

棉花叶面积指数和地上干物质积累量的高光谱估算模型研究

马勤建, 王登伟*, 黄春燕, 袁杰, 陈燕, 赵鹏举

(石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要:用 ASD FieldSpec 光谱仪实测棉花冠层不同生育时期的高光谱数据, 同期获取棉花叶面积指数(LAI)和地上干物质积累量(Above-ground Dry Matter Accumulation, ADMA)。分析棉花冠层反射光谱与棉花 LAI、地上干物质积累量(ADMA)的相关关系, 分析结果表明, 反射光谱数据与棉花 LAI、ADMA 的相关系数的最高值分别发生在 783 nm($r=0.6391^{**}$)和 766 nm 处($r=0.6287^{**}$); 对反射光谱数据进行统计分析, 建立了基于比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)的 5 种函数形式的棉花 LAI、ADMA 估测模型。经检验, 基于 RVI 的估测模型具有较高的精度; 对一阶微分光谱数据与棉花 LAI 和 ADMA 的逐步回归相关分析表明, 敏感波段分别发生在 736 nm($r=0.6769^{**}$)和 742 nm 处($r=0.6847^{**}$)。由 736 nm、742 nm 波段处的微分数值建立的 LAI 和 ADMA 线性回归估测模型, R 值均达到了 1% 极显著的检验水平, 说明一阶微分光谱敏感波段的数值, 对棉花 LAI 和 ADMA 具有一定的估算能力。

关键词:棉花; 高光谱; 植被指数; 叶面积指数; 地上干物质积累量

中图分类号: S562.01 **文献标识码:** A

文章编号: 1002-7807(2008)03-0217-06

Hyperspectral Estimating Modelings of Cotton LAI and the Above-ground Dry Matter Accumulation

MA Qin-jian, WANG Deng-wei*, HUANG Chun-yan, YUAN Jie, CHEN Yan, ZHAO Peng-ju
(Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shi he-zi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Hyperspectral data of cotton canopy were measured with ASD FieldSpec during different growth stages, and simultaneously, leaf area index(LAI), above-ground dry biomass accumulation(ADMA) were acquired. The correlations between the reflective spectra data and cotton canopy LAI, ADMA were analyzed, respectively. The result indicated that the maximum correlation coefficients between reflective spectra data and LAI, ADMA of cotton were occurred at wavelength 783 nm($r=0.6391^{**}$) and 766 nm($r=0.6287^{**}$), respectively. Reflective spectra data were statistically analyzed to establish five function modelings of LAI, ADMA of cotton, based on ratio vegetation index(RVI), and normalized difference vegetation index(NDVI). The RVI modeling has a higher precision. According to correlation analysis between the first derivative spectra data and LAI, ADMA of cotton, the sensitivity wavelength has take placed at 736 nm($r=0.6769^{**}$) and 742 nm($r=0.6847^{**}$), respectively. Using derivative spectra value of wavelength 736 nm and 742 nm to establish the linear regression modelings of LAI and ADMA, all reached 1% significant level. It showed that value of sensitivity wavelength of the first derivative spectra has certain estimating capacity for LAI and ADMA of cotton.

Key words: cotton; hyperspectral; vegetation index; leaf area index; above-ground dry matter accumulation

利用植被指数对 LAI、地上干物质积累量等建立相关关系, Choudhury^[1]等已做了大量的工作, 使植被指数不仅可用于监测作物水、肥、生化组分等信息, 而且还可直接或间接估算植被的 LAI 和生物量等参数, 定量指示植被的生长状况, 反映植被冠层状态的信息。由于作物的 LAI 和生物量是作物产量的基础, 并且两者之间有着密切的关系, 因此通过植被指数估算农作物的 LAI 和干物质积累量等指标, 可以定性和定量评价作物的生长和产量状况。

