

利用冠层光谱估测烟草叶面积指数和地上生物量

刘国顺 李向阳 刘大双 喻奇伟

(河南农业大学国家烟草栽培生理生化研究基地,河南郑州 450002)

摘要 综合多种烟草类型、品种及肥料处理因素,分析了 17 种光谱参数与烟草叶面积指数 (LAI)、地上鲜生物重 (AFW)、地上干生物重 (ADW) 的关系,建立逐步回归模型对烟草 LAI 、 AFW 、 ADW 进行估测并结合相关分析筛选出相应的特征变量。结果表明:5 个回归方程的复确定系数 R^2 、回归系数相伴概率均达到显著水平。包含 17 个光谱参量的逐步回归方程筛选出的第一自变量均为 Rg/Rr 。相关分析及散点图分析亦得出 Rg/Rr 与 LAI 、 AFW 、 ADW 相关系数分别为 0.759、0.611、0.647, R^2 为 0.576、0.3727、0.4184,均达到极显著水平,证明烟草 LAI 、 AFW 、 ADW 的特征变量为 Rg/Rr 。仅采用 8 种植被指数建立模型,证明利用比值植被指数 (RVI) 估测 LAI 、 ADW 亦是可行的。经过统计检验,建立的模型估测效果均较好,估测值与实测值的相关性均达到显著水平,其中包含特征变量 Rg/Rr 的回归模型估测效果优于 RVI 构建的模型。表明采用高分辨率光谱或宽波段光谱提取光谱变量可对烟草 LAI 、 AFW 、 ADW 进行监测,并可根据数据条件选择有效的估测模型,为烟草遥感数据分析提供方法。

关键词 冠层光谱 烟草 叶面积指数 地上鲜生物重 地上干生物重

文章编号:1000-0933(2007)05-1763-09 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Estimation of tobacco leaf area index and aboveground biomass using canopy spectra

LIU Guo-Shun, LI Xiang-Yang, LIU Da-Shuang, YU Qi-Wei

National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Center of Henan Agricultural University Zhengzhou 450002, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1763 ~ 1771.

Abstract: Leaf area index (LAI), aboveground fresh weight (AFW) and aboveground dry weight (ADW) are important parameters in monitoring of crop growth status. The tobacco stepwise regression models and characteristic variable were established by analysing the relationship between 17 spectral parameters and LAI , AFW , ADW in different type, breed, fertilizer treatments. The results showed that 5 regression equation R^2 and coefficients reached 0.05 significant level. The first variable screened was Rg/Rr for the regression models of 17 spectral variables. The correlation coefficients of Rg/Rr and LAI , AFW , ADW were 0.759, 0.611, 0.647, respectively and that of R^2 were 0.576, 0.3727, 0.4184. They all reached 0.01 significant level. So Rg/Rr was the characteristic variable of LAI , AFW , ADW . Also, RVI could be used to estimate LAI , ADW by using the regression equation of 8 vegetation indexes. Through testing, all the models had good estimate effects and regression models of Rg/Rr were better than those of RVI . This study indicates that it is feasible to monitor the tobacco growth by the characteristic parameters of hyperspectra and broadband spectra, and we can choose effective models based on the data, providing method of analysing remote sensing data.

Key Words: canopy spectra; tobacco; leaf area index; aboveground fresh weight; aboveground dry weight

基金项目:国家烟草专卖局重点资助项目(110200401021)

收稿日期:2006-07-19;修订日期:2007-02-10

作者简介:刘国顺(1954~)男,河南平顶山人,教授,主要从事烟草栽培及信息技术研究。E-mail:liugsh@371.net

Foundation item: This work was financially supported by Key Project of National Tobacco Monopoly Bureau (No. 110200401021)

Received date: 2006-07-19; **Accepted date**: 2007-02-10

Biography: LIU Guo-Shun, Professor, mainly engaged in tobacco cultivation and information technique. E-mail: liugsh@371.net

叶面积指数 (Leaf Area Index, 简称 LAI) 是陆面过程中的一个十分重要的结构参数, 是表征植被冠层结构最基本的参量之一, 通常作为遥感估测产量和土壤水分蒸发蒸腾量模型的输入参数^[1, 2]。地上生物量也是生态系统研究中最重要生物物理参数之一, 与植物的叶面积之间有着密切的关系。LAI 既可以定义为单位地面面积上所有叶子表面积的总和 (全部表面 LAI), 也可以定义为单位面积上所有叶子向下投影的面积总和 (单面 LAI)^[3]。本文定义的叶面积指数是指全部表面 LAI。

