

干旱区玉米抽雄期叶绿素含量 高光谱最佳模型选择

武倩雯¹, 熊黑钢², 王凯龙¹, 王莉峰¹, 靳彦华¹

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;
2. 北京联合大学应用文理学院城市系, 北京 100083)

摘要: 采用相关性、线性和非线性分析法, 探讨了玉米抽雄期叶片叶绿素含量与多种高光谱参数之间的关系, 并建立了叶绿素含量的定量监测模型。结果表明: (1) 原始光谱反射率与叶绿素含量在 713 nm 处具有最大相关系数 $r = 0.86$, 光谱反射率一阶微分在 760 nm 处与叶绿素含量具有最大相关性 $r = 0.84$ 。同时, 最大一阶微分分别对应的波长 ($\lambda_r, \lambda_b, \lambda_y$)、绿峰反射率 (R_g) 和其对应的波长 λ_g 、红边内最大一阶微分总和 (SDr)、比值植被指数 ($SDr/SDb, SDr/SDy, (R_g - R_o)/(R_g + R_o)$) 以及归一化植被指数 ($(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$) 等 10 种参数分别与叶绿素含量的相关性达到极显著相关。(2) 采用相关性达到极其显著的 12 种光谱参数进行建模, 其中原始光谱、绿色反射峰以及光谱反射率一阶微分、基于红边面积与蓝边面积的比值植被指数和归一化植被指数所建立的 10 个模型 R^2 都不小于 0.72, 前两者所建立的指数模型优于线性模型, 而后者所建立的线性模型则优于指数模型。(3) 所选取的五个方程中, 在 760 nm 处的光谱反射率一阶微分值所构建的线性模型: $y_{\text{叶绿素}} = 6912x_{760\text{nm}} + 44.878$ 因其具有最大决定系数和最小的 RMSE, 并且其模型表达式相对简单, 因此是玉米抽雄期叶绿素含量的最佳预测模型, 从模型决定系数 R^2 来看, 它比其他模型至少提高了 11.4%。

关键词: 叶绿素含量; 高光谱参数; 抽雄期
中图分类号: S513 **文献标志码:** A

Selection of optimal model using hyperspectral parameters for chlorophyll content of maize during tasseling stage in arid region

WU Qian-wen¹, XIONG Hei-gang², WANG Kai-long¹, WANG Li-feng¹, JIN Yan-hua¹

(1. College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 2. College of Art & Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China)

Abstract: A model monitoring the quantitative content of chlorophyll was established using correlation and linear and nonlinear analyses to determine the relationships between chlorophyll content of maize at the heading stage and a variety of high spectral parameters. The results showed that the raw spectral reflectance had a maximal negative correlation coefficient at 713 nm ($r = 0.86$) with the chlorophyll content. The first derivative spectral reflectance had a maximal positive correlation coefficient at 760 nm ($r = 0.84$). The parameters included $\lambda_r, \lambda_b, \lambda_y, \lambda_g, R_g, SDr, SDr/SDb, SDr/SDy, (R_g - R_o)/(R_g + R_o)$ and $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$, all of which reached significant correlations with the chlorophyll content. Models were built based on 12 kinds of spectral parameters that showed significant correlations. The R^2 of the models were greater than 0.72, constructed by the raw spectral reflectance, green reflection peak, the spectral reflectance of the first derivative, vegetation index and normalized difference vegetation index based on the red edge and blue edge area ratio. The first two exponential models established were better than the linear model, whereas the latter three linear models were better than the exponential models. Through precision evaluations of the estimation

收稿日期: 2014-02-17
基金项目: 国家自然科学基金(41171165); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322); 北京联合大学人才强校计划资助项目(BPHR2012E01)
作者简介: 武倩雯(1989—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 主要研究方向为干旱区资源与环境。E-mail: wqw200952199@163.com。
通信作者: 熊黑钢(1956—), 男, 湖南湘乡人, 教授, 博士, 博士生导师, 现主要从事资源环境研究。E-mail: heigang@sbuu.edu.cn。

models, the model $y_{\text{Chlorophyll content}} = 6912x_{760\text{nm}} + 44.878$ constructed in the first derivative spectral reflectance at 760 nm. This model seemed to be the best prediction for the chlorophyll content of maize at the heading stage due to its maximal correlation coefficient and minimal RMSE, and its relatively simple expression. The correlation coefficient R^2 of the model was increased at least 11.4% more than other models.