Gupter 等^[2]提出用 729 nm 波段处 RVI 估计小麦 LAI; 杨敏华^[3]等采用归一化植被指数 (NDVI (800, 670)) 非线性 (对数) 统计模型对小麦 LAI 进行了监测; 张良培等^[4]利用归一化差值植被指数 (NDVI) 估算了鄱阳湖地区的鲜、干生物量; 肖向明等^[5]用 TM 数据对锡林河流域进行植被覆盖度类型的研究和对草场地上生物量的遥感估测, 并指出植被指数与草场生物量有很强的相关性; 王渊^[6]用油菜的各组分生物量 (叶、茎干重和荚果干重) 分别与 RVI、NDVI 建立了回归模型; 傅玮东等^[7]研究认为 RVI、NDVI 和冬小麦生物量呈指数相关关系。本文通过高光谱不同波段组合的比值指数和归一化差值植被指数预测棉花 LAI 和 ADMA 参量, 同时建立了基于微分光谱数据的棉花 LAI 及 ADMA 线性回归模型, 以期为高光谱数据应用于棉花生长和产量监测提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地情况

试验于 2005—2006 年在石河子大学农学院田间试验站 (北纬 44°22', 东经 86°03') 进行。试验地土壤肥力中等, 含有机质 1.29%、碱解氮 33.8 mg·kg⁻¹、速效磷 84 mg·kg⁻¹、速效钾 300 mg·kg⁻¹, 前茬为棉花。供试品种为新陆早 13 号和新陆早 19 号。设 4 种配置种植方式, 分别为大三膜 (30 cm+60 cm)、小三膜 (20 cm+40 cm)、等行距 (30 cm+30 cm)、机采棉 (10 cm+66 cm)。覆膜点播, 膜下滴灌, 全生育期足量灌溉 3500 m³·hm⁻², 化控 4 次。4 月 20 播种, 7 月 15 日打顶。大田常规管理。

1.2 光谱数据采集

采用美国 ASD Fieldspec FR 2500 型便携式高光谱仪, 光谱测定范围 350~2500 nm, 光谱区的分辨率 350~1000 nm 为 3 nm, 1000~2500 nm

为 10 nm。选择长势均匀无病虫害危害的棉株为样点, 在无风无云晴日上午 11:30~14:00 之间对棉花冠层进行光谱测试。设定视场角 (FOV) 25°。测量前经参考板 (白板) 标定, 群体测定时探测器探头头部垂直向下距棉花冠层顶部约 1 m, 每样点测定 20 条曲线, 光谱扫描时间设定为 0.2 s, 对棉花各关键时期 (现蕾期 6 月 26 日, 初花期 7 月 10 日, 花铃期 7 月 28 日, 盛铃期 8 月 13 日, 吐絮期 8 月 28 日) 进行 5 次光谱测定。

1.3 农学参数测定

1.3.1 棉花叶面积的测定。采用美国 CID 公司生产的 CI-110 数字式冠层结构分析仪测定, 测定时间选择在北京时间 20:00~22:00, 在田间将安装有鱼眼探测头的观测棒定点在行间中央, 调好水平, 并从计算机显示屏上观察无人影等其他外界影响时开始拍照。每处理测定 4 个点 (分宽、窄行), 通过计算机图像数字化处理专用软件分析后, 采集到冠层叶面积。

1.3.2 棉花干物质积累量的测定。对应高光谱测试后的样点, 实地取样, 于室内将样本棉株子叶节以上的茎、叶、生殖器官分离, 称鲜重。然后置于 105℃ 烘箱中杀青 30 min, 再调至 85℃ 恒温烘干, 24 h 后称重, 前后两次重量差 ≤ 5%, 不再烘烤, 称取干重。

1.4 光谱数据处理方法与模型的建立

1.4.1 光谱微分技术。对反射光谱进行一阶微分 (差分) 值的计算, 其公式为:

$$R'(\lambda_i) = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda \quad (1)$$

式中: λ_i 为各波段波长; $R'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分光谱。 $\Delta\lambda$ 是波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的间隔。

1.4.2 单变量线性与非线性预测模型。本研究确立 5 种单变量线性与非线性预测模型。包括: 简单线性函数 $y=a+bx$; 幂函数 $y=ax^b$; 指数函数 $y=a \times \exp(b/x)$; 对数函数 $y=a+b \times \ln(x)$; 双曲线函数 $y=1/(a+b/x)$ 。式中 y 代表棉花 LAI 和 ADMA, x 代表高光谱植被指数, a 和 b 为常数。研究目的是从上述模型中选择高光谱数据与棉花 LAI 及 ADMA 之间的最优回归模型。

