

关中地区夏玉米抽穗期叶绿素含量的高光谱估算

解飞, 齐雁冰, 常庆瑞

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 利用高光谱数据进行叶绿素估算, 为快速获取作物的生长信息、生长诊断及精确管理提供依据。[方法] 基于陕西省关中地区抽穗期夏玉米冠层光谱特征及叶绿素含量的测定, 运用线性及非线性分析方法建立了基于原始光谱敏感波段和一阶微分光谱敏感波段叶绿素估算模型。[结果] 夏玉米抽穗期反射光谱在可见光及中远红外区域, 叶绿素含量越高, 光谱曲线越向下偏移; 在红边区域, 叶绿素含量对光谱曲线影响不显著; 在近红外波段, 叶绿素含量越高, 光谱曲线越向上偏移。基于一阶微分光谱敏感波段的夏玉米叶绿素含量估算模型拟合精度要优于基于原始光谱敏感波段估算模型, 决定系数 R^2 分别为 0.81 和 0.60, 均方根误差 (RMSE) 分别为 2.39, 4.41。[结论] 基于一阶微分光谱敏感波段建模分析是估测抽穗期夏玉米冠层叶绿素含量的重要方法, 对指导西北地区夏玉米种植与生产具有积极的借鉴意义。

关键词: 关中地区; 高光谱; 叶绿素含量; 夏玉米; 估算模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0176-05

中图分类号: S127

文献参数: 解飞, 齐雁冰, 常庆瑞. 关中地区夏玉米抽穗期叶绿素含量的高光谱估算[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 176-180. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.034

Hyperspectral Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Summer Corn in Guanzhong Area

XIE Fei, QI Yanbing, CHANG Qingrui

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Hyperspectral estimation of canopy chlorophyll content was expected to provide a clue for obtaining growth information rapidly, diagnosing growth situation and precision management of crops. [Methods] Based on the measurement of canopy spectral characteristics and chlorophyll content of summer corn in heading stage in Guanzhong area of Shaanxi Province, a model with regard to the canopy chlorophyll content estimation was established by relating the original spectrum and the first derivative spectral reflectance of sensitive band. [Results] For the reflection spectral of corn in the heading stage, the spectral curve showed downward trend with the increase of chlorophyll content in the visible and infrared band; influence of chlorophyll content on spectral curve in the red edge band was not obvious, and the spectral curve showed upward trend with the increase of chlorophyll content in the near infrared band. Fitting precision of the estimation model with the sensitive band of the first derivative spectral reflectance were superior to the original spectral reflectance. The coefficients of determination R^2 of the model based on the first derivative spectral and the original spectral reflectance were 0.81 and 0.60, the root mean square errors (RMSE) were 2.39 and 4.41 respectively. [Conclusion] The sensitive bands of first derivative spectral reflectance was an important indexes for canopy chlorophyll content estimation of summer corn in heading stage. The models have positive significance to guide the plantation and the production for summer corn in the northwest of China.

Keywords: Guanzhong area; hyperspectral; chlorophyll content; summer corn; estimation model

植物的生长离不开光合作用, 叶绿素则直接影响
植被光合作用。在植物生长环境分析和长势监测中,

叶绿素含量是非常重要的评估内容之一。植被和叶
片的反射光谱在可见光范围内主要受植被色素(主要

是叶绿素)和覆盖度的影响,在近红外区主要受叶片结构和冠层等的影响^[1]。因此,可以用植被冠层和叶片的反射光谱来估算色素含量^[2],通过农作物光谱特征的分析,无损、迅速地获取作物的田间生长信息,也是进行农作物生长诊断及精确管理的重要基础。随着遥感技术的发展,高光谱遥感在检测植被,尤其是农作物的叶绿素含量方面的研究已经取得了很大进展,利用实测高光谱数据来估算作物生物物理、生物化学指标的研究也多见报道^[3-4]。美国科学家 Knipling^[5]在 20 世纪 70 年代就发现叶绿素控制着作物可见光波段的光谱反射率。Thomas 和 Gausman^[6-9]的研究也表明叶绿素直接影响着植物可见光波段的反射率,其显著差别主要表现在 500~600 nm 波段上,这些显著差别跟叶片中叶绿素含量是紧密相关的。童庆禧院士在国内倡导和开展了高光谱遥感技术和应用研究后,吴长山等^[10]利用光谱一阶导数估测了玉米和水稻的叶片叶绿素含量,模型精度达到 80%,研究指出原始光谱一阶导数与叶绿素含量有很好的相关性。刘伟东等^[11]通过研究植物叶绿素含量与高光谱数据之间的关系得出,植物光谱一阶导数与叶绿素含量的相关性在作物全部生育期内都高于原始光谱与叶绿素含量的相关性,通过原始光谱一阶导数数据与叶绿素含量所建立的估算模型能较好的反映植物的生长状况。然而无论是在国外还是国内,大量的经验统计模型多是在人工控制试验条件下进行的,农作物在大田生长条件下由于受到众多因素的影响,叶绿素与光谱反射率的关系则更为复杂^[12-14],只有选择最为适宜的叶绿素与光谱之间的模拟模型才能准确地监测玉米在田间的生长状况。