Keywords: chlorophyll content; spectral parameter; maize tasselling

叶绿素含量通常对植物的养分胁迫、光合作用能力和植被生长阶段(衰老)具有指示作用。研究作物叶绿素含量的不同光谱特性,建立作物叶绿素含量光谱估算模型,有利于准确、快速、经济的诊断作物的叶绿素水平,促进作物高产优质生产,同时通过对作物的光谱分析,快速获取作物的生长信息,对生长诊断及精确管理均具有重要意义,成为作物研究的重要领域。

关于光谱变化特征与叶绿素含量的研究,国内外已取得较大进展。主要成果有:对玉米群体反射光谱与叶绿素含量及叶绿素密度之间的关系进行的分析^[1],玉米可见光波段的光谱变化特征分析^[2],通过分析玉米红边区和近红外光的光谱分布特征,探讨拔节期-吐丝期不同波长光谱反射率与各深度土壤湿度的相关关系^[3],对不同时期玉米光谱反射率及其对应叶片的全氮含量进行分析,进而建立各个时期的全氮含量最佳高光谱遥感估算模型^[4],Daughtry 等认为通过玉米叶片和冠层光谱反射率估算叶绿素含量具有可行性^[5],通过对油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究建立其叶绿素含量与红边位置和绿峰位置之间的定量分析模型^[6],通过马尾松针叶以及水稻上部叶片的光谱特征与其叶绿素含量之间的关系,建立其叶绿素的估算模型^[7-8],在高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析中得出微分光谱在某些波段与叶绿素密度及叶面积指数有很好的相关关系结论^[9],Sims D A, Gamon J A 等将叶绿素对光的吸收与叶绿素的含量之间的关系进行研究^[10]。

玉米抽雄期标志着玉米开始由营养生长(根,茎,叶等的生长)转向生殖生长(开花,结果),也就是营养生长和生殖生长旺盛的并进阶段。它是玉米一生中生长发育最快,对养分,水分,温度,光照要求最多的时期,也是使用灌溉,穗肥追肥的关键时期,决定了玉米产量的高低。快速准确估算抽雄期叶绿素含量对玉米高产稳产极为重要。同时,不同高光谱参数对植物的叶绿素估算精度有差异^[11-14],何种高光谱参数对玉米叶片叶绿素含量更为敏感,尚有待于进一步探索。本文对多种高光谱参数与玉米抽雄期叶绿素含量的模型精度进行探究,为快速、准确

获取作物的生长信息提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山东段博格达峰北麓准噶尔盆地南缘,新疆奇台县,地处 $89^{\circ}13' \sim 91^{\circ}22' \text{E}$, $43^{\circ}25' \sim 45^{\circ}29' \text{N}$ 。该区属于温带大陆性气候,年平均气温为 5°C 左右,7 月份最高气温 43°C ,1 月份极端最低气温 -42.6°C 。年均降水 176 mm,年均蒸发潜力是 2 141 mm。冬季长而严寒,夏季短而炎热,春秋季节不明显,气候干燥。

试验地为水浇地,玉米行距大约 50 cm,苗高大约 70 cm,叶宽 6~8 cm,整体长势较均匀,覆盖度达 60%~70%。品种是新玉 23 号,于 4 月中旬播种,9 月底 10 月初收。4 月 25 日左右浇第一次水,在整个生长期共浇水 6~7 次,施肥 1~2 次,主要是底肥,农家肥,尿素以及二铵分别约 $30 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。