2 结果与分析

2.1 棉花反射光谱数据与棉花 LAI 和 ADMA 参量的相关性分析

通过对棉花 LAI、ADMA 与棉花冠层光谱反射数据进行多元统计分析, 得到棉花反射光谱

(350~1550 nm)与棉花 LAI、ADMA 的相关系数曲线。由图 1a 和 1b 可知,从红光区到近红外的 750~1 350 nm 的波段范围内,相关系数达到了极显著的水平($\alpha=1\%$, $n=16$)。由图 1a 可知,相关系数的高平台区为近红外的 780~1 346 nm 波段,此波段范围内在 783 nm、925 nm 和 1 123 nm 波段处分别出现了 3 个峰值,这三个波段的相关系数几乎相等。其中在 783 nm 处达到最大值为($r=0.6394^{**}$),红光区 650~750 nm 波段,负相

关系数的极值发生在 713 nm 处($r=-0.2497^*$)。由图 1b 可知,相关系数的高平台区为近红外的 761~1 348 nm 波段,此波段范围内在 766 nm、942 nm 和 1 124 nm 波段处分别出现了 3 个峰值,这三个波段的相关系数几乎相等,其中在 766 nm 处达到最大值为($r=0.6287^{**}$),红光区 640~740 nm 波段,负相关系数的极值发生在 705 nm 波段处($r=-0.2334^*$)。

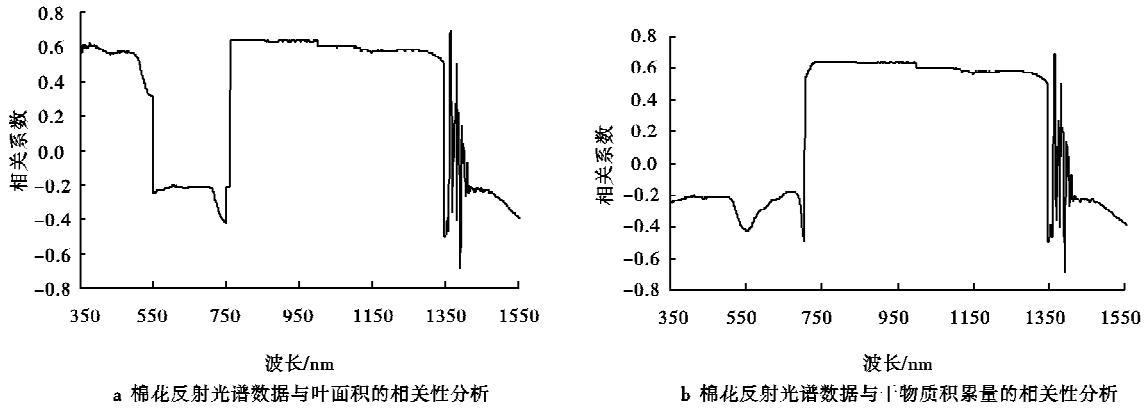


图 1 棉花反射光谱数据与 LAI、ADMA 的相关分析

Fig. 1 Correlation analysis between reflectance and LAI and ADMA of cotton canopy

2.2 棉花 LAI 与 ADMA 参量的高光谱估算模型

NDVI 和 RVI 都是常用来估算植被(包括农作物)LAI 的有效的遥感模型。一般而言,植被指数的构建都采用近红外波段(NIR)与红光波段(R)进行一些数字运算来提高目标地物的可识别性,同时降低背景地物的噪声。大量研究论证了植被指数与 LAI 及生物量之间的关系,多数将植被指数与生物量关系表述成线性相关或指数相关^[7-8]。本研究用高光谱 RVI 和 NDVI 来估算棉花 LAI 和 ADMA。

RVI 的表达式为:

$$RVI = R_{NIR} / R_R \quad (2)$$

公式中,定义 R_{NIR} 为近红外光谱数据与棉花 LAI 相关性最大值波段的反射率。由图 1a 可知,783 nm、925 nm 和 1 123 nm 波段的 R_{783} 、 R_{925} 、 R_{1123} 均可作为 R_{NIR} 入选。对比相关研究,刘伟东等^[9]认为 750 nm 附近的光谱数据与水稻的 LAI 相关性较高;宋开山等^[10]认为 760 nm 附近的光谱数据与大豆 LAI 有较高的相关性。本研究中 783 nm 与上述两个特征波段最为接近,因此可用 R_{783} 和 R_{713} 分别指示 R_{NIR} 和 R_R 。

