

马铃薯地上部干生物量光谱指数的建立及模型构建

杨福芹¹, 冯海宽^{2*}, 刘小强¹, 王果¹, 陈超¹

(1. 河南工程学院土木工程学院, 郑州 451191; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要:为了寻求高效的马铃薯生物量估算方法, 该研究利用2017年北京小汤山地区幼苗期、块茎形成期、块茎增长期、块茎增长后期和淀粉积累期的马铃薯生物量和对应的地面非成像高光谱数据, 构建了植被指数NDVI和RVI与生物量的决定系数 R^2 等高线图, 利用重心公式分析了不同区域对生物量的敏感波段, 最后用经验回归分析方法构建了马铃薯干生物量遥感估算模型。结果表明抛物线模型构建的NDVI(382, 669)和RVI(385, 668)可以很好地估算地上部干生物量, 其建模的 R^2 均为0.545, 验证精度RMSE均为0.054 kg/m², MAE分别为0.040、0.039 kg/m²。该方法可提高模型的稳定性和准确性, 为快速无损诊断马铃薯地上部干生物量提供新的波段选择方法。

关键词:马铃薯; 生物量; 敏感波段; 模型; 高光谱遥感

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)05-0107-04

Establishment and Model Construction Based on Spectral Index of Aboveground Dry Biomass of Potato

YANG Fuqin¹, FENG Haikuan^{2*}, LIU Xiaoqiang¹, WANG Guo¹, CHEN Chao¹

(1. College of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to find an efficient estimation method of potato biomass, the potato biomass and corresponding hyperspectral data of the seedling stage, the tuber formation stage, the tuber growth stage, the tuber growth later stage and the starch accumulation stage in Beijing Xiaotangshan area were acquired during 2017. The R^2 contour maps of the coefficient of determination between vegetation index NDVI and RVI and biomass were constructed. The gravity center formula was used to analyze the sensitive bands of different regions to biomass. Finally, empirical regression analysis was used to estimate the dry potato biomass with the sensitive bands as independent variables. The results indicated that NDVI (382, 669) and RVI (385, 668) constructed by sensitive bands estimated accuracy reached extremely significant correlation at the level of $P < 0.01$, the modeling R^2 was 0.545, the validation accuracy RMSE was 0.054 kg/m², and MAE error was 0.040 and 0.039 kg/m². The research showed that among all regression analysis models, the parabola model was the best ($R^2 = 0.545$). The center of gravity of the R^2 maximum value region fitted by vegetation index NDVI and RVI can be used as the center of the sensitive band to improve the stability and accuracy of the model, provided a new band selection method for rapid nondestructive diagnosis of potato aboveground dry biomass.

Key words: Potato; Biomass; Sensitive band; Model; Hyperspectral remote sensing

地上部干生物量是反映作物生长发育状况的重要指标, 在作物准确估产和品质测定方面有重要作用。因此, 准确获取农作物生物量信息对作

物长势监测、产量估算、作物田间管理与调控等具有重要的意义^[1-3]。传统的马铃薯地上部干生物量测量多是破坏性取样, 费时费力, 难以满足现代化农业对大面积作物地上生物量准确及时估测的需求。高光谱遥感监测具有快速、准确、无破坏性的特点, 已广泛应用于农作物长势的快速获取中。姚霞等^[4]构建所有可能两两波段形成的归一化光谱指数和比值植被指数与小麦叶层氮含量建立决定系数 R^2 图, 筛选出对小麦叶层氮含量敏感的归一化光谱指数NDSI(1350, 700)和比值光

收稿日期: 2019-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007424); 河南省科技攻关计划项目(202102310333, 212102310427)