1.2 光谱的采集与预处理

本试验于 2012 年 6 月 9 日采用美国 ASD 公司的 FieldSpecPro3 光谱仪采集玉米光谱反射率数据,其测量的波长范围为 350~2 500 nm。去除受外界噪声影响较大的波段 1 000~2 500 nm,取 350~1 000 nm。这一波段包括了遥感常用的可见光和近红外波段,可满足本文分析要求。试验选择晴朗无云或少云的天气,光谱仪探头垂直向下,距玉米冠层顶部垂直高度约 15 cm,视场角 25 度,每次采集玉米光谱前后进行白板校正以去除暗电流影响。选择 25 个点进行光谱测定,每点重复测量 5 次取平均值作为该点光谱测量的结果。

1.3 叶绿素含量的测定

测量光谱的同时,采用对植物无破坏性的 SPAD-502 叶绿素仪测定玉米叶绿素 SPAD 值,在光谱仪探头所能辐射的范围内,选取不同方向的玉米叶片各三个,每个叶片随机选取 10 个点测定其叶绿素含量,最终取三个叶片的平均值作为该玉米叶绿素含量。

1.4 光谱参数

根据研究区玉米特点,本文选取原始光谱,光谱一阶微分以及应用较广泛的基于光谱位置变量,基

于光谱面积,基于植被指数等 19 种高光谱参数^[15],作为估算玉米叶绿素的参数。

1.5 模型检验

用均方根误差 (*RMSE*) 对预测模型进行精度检验,计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}}$$

其中, *n* 为样本个数, *y_i* 和 $\bar{y}$ 分别代表实测值和预测值。*RMSE* 是用来衡量这两个值之间的偏差,它越小说明这两个值之间的偏差越小。

2 结果与分析

2.1 玉米叶绿素含量与各高光谱参数的相关性

2.1.1 玉米原始光谱反射率与叶绿素含量的相关关系 将玉米原始光谱反射率与相应的叶绿素含量分别进行相关分析,以寻找对玉米叶绿素敏感波段,并建立普适性的叶片叶绿素含量监测模型。

玉米叶绿素含量与光谱反射率在整个波段范围内都呈现正相关关系(图 1)。通过分析发现,在 713 nm 处光谱反射率与叶绿素相关性最好, *r* = 0.86, 达

到显著性水平。

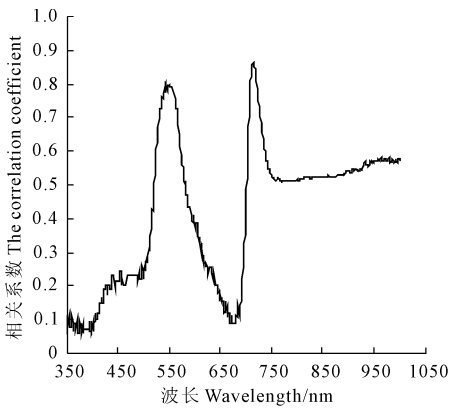


图 1 玉米抽雄期叶绿素含量与原始光谱反射率的相关关系
Fig.1 Correlations between the chlorophyll content and the spectral reflectance

2.1.2 玉米光谱反射率一阶微分与叶绿素含量的相关关系 叶绿素含量与一阶微分光谱之间相关分析见图 2。350 ~ 1 000 nm 波段范围内,光谱反射率一阶微分与叶绿素相关性最大的是在 760 nm 处, *r* = 0.84, 达到显著性水平。