RVI 被重新定义为:

$$RVI = R_{783} / R_{713} \quad (3)$$

由图 1b 可知,766 nm、942 nm 和 1 124 nm 波段的 R_{766} 、 R_{942} 和 R_{1124} 均可作 R_{NIR} 入选。对比相关研究,吴长山等^[11]确立了反射光谱 765 nm 是水稻、玉米叶绿素密度的特征波段;黄春燕等^[12]确立了 761 nm 波段处的光谱反射数据与棉花 ADMA 的相关性较高。本研究中 766 nm 与上述特征波段最为接近。因此可用 R_{766} 和 R_{705} 分别指示 R_{NIR} 和 R_R 。

RVI 被重新定义为:

$$RVI = R_{766} / R_{705} \quad (4)$$

归一化植被指数(NDVI)的应用最为广泛,NDVI 是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示参数,与 LAI、绿色生物量等植被参数相关。

NDVI 可表达为(图 1a 所得):

$$NDVI = (R_{783} - R_{713}) / (R_{783} + R_{713}) \quad (5)$$

R_{783} 是近红外 783 nm 波段的反射率, R_{713} 是红光区 713 nm 的反射率。

NDVI 可表达为(图 1b 所得):

$$NDVI = (R_{766} - R_{705}) / (R_{766} + R_{705}) \quad (6)$$

R_{766} 是近红外 766 nm 波段的反射率, R_{705} 是红光区 705 nm 的反射率。

分别以 RVI、NDVI 为自变量,LAI 及单位面积 ADMA($kg \cdot m^{-2}$)为因变量,建立 LAI 及 AD-

MA 的 5 种估算模型方程(表 1)。表 1 中 5 个单变量线性与非线性的 LAI 及 ADMA 估测模型的相关系数和均方根误差,可以反映模型的估测精度。基于 RVI 和 NDVI 建立的估测模型,均达到了极显著的水平($\alpha = 1\%$, $n = 16$)。相对基于 NDVI 建立的估测模型,RVI 构建的 LAI 和 AD-

MA 模型的预测精度较高。其中采用对数函数、指数函数和幂函数模型优于线性函数、双曲线函数模型。相关文献表明,植被指数与棉花 LAI 及生物量之间存在对数函数关系^[7]。本研究结果表明,RVI 和 NDVI 与棉花 LAI、ADMA 之间同样存在着这种函数关系。

表 1 基于 RVI 和 NDVI 的棉花 LAI 及 ADMA 的估算模型

Table 1 Estimating modeling of cotton LAI and ADMA based on RVI and NDVI

方程类型	模型方程	植被指数	拟合方程	相关系数	均方根误差
1 简单线性函数 $y=a+bx$		RVI _(783,713)	LAI=0.3884+0.0673x	0.8161**	0.2843
		RVI _(766,705)	ADMA=73.642+13.064x	0.7149**	0.3556
		NDVI _(783,713)	LAI=-1.7911+3.574x	0.8037**	0.2946
		NDVI _(766,705)	ADMA=-1.011+246.33x	0.7004**	0.3744
2 幂函数 $y=ax^b$		RVI _(783,713)	LAI=0.3213x ^{0.5268}	0.8488**	0.2542
		RVI _(766,705)	ADMA=60.89x ^{0.5943}	0.7942**	0.2419
		NDVI _(783,713)	LAI=1.9813x ^{2.9106}	0.8092**	0.2435
		NDVI _(766,705)	ADMA=243.54x ^{0.9804}	0.7578**	0.2648
3 指数函数 $y=a \times \exp(b/x)$		RVI _(783,713)	LAI=0.5229 $\times \exp(-0.0678/x)$	0.8344**	0.2217
		RVI _(766,705)	ADMA=106.13 $\times \exp(-0.1632/x)$	0.7433**	0.2877
		NDVI _(783,713)	LAI=0.0472 $\times \exp(-3.8443/x)$	0.8229**	0.2748
		NDVI _(766,705)	ADMA=65.307 $\times \exp(-0.3646/x)$	0.7374**	0.3437
4 对数函数 $y=a+b \times \ln(x)$		RVI _(783,713)	LAI=-0.0645+0.5092ln(x)	0.8731**	0.2214
		RVI _(766,705)	ADMA=108.26-36.048ln(x)	0.7943**	0.2534
		NDVI _(783,713)	LAI=1.6813+2.702ln(x)	0.851**	0.2449
		NDVI _(766,705)	ADMA=236.43+176.35ln(x)	0.7642**	0.3358
5 双曲线函数 $y=1/(a+b/x)$		RVI _(783,713)	LAI=1/(0.0472+0.0087/x)	0.8593**	0.2373
		RVI _(766,705)	ADMA=1/(2.1137+0.1235/x)	0.7274**	0.3488
		NDVI _(783,713)	LAI=1/(0.0467+0.0084/x)	0.8342**	0.2546
		NDVI _(766,705)	ADMA=1/(1.9948+0.1317/x)	0.7029**	0.3639