作者简介: 杨福芹(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事农业定量遥感研究。

通讯作者: 冯海宽, 男, 博士, 副研究员, E-mail: fenghaikuan123@163.com

谱指数RSI(1350,700)。贾学勤等^[5]采用偏最小二乘法(partial least squares regression, PLSR)建立了多植被指数的冬小麦地上干生物量估算方法,结果表明PSSRC、MSR705、MTCI共3个植被指数组合建立的PLSR复合式模型的估测效果最好。黄春燕等^[6]采用连续统计去除和波段深度归一化方法筛选出棉花敏感波段,构建了高光谱归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和比值植被指数(ratio vegetation index, RVI),结果表明RVI构建是棉花生物量估算模型精度最高的。刘斌等^[7]和任健强等^[8]均构建了窄波段植被指数N-NDVI和地上部干生物量的决定系数R²二维区域图,用重心公式计算R²最大区域的敏感波段中心,结果表明估算的地上干生物量模型稳定性和准确性精度都较高。Millard P.等^[9]根据红光和近红外光谱区的反射率构建植被指数以估算马铃薯的生物量。蔡兆炜等^[10]用6种回归模型分析了长白落叶松林下灌木的生物量模型,结果表明以二次多项式及乘幂方程为最佳估算模型。

目前利用高光谱手段监测小麦、玉米、棉花等作物生物量的研究较多^[6,11-12],但是对马铃薯地上部干生物量的估算研究较少。本研究以不同品种、不同氮素、不同密度的田间试验为基础,利用地面非成像光谱仪获取的冠层高光谱数据,结合归一化植被指数NDVI,比值植被指数RVI为遥感特征变量,用重心公式计算敏感波段中心,构建马铃薯地上部干生物量遥感估算模型,为马铃薯快速无损检测生物量,定量监控马铃薯生长状况,为精准农业管理提供重要理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地(116°26.3' E, 40°10.6' N),海拔高度36 m。试验于2017年进行,前茬作物是玉米,土壤类型是重壤土。品种设2个水平,费乌瑞它(P₁)、中薯143(P₂),均为早熟品种。马铃薯试验区东西总长39.6 m,南北总长35 m(不包括保护行),小区数目48个,小区面积5 m×6.6 m。采用不同梯度水肥管理。试验设计分两个实验,密度实验和氮素实验。

试验区1(n区):密度实验设3个水平,费乌瑞它:4000株/667 m²(T₁)、5000株/667 m²(T₂,正常处理)、6000株/667 m²(T₃);中薯143:4000株/667 m²(T₁)、5000株/667 m²(T₂,正常处理)、6000株/667 m²

(T₃)。试验区2(s区):氮素实验设4个水平,尿素0 kg/667 m²(N₀)、尿素10.87 kg/667 m²(N₁)、尿素21.74 kg/667 m²(N₂,正常处理,10 kg纯氮)、尿素32.61 kg/667 m²(N₃)。试验区1和试验区2均为随机区组排列,3次重复,其中重复1和重复3用于建模,重复2用于验证。田间实际生产按照大田管理规范进行。田间光谱测试和理化参数采样时间分别为:2017年4月25日(幼苗期),5月16日(块茎形成期),6月1日(块茎增长期),6月14日(块茎增长后期),6月27日(淀粉积累期)。

1.2 冠层光谱数据测定

马铃薯地面冠层光谱数据采用美国ASD FiedSpec Pro 4 FR(350~2500 nm)高光谱仪进行光谱数据采集。冠层光谱测量选择晴朗无云天气,于北京时间10:00~14:00进行。采集时,探头高度离马铃薯冠层40 cm处,视场角为25°。光谱在350~1000 nm范围内采样间隔为1.4 nm,1000~2500 nm范围内采样间隔为2 nm。每个小区测量前后均使用白板进行校正以去除光照条件变化带来的影响。每个小区内选择3株长势均匀且能代表小区内马铃薯长势的样本,在小区内3株样本点附近采集冠层光谱数据,每个样本点测量10条光谱曲线,一个小区共测量30次。

1.3 地上部干生物量测定

在每个实验小区内,选择3株能代表实验小区长势的马铃薯作为样本取样,装入密封袋,迅速带回实验室。茎、叶、根和地下块茎分离,分别称重,获取质量。将各部分放入纸袋中,放置烘箱105℃杀青40 min,烘箱温度再调至80℃烘干48 h以上,至各部分质量不变,获取取样马铃薯地上生物量数据(kg/m²)。