对 LAI 和地上生物量的小尺度测量, 已经有一些较为有效的方法, 但是想要进行大面积甚至是全球的估算时只有利用遥感技术才是可行的。前人研究发现绿色作物光谱反射率与 LAI 有密切的关系^[4-7]。其中, 又以玉米、水稻、小麦等主要粮食作物研究较多。Haboudane 等通过对玉米、小麦、大豆 3 种作物的研究提出四种新的植被指数, 其中 MTVI2 和 MCARI2 对叶面积指数有最好的估测效果^[8]。Price 等通过对玉米冠层和土壤辐射的交互作用研究得出, 在可见光和近红外范围内冠层和土壤光辐射可对叶面积指数进行估测^[9]。Shibayama 等利用多元回归方法分析了水稻多时相的可见光、近红外和中红外光谱与叶面积指数、干生物量以及产量的关系, 提出“红边”位置与叶面积指数高度相关, 同时提出用水稻冠层光谱的反射率之比 R840/R560、R1100/R840 来估测 LAI, R^2 达 0.71; 用 R1100-R1650、R1100-R1200、R840/R560、R1100/R840 估算地上生物量, R^2 达 0.93^[10, 11]。Casanova 等通过水稻多光谱植被指数 RVI、NDVI、PVI、WDVI 来估算生物量和 LAI, R^2 分别达 0.97 和 0.67^[12]。关于小麦的研究比较系统完善, 试验设置很广泛, 包括不同地点、品种、播期以及栽培方式等。Asrar 等研究了不同营养条件下小麦光谱反射率与 LAI 的关系^[13]; Hatfield 等研究了小麦不同生育时期通过光谱特性估测 LAI^[14]; Wiegand 等分析了不同地点小麦光谱数据^[15]。Aparieio 等研究了硬质小麦光谱植被指数与生长特性的关系^[16]。但是遥感技术用于烟草的研究很少见, 而烟草作为一种重要的经济作物, 在我国多个省份种植面积较大。而且烟草叶片宽大, 种植密度较小, 与水稻、小麦等禾本科窄叶密植作物有着很大的差异。Thomas 等曾研究了七种植物 (甜瓜、玉米、黄瓜、莴苣、高粱、棉花、烟草) 在不同氮素营养水平下的叶片光谱特性^[17], 但这仅仅是初步分析烟草叶片光谱表现, 并没有涉及不同类型、品种以及施肥状况下的烟草冠层光谱特性及其与生物参数的关系。

因此, 本试验综合多种处理条件, 在自然状态下观测烟草田间冠层光谱特性, 分析光谱特征参数与代表其生长状况和植被结构的典型指标 LAI、地上鲜干生物量的关系。筛选出既能采用高分辨率光谱仪测定, 又能采用 Landsat 卫星 TM 和 ETM+2、3、4 通道分析的光谱参数, 为利用航天遥感大面积、无破坏和及时获取烟草生长状态信息提供重要手段。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计

试验于 2005 年在浙江大学华家池校区农场 (北纬 34°14', 东经 120°10') 进行。试验地土壤是砂壤土, 土壤全氮为 0.95 g/kg, 速效氮为 148.5 mg/kg, 全磷 1.21 g/kg, 全钾 72.7 mg/kg, 有机质 9.56 g/kg, pH 值 6.71。试验设置为: (1) 不同烟草类型试验: 包括白肋烟、香料烟和烤烟 K326 三个类型, 肥料用量分别为白肋烟: N (180 kg/hm² 纯氮), P₂O₅ (135 kg/hm²), K₂O (360 kg/hm²), 香料烟: N (30 kg/hm² 纯氮), P₂O₅ (45 kg/hm²), K₂O (75 kg/hm²), 烤烟: N (45 kg/hm² 纯氮), P₂O₅ (90 kg/hm²), K₂O (135 kg/hm²)。 (2) 品种试验: 包括烤烟 K326、NC89、云烟 85、庆胜 2 号 4 个品种, 肥料用量均为 N (45 kg/hm² 纯氮), P₂O₅ (90 kg/hm²) 和 K₂O (135 kg/hm²)。 (3) 氮肥试验: 供试品种为烤烟 K326 和 NC89, 分别设 4 个氮肥施用水平, 分别是 N0 (不施氮), N1 (45 kg/hm² 纯氮), N2 (90 kg/hm² 纯氮), N3 (135 kg/hm² 纯氮) 并且每处理均施 P₂O₅ (90 kg/hm²) 和 K₂O (135 kg/hm²)。 (4) 钾肥试验: 供试品种为烤烟 NC89, 设 3 个钾肥施用水平, 分别为 K0 (不施钾), K1 (K₂O 135 kg/hm²), K2 (K₂O 270 kg/hm²) 并且每处理均施 N (90 kg/hm² 纯氮) 和 P₂O₅ (90 kg/hm²)。 (5) 磷肥试验: 供试品种为烤烟 NC89, 设 3 个磷肥施用水平, 分别为 P0 (不施磷), P1 (P₂O₅ 90 kg/hm²), P2 (P₂O₅ 180 kg/hm²) 并且每处理均施 N (90 kg/hm² 纯氮) 和 K₂O (135 kg/hm²)。以上试验中白肋烟和烤烟行距为 120 cm, 株距为 55 cm, 香料烟行距为 60 cm, 株距为 10 cm。5 月 11 日进行移栽, 氮肥、钾肥基肥和追肥各 50%, 磷肥全部