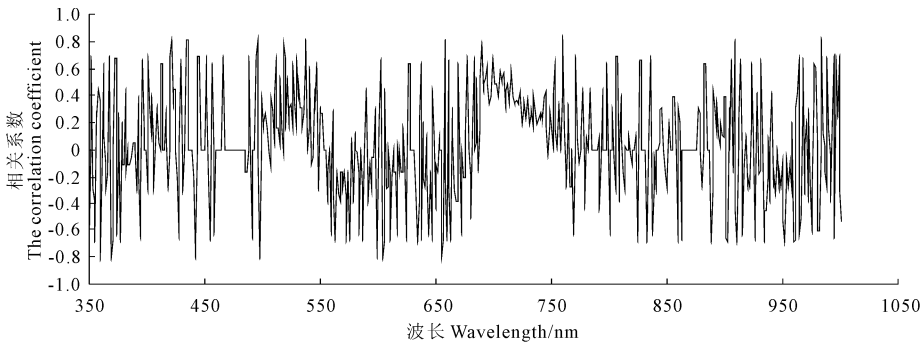


图 2 玉米抽雄期叶绿素含量与一阶微分光谱的相关性

Fig.2 Correlations between the chlorophyll content and the first derivative spectral reflectance

2.1.3 叶绿素含量与其余高光谱参数的相关性 由于所选的 19 种高光谱参数对应特定波段,因此只需求得叶绿素在该高光谱参数波段处的相关性即可。

除 *D_y*, *SD_y* 和 *SD_r - SD_y* 这三个光谱参数与叶绿素含量呈负相关外,其余的光谱参数与叶绿素含量都呈正相关关系(表 1)。在基于光谱位置变量的参数中,红边位置 λ_r , 蓝边位置 λ_b , 黄边位置 λ_y 以及绿色反射峰 (*R_g*) 及其对应的位置都与叶绿素含量达到极显著相关,其中 *R_g* 与叶绿素含量的相关性最高。

基于光谱面积的“三边”面积变量与叶绿素含量均达到显著相关,其中红边面积变量达到极显著相关。在基于植被指数变量中,除红边面积和黄边面

积以及绿峰和红谷反射率所建立的归一化植被指数、土壤调节植被指数外,其余参数均与叶绿素含量达极显著相关(表 1)。

2.2 模型建立

选择相关性达到极显著的参数建立叶绿素含量估算模型。利用线性和非线性拟合分析,以叶绿素含量作为因变量,分别以上述与叶绿素含量达到极显著相关的高光谱参数作为自变量,建立叶绿素含量与它们的关系模型(表 2)。在决定系数 *R*² 大于 0.72 的五对模型中,原始光谱在 713 nm 和绿峰处分别建立的线性模型和指数模型,均是后者比前者的拟合效果好。而基于红边面积和蓝边面积的比值植被指数和归一化植被指数分别所建立的线性模型的 *R*² 均大于其指数模型的 *R*²。虽然一阶微分在 760

nm 处与叶绿素含量的拟合程度不论是线性还是非线性的模型 R^2 都达 0.88 以上,但前者的 R^2 大于后者。选择各自拟合度更好的模型作为对叶绿素含量预测的备选模型。

表 1 光谱参数与叶绿素含量的相关关系

Table 1 Correlation coefficients between chlorophyll content and hyperspectral variables

类型 Type	光谱参数 Spectral parameters	定义 Definitions	相关系数 Correlation
基于光谱位置变量 Based on the spectral position variables	D_r	红边内最大一阶微分值 The maximum first-order differential value in the red edge	0.31
	λ_r	D_r 对应波长 D_r corresponding wavelength	0.70 * *
	D_b	蓝边内最大一阶微分值 The maximum first-order differential value in the blue edge	0.43
	λ_b	D_b 对应波长 D_b corresponding wavelength	0.68 * *
	D_y	黄边内最大一阶微分值 The maximum first-order differential value in the yellow edge	-0.60 *
	λ_y	D_y 对应波长 D_y corresponding wavelength	0.64 * *
	R_g	绿峰反射率 Green peak reflectivity	0.79 * *
	λ_g	R_g 对应波长 R_g corresponding wavelength	0.70 * *
	R_o	红谷反射率 Red Valley reflectance	0.58 *
基于光谱面积变量 Based on the spectral area variables)	SDr	红边内一阶微分总和 The sum of the first derivative within the red edge	0.63 * *
	SDb	蓝边内一阶微分总和 The sum of the first derivative within the blue edge	0.52 *
	SDy	黄边内一阶微分总和 The sum of the first derivative within the yellow edge	-0.53 *
	SDr/SDb		0.81 * *
	SDr/SDy	比值植被指数 RVI	-0.68 * *
基于植被指数变量 Based on vegetation index variable	R_g/R_o		0.62 * *
	$(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$		0.80 * *
	$(SDr - SDy)/(SDr + SDy)$	归一化植被指数 NDVI	0.49 *
	$(R_g - R_o)/(R_g + R_o)$		0.53 *
	$(1 + 0.65)(R800 - R670)/(R800 + R670 + 0.65)$	土壤调节植被指数 Soil adjusted vegetation index	0.32