注:n=16

2.3 一阶微分光谱数据与棉花 LAI 和 ADMA 参量的相关分析

光谱微分技术对光谱信噪比比较敏感,用一阶微分处理去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对植被指数(必须为非线性)的影响^[13]。微分光谱能较好地获取植被的信息,监测冠层的生长状况^[14]。刘伟东等^[9]对水稻的研究表明,光谱微分技术能改善光谱数据与 CH. D 的相关性。国内学者吴长山^[11]指出在 720~770 nm 波段水稻、玉米的导数光谱与 CH. D 之间有较高的相关拟和度,在 762 nm 处的一阶微分值与夏玉米 CH. D 的线性模型估计精度达 80.6%;黄春燕等^[12]确立了 748 nm 处的一阶微分光谱与棉花

ADMA 的相关性比较好;谭昌伟等^[15]用 738 nm 处一阶微分光谱值与夏玉米 CH. D 建立指数回归模型最佳。对 16 个棉花测试样本的反射光谱进行求导,用它们一阶微分光谱数据与 LAI、ADMA 进行逐步回归分析,由图 2a 可知,棉花一阶微分光谱数据与 LAI 在 736 nm 波段的相关系数最高($r=0.6769^{**}$),高于反射光谱数据与 LAI 的 783 nm 波段的相关系数($r=0.6394^{**}$)。由图 2b 可知,棉花一阶微分光谱与 ADMA 在 742 nm 波段的相关性系数最高($r=0.6847^{**}$),高于反射光谱数据与 ADMA 在 766 nm 波段的相关系数($r=0.6287^{**}$),微分光谱去除了土壤背景、大气散射和吸收等对植被光谱的影响^[9,11],提高

了光谱数据与棉花 LAI 及 ADMA 的相关性,使

模型的精度获得提高。

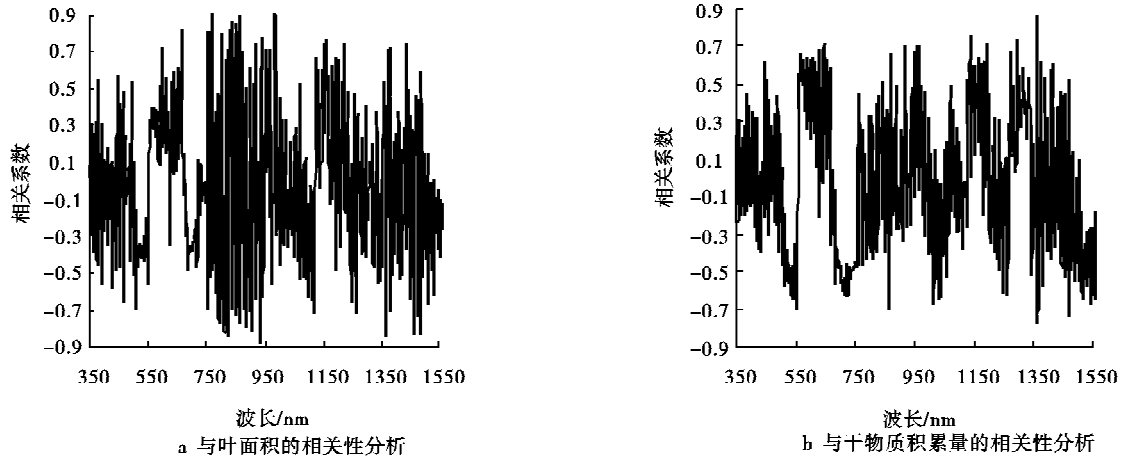


图 2 一阶微分光谱数据与 LAI 及 ADMA 相关分析

Fig. 2 Correlation analysis between the first derivative Spectra data and LAI, ADMA of cotton canopy