基施,其它按大田常规管理。

1.2 测试项目

1.2.1 冠层光谱数据采集

采用美国 ASD Field spec FR 2500 光谱仪,光谱范围 350 ~ 2500 nm,光谱分辨率在 350 ~ 1000 nm 区间为 1.4 nm,1000 ~ 2500nm 区间为 2nm。在烟草移栽后 35、55、75d 分别选择无病虫害的正常烟株为样本,每个处理选 3 株长势一致、能代表正常生长发育状况的烟株进行观测。选择晴朗无云无风天气,于 10:00 ~ 14:00 测定冠层光谱反射率。测量时,传感器探头垂直向下,距冠层顶垂直高度为 1m,光谱仪视场角选用 25°。每次测量前进行标准白板校正(标准白板反射率视为 1,所测目标物光谱是无量纲的相对反射率),在每株烟正上方测定 3 次,每次记录 5 组数据,最后以其平均值作为该样本的光谱反射值。

1.2.2 生物参数测定

(1)叶面积指数 (Leaf Area Index,简称 LAI): $LAI = \text{长} \times \text{宽} \times 0.6345^{[8]}$ 。

(2)地上鲜生物重 (Aboveground Fresh Weight,简称 AFW):取回后立刻称重。

(3)地上干生物重 (Aboveground Dry Weight,简称 ADW):105℃ 杀青 15min,60℃ 烘至恒重。

1.3 分析方法

1.3.1 光谱分析

(1)采用光谱归一化微分分析技术,对反射光谱进行一阶微分(差分),其近似计算方法如下^[9]:

$$R'(\lambda_i) = \frac{dR(\lambda_i)}{d\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中 λ_i 为波段 i 波长值, $R(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的光谱值, $\Delta\lambda$ 是相邻波长的间隔。从一阶微分光谱数值中提取的光谱变量主要包括:红边幅值 D_r 、红边位置 λ_r 、红边面积 SD_r 。红边幅值 D_r 为红边 (680 ~ 760 nm) 内最大的一阶微分值,红边位置 λ_r 为最大一阶微分值对应的波长,红边面积 SD_r 为红边范围内一阶微分值的总和。

(2)从原始光谱反射率中提取的光谱变量主要包括:绿峰幅值 R_g 是绿光范围内 (510 ~ 560nm) 最大的波段反射率,绿峰位置 λ_g 是绿峰对应的波长。红光吸收谷幅值 R_r 是 640 ~ 680nm 范围内最小的波段反射率,红吸收谷位置 λ_v 是红谷对应的波长。绿峰与红谷比值 R_g/R_r 和绿峰与红谷归一化值 $(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$ 。

(3)从原始光谱反射率中提取的主要植被指数包括:

$$\text{比值植被指数 (RVI)} \quad RVI = R_{NIR}/R_{Red} \quad (2)$$

$$\text{归一化植被指数 (NDVI)} \quad NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} \quad (3)$$

$$\text{垂直植被指数 (PVI)} \quad PVI = \sqrt{(0.355R_{NIR} - 0.149R_{Red})^2 + (0.355R_{NIR} - 0.852R_{Red})^2} \quad (4)$$

$$\text{差值植被指数 (DVI)} \quad DVI = R_{NIR} - R_{Red} \quad (5)$$

$$\text{土壤调整植被指数 (SAVI)} \quad SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red} + L} (1 + L) \quad (6)$$

$$\text{转换型土壤调整指数 (TSAVI)} \quad TSAVI = \frac{a(R_{NIR} - aR_{Red} - b)}{aR_{NIR} - R_{Red} - ab} \quad (7)$$

修改型二次土壤调整指数 (MSAVI2)

$$MSAVI2 = 0.5 \left[2(R_{NIR} + 1) - \sqrt{2(R_{NIR} + 1)^2 - 8(R_{NIR} - R_{Red})^2} \right] \quad (8)$$

$$\text{再归一化植被指数 (RDVI)} \quad RDVI = \sqrt{NDVI \times DVI} \quad (9)$$

式中 R 为光谱反射率, R_{red} 为红谷位置对应的波长, R_{NIR} 为近红外范围内第一个拐点对应的波长。 a 、 b 为土壤系数 $a = 10.489$ $b = 6.604$ L :调整系数 $L = 0.5$