注: * *, 极显著水平 ($P < 0.01$); * , 显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: “* * ”showed significant difference at $P < 0.01$; “* ” significant difference at $P < 0.05$.

2.3 叶绿素含量估算模型检验及最佳模型选择

采用通用的均方根误差 ($RMSE$) 检验备选模型的预测能力。精度检验的结果表明,采用 760 nm 处的光谱一阶微分值所建构的线性模型具有最大决定系数和最小的均方根误差 $RMSE$ (表 3)。由于玉米在抽雄期,植株垂直投影没有全部覆盖地面,所以其光谱受到各种背景因素的影响较大,而光谱的一阶微分可以去除部分背景因素的影响^[16],不仅提高了光谱与玉米叶片叶绿素含量之间的相关关系,而且预测模型决定系数最大。

3 讨 论

叶绿素含量是作物主要的生化参数,其变化可用来评价作物的光合作用能力,直接控制着植被能量和物质交换。前人在建立玉米叶绿素含量的估测模型方面已经做了很多工作。张俊华^[17]等对夏玉米不同色素含量与其光谱特征的关系进行研究,唐

延林^[18],王秀珍等在玉米高光谱与红边特征的分析一文中,利用红边参数建立叶绿素含量预测模型,Zarco-Tejada^[19]等利用 700 ~ 750 nm 光谱区域波段反射率构造的高光谱指数估算叶绿素含量,并取得了很好的效果。在玉米生育期,不同生长阶段有不同的光谱敏感波段和相应的叶绿素含量的最优模拟方程。而玉米抽雄期是决定其产量的关键时期,所以对这个时期的叶绿素含量的预测模型的建立是极为重要的。通过分析玉米抽雄期特征光谱参数与其对应的叶绿素含量之间的关系,选定其敏感的光谱参数,能够建立准确、稳定、误差低的叶绿素含量预测模型。

4 结 论

通过对玉米抽雄期多种高光谱参数与叶绿素含量相关性分析,并且建立玉米叶绿素含量预测模型,综合分析得到以下结论:

表 2 叶绿素含量(y)与不同光谱参数(x)的定量关系

Table 2 Quantitative relationships of leaf chlorophyll content(y) to spectral parameters(x) in maize