1.4 方法

本文算法流程图如图1所示。

1.5 植被指数的构建

为了研究作物冠层高光谱构建的植被指数与生物量的相关关系,本研究选取了更具普适性和描述性的归一化植被指数NDVI和比值植被指数RVI^[13-14]进行马铃薯生物量估算。计算公式如下:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \dots\dots\dots (1)$$

$$RVI = \frac{R_{nir}}{R_{red}} \dots\dots\dots (2)$$

式中,nir、red分别表示近红外、红光波段;R_{nir}为近红外波段光谱反射率;R_{red}为红光波段光谱反射率。

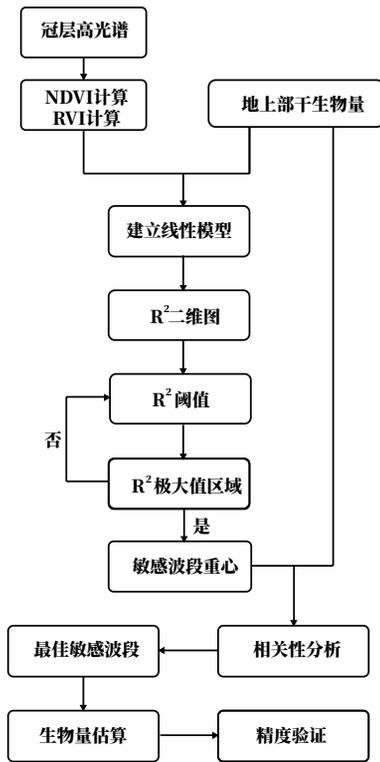


图1 技术路线图

1.6 敏感波段的筛选

首先,在350~1000 nm范围内读取马铃薯光谱反射率,两两光谱反射率组合构建估算马铃薯地上干生物量的NDVI和RVI,将所构建的所有植被指数与马铃薯地上部干生物量进行线性拟合,计算相应的决定系数R²,绘制决定系数等高线图(颜色从黑到白表示决定系数由小到大,同种颜色浓度越深表示决定系数越大),从而确定对生物量估算相关性高的波段区域,为马铃薯地上干生物量确定敏感波段提供依据。

为保证所选敏感波段的估算模型更具准确性和稳定性,本研究通过确定R²极大值区域重心以获得敏感波段中心。重心计算公式为:

$$\begin{cases} \bar{u} = \frac{\sum_{(u,v) \in \Omega} uf(u,v)}{\sum_{(u,v) \in \Omega} f(u,v)} \\ \bar{v} = \frac{\sum_{(u,v) \in \Omega} vf(u,v)}{\sum_{(u,v) \in \Omega} f(u,v)} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

式中,f(u, v)为波段坐标(u, v)的R²值,Ω为极大值区域,(\bar{u}, \bar{v})为敏感波段中心坐标。

1.7 模型构建和精度评价

为建立马铃薯冠层光谱敏感波段估算地上部干生物量的估算模型,选择相关系数较高的光谱

敏感波段进行回归分析,主要采用一元线性、指数、对数和抛物线模型^[15]比较分析各回归分析模型的预测精度和验证精度,为马铃薯地上干生物量的高光谱无损检测技术提供参考。

采用决定系数R²、均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)来评价估算生物量和实测生物量之间的标准。计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_m - X_s)^2}{n}} \dots\dots\dots (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_m - X_s|}{n} \dots\dots\dots (6)$$

其中,x_i和y_i为样本值,\bar{x}和\bar{y}为样本平均值,X_m表示测量值,X_s表示模拟值,n为样本个数。

2 结果与分析

2.1 NDVI和RVI估算地上干生物量敏感波段选取

利用MATLAB软件,根据式(1)和(2)计算任意两波段组合的NDVI和RVI,建立马铃薯地上部干生物量的决定系数图(图2)。其中,横坐标(λ₁)、纵坐标(λ₂)均为冠层高光谱波段,波长范围为350~1000 nm,二维空间所对应的点为任意两波段λ₁、λ₂所对应的反射率计算的NDVI和RVI与生物量的决定系数值,并根据大小赋予不同灰度。