1.3.2 数据分析

采用 EXCEL 进行基础数据输入,采用 SPSS11.5 分析软件进行相关和逐步回归分析,并进行差异显著性

检验。其中测试样本为 100 , 检验样本为 17。

2 结果与分析

2.1 烟草冠层反射特性

由于本试验涉及处理因素较多 , 文中不能把所有处理的各个生育时期烟草光谱反射曲线一一列出 , 因此仅选出不同烟草类型和烤烟 K326 旺长期不同氮素处理以及烤烟 K326 N1 处理不同生育时期的冠层光谱反射曲线由图 1 显示出来。从中可以看出 , 不同类型处理和不同氮用量处理的冠层反射光谱曲线均有一定差别。对不同类型而言 , 在绿光波段和近红外范围内 , 冠层反射率为白肋烟大于烤烟大于香料烟。这主要是由其生长特性决定的 , 白肋烟叶片浅绿、叶脉发白 , 而烤烟和香料烟叶片呈绿色 , 但香料烟种植密度较大 , 植株矮小 , 这就造成光谱仪视场范围内香料烟叶绿素含量高 , 从而绿光范围内反射率白肋烟大于烤烟大于香料烟。而近红外范围内冠层反射率变化主要受烟草冠层结构和叶片反射特性影响 , 随施氮量的增加烟草生物量和叶面积增加 , 从而增强散射返回的概率。而且含氮量高的叶细胞大而且间隙也大 , 细胞壁水化度也高 , 对近红外光反射亦强 , 从而两方面共同作用表现出近红外波段的反射率增加。白肋烟施氮量最大所以其近红外区域反射率亦最大。对不同氮用量处理而言 , 在可见光范围内 , 冠层反射率随施氮量的增加而降低 , 尤其在绿光波段最为明显。这主要是由于随施氮量增加 , 叶片叶绿素含量增加造成的。在近红外范围内 , 冠层光谱反射率随施氮量的增加而增加 , 这亦主要与冠层叶片组织结构的差异有关。随着生育时期的后移 , 冠层光谱反射率在可见光范围内逐渐增加 , 而近红外范围内逐渐降低。这亦是叶绿素含量变化和叶片、冠层结构改变造成的。

2.2 烟草冠层光谱参数与叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重的相关性

分析表 1、表 2 可以看出 , 与叶面积指数相关性强的光谱参数最多 , 其次是地上干生物重 , 最后是地上鲜生物重。与叶面积指数相关达到极显著水平的变量有 : R_g/R_r 、 $(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$, 达到显著水平的有 : R_r 、 RVI 、 $NDVI$ 、 $TSAVI$ 。与地上干生物重相关达到极显著水平的变量有 : R_g/R_r , 达到显著水平的有 : $(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$ 、 RVI 。与地上鲜生物重相关达到极显著水平的变量有 : R_g/R_r , 达到显著水平的有 : $(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$ 。其中 R_g/R_r 与 3 种生物参数的相关性均达到极显著水平且相关系数均为最大。综上所述 , 通过分析多种光谱参数与叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重的关系可见 R_g/R_r 和 $(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$ 是与其关系较密切的两个变量。

通过图 2 进一步分析 R_g/R_r 与烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重的关系可以得出 R_g/R_r 与

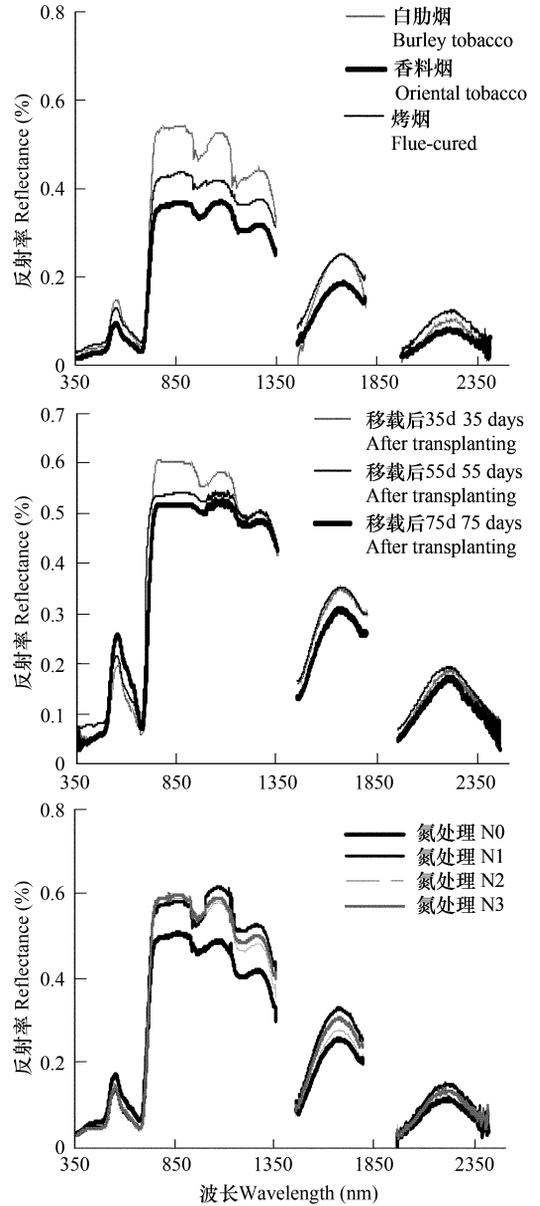


图 1 不同类型烟草和烤烟 K326 不同施氮处理、不同生育时期冠层光谱反射率

Fig. 1 Canopy spectral reflectance of different type tobaccos , flue-cured tobacco K326 in different N treatments and growth periods