关中地区是我国重要的传统农业生产基地,农作物种植面积、长势及优质农产品产区监测一直受到重视。本文则是以关中地区主要粮食作物中的玉米为研究对象,在大田耕作条件下以夏玉米抽穗期为例,研究玉米冠层光谱反射率与作物叶绿素含量之间的关系,建立基于高光谱反射率的玉米叶绿素估算模型,以期为大面积的快速、无损农作物长势及面积监测提供基础。与以往的研究相比较,该研究采样次数更多,更接近生产实际,可为关中农业主产区开展高光谱农学参数的估算、作物营养的诊断及干旱半干旱区优质农业产区的确定提供一定的借鉴作用。

1 材料与方 法

1.1 田间试验设计

所选玉米试验地位于陕西省宝鸡市扶风县召公镇聚粮村,地处北纬 108°01'3"—108°01'14",东经

34°23'52"—34°23'53",小区面积 10 hm²,内共设 51 个试验小区。为农户自种玉米,品种为陕西高农金稻 3 号,种植时间为 2014 年 6 月 20—25 日,机播,行距 60 cm,株距 20 cm。农户施肥方式采取一次底肥、不追肥的方式。由于农户施肥量及除草、喷药等管理的差别,区内玉米长势有一定的区别。选择玉米敏感时段—抽穗期作为观测时段,观测日期为 2014 年 8 月 28 日,为保证试验结果的全面性与精确性,选择玉米长势有差异的、能代表该区域生产特性的样地进行冠层光谱和叶绿素的测量。

1.2 光谱测试

使用美国 SVCHR 1024 i 型便携式高光谱仪,波段范围是 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 区间光谱分辨率为 1.4 nm,1 000~1 850 nm 区间光谱分辨率为 3.8 nm,在 1 850~2 500 nm 区间光谱分辨率为 2.4 nm。本研究选择夏玉米抽穗期(2014 年 8 月 28 日)进行光谱与叶绿素的测定。测定时间选择在晴朗无云无风的 11:00—14:00 之间,测定前经参考板(白板)标定,传感器探头垂直向下,距离冠层顶部约 1 m,光谱仪视场角选用 8°,光谱扫描时间设定在 5 s,对 51 个小区进行测量,每个小区选取 1 个样点,每样点测 5 条曲线,最后用其平均值作为该样点的光谱反射值。

1.3 叶绿素测试

与光谱测量同步,本文使用便携式叶绿素仪 SPAD-502 的测定值来代替叶绿素值。SPAD 值也被称作“绿度”,是一个无量纲的值,是反映植物叶绿素相对含量的指标^[15]。叶绿素仪主要利用 650~940 nm 中心波段叶片透射率进行叶片叶绿素含量的测定,其读数 SPAD 值能较好地反映叶片绿度的变化。研究表明:植被叶绿素含量随 SPAD 值的增加而增加,呈一定函数变化规律,且达到极显著相关的水平^[16]。夏玉米叶绿素测定时,在冠层光谱测定的相应位置处对应光谱测定时选定的 51 个样本的叶片均匀的测量 10 次 SPAD 值,求取平均值作为该样点的叶绿素含量。

1.4 高光谱数据分析

利用 Excel,SPSS 19.0 等软件对数据进行处理并进行相关分析。由于光谱仪采集的是离散的数据,因此采用公式(1)对原始光谱数据进行一阶微分计算^[17]。

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

式中: R_i ——第 i nm 处的光谱反射率; R' —— R_i 的一阶微分; λ_i ——第 i 个通道的波长。

将 51 个样本分成两组,前 30 个样本用来确定估测模型,21 个用来验证模型。为检验实测值与估测值之间的拟合效果,利用地面试验数据来验证建立的反演模型的适应性,将模型反演值和地面实测值回归拟合,以反演模型的决定系数 R^2 ,均方根误差 RMSE 和相对误差 RE%,作为主要依据来评价模型的验证结果。公式(2)–(3)分别为均方根误差的计算公式和相对误差的计算公式^[17]。