由图2可知,马铃薯地上部干生物量的敏感区域主要位于可见光区域与近红外区域,植被指数NDVI和RVI与干生物量间R²分布二维图中极大值区域分布特点各不相同,为了提高所选敏感波段估算地上部干生物量的精度,本研究确定植被指数NDVI和RVI拟合冬小麦干生物量R²二维图中选择R²≥0.495的区域进行相关敏感波段中心的筛选。NDVI的R²≥0.495区域包括3个,横轴460~476 nm和纵轴455~470 nm,R²范围为0.495~0.558;横轴643~692 nm和纵轴350~424 nm,R²范围为0.495~0.533;横轴948~950 nm和纵轴942~943 nm,R²范围为0.499~0.512。RVI的R²≥0.495区域包括3个,横轴460~476 nm和纵轴454~470 nm,R²范围为0.495~0.558;横轴639~692 nm和纵轴350~429 nm,R²范围为0.495~0.542,横轴948~950 nm和纵轴942~943 nm,R²范围为0.499~0.512。

根据确定的NDVI和RVI与干生物量的敏感波

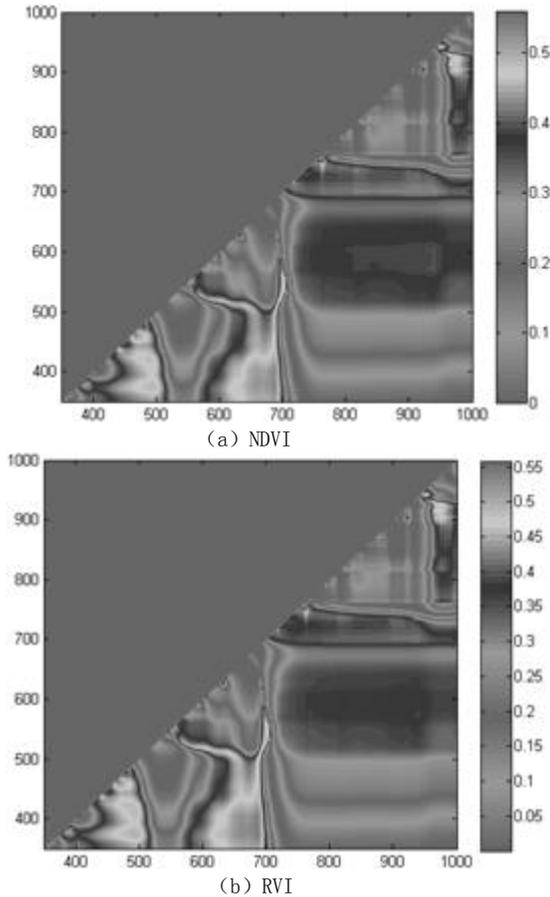


图2 NDVI和RVI分布二维图

段区域,利用重心坐标公式(3)分别计算敏感区域的重心作为敏感波段的中心。通过计算可知,NDVI的敏感波段中心分别为(943 nm, 949 nm)(382 nm, 669 nm)(460 nm, 470 nm);RVI的敏感波段中心分别为(943 nm, 949 nm)(385 nm, 668 nm)(460 nm, 470 nm)。由于(943 nm, 949 nm)(460 nm, 470 nm)波段相关性值接近1,存在严重的共线性,因此NDVI和RVI舍去敏感波段。

2.2 基于敏感波段的地上部生物量遥感反演

表1为模型的精度和验证结果。由表1可知,2个最优波段估算马铃薯地上部生物量在 $P<0.01$ 水平上均达到极显著水平。地上部生物量与敏感波段拟合的模型中,NDVI(382 nm, 669 nm)和RVI(385 nm, 668 nm)构建抛物线模型的决定系数 R^2 最高,其值均为0.545, RMSE和MAE最小,其值均为 0.034 kg/m^2 和 0.026 kg/m^2 。其预测精度也较高,NDVI(382 nm, 669 nm)和RVI(385 nm, 668 nm)预测的地上部生物量的RMSE和MAE分别为 0.054 kg/m^2 和 0.040 kg/m^2 、 0.054 kg/m^2 和 0.039 kg/m^2 。