3 种生物参数都呈较明显的线性关系, 线性方程的确定系数 R^2 分别达到 0.576、0.3727、0.4184, 均达到极显著水平。

表 1 烟草冠层光谱变量与 LAI、AFW、ADW 的相关性

Table 1 The correlation between tobacco canopy spectral variables and LAI, AFW, ADW

项目 Item		λ_r	D_r	SD_r	λ_g	R_g	λ_v	R_r	R_g/R_r	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$
叶面积指数 LAI	相关系数 Correlation coefficient	0.231	-0.13	-0.025	-	-0.191	-0.05	-0.575 *	0.759 **	0.71 **
	显著性 Sig.	0.372	0.62	0.925	-	0.463	0.85	0.016	0	0.001
地上鲜生物重 AFW	相关系数 Correlation coefficient	0.412	0.231	0.32	-	0.216	0.067	-0.205	0.611 **	0.548 *
	显著性 Sig.	0.1	0.373	0.21	-	0.405	0.797	0.431	0.009	0.023
地上干生物重 ADW	相关系数 Correlation coefficient	0.381	0.194	0.289	-	0.119	0.038	-0.297	0.647 **	0.588 *
	显著性 Sig.	0.131	0.456	0.26	-	0.649	0.884	0.247	0.005	0.013

* * 显著水平 Significant ($p \leq 0.01$) * 显著水平 Significant ($p \leq 0.05$)

表 2 烟草植被指数与 LAI、AFW、ADW 的相关性

Table 2 The correlation between vegetation indexes and LAI, AFW, ADW

项目 Item		RVI	$NDVI$	DVI	PVI	$SAVI$	$TSAVI$	$MSAVI2$	$RDVI$
叶面积指数 LAI	相关系数 Correlation coefficient	0.572 *	0.525 *	-0.013	-0.056	0.092	-0.57 *	0.019	0.088
	显著性 Sig.	0.017	0.03	0.96	0.831	0.726	0.017	0.943	0.738
地上鲜生物重 AFW	相关系数 Correlation coefficient	0.451	0.39	0.329	0.307	0.399	-0.191	0.354	0.383
	显著性 Sig.	0.069	0.122	0.198	0.231	0.113	0.463	0.163	0.129
地上干生物重 ADW	相关系数 Correlation coefficient	0.519 *	0.456	0.301	0.272	0.381	-0.283	0.329	0.367
	显著性 Sig.	0.033	0.066	0.241	0.29	0.132	0.271	0.198	0.147

* 显著水平 Significant ($p \leq 0.05$)