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

$$\text{RE}\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{y}_i - y_i|}{y_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: \bar{y}_i ——估测值和实测值; n ——样本数量。

2 结果与分析

2.1 夏玉米(抽穗期)光谱曲线特征分析

图 1 显示,夏玉米(抽穗期)在可见光区域(360~700 nm)植物冠层的光谱反射率均较低,其光谱曲线存在两个吸收谷和一个反射峰,即 400 nm 左右区域的蓝光、690 nm 左右区域的红光和 550 nm 左右区域的绿光。在短波近红外呈强烈反射,特别是在 690~750 nm 之间光谱的反射率急剧上升形成植被光谱的最重要特征—红边,在短波远红外区域总体呈下降趋势,在 1 680 和 2 200 nm 附近有两个反射峰。但因为组分含量的不同(特别是叶绿素含量的不同)会造成植物光谱吸收特征的变化。从图 1 可以看出,玉米冠层叶绿素相对含量不同(相对含量 SPAD 值分别为 36.9,44.7,48.0,52.0,55.8),其对应光谱会发生上下偏移,在可见光区域,叶绿素含量越高,光谱曲线越向下偏移;在红边区域,叶绿素含量对光谱曲线影响不太显著;在近红外波段,叶绿素含量越高,光谱曲线越向上偏移;在中红外和远红外波段,叶绿素含量越高,光谱曲线则越向偏下偏移。光谱曲线特征与叶绿素含量有着密切的联系,可以尝试利用冠层反射光谱来估算冠层叶绿素含量。

2.2 夏玉米(抽穗期)叶绿素估算模型

2.2.1 基于原始光谱敏感波段的叶绿素估算与验证

通过计算夏玉米抽穗期冠层每个光谱通道上的原始光谱反射率与 SPAD 值之间的相关系数(图 2)发现,夏玉米抽穗期冠层光谱反射率与叶绿素 SPAD 值的相关性在可见光区域 360~700 nm 间达到显著相关,通过去除异常波段等处理,得到在波长 558 nm 处相关性最好($R=-0.75$)。这种现象说明,抽穗期夏玉米冠层光谱信息在可见光区域与叶绿素存在一

定的关系。由于冠层光谱数据与叶绿素相对含量在可见光区域呈显著相关,因此可以考虑选择相关性最好的波段作为入选参量,利用相关性最好的波段即敏感波段(558 nm, $R=-0.75$)来反演叶绿素含量,从而得到以原始光谱敏感波段为自变量的叶绿素含量预测模型,通过筛选不同回归模型,比较各个回归模型的 R^2 值,得出指数函数的拟合效果最佳,并建立验证模型对预测模型进行精度检验。结果表明,预测 $R^2=0.60$,验证 $R^2=0.65$,均达到极显著水平。

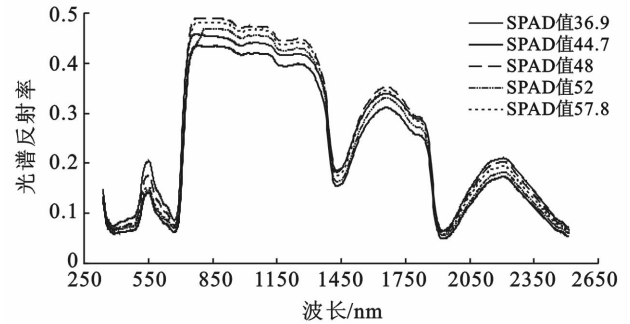


图 1 不同叶绿素相对含量(SPAD 值)夏玉米冠层高光谱曲线

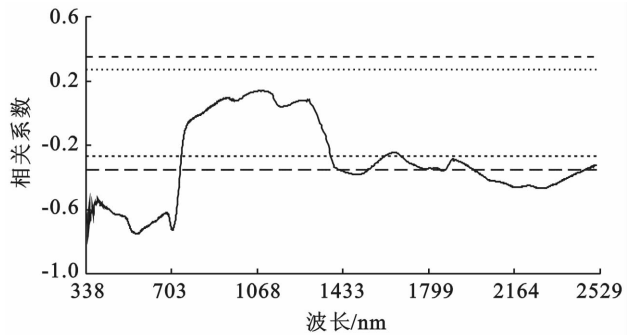


图 2 夏玉米(抽穗期)冠层原始光谱数据与叶绿素相对含量(SPAD 值)的相关性分析

2.2.2 基于一阶微分光谱敏感波段的叶绿素估算与验证

通过计算夏玉米抽穗期冠层每个光谱通道上的一阶微分光谱反射率与 SPAD 值之间的相关系数(图 3)发现,夏玉米抽穗期冠层一阶微分光谱反射率与叶绿素 SPAD 值的相关性在各个区域均十分显著,通过去除异常波段等处理,得到在波长 760.8 nm 处相关性最好($R=0.90$)。

