度分析

分析发现: 对于单变量估产模式而言, 在抽穗期以绿度 G 的估产效果较好, 在灌浆期和蜡熟期则以 DV I 效果较好。以蜡熟期的冠层光谱为例, 实际产量的 DV I 估算回归方程如表 4。

从表 4 中可知, 各种资料单变量 DV I 模拟估产模式的估产精度都在 91% 以上(精度检验是以同时布置的另外 3 个水稻品种嘉育 293、嘉早 312 和嘉育 324 为

样本)。验证分析知, 尽管不同波段同类模拟植被指数之间存在显著性差异, 但由各波段模拟的估产模式的估产结果却没有显著性差异, 这说明理论上用文中各种资料来进行水稻估产具有相同的效果。考虑到水稻产量形成的生理基础, 实际产量的 DV I 复合回归结果如表 5 所示, 以抽穗期- 灌浆期- 蜡熟期 3 个生育期的复合回归的相关性均达到极显著水平, 且比单生育期的单变量 DV I 回归稍好。

表 4 水稻实际产量的单变量光谱估产模式

Table 4 Single-variable spectral estimation models of real yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) for rice

模拟波段	回归方程	R^2	F	估测标准误差	估测精度/%
MSS	$y = 30619.8 \text{DV I}_{\text{MSS}} + 1513.9$	0.902	203.2	546.1	92.0
TM	$y = 33375.4 \text{DV I}_{\text{TM}} + 667.5$	0.891	178.1	579.4	91.7
SPOT	$y = 32919.9 \text{DV I}_{\text{SPOT}} + 747.6$	0.890	177.2	580.7	91.6
资源一号	$y = 33344.0 \text{DV I}_{\text{资源一号}} + 651.9$	0.889	177.0	580.9	91.6
IKONOS	$y = 33335.9 \text{DV I}_{\text{IKONOS}} + 758.2$	0.889	175.8	582.7	91.6
MODIS	$y = 32171.7 \text{DV I}_{\text{MODIS}} + 844.8$	0.892	181.9	574.0	91.7
高光谱	$y = 34729.2 \text{DV I}_{\text{高光谱}} + 303.3$	0.884	168.4	594.0	91.5

表 5 水稻实际产量的复合光谱估产模式

Table 5 Combined spectral estimation models of real yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) for rice

模拟波段	回归方程	R^2	F
MSS	$y = 27688.9 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 4959.2 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 2121.9 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 1488.4$	0.922**	76.9
TM	$y = 29643.5 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 5991.4 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 2233.6 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 561.4$	0.915**	70.6
SPOT	$y = 29168.1 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 6058.0 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 2375.4 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 681.9$	0.915**	70.5
资源一号	$y = 29413.9 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 6215.5 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 2305.8 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 555.8$	0.915**	70.4
IKONOS	$y = 29553.1 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 6102.9 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 2385.2 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 684.5$	0.914**	69.9
MODIS	$y = 28581.6 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 5820.4 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 2366.2 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 805.5$	0.916**	71.7
高光谱	$y = 30757.6 \text{DV I}_{\text{抽穗}} + 6340.9 \text{DV I}_{\text{灌浆}} - 1977.1 \text{DV I}_{\text{蜡熟}} + 63.9$	0.911**	67.9

3 结论与讨论

通过田间小区试验, 测量了水稻在抽穗后不同时期的冠层光谱及小区的理论产量和实际产量, 根据 Landsat 的 MSS、TM 波段、SPOT 波段、资源一号 CCD 波段、IKONOS 波段、MODIS 波段和高光谱波段来模拟构建差值植被指数 DV I、比值植被指数 RV I、差值归一化植被指数 NDV I 和绿度 G, 经相关分析, 发现:

1) 水稻产量与原始光谱各波段的相关性随发育期不同而变, 可见光波段以抽穗期的相关性最好, 近红外波段以成熟期的相关性最好; 产量与一阶导数光谱的某些波段也显著相关。

2) 水稻产量与各种植被指数的相关系数随发育期不同而不同, 与 DV I 的相关系数以蜡熟期最大; 与 RV I、NDV I 和绿度 G 的相关系数以抽穗期最大。

3) 水稻产量与各种资料同一波段的原始反射光谱值及同一模拟植被指数的相关性显著程度基本相同, 但 NIR 波段与产量的相关性要好于绿光波段和红光波段, 原因可能是 NIR 波段主要反映了水稻的生物量, 绿