3 结 论

本研究以马铃薯中薯143和费乌瑞它品种为研究对象,提取马铃薯冠层高光谱敏感波段,将

表1 敏感波段估算地上部生物量

高光谱敏感波段中心	模型	建模			验证		
		R^2	RMSE(kg/m^2)	MAE(kg/m^2)	R^2	RMSE(kg/m^2)	MAE(kg/m^2)
NDVI(382 nm, 669 nm)	线性	0.514	0.035	0.026	0.427	0.059	0.043
	指数	0.543	0.035	0.026	0.517	0.054	0.039
	对数	0.534	0.035	0.026	0.499	0.056	0.042
	抛物线	0.545	0.034	0.026	0.534	0.054	0.040
RVI(385 nm, 668 nm)	线性	0.483	0.036	0.027	0.336	0.063	0.045
	指数	0.524	0.036	0.026	0.461	0.057	0.040
	对数	0.508	0.036	0.027	0.406	0.060	0.043
	抛物线	0.545	0.034	0.026	0.519	0.054	0.039

敏感波段作为自变量与生物量进行建模,用均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)评价模型精度,得出如下结论:

(1)在NDVI和RVI与马铃薯生物量拟合 R^2 二维图上,筛选出 $R^2 \geq 0.495$ 的敏感波段区域,通过重心计算公式,NDVI与马铃薯干生物量的敏感波段中心为(943 nm, 949 nm)(382 nm, 669 nm)(460 nm, 470 nm),RVI与马铃薯干生物量的敏感波段中心为(943 nm, 949 nm)(385 nm, 668 nm)(460 nm, 470 nm)。由于(943 nm, 949 nm)(460 nm,

470 nm)波段相关性值接近1,存在严重的共线性,因此NDVI和RVI舍去敏感波段(943 nm, 949 nm)(460 nm, 470 nm)。

(2)根据筛选的敏感波段中心,建立了全生育期的马铃薯干生物量遥感估算回归分析模型,并取得了较为满意的估算结果:NDVI(382 nm, 669 nm)和RVI(385 nm, 668 nm)构建的抛物线回归模型精度最高, R^2 均为0.545,验证精度RMSE和MAE分别为 0.054 kg/m^2 和 0.040 kg/m^2 、 0.054 kg/m^2 和 0.039 kg/m^2 。

(下转第115页)

科研数据的准确性提供了重要的指导方法。

参考文献:

- [1] 昌梦雨,魏晓楠,王秋悦,等.植物叶绿素含量不同提取方法的比较研究[J].中国农学通报,2016,32(27):177-180.
- [2] 侯泽豪,张迎新,王欢,等.高温胁迫对小麦花药叶绿素质量分数及RuBP羧化酶基因表达的影响[J].西北农业学报,2018,27(9):1280-1286.
- [3] 李亚婷,朱荣,李昱,等.小麦早衰研究综述[J].农业科学研究,2015,36(3):57-62.
- [4] 张晓琳,陈梦恬,翟鹏辉,等.增水和施肥对苜蓿-冬小麦轮作系统冬小麦叶片光合速率和叶绿素含量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2019,39(4):40-46.
- [5] 宋廷宇,何自涵,程艳,等.菜心叶片SPAD值与叶绿素含量的相关性分析[J].东北农业科学,2017,42(1):34-37.
- [6] 宋廷宇,吴春燕,常雪,等.西葫芦叶片SPAD值与叶绿素含量相关性分析[J].吉林农业科学,2014,39(3):67-70.
- [7] 薛香,吴玉娥.小麦叶片叶绿素含量测定及其与SPAD值的关系[J].湖北农业科学,2010,49(11):2701-2702.
- [8] 向芬,李维,刘红艳,等.茶树叶绿素测定方法的比较研究[J].茶叶通讯,2016,43(4):37-40.
- [9] 李得孝,郭月霞,员海燕,等.玉米叶绿素含量测定方法研究[J].中国农学通报,2005,21(6):153-155.
- [10] 苏正淑,张宪政.几种测定植物叶绿素含量的方法比较[J].植物生理学报,1989(5):77-78.
- [11] 惠杜娟,冀乙萌,李瑞梅,等.木薯中两种叶绿素提取方法的比较及其含量测定[J].基因组学与应用生物学,2011,30:1279-1283.
- [12] 洪法水,魏正贵,赵贵文.菠菜叶绿素的浸提和协同萃取反应[J].应用化学,2001,18(7):532-535.
- [13] 于志刚,张经,张耀红,等.提取测定大型海藻叶绿素a的新方法[J].海洋科学,1997(5):1-2.
- [14] 杨彩根,宋学宏,孙丙耀.浮游植物叶绿素a含量简易测定方法的比较[J].海洋科学,2007(1):6-9.
- [15] 何丽斯,苏家乐,刘晓青,等.高山杜鹃叶片叶绿素含量测定及其与SPAD值的关系[J].江苏农业科学,2012,40(11):190-191.
- [16] 徐芬芬,叶利民,徐卫红,等.小白菜叶绿素含量的测定方法比较[J].北方园艺,2010(23):32-34.
- [17] 徐澜,许冰霞,张珺,等.不同材料叶绿素提取条件探究[J].广州化工,2017,45(9):102-105.
- [18] Wang S P, Zhang Y X, Song Q L, et al. Mitochondrial dysfunction causes oxidative stress and tapetal apoptosis in chemical hybridization reagent-induced male sterility in wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2018(8): 2217.
- [19] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等.棉花上部叶片叶绿素SPAD值动态变化研究[J].中国农学通报,2012,28(3):121-126.
- [20] 苏正淑.叶绿素测定条件及几种作物叶绿素含量的研究[J].沈阳农学院学报,1982(1):81-86.
- [21] 彭京青,赵海风,庞光惠.小麦高产节水栽培技术综述[J].山东省农业管理干部学院学报,2005(5):173.
- [22] Jacob-Wilk D, Holland D, Goldschmidt E E, et al. Chlorophyll breakdown by chlorophyllase: isolation and functional expression of the chlase1 gene from ethylene-treated citrus fruit and its regulation during development[J]. Plant Journal, 2010(20): 653-661.