光谱参数 Spectral parameters	模型 Model	回归方程 Regression model	R^2
λ_r	一次线性 A linear model	$y = 1.264x - 870.27$	0.4897
	指数 Exponential model	$y = 3 \times 10^{-7}e^{0.0262x}$	0.4684
λ_b	一次线性 A linear model	$y = 0.4414x - 184.05$	0.4673
	指数 Exponential model	$y = 0.3431e^{0.0094x}$	0.4729
λ_y	一次线性 A linear model	$y = 0.5309x - 254$	0.4122
	指数 Exponential model	$y = 0.0765e^{0.0113x}$	0.4187
R_g	一次线性 A linear model	$y = 351.5x + 21.439$	0.7159
	指数 Exponential model	$y = 27.212e^{7.4981x}$	0.7271
λ_g	一次线性 A linear model	$y = 0.8373x - 415.81$	0.4965
	指数 Exponential model	$y = 0.0023e^{0.0179x}$	0.508
SDr	一次线性 A linear model	$y = 45.665x + 32.634$	0.4025
	指数 Exponential model	$y = 34.825e^{0.949x}$	0.3882
SDr/SDb	一次线性 A linear model	$y = 0.8737x + 38.69$	0.7406
	指数 Exponential model	$y = 39.496e^{0.0182x}$	0.7311
SDr/Sd_y	一次线性 A linear model	$y = -0.3428x + 41.3$	0.4627
	指数 Exponential model	$y = 41.688e^{-0.0071x}$	0.448
R_g/R_o	一次线性 A linear model	$y = 2.4837x + 40.338$	0.3785
	指数 Exponential model	$y = 40.728e^{0.053x}$	0.3842
$(SDr - SDb)/(SDr + SD)$	一次线性 A linear model	$y = 53.161x + 4.2995$	0.7462
	指数 Exponential model	$y = 19.198e^{1.1135x}$	0.7456
原始光谱(713 nm) The original spectrum at 713 nm	一次线性 A linear model	$y = 241.19x + 17.349$	0.7715
	指数 Exponential model	$y = 24.969e^{5.1357x}$	0.7845
光谱一阶微分(760 nm) The first derivative spectrum at 760nm	一次线性 A linear model	$y = 6912x + 44.878$	0.8991
	指数 Exponential model	$y = 44.9e^{145x}$	0.8889

表 3 叶绿素含量估算模型的精度检验结果

Table 3 Comparisons of precision test results of hyperspectral models for chlorophyll content

自变量 X Independent variable	模型 Model	R^2	RMSE
713 nm 处的光谱反射率 Spectral reflectance at 713 nm	$y = 24.969e^{5.1357x}$	0.7850	0.953
760 nm 处的反射率一阶微分 The first derivative reflectance at 760 nm	$y = 6912x + 44.878$	0.8990	0.684
SDr/SDb	$y = 0.8737x + 38.69$	0.7410	1.466
$(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$	$y = 53.161x + 4.2995$	0.7462	1.308
R_g	$y = 27.212e^{7.4981x}$	0.7270	0.854

1) 原始光谱反射率在 713 nm 处, 光谱反射率一阶微分在 760 nm 处, $\lambda_r, \lambda_b, \lambda_y, R_g, \lambda_g, SDr, SDr/SDb, SDr/Sd_y, R_g/R_o, (SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 等 12 种参数分别与叶绿素含量相关性达到极显著。因此利用这些变量对玉米叶绿素含量进行估算具有可行性。

2) 基于原始光谱、绿色反射峰所建立的指数模型优于线性模型, 而采用光谱反射率一阶微分、基于红边面积与蓝边面积的比值植被指数和归一化植被

指数所建线性模型优于指数模型, 且各模型 R^2 均不小于 0.72。

3) 通过精度检验综合分析, 在 760 nm 处的光谱反射率一阶微分值所构建的线性模型比其他模型的决定系数至少提高了 11.4% ~ 17.2%, 因此作为玉米抽雄期叶绿素含量的预测模型最为理想。

参 考 文 献:

[1] 吴长山, 童庆禧, 郑兰芬, 等. 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的

相关分析[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(1):31-37.

[2] 孙红,李民赞,张彦娥,等.不同施氮水平下玉米冠层光谱反射特征分析[J].光谱学与光谱分析,2010,30(03):715-719.

[3] 王宏博,冯锐,纪瑞鹏,等.干旱胁迫下春玉米拔节-吐丝期高光谱特征[J].光谱学与光谱分析,2012,32(12):3358-3362.

[4] Daughtry C T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000,74(2):229-239.

[5] 刘冰峰,李军,赵刚峰,等.夏玉米叶片全氮含量高光谱遥感估算模型研究[J].植物营养与肥料学报,2012,18(04):813-824.

[6] 方慧,宋海燕,曹芳,等.油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(9):1731-1734.

