

基于高光谱植被指数的棉花干物质积累估算模型研究

黄春燕¹, 王登伟¹, 陈冠文², 袁杰¹, 祁亚琴¹, 陈燕¹, 程诚¹

(1. 石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003;

2. 新疆农垦科学院棉花所, 石河子 832000)

摘要:利用北疆 8 个棉花主栽品种(其中 2 个棉花品种设 4 水平种植密度)的各生育期冠层高光谱数据,经多元统计分析与光谱微分处理,建立了基于比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)的 5 种函数形式的棉花干物质积累估测模型,相关系数均达到了极显著水平($\alpha=1\%$, $n=96$)。基于 RVI 和 NDVI 构建的估测模型,前者比后者具有更高的估测精度,指数函数、对数函数和双曲线函数形式的模型可以产生较高的预测精度;一阶微分光谱数据与棉花干物质积累量的逐步回归相关分析表明,相关系数的最高值发生在 748 nm 波段处($r=0.6920^{**}$),由 748 nm 波段处的微分数值建立的回归模型,估测精度较高,具有实际应用的潜力。

关键词:棉花;高光谱;植被指数;干物质积累;估算模型

中图分类号:S562 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2006)02-0115-05

Estimating Modeling of Cotton Dry Matter Accumulation Based on Hyperspectral Vegetation Index

HUANG Chun-yan¹, WANG Deng-wei¹, CHEN Guan-wen², YUAN Jie¹, QI Ya-qin¹, CHEN Yan¹, CHENG Cheng¹

(1. *Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shi Hezi University, Shi Hezi 832003, China*; 2. *Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation, Shihezi 832000, China*)

Abstract: Utilizing Multivariate Regression Modeling and Spectral Derivative to establish five function pattern cotton dry matter accumulation modeling based on Ratio Vegetation Index(RVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), all correlation coefficient is highly positive ($\alpha=1\%$, $n=96$), based on RVI modeling has a higher precision than NDVI does, hyperbolic curve fitting, exponential curve fitting and logarithmic curve fitting have further improved analysis against cotton dry matter accumulation. Analysis of correlation between the first derivative spectra data and dry matter yield, the maximum value of correlation coefficient ($r=0.6920^{**}$) in waveband 748 nm. Using derivative spectra data at waveband 748 nm, the regression modeling of dry matter accumulation has been established, and derivative spectra has improved the prediction of cotton dry matter accumulation, so it has shown a potential capacity in application.

Key words: cotton; hyperspectral; vegetation index; dry matter accumulation

植被指数是由光谱数据中红光波段和近红外区反射率的线性或非线性组合得到的特征参数,可直接或间接用来估算植被的生物量等参数,定

量指示植被的生长状况,反映植被冠层状态的信息。而作物的生物量是作物产量的基础,通过植被指数来估算农作物的生物量指标,可以定性和

收稿日期:2005-10-25 作者简介:黄春燕(1966-),女,在职博士生

基金项目:国家自然科学基金(30460060 和 30060039)

定量评价作物的生长和产量状况。

Shibayama^[1]用比值指数(R_{1100}/R_{1200})较好地预测了双季水稻的干物质重。张良培等^[2]利用归一化差值植被指数(NDVI),估测了鄱阳湖地区的鲜、干生物量。傅玮东等^[3]研究认为RVI(比值植被指数)、NDVI和冬小麦生物量之间呈指数相关。王渊^[4]用油菜的各组分生物量(叶、茎干重和荚果干重)分别与RVI、NDVI建立了估算回归模型。目前,基于高光谱数据的植被指数,用于估测棉花地上部干物质积累的研究甚少,本文利用新疆8个棉花主栽品种的多时相高光谱数据,通过高光谱不同波段组合的比值植被指数预测棉花地上部的干物质积累状况,建立了基于微分光谱数据的棉花干物质积累回归模型,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 试验材料

试验于2003—2005年在石河子大学农学院田间试验站进行,土壤肥力中等,含有机质1.93%、碱解N 77.4 mg·kg⁻¹,速效P 93 mg·kg⁻¹,速效K 315 mg·kg⁻¹,试验地前茬为棉花。为研究棉花地上部分不同生物量对光谱差异的响应机理,设置了2组试验:(1)单因素比较试验(试验1)。供试品种棉花8个,分别为新陆早4、6、7、8、10、13号、炮台1号(品系)和中棉所36,随机区组试验,重复3次,小区面积30 m²,种植密度为21万株·hm⁻²;(2)2个品种4水平种植密度试验(试验2)。棉花品种为新陆早6号、8号,4水平种植密度分别为18万株·hm⁻²(P₁)、22.5万株·hm⁻²(P₂)、27万株·hm⁻²(P₃)和31.5万株·hm⁻²(P₄),裂区设计,品种为主区,密度为副区,3次重复,每重复小区面积30 m²,分别用P₁-6、P₁-8、P₂-6、P₂-8、P₃-6、P₃-8、P₄-6、P₄-8表示种植密度P₁、P₂、P₃和P₄下的新陆早6号、8号。