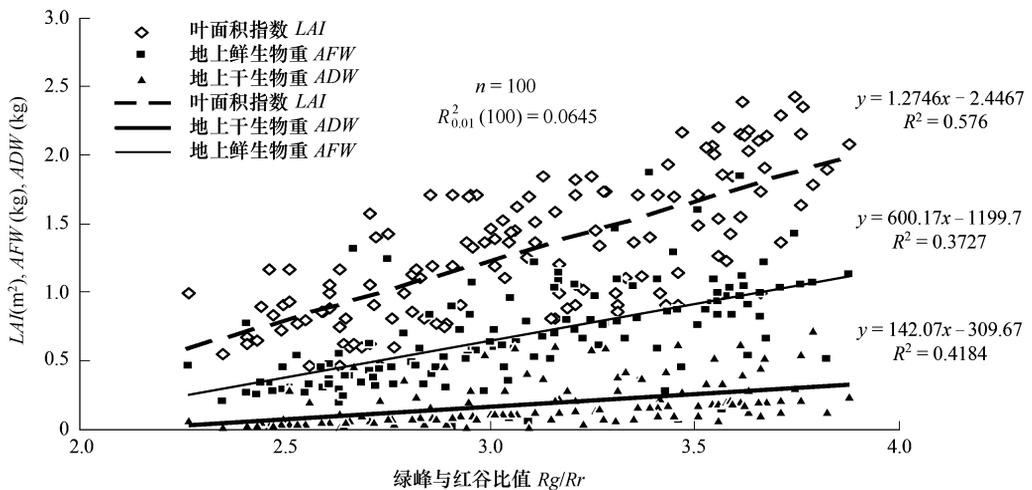


图 2 烟草光谱变量 R_g/R_r 与 LAI、AFW、ADW 散点分布图

Fig.2 Scatter map of LAI, AFW, ADW to tobacco canopy spectral variable R_g/R_r

2.3 烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重逐步回归方程的建立

通过建立逐步回归方程筛选与烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重关系最密切的光谱变量是找出其特征变量的直接有效方法。通过表 3 可以看出,以 17 种光谱参数为自变量建立的叶面积指数回归方程的复确定系数 R^2 为 0.777,达到极显著水平,筛选出的自变量分别为 R_g/R_r 、 λ_r 、 R_g ,其回归系数的显著性检验均达到显著水平。建立的地上鲜生物重回归方程的复确定系数 R^2 为 0.620,达到极显著水平,筛选出的自变量分别为 R_g/R_r 、 λ_r ,其回归系数的显著性检验均达到显著水平。建立的地上干生物重回归方程的复确定系数 R^2 为 0.640,达到显著水平,筛选出的自变量分别为 R_g/R_r 、 λ_r ,其回归系数的显著性检验均达到显著水平。通过 (10) (11) (12) 3 个回归方程筛选出的第一自变量均为 R_g/R_r ,其它的自变量与相关性分析的结论有一定差别(表 3)。说明 λ_r 和 R_g 在逐步回归过程中受其它变量影响较大,通过逐个去除其它变量影响后,它们与依变量有一定关系,可结合 R_g/R_r 共同对相应的生物参数进行估测,但相关分析结果说明其与依变量没有明显的线性关系,所以它们不能单独用来估测 3 种生物参数。通过以全部光谱参数为自变量逐步回归方程分析,多个植被指数没有被筛选出来,说明与以上变量相比它们对烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重的敏感性不是很强。因此, R_g/R_r 可被确定为烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重的特征变量。

表 3 以 17 种光谱参数为自变量的逐步回归方程

Table 3 The stepwise regression equations by all of 17 spectral parameters

因变量 Dependent	回归方程 Regression equation	自变量 Independent	自变量名称 The name of independent	回归系数相伴概率 Regression coefficient Sig.	复确定系数 R^2	
叶面积指数 LAI	$\hat{y} = -3554501 + 13442.177x_1 + 4936.363x_2 - 101298.1x_3$	(10)	x_1	R_g/R_r	0.000	0.777 **
			x_2	λ_r	0.006	
			x_3	R_g	0.04	
地上鲜生物重 AFW	$\hat{y} = -224889.2 + 655.4033x_1 + 311.4944x_2$	(11)	x_1	R_g/R_r	0.001	0.620 **
			x_2	λ_r	0.009	
地上干生物重 ADW	$\hat{y} = -47624.01 + 155.8701x_1 + 65.8866x_2$	(12)	x_1	R_g/R_r	0.000	0.640 *
			x_2	λ_r	0.011	

** 显著水平 Significant ($p \leq 0.01$) * 显著水平 Significant ($p \leq 0.05$)

表 4 以 8 种植被指数为自变量的逐步回归方程

Table 4 The stepwise regression equations by 8 vegetation indexes

因变量 Dependent	回归方程 Regression equation	自变量 Independent	自变量名称 The name of independent	回归系数相伴概率 Regression coefficient Sig.	复确定系数 R^2	
叶面积指数 LAI	$\hat{y} = -6589.093 + 1598.884x_1$	(13)	x_1	RVI	0.016	0.327 *
地上鲜生物重 AFW	—	—	—	—	—	—
地上干生物重 ADW	$\hat{y} = -123.265 + 18.971x_1$	(14)	x_1	RVI	0.032	0.269 *

** 显著水平 Significant ($p \leq 0.05$)

通过分析表 4 中的仅以 8 种植被指数为自变量的逐步回归方程可以看出,对叶面积指数和地上干生物重可以建立回归方程,对地上鲜生物重无法建立回归方程。叶面积指数回归方程 (13) 的复确定系数 R^2 为 0.327,地上干生物重回归方程 (14) 的复确定系数 R^2 为 0.269,均达到显著水平,且回归系数的显著性检验亦达到显著水平,方程 (13) (14) 筛选出的变量均为 RVI ,与前人研究结果一致^[20]。说明 RVI 是可以用来模拟

和估测烟草叶面积指数和地上干生物重的,只是效果不如采用 R_g/R_r 好,但不能使用植被指数模拟和估测地上鲜生物重。

2.4 烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重逐步回归方程的检验

图 3 和表 5 中估测值 LAI_1 、 AFW_1 、 ADW_1 是由方程 (10) (11) (12) 计算的估测值,估测值 LAI_2 、 ADW_2 是由方程 (13) (14) 计算的估测值。通过观察图 3 可以看出多数样本的估测值 LAI_1 、 ADW_1 与估测值 LAI_2 、 ADW_2 相比与实测值 LAI 、 ADW 更为接近,直观的表现出方程 (10) (12) 估测效果较方程 (13) (14) 好。由于检测样本是随机挑选,所以样本间并没有可比性。通过分析实测值和估测值的相关性如表 5 所示,结果表明,估测值 LAI_1 、 AFW_1 、 ADW_1 与实测值 LAI 、 AFW 、 ADW 相关性均达到极显著水平,估测值 LAI_2 、 ADW_2 与实测值 LAI 、 ADW 的相关性亦达到显著水平。这与以上分析是一致的,证明了采用以上回归模型估测烟草叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重均是可行的,只是相比而言,估测效果有所不同,可以根据数据情况择优而用。