(责任编辑:王丝语)

(上接第110页)

参考文献:

- [1] Han W Y, Ma L F, Shi Y Z, et al. Nitrogen release dynamics and transformation of slow release fertiliser products and their effects on tea yield and quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 88(5): 839-846.
- [2] Han Z Y, Zhu X C, Fang X Y, et al. Hyperspectral estimation of apple tree canopy LAI based on SVM and RF regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 800-805.
- [3] 陈百翠,魏峭嵘,石瑛,等.SPAD值在马铃薯氮素营养诊断和推荐施肥中的研究与应用[J].吉林农业科学,2014,39(4):26-30,38.
- [4] 姚霞,朱艳,田永超,等.小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J].中国农业科学,2009,42(8):2716-2725.
- [5] 贾学勤,冯美臣,杨武德,等.基于多植被指数组合的冬小麦地上干生物量高光谱估测[J].生态学杂志,2018,37(2):424-429.
- [6] 黄春燕,王登伟,曹连莆,等.棉花地上鲜生物量的高光谱估算模型研究[J].农业工程学报,2007,23(3):131-135.
- [7] 刘斌,任建强,陈仲新,等.冬小麦鲜生物量估算敏感波段中心及波宽优选[J].农业工程学报,2016,32(16):125-134.
- [8] 任建强,吴尚蓉,刘斌,等.基于Hyperion高光谱影像的冬小麦地上干生物量反演[J].农业机械学报,2018,49(4):199-211.
- [9] Millard P, Wright G, 杨帆.根据红光和近红外光谱区的反射率估算马铃薯的光截获量和生物量[J].气象科技,1991(6):47-51.
- [10] 蔡兆伟,孙玉军,刘凤娇.长白落叶林下灌木生物量模型研究[J].河南农业科学,2013,42(6):126-129.
- [11] 牛庆林,冯海宽,杨贵军,等.基于无人机数码影像的玉米育种材料株高和LAI监测[J].农业工程学报,2018,34(5):73-82.
- [12] 仇瑞承,苗艳龙,张漫,等.基于线性回归的玉米生物量预测模型及验证[J].农业工程学报,2018,34(10):131-137.
- [13] Abrera-bosquet L, Molero G, Stellacci A M, et al. NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions[J]. Cereal Research Communications, 2011, 39: 147-159.
- [14] Pradhan S, Bandyopadhyay K K, Sahoo R N, et al. Predicting wheat grain and biomass yield using canopy reflectance of booting stage[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2014, 42(4): 711-718.
- [15] 吴伟斌,李佳雨,张震邦,等.基于高光谱图像的茶树LAI与氮含量反演[J].农业工程学报,2018,34(3):195-201.

(责任编辑:王丝语)