两试验均为宽膜种植,膜上点播,30 cm+60 cm宽窄行种植。4月中下旬日播种,采用膜下滴灌,全生育期化控4次,7月15日棉花打顶。

1.2 试验数据采集

1.2.1 棉花高光谱数据测量。采用美国ASD Fieldspec FR 2 500型地物光谱仪,光谱范围350~2 500 nm,光谱区的分辨率350~1 000 nm为3 nm,1 000~2 500 nm为10 nm。分别在棉花的现蕾期、开花期、花铃期、盛铃期、盛铃末期、吐絮

期进行6次高光谱数据采集,测试时间选在晴朗无云的11:30~14:00之间。选择具有代表性的、均匀的无病虫害危害的样本点,测量前均用白板进行标定,测试冠层光谱采用25°视场角,传感器探头向下,距冠层顶垂直高度1 m,每次测试15条曲线,设定扫描时间是0.2 s,以其平均值作为该处理冠层的光谱反射值。

1.2.2 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,于室内将样本棉植株叶节以上的茎、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,1 h后再称一次重量,前后两次重量差≤5%,不再烘烤,称取干重。

1.3 数据处理方法与模型的建立

1.3.1 光谱微分技术。对反射光谱进行一阶微分(差分)值计算,其公式为:

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

式中 λ_i 为每个波段的波长; $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分光谱。 $\Delta\lambda$ 是波长 λ_{i+1} 到 λ_{i-1} 的间隔。

1.3.2 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(1), $y = a + b \times \ln(x)$;对数函数(2), $y = a \times \ln(x+b) + c$;双曲线函数, $y = 1/(a+b/x)$ 。式中 y 代表棉花干物质积累量, 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地上部干物质积累之间的最优回归模型。

2 结果与分析

2.1 棉花反射光谱与地上部干物质积累量的相关性分析

采用多元统计分析方法,得到棉花反射光谱(350~2 500 nm)与地上部干物质积累量的相关系数曲线(图1)。由图1可知,光谱反射率与棉花地上部干物质积累量的相关系数在577~700 nm、1833~1912 nm、1971~1996 nm三个波段范围内,均呈负相关性;从红光区到近红外的717~1448 nm波段范围内,相关系数达到了极显著性水平($\alpha=1\%$, $n=96$),其中,相关系数的高平台区为近红外的758~1 364 nm波段,此波段范围内在761 nm、934 nm和1122 nm波段处分别出现3个峰值,这3个波段的相关系数几乎相等;红光区650~700 nm波段,负相关系数的极值发生在

673 nm 波段处($r=-0.2168^*$)。

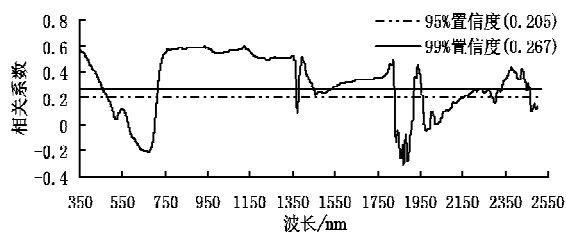


图1 棉花反射光谱数据与干物质积累量的相关分析
Fig.1 Correlation analysis between reflectance and dry matter yield of cotton canopy

2.2 棉花干物质积累的高光谱估算模型

植被指数与植被的覆盖度(绿度)有密切的关系,是估算生物量的一个重要参数,大量的研究论证了植被指数与 LAI、植被的覆盖度、生物量之间的关系,多数将植被指数与生物量关系表述为线性相关或指数相关^[3,5]。本研究用高光谱比值植被指数(RVI)估算棉花地上部干物质积累量,RVI是绿色植物的一个灵敏的指示参数,能增强植被与土壤背景之间的辐射差异。许多研究表明,RVI与叶面积指数(LAI)、干物质积累量(DM)、叶绿素含量相关性高,被广泛用于估算和监测绿色植物的生物量。

比值植被指数(RVI)的表达式为:

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R} \quad (2)$$

公式中,定义 ρ_{NIR} 为近红外光谱数据与棉花干物质积累量相关性最大值的波段反射率,由图1可知,761 nm、934 nm和1122 nm波段的 ρ_{761} 、 ρ_{934} 和 ρ_{1122} 均可作为 ρ_{NIR} 入选,对比相关研究,谭倩等^[6]选取758 nm作为近红外平台的特征位