由于冠层一阶微分光谱数据与叶绿素相对含量有显著相关性,因此可以考虑选择相关性最好的波段作为入选参量,利用相关性最好的波段即敏感波段(760.8 nm, $R=0.90$)来反演叶绿素含量,从而得到以一阶微分光谱敏感波段为自变量的叶绿素含量预测模型,通过筛选不同回归模型(表 2),比较各个回归模型的 R^2 值,幂函数可以很好地进行拟合,并建

立验证模型对预测模型进行精度检验。结果表明,预测 $R^2=0.81$,验证 $R^2=0.91$ 。

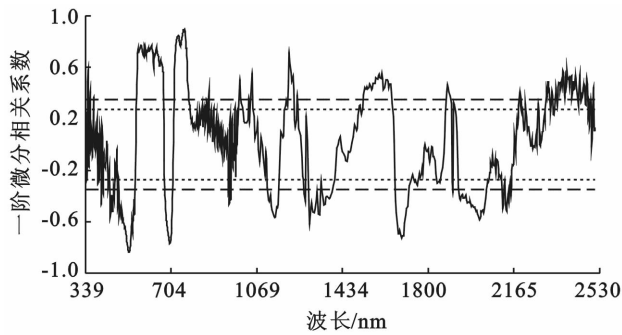


图 3 夏玉米(抽穗期)冠层一阶微分光谱数据与叶绿素相对含量(SPAD 值)的相关性分析

2.3 叶绿素估算模型精度比较

分别比较利用一阶微分光谱敏感波段来反演夏玉米抽穗期叶绿素相对含量 SPAD 值模型和利用原始光谱敏感波段来反演夏玉米抽穗期叶绿素相对含量 SPAD 值模型的 R^2 , RMSE, RE% 可知(表 1), 利用一阶微分光谱敏感波段来反演夏玉米抽穗期叶绿素相对含量 SPAD 值模型的 R^2 , RMSE, RE% 均优于利用原始光谱敏感波段来反演夏玉米抽穗期叶绿素相对含量 SPAD 值模型, 因此利用一阶微分光谱敏感波段来反演夏玉米抽穗期的叶绿素相对含量 SPAD 值模型拟合精度要高于利用原始光谱敏感波段来反演夏玉米抽穗期的叶绿素相对含量 SPAD 值。

表 1 叶绿素含量估算模型

敏感波段	预测模型	R^2	均方根误差	相对误差/%
原始光谱	$y=98.999e^{-4.712x}$	0.60	4.41	7.50
一阶微分光	$y=810.56x^{0.3761}$	0.81	2.39	4.14

3 讨论

大田条件下农作物冠层光谱特征受到众多复杂因素的影响。作物在不同的生育期光谱特征表现出不同的特征, 通常情况下抽穗期是夏玉米由营养生长(根和茎、叶等的生长)转向生殖生长(开花、结果)的关键时期, 营养生长和生殖生长旺盛的并进阶段。此时夏玉米冠层叶绿素含量较高, 光谱特征最为显著, 是决定玉米产量的最关键阶段。本研究中夏玉米在抽穗期的冠层光谱反射率的变化表现为: 在可见光区内呈现“低—高一低”的趋势, 在 560 nm 附近形成一个小小的反射峰, 这些光谱特征的形成, 与玉米叶绿

素的特征有关, 吸收谷是色素对蓝光和红光的强吸收造成的, 而反射峰则是由于绿光的弱反射造成的, 所以植物通常呈暗绿色, 在近红外区域逐渐升高, 形成一个较高的反射平台, 这是因为叶肉内的海绵组织结构内有很大反射表面的空腔, 且细胞内的叶绿素呈水溶胶状态, 具有强烈的红外反射。在短波红外区域由于水分吸收带的原因光谱曲线总体呈下降趋势^[18], 在 1 680 和 2 200 nm 附近有两个反射峰, 这与李民赞等^[19]、吴倩雯等^[20]的研究结果一致。