光和红光波段只是主要反映水稻的色素状况和覆盖率, 正常情况下生物量更能准确地反映水稻的最终产量。

4) 单变量估产模式在抽穗期时以绿度 G 效果较好, 灌浆期和蜡熟期以差值植被指数 DV I 效果较好, 且蜡熟期各种数据的单变量 DV I 估产模式具有相近的估产精度, 达 91% 以上; 抽穗期- 灌浆期- 蜡熟期多时期复合估产模式的效果要优于单时期, 这说明通过多元复合回归建模方法可提高水稻估产精度, 因为它更符合水稻产量形成的机理。从产量形成的生理基础来看, 抽穗期的光谱值反映了抽穗前水稻营养生长的好坏, 灌浆期的光谱值可反映水稻茎、叶营养成分向穗部的转移状况, 蜡熟期的光谱值则反映了水稻是青秆黄熟、贪青徒长还是早衰。

5) 无论是蜡熟期的单变量 DV I 估产模式还是多时期的 DV I 复合估产模式, 各种资料的估产精度基本接近, 其中以 MSS 数据的估产精度稍高, 这说明波段越宽可以更好地反映水稻长势。

由于水稻产量受气候、环境、病虫害、品种和耕作方式等多种因素的影响, 需要按照实际情况来调整 and 选择适宜的估产模式, 以提高水稻遥感估产的精度。

[参 考 文 献]

- [1] 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 Sens Environ*, 1989, 27: 119- 127.
- [2] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity[J]. *Appl Optics*, 1970, 9: 545- 552.
- [3] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI[J]. *Field Crops Research*, 1998, 55: 83- 92.
- [4] Choubey V K, Choubey R. Spectral reflectance, growth and chlorophyll relationships for rice crop in a semiarid region of India[J]. *Water Resources Management*, 1999, 13: 73- 84.
- [5] Takebe M, Yoneyama T, Inada K. Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status[J]. *Plant and Soil*, 1990, 122: 295- 297.
- [6] Wang Y Y, Gao Q F. The relationship between spectrum in paddy fields and rice growth and yield components[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1996, 1: 51- 55.
- [7] Wiegand C, Shibayama M, Yamagata Y. Spectral observations for estimating the growth and yield of rice[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1989, 58(4): 673- 683.
- [8] Wang R C, Huang J F. Rice yield estimation using remote sensing data [M]. *Chi Agri Press* 2002.
- [9] Patel N K, Singh T P, Sahai B, et al. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes[J]. *Int J Remote Sens*, 1985, 6(3): 657- 664.
- [10] Shao Y, Fan X T, Liu H, et al. Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT[J]. *Remote Sens Environ*, 2001, 76: 310- 325.
- [11] Shibayama M, Akiyama T. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements [J]. *Remote Sens Environ*, 1991, 36: 45- 53.
- [12] Takahashi W, Nguyen C V, Kawaguchi S. Statistical models for prediction of dry weight and nitrogen accumulation based on visible and near-infrared hyperspectral reflectance of rice canopies[J]. *Plant Prod Sci*, 2000, 3(4): 377- 386.
- [13] Wang X Z, Huang J F, Li Y M, et al. Relationships between rice agricultural parameters and hyperspectral data [J]. *Journal of Zhejiang University (Agri & Life Sci)*, 2002, 28(3): 283- 288.
- [14] Wang Y R. Rice Nutrition and Apply fertilizer rationally [M]. *Science Press*, 1989: 226- 238.

Comparison of yield estimation simulated models of rice by remote sensing

Tang Yanlin^{1,2}, Huang Jingfeng¹, Wang Renchao¹, Wang Fumin¹

(1. *Institute of Agriculture Remote Sensing and Information System Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;* 2. *Department of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

Abstract: The hyperspectral reflectances of the canopies of two varieties of rice were measured by a ASD Field-Spec Pro FRTM in field under 3 nitrogen support levels in different stages after heading. The leaf area indices LAI corresponding to the hyperspectral reflectance, and the ultimate theoretical yield and real yield were determined. The spectral difference vegetation index DVI, ratio of vegetation index RVI, normalized difference vegetation index NDVI and greenness G were constructed by the data of MSS wavebands, TM wavebands, SPOT wavebands, CCD wavebands on China- Brazil Resources NO. 1, IKONOS wavebands, MODIS wavebands and hyperspectral wavebands. The yield estimation models of rice were established by simulating the method of remote sensing. The correlation between the yields and the hyperspectral data and vegetation indices of rice and the accuracies of yield estimation were analyzed. The yield estimation result by DVI was the best in the yield estimation models of single variable, and the results at mature stage were better than those at heading and milking stage. The results of multiple yield estimation model of multi-stages were better than that of single stage. They were the same results, the accuracies above 91%, for all DVI yield estimation models simulating all above wavebands for rice at mature stage, and the accuracy of MSS wavebands was the best.

Key words: rice; yield estimation; spectral reflectance; model; vegetation index