3 结论与讨论

叶面积指数、地上生物量是反映烟草光合作用及代谢状况的重要指标,与最终产量和品质关系密切。烟草类型和品种直接决定其固有的性状,而氮、磷、钾肥则对烟草形态建成起重要作用。Aparicio 等研究表明小麦叶面积指数不受品种、栽培措施及栽培区域的影响^[21],但是对烟草的研究尚未见到。因此,本试验通过选用多种类型、品种的供试材料、构建不同施肥水平,形成丰富的田间个体形态和群体结构,使研究更具系统性和可信度。

前人对于水稻、小麦等禾本科作物的研究较多,也筛选出很多有价值的遥感特征变量,建立了一系列统计和光学模型^[22-23]。但是,本研究结果表明,就统计定量方法而言,前人报道的与多种植被和作物叶面积指数、地上生物重关系密切的植被指数可以对烟草叶面积指数、地上干生物重进行估测,但估测效果不如以 R_g/R_r 为主的光谱变量构建的回归模型,而且植被指数不能对地上鲜生物重进行估测。本试验通过多种统计方法筛选出的叶面积指数、地上鲜生物重、地上干生物重特征变量均为 R_g/R_r 。 R_g/R_r 不仅与 LAI 、 AFW 、 ADW 均呈线性相关,相关系数均达到极显著水平,以 R_g/R_r 为第一自变量的逐步回归方程估测效果亦好,而且 R_g/R_r 既可通过高光谱遥感数据获得,也可以通过 Landsat 卫星 TM 和 ETM+ 相应通道获得,为采用多种遥感手段分析烟草生物特性提供新的参数。此外,对多种植被指数作以分析,其中 RVI 对烟草叶面积指数和地上干生物重的估测也是可行的,为采用传统宽波段遥感对烟草长势监测提供科学依据。通过检验样本对回归模型进行检验,模拟效果较好,回归模型的估测值与实测值的相关系数均达到显著水平。本文在数据处理过程中把不同

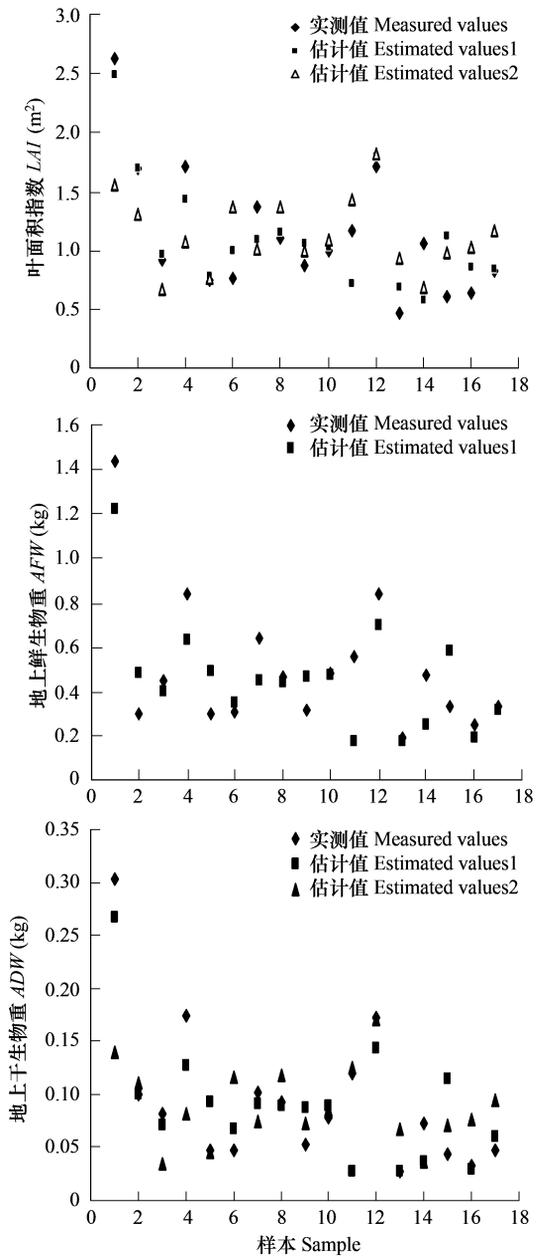


图 3 LAI 、 AFW 、 ADW 实测值和估测值示意图

Fig. 3 The scatter map of the measured and estimated values of LAI 、 AFW 、 ADW

类型、品种、肥料和生育时期的光谱变量、生物参数进行综合分析,既扩充了样本数保证了统计分析的准确性,又增加了模型和特征变量的普适性。对于各种处理在不同生育时期对光谱变量和生物参数关系的影响,本文篇幅有限不作详细阐述。