在利用高光谱数据构建叶绿素含量的预测模型时, 模型精度受到光谱数据的变换形式及所选函数类型的影响。大多数学者的研究表明将原始光谱采用一阶微分变化后与叶绿素的相关性高于原始光谱的相关性, 可能是由于原始光谱反射率的一阶微分能消除或减弱在测量过程中由于土壤背景和测量高度等对光谱特性的影响。如武倩雯等^[20]的研究表明当原始光谱经过一阶导数变换之后与叶绿素的相关性由 0.72 提高到 0.83, 本研究的结果显示原始光谱与叶绿素的相关系数为 0.75, 而经过一阶微分变换之后相关系数提高至 0.90。利用线性和非线性拟合的方法是目前基于光谱数据的叶绿素估算的主要途径, 通常选用的函数包括线性、对数函数、指数函数、幂函数、多项式函数等, 由于农作物的生长条件不同, 所选用的函数模拟精度差异也非常明显, 陈志强等^[21]和易秋香等^[22]的结果显示指数模型优于对数、幂函数、多项式及线性模型, 而武倩雯等^[20]的结果表明线性模型优于指数模型。本研究的结果显示以一阶微分光谱敏感波段所建立的预测模型中幂函数的模型精度明显高于指数、对数、线性及多项式函数, 其原因可能在于本研究是在玉米生长环境较为复杂的西北地区大田环境下开展的研究, 而明显区别于以往的以东部优良作物产区小区试验的结果。但建立的模型具有一定的局限性, 不同时期不同地区不同植物种类的反演模型是有区别的, 这里仅作反演模型的精度比较。

关中地区作为西北地区重要的农业生产区, 水土生态环境相对脆弱, 受到气候、地形等因素的影响, 土壤水分、养分及光照等自然条件区域差异明显, 作物生长状况也完全能够从叶绿素含量上反映出来。而通过地表高光谱遥感的叶绿素反演, 一方面可以进行玉米生长状况的快速、无损监测, 为作物水肥诊断提供基础资料, 另一方面通过地表高光谱与高空卫星光谱数据的关联, 可以为关中地区大面积玉米长势检测及玉米优质产区划定提供基础。

4 结论

以西北关中地区大田玉米田间试验为基础,分析抽穗期玉米冠层叶片叶绿素与光谱反射率及其一阶微分的相互关系,最终构建了基于高光谱数据的玉米叶片叶绿素预测模型。结果表明叶绿素与叶片反射率的一阶微分的相关性高于原始光谱,幂函数可以很好地预测叶绿素含量,但模型具有局限性。通过高光谱的叶绿素估算研究,可以为生态环境脆弱、耕地资源日益减少、环境问题日益突出的西北地区玉米优质产区划分提供基础资料。

[参 考 文 献]

- [1] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R, et al. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(3): 545-552.
- [2] 姚付启,张振华,杨亚润,等.基于主成分分析和BP神经网络的法国梧桐叶绿素含量高光谱反演研究[J]. *测绘科学*, 2010, 35(1): 109-112.
- [3] Blachburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 273-285.
- [4] Penuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance [J]. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
- [5] Knippling E B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near in-framed radiation from vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1970, 1(3): 155-159.
- [6] Thomas J R, Gausman H W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops [J]. *Agronomy Journal*, 1977, 69(5): 799-802.
- [7] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves [J]. *Agronomy Journal*, 1994, 86(6): 934-938.
- [8] McMurtrey J E, Chappelle E W, Kim M S, et al. Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 47(1): 36-44.
- [9] Hong S, Rim S, Lee J, et al. Remote sensing for estimating chlorophyll amount in rice canopies[C]// Singapore: Proc Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 1997.
- [10] 吴长山,童庆禧,郑兰芬.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*, 2008, 8(1): 31-37.
- [11] 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.
- [12] 张晓华,常庆瑞,章曼,等.基于高光谱植被指数的西北玉米不同时期叶绿素含量估测[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 75-81.
- [13] 章曼,常庆瑞,张晓华,等.不同施肥条件下水稻冠层光谱特征与叶绿素含量的相关性[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(11): 49-56.
- [14] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll[J]. *Journal of Plant Physical*, 1996 (3/4): 494-500.
- [15] 方圣辉,乐源,杨光.基于 HyperScan 成像光谱数据的植被叶绿素反演[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(4): 40-47.
- [16] 李辉,白丹,张卓,等.羊草叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关分析[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 27-30.
- [17] 王纪华,赵春江,黄文江,等.农业定量遥感基础与应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [18] 张凯,郭锐,王润元,等.甘肃省两种主要草地类型的光谱反射特征比较[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 142-147.
- [19] 李民赞.光谱分析技术及其应用[M].北京:北京科学出版社,2006.
- [20] 武倩雯,熊黑钢,王凯龙,等.干旱区玉米抽雄期叶绿素含量高光谱最佳模型选择[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(2): 81-86.
- [21] 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.
- [22] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等.玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J]. *科技通报*, 2007, 23(1): 83-87.