置;刘伟东等^[7]认为750 nm附近的光谱数据与水稻 LAI 的相关性较高;吴长山等^[8]确立了反射光谱765 nm是水稻、玉米叶绿素密度的特征波段;本研究中761 nm波段与上述3个特征波段最为接近,因此,可用 ρ_{761} 和 ρ_{673} 分别指示 ρ_{NIR} 和 ρ_R 。

RVI被重新定义为:

$$RVI = \frac{\rho_{761}}{\rho_{673}} \quad (3)$$

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、植被覆盖度、光合作用等植被参数相关。

NDVI可表达为:

$$NDVI = \frac{\rho_{761} - \rho_{673}}{\rho_{761} + \rho_{673}} \quad (4)$$

ρ_{761} 是近红外761 nm波段的反射率, ρ_{673} 是红光区673 nm波段的反射率。

分别以 RVI、NDVI 为自变量,棉花单位面积地上部干物质积累量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)为因变量,建立棉花地上部干物质积累量的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棉花干物质积累量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 建立的估测模型,均达到了极显著水平($\alpha=1\%$, $n=96$),相对基于 NDVI 建立的估测模型,RVI 构建的棉花干物质积累量模型的预测精度较高。其中采用指数函数、对数函数和双曲线函数模型,优于幂函数形式的模型。

相关文献表明,植被指数与生物量之间存在

表1 基于 RVI 和 NDVI 的棉花地上部干生物量的估算模型

Table 1 Estimating modeling of cotton dry matter accumulation 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	$y=6.919+11.9803x$	0.6704**	0.2948
		NDVI	$y=0.0538+0.8472x$	0.6120**	0.3445
2、幂函数	$y=ax^b$	RVI	$y=18.7812x^{0.2589}$	0.7228**	0.1194
		NDVI	$y=0.9x^{0.0877}$	0.6704**	0.2420
3、指数函数	$y=a \times \exp(b/x)$	RVI	$y=21.0947 \times \exp(-0.1336/x)$	0.7555**	1.0127
		NDVI	$y=0.9132 \times \exp(-0.0182/x)$	0.6896**	0.5396
4、对数函数(1)	$y=a+b \times \ln(x)$	RVI	$y=18.754+4.2708 \times \ln(x)$	0.7357**	0.2922
		NDVI	$y=0.8999+0.0333 \times \ln(x)$	0.6719**	0.2433
4、对数函数(2)	$y=a \times \ln(x+b)+c$	RVI	$y=2.8247 \times \ln(x-0.1503)+19.015$	0.7459**	0.3658
		NDVI	$y=0.0218 \times \ln(x-0.1524)+0.902$	0.6815**	0.2748
5、双曲线函数	$y=1/(a+b/x)$	RVI	$y=1/(0.0454+0.0085/x)$	0.7518**	0.4976
		NDVI	$y=1/(1.0941+0.0208/x)$	0.6898**	0.4933

注:n=96

指数函数关系^[3], 本研究结果表明, RVI 与棉花干物质积累量之间同样存在这种函数关系, 但采用对数函数和双曲线函数构建的估测模型, 同样具有较好的预测精度。

2.3 一阶微分光谱与棉花干物质积累量的相关分析

光谱微分技术对光谱信噪比非常敏感, 用一阶微分处理去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对植被光谱(必须为非线性)的影响^[9]。微分光谱能更好地获取植被的信息, 监测冠层的生长状况^[10]。对试验 1、2 的 96 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干物质积累量进行逐步回归分析(图 2)。结果表明: 棉花一阶微分光谱与干物质积累量在 748 nm 波段的相关系数最高($r=0.6920^{**}$), 高于反射光谱与干物质积累量的 761 nm 波段的相关系数($r=0.5824^{**}$), 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^[7-8], 提高了光谱数据与冠层干物质积累量的相关性, 使模型的精度获得提高。

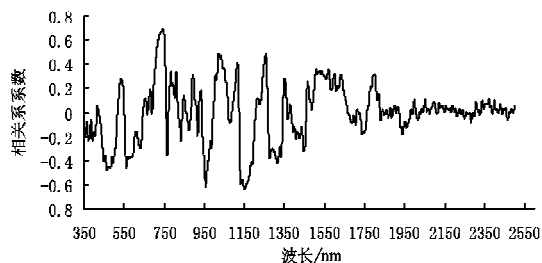


图 2 一阶微分光谱与干物质积累量相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between the first derivation spectra data and dry matter yield of cotton canopy

选取 748 nm 波段微分光谱数据与棉花冠层干物质积累量(DMY)建立线性关系, 函数公式为:

$$DMY=A+B \times \rho'(\lambda) \quad (5)$$

(5)式中 DMY 为棉花冠层干物质积累量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), $\rho'(\lambda)$ 为 748 nm 波段处的一阶微分光谱数值, A, B 为特定参数。