表5 LAI、AFW、ADW 实测值和估测值相关性

Table 5 The correlation between the measured and estimated values of LAI, AFW, ADW

		估测叶 面积指数 1 Estimated LAI1	估测叶 面积指数 2 Estimated LAI2	估测地上 鲜生物重 1 Estimated AFW1	估测地上 干生物重 1 Estimated ADW1	估测地上 干生物重 2 Estimated ADW2
实测叶面积指数 Measured LAI	相关系数 Correlation coefficient	0.882 **	0.572 *	—	—	—
	显著性 Sig.	0.000	0.017	—	—	—
	样本数 Sample number	17	17	—	—	—
实测地上鲜生物重 Measured AFW	相关系数 Correlation coefficient	—	—	0.829 **	—	—
	显著性 Sig.	—	—	0.000	—	—
	样本数 Sample number	—	—	17	—	—
实测地上干生物重 Measured ADW	相关系数 Correlation coefficient	—	—	—	0.837 **	0.574 *
	显著性 Sig.	—	—	—	0.000	0.016
	样本数 Sample number	—	—	—	17	17

* * 显著水平 Significant ($p \leq 0.01$) * 显著水平 Significant ($p \leq 0.05$)

由于本文光谱数据是通过地面高光谱仪测定得到的,虽然其包含的光谱信息可与多种卫星通道相对应,但与受多种因素影响的卫星数据相比还有一定差别,因此,本试验筛选的特征变量及构建的估测模型还有待航天数据的进一步检验与校正。

References :

- [1] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sens. Environ.*, 1996, 55: 153—162.
- [2] Wiegand C L, Richardson A J, Kanemasu, et al. Leaf area estimates for wheat from Landsat and their implications for evapotranspiration and crop modeling. *Agron. J.*, 1979, 71: 336—342.
- [3] Pu R L, Gong P. *Hyper Spectral Remote Sensing and its Applications*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [4] Kimes D S, Markham B L, Tucker C J, et al. Temporal relationships between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. *Remote Sens. Environ.*, 1981, 11: 401—411.
- [5] Ahlrichs J S, Bauer M E. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. *Agron. J.*, 1983, 75: 987—993.
- [6] Hatfield J L, Kanemasu E T, Jackson R D, et al. Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Ag Ristars Tech.*, 1982, 19.
- [7] Hu B X, Qian S E, Haboudane D, et al. Retrieval of crop chlorophyll content and leaf area index from decompressed hyperspectral data: the effects of data compression. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 92: 139—152.
- [8] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, et al. Hyperspectral vegetation indices and algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 90: 337—352.
- [9] Price J C and Bausch W C. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 52: 55—65.
- [10] Shibayama M and Akiyama T. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass. *Remote Sens. Environ.*, 1989, 27: 119—127.
- [11] Shibayama M, Akiyama T. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 1991, 36: 45—53.
- [12] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research.*, 1998, 55: 83—92.

- [13] Asrar G , Kanemasu E T , Yoshida M. Estimation of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angles. *Remote Sens. Environ.* ,1985 ,17 :1—11.
- [14] Hatfield J L , Kanemasu E T , G. Asrar RD , *et al.* Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *International Journal of Remote Sensing.* ,1985 :167—175.
- [15] Wiegand C L , Maas S J. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sens. Environ.* ,1992. 42 :1—21.
- [16] Aparicio N , Villegas D , Araus J L , *et al.* Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in Durum wheat. *Agronomy Journal* , 2002 :1547—1555.
- [17] Thomas I L , *et al.* A review of multi-channel indices of class separability. *Int. J. Remote Sensing* ,1987 ,18 (3) :331—350.
- [18] Liu G S. Tobacco Cultivation. Beijing :China Agricultural Press 2003. 38—39.
- [19] Tsai F , Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data. *Remote Sens. Environ.* ,1998 ,66 :41—51.
- [20] Li K L , Jiang J J , Mao R Z , *et al.* The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing. *Acta Ecologica Sinica.* ,2005 , 25 (6) :1493—1496.
- [21] Aparicio N D , Villegas J L , Araus J C , *et al.* Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in Durum wheat. *Agronomy Journal* ,2002 :1547—1555.
- [22] Broge N H and Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens. Environ.* ,2002 :81 :45—57.
- [23] Casanova D , Epema G F , Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research.* ,1998 , 55 :83—92.

参考文献：

- [3] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社 2000.
- [18] 刘国顺. 烟草栽培学. 北京: 中国农业出版社 2003. 38~39.
- [20] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等. 植被叶面积指数遥感监测模型. *生态学报* 2005 , 25 (6) :1493~1496.