分别选取 736 nm 和 742 nm 波段微分光谱数据与棉花 LAI、ADMA 建立线性相关关系,函数公式分别为:

$$LAI = A_0 + B_0 \times R'(\lambda) \quad (7)$$

$$ADMA = A_1 + B_1 \times R'1(\lambda) \quad (8)$$

(7)和(8)式中 A_0 、 B_0 、 A_1 、 B_1 为特定参数,

$R'(\lambda)$ 、 $R'1(\lambda)$ 分别为 736 nm 和 742 nm 波段处的一阶微分光谱数值。图 3 为建立的简单线性函数回归模型,相关系数达到了极显著水平 ($\alpha = 1\%$, $n = 16$),表明可用一阶微分光谱的敏感波段的数值对棉花 LAI 和 ADMA 进行估算。

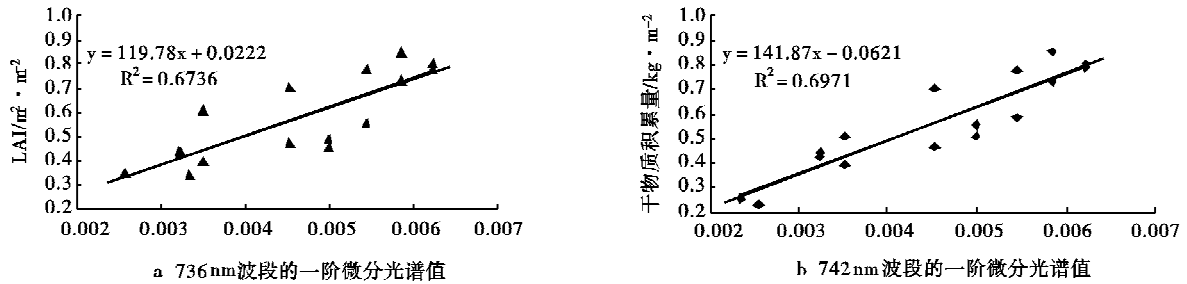


图 3 736 nm、742 nm 波段的一阶微分光谱值与 LAI、ADMA 的相关分析

Fig. 3 Correlation analysis between the first derivative spectra data at 736 nm, 742 nm and LAI, ADMA

3 讨论与结论

研究作物的 LAI 及 ADMA 积累状况,传统方法多以实测数据建立相关模型,推算作物的 LAI 及 ADMA,进行估算或相关分析。这种方法在实践中很难做到对作物进行实时、动态的生长监测,而且不能大面积普及。

采用高光谱分辨率遥感技术,可以实现对作物冠层快速、有效、非接触、非破坏性的田间信息采集和处理。用植被指数来估算作物的 LAI 及 ADMA 状况。方法简便、快速。估算精度较高。便于大面积的反演植被的 LAI 及生物量。黄敬峰等^[16]对新疆牧草产量进行了遥感动态监测;金丽芳^[17]用 TM 数据建立 NDVI 与生物量之间的关系式;祁亚琴等^[18]利用高光谱数据对棉株冠层

进行了研究。

本文通过对棉花生育时期的反射光谱与 LAI 及 ADMA 进行多元统计分析,对反射光谱与 LAI 而言,确立近红外波段 783 nm 波段处具有较高的相关系数 ($r = 0.6394^{**}$),红光区 713 nm 处是负相关系数的极值波段 ($r = -0.2497^*$),对反射光谱与 ADMA 而言,确立近红外波段 766 nm 波段处具有较高的相关系数 ($r = 0.6287^{**}$),光区 705 nm 处是负相关系数的极值波段 ($r = -0.2334^*$)。基于上述 4 个波段组合产生的 RVI 和 NDVI 两种植被指数,构建了 5 种函数形式的棉花 LAI 及 ADMA 的线性和非线性估算模型。经检验,相关系数均达到了极显著水平 ($\alpha = 1\%$, $n = 16$);其中对数函数、指数函数和双曲线函数形式的模型可以产生较高的估测精度。对比