[7] 杜华强,葛宏立,范文义,等.马尾松针叶光谱特征与其叶绿素含量间关系研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(11):3033-3037.

[8] 杨杰,田永超,姚霞,等.水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型[J].生态学报,2009,29(12):6561-6571.

[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] Daniel A S, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,81(2/3):337-354.

[11] 陈志强,王磊,白由路,等.整个生育期玉米叶片 SPAD 高光谱预测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(10):2838-2842.

[12] 靳彦华,熊黑钢,张芳,等.不同地类春小麦叶片叶绿素含量高光谱植被指数估算模型研究[J].麦类作物学报,2013,33(05):1012-1018.

[13] 张永贺,陈文惠,郭乔影,等.桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型[J].生态学报,2013,33(03):876-887.

[14] 蒋金豹,陈云浩,黄文江,等.病害胁迫下冬小麦冠层叶片色素含量高光谱遥感估测研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(7):1363-1367.

[15] 浦瑞良,宫鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000.

[16] 王秀珍,王人潮,黄敬峰.微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究[J].农业工程学报,2002,18(1):9-13.

[17] 张俊华,张佳宝.夏玉米光谱特征对其不同色素含量的响应差异[J].西北农业学报,2010,19(4):70-76.

[18] 唐延林,王秀珍.玉米高光谱与红边特征的分析[J].山地农业生物学报,2003,22(3):189-194.

[19] Zarco-Tejada P J, Berjon A, Lopez-Lozano R, et al. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,99:271-287.

(上接第 39 页)

[14] 危常州,张福锁,朱和明.新疆棉花氮营养诊断及追肥推荐研究[J].中国农业科学,2002,35(12):1500-1505.

[15] 姚青青,杨涛,马兴旺,等.水肥调控策略对膜下滴灌棉花冠层结构和产量的影响[J].棉花学报,2013,25(1):73-80.

[16] 刘翠,张巨松,阿依加玛丽,等.密度对杂交棉群体冠层及光合特性的影响[J].新疆农业科学,2013,50(1):1-7.

[17] 原日红,俞树迅,余学科.中棉所 36 在北疆棉区的表现及高产栽培技术[J].中国棉花,2000,27(12):29-30.

[18] 毛树春,韩迎春,王国平,等.推广棉花工厂化育苗机械化移栽加快发展现代植棉业[J].中国棉花,2012,39(8):1-5.

[19] Wright P R. Premature senescence of cotton-predominantly a potassium disorder caused by an imbalance of source and sink[J]. Plant Soil, 1999,211:231-239.

[20] 纪从亮,俞敬忠.棉花高产品种的产量构成特点[J].江苏农业学报,2000,16(1):25-30.

[21] 陈德华,陈源,周桂生.高产条件下与棉铃发育有关的养分流研究[J].棉花学报,2002,14(1):28-32.

[22] 张旺锋,王振林,余松烈,等.氮肥对新疆高产棉群体光合性能和产量形成的影响[J].作物学报,2002,28(6):789-796.

[23] 姜善伟,高云光,张巨松.不同栽培密度对棉花植株养分特征及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,16(4):953-958.

[24] 柯梁,吕凤琴,熊辉.棉花生产主要育苗移栽技术概述[J].棉花科学,2013,35(2):11-15.

[25] 伍维模,郑德明,董合林.新疆棉花干物质和氮磷钾养分积累的模拟分析[J].西北农业学报,2002,26(1):17-18.

[26] William R, Meredith J R, Heltholt J. Comparison of obsolete and modern cotton cultivars at two nitrogen levels[J]. Crop Sci, 1997,37:1453-1457.

[27] 孙学振,单世华,宋宪亮.株型对棉铃时空分布及素质的影响[J].棉花学报,2002,14(3):171-174.

[28] James R M, Steven A M. Antioxidant metabolism in cotton seedlings exposed to temperature stress in the field[J]. Crop Science, 2005,45:2337-2345.