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($\alpha=1\%$, $n=96$), 表明可用一阶微分光谱数据对棉花冠层干物质积累量进行估算。

3 讨论

研究作物干物质的积累状况, 传统方法多采

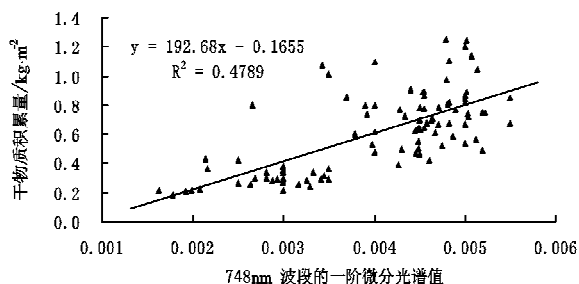


图 3 748 nm 波段的一阶微分光谱值与干物质积累量的相关分析

Fig. 3 Correlation analysis between the first derivative spectra data at 748 nm dry matter yield

用选定样本区, 利用大量固定样点实地取样获取作物的鲜重, 烘干后再称干重, 以实测数据建立相关模型, 推算作物的干物质积累, 进行宏观拓展估算或相关分析。这种方法比较费时、费力、实时性差且对作物有破坏性, 在实践中很难作到对作物进行实时、动态的生长监测, 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与处理, 用高光谱的红波段和近红波段的组合即植被指数来估算作物的干物质积累状况, 方法简便、快速, 估算精度较高, 便于大面积的反演植被的生物量。金丽芳^[11]用 TM 数据建立 NDVI 与生物量之间的关系式; 黄敬峰等^[12]对新疆牧草产量进行了遥感动态监测; 张良培等^[2]对研究区生物量与光谱数据进行回归分析, 相关系数在 0.8 以上; 童庆禧等^[13]用归一化植被因子对鄱阳湖湿地生物量进行了制图; 赵艳霞等^[14]对棉花反演模型初始值和参数进行了研究。孙莉等^[15]、祁亚琴等^[16]利用高光谱数据对棉株冠层进行研究。

本文通过对棉花不同生育期的反射光谱与冠层干物质积累量进行多元统计分析, 确立近红外 761 nm 波段处具有较高的相关系数($r=0.5824^{**}$), 红光区 673 nm 处是负相关系数的极值波段($r=-0.2168^*$)。基于上述 2 个波段组合产生的植被指数 RVI 和 NDVI, 构建了 5 种函数形式的棉花冠层干物质积累量的线性和非线性估算模型, 相关系数均达到了极显著水平($\alpha=1\%$, $n=96$); 对比估测模型的相关系数以及 RMSE, RVI 的预测精度高于 NDVI。基于植被指数的技术已经被证明是一种简单高效的方法, 除传统的幂函数形式的模型外, 指数函数、对数函数和双曲线函数形式的模型也是能够产生较高的预测

精度。

光谱微分技术在实际应用中非常有效^[17],本研究中棉花冠层微分光谱数据与冠层干物质积累量的相关系数较反射光谱有所提高,在 748 nm 波段处,微分光谱数据与棉花冠层干物质的相关性达到了极显著水平($r=0.6920^{**}$),表明采用微分光谱数据,通过逐步回归分析建立的估测模型具有一定的应用潜力。

致谢:

石河子大学农学院学生刘杨、杨坤、张建春、吴国艳、米雪、郝孝坤和单国明参加了部分试验工作,在此表示感谢!

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 biomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27: 119-197.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王 渊, 王福民, 黄敬峰. 油菜不同组分生物量光谱遥感估算模型[J]. *浙江农业大学学报*, 2004, 16(2): 79-83.
- [5] 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.
- [6] 谭 倩, 赵永超, 童庆禧, 等. 植被光谱维特征模型[J], *遥感信息*, 2001, 1: 14-18.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 185-228, 124-144.
- [10] 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.
- [11] 金丽芳. 用陆地卫星 TM 资料作内蒙古草场产草量分级图[A]. 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)[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1987, 136-141.
- [12] 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.
- [13] 童庆禧, 郑兰芬, 王晋年, 等. 湿地植被成像光谱遥感研究[J]. *遥感学报*, 1997, 1(1): 50-57.
- [14] 赵艳霞, 秦 军, 周秀骥. 遥感信箱与棉花模型结合反演模型初始值和参数的方法研究[J]. *棉花学报*, 2005, 17(5): 280-284.
- [15] 孙 莉, 陈 曦, 包安明, 等. 用高光谱数据诊断水分胁迫下棉花冠层叶片氮素状况的研究[J]. *棉花学报*, 2004, 16(5): 291-295.
- [16] 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.
- [17] CLOUTIS E A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2215-2242.