估测模型的相关系数以及 RMSE, RVI 的预测精度高于 NDVI。RVI、NDVI 与棉花 LAI 回归效果较之与 ADMA 更为理想, 估算精度更高。

光谱微分技术在实际应用中非常有效^[19-20], 本研究中棉花冠层微分光谱数据与 LAI 及 ADMA 的相关系数较反射光谱有所提高, 在 736 nm ($r=0.6769^{**}$) 和 742 nm ($r=0.6847^{**}$) 波段处, 微分光谱数据与棉花 LAI 及 ADMA 的相关性均达到了极显著的水平, 建立的模型估测精度也有所提高。

在以上的分析中, 还有待对光谱分析技术进行深层分析来探讨对作物 LAI 及 ADMA 估算的敏感波段的选择。积分光谱技术、光谱吸收指数以及神经网络分析方法都可以用到高光谱遥感预测 LAI 及 ADMA 的分析当中去, 由于篇幅的关系, 不再一一赘述。

参考文献:

- [1] CHOUDHURY B J. Relationships between Vegetation indices, Radiation Absorption and Net Photosynthesis Evaluated by Sensitivity Analysis [J]. *Remote Sensing Environment*, 1987, 22(2): 209-233.
- [2] GUPTER R K, Vijayan D, Prasad T S. Comparative analysis of red-edge hyperspectral indices [J]. *Adv Space Res*, 2003, 32: 2 217-2222.
- [3] 杨敏华, 刘良云, 等. 小麦冠层理化参数的高光谱遥感反演研究[J]. *测绘学报*, 2002, 31(4): 316-321.
- [4] 张良培, 郑兰芬, 童庆禧. 利用高光谱数据对生物变量进行估计[J]. *遥感学报*, 1997, 1(2): 110-113.
- [5] XIAO X M, Ojima D S, Ennis C A, et al. Estimation of above-ground biomass of the Xilin River Basin, inner Mongolia, using landsat TM imagery[C]//中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究所. 草原生态系统研究: 第五集. 北京: 科学出版社, 1997: 130-138.
- [6] 王 渊, 王福民, 黄敬峰. 油菜不同组分生物量光谱遥感估测模型[J]. *浙江农业大学学报*, 2004, 16(2): 79-83.
- [7] 傅玮东, 刘绍民, 黄敬峰. 冬小麦生物量遥感监测模型的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 1997, 11(1): 84-89.
- [8] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻地上部生物量的高光谱遥感估算模型研究[J]. *作物学报*, 2003, 29(6): 815-821.
- [9] 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.
- [10] 宋开山, 张 柏, 李 芳, 等. 高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 36-40.
- [11] 吴长山, 项月琴. 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.
- [12] 黄春燕, 王登伟, 陈冠文, 等. 基于高光谱植被指数的棉花干物质积累估算模型研究[J]. *棉花学报*, 2006, 18(2): 115-119.
- [13] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 124-144, 185-228.
- [14] 张金恒, 王 珂, 王人潮. 高光谱评价叶绿素含量的研究进展[J]. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2003, 21(1): 74-80.
- [15] 谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 等. 夏玉米叶片全氮、叶绿素及叶面积指数的光谱响应研究[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(6): 1041-1046.
- [16] 黄敬峰, 王秀珍, 王人潮, 等. 天然草地牧草产量与气象卫星植被指数的相关分析[J]. *农业现代化研究*, 2000, 21(1): 33-36.
- [17] 金丽芳. 用陆地卫星 TM 资料作内蒙古草场草场产草量分级图[M]//内蒙古草场资源遥感考察队. 内蒙古草场资源遥感应用研究(一). 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1987: 136-141.
- [18] 祁亚琴, 王登伟, 陈冠文, 等. 基于高光谱数据提取作物冠层特征信息的研究进展[J]. *棉花学报*, 2005, 17(6): 371-375.
- [19] CLOUTIS E A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques [J]. *Int J Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2215-2242.
- [20] 陈 兵, 李少昆, 王克如, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. *棉花学报*, 2007, 19(1): 57-63. ●