

基于多载荷无人机遥感的大豆地上鲜生物量反演

陆国政^{1,2,3}, 杨贵军², 赵晓庆², 王艳杰¹, 李长春¹, 张小燕³

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 3. 南京农业大学 国家大豆改良中心, 江苏 南京 210095)

摘要:以多载荷无人机获取数据和地面实测的数据为基础,将大豆生殖生长期分段建模,采用植被指数和光谱参数相结合再加上农学参数株高,通过最小二乘法建立多元线性回归模型的方法,来估算大豆开花期和结荚期的鲜生物量,采用高光谱植被指数法估算大豆鼓粒期和成熟期的鲜生物量。结果表明:在大豆开花期和结荚期内,采用混合法构建生物量反演模型利用交叉验证法,验证结果的 R^2 和 RMSE 分别为 0.714 和 0.393;在大豆鼓粒期和成熟期内,采用高光谱植被指数法构建生物量反演模型,利用交叉验证法,验证结果的 R^2 和 RMSE 分别为 0.697 和 0.386;大豆开花结荚期构建的模型和鼓粒成熟期构建的模型都有比较高的精度和可靠性,利用这两种模型完成了高光谱影像鲜生物量的遥感空间制图,能反映当地当时大豆的真实长势情况。

关键词:无人机;遥感;载荷;生物量;植被指数;大豆

中图分类号:P237;S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.01.0041

Inversion of Soybean Fresh Biomass Based on Multi-payload Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

LU Guo-zheng^{1,2,3}, YANG Gui-jun², ZHAO Xiao-qing², WANG Yan-jie¹, LI Chang-chun¹, ZHANG Xiao-yan³
(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Beijing Agricultural Information Technology Research Center, Beijing 100097, China; 3. Nanjing Agricultural University, National Center for Soybean Improvement, Nanjing 210095, China)

Abstract: In this study, based on the UAV payload data and ground measured data, different soybean productive growth periods were modeled, vegetation index and spectral parameters combine agronomic parameters plus the height multiple linear scale back by least squares method were used to estimate the biomass of fresh soybean flowering and fruiting period, and hyperspectral vegetation index were use to estimate soybean drum fresh biomass and maturity of grain. The results showed that, during soybean flowering and fruiting period, verification results of R^2 and RMSE were 0.714 and 0.393, respectively, by using of biomass mixing build inversion model using cross-validation. During soybean seed filling stage and mature period, verification results of R^2 and RMSE were 0.697 and 0.386, respectively, by using of hyperspectral vegetation index build biomass inversion model using cross-validation. Models of soybean podding and seed filling to maturity periods both had a relatively high accuracy and reliability, using these two models to complete the hyperspectral remote sensing image of fresh biomass mapping could reflect the real growth situation of soybeans.

Keywords: Unmanned aerial vehicle; Remote sensing; Multi-payload; Biomass; The vegetation index; Soybean

生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质总量,是生态系统研究中最重要生物物理参数之一,并且作物的叶面积与地上生物量之间有着密切的关系^[1]。作物地上鲜生物量是反映作物生长状况的重要指标,它的大小与作物群体的光能利用、产量和品质的形成密切相关^[2]。因此,准确地进行生物量估算对于了解作物生长情况十分重要,传统方法在获取的生物量方面存在时间和空间上的局限性^[3-5]。遥感技术不仅可以为预测生物量的模型提供数据,而且可以直接用于生物量的估算和制图。与传统的生物量估算方法比较,可以更为快速、准确、无破坏地对生物量进行估算,对生态系统进行宏观监测。王建步等^[3]研究了基于高分一号 WFV 卫星数据,通过计算植被指数,结合黄河口湿地现场草本植被地上干生物量样本进行回归分析,从中选出生物量最佳估算模型。高明亮等^[4]

收稿日期:2016-08-15
基金项目:北京市自然科学基金(4141001);北京市农林科学院科技创新能力建设项目(KJCX20140417);国家自然科学基金(41271345, 41471351)。
第一作者简介:陆国政(1991-),男,硕士,主要从事农业遥感研究。E-mail:1450018989@qq.com。
通讯作者:杨贵军(1975-),男,研究员,主要从事农业定量遥感机理及精准农业应用研究。Email:guijun.yan@163.com。

研究了基于环境卫星遥感数据和地面实测数据,比较了多元线性回归模型和一元曲线回归模型反映植被生物量的能力,并估算研究区植被生物量。刘芳等^[5]研究了基于资源3号遥感卫星数据和地面实测数据,将纹理因子与光谱因子、地形因子一起与实地样地数据建立生物量模型,进行生物量反演。催霞等^[6]研究了基于MOD09GA产品提取了光谱反射率值,计算了17种植被指数,综合研究了植被指数与生物量之间的相关性及草地地上生物量遥感反演模型。

由于卫星影像受到、云层以及雨雪的干扰,严重影响生物量反演精度^[7]。通过卫星影像反演生物量不仅成本高而且耗时长,通过无人机搭载多传感器获取的影像数据在一定程度上弥补了卫星影像的获取周期长、受天气影响大、成本高等缺点,无人机可适用于长时间飞行、恶劣环境的遥感任务,开始应用于农业、林业、灾害勘测等民用领域,但所搭载的遥感任务载荷大多是单载荷,其质量和体积都在小型或微小型量级上,难以执行高精度、大范围的复杂遥感任务,无人机常用的任务载荷包括多光谱、高光谱、热成像仪、数码相机等。目前,很多学者也开始用无人机遥感来精细获取农作物表型信息,如杨贵军等^[8]利用无人机搭载多个传感器来辅助小麦育种信息的获取。高林等^[9]利用多旋翼无人机搭载高清数码相机和多光谱传感器获取的作物信息对大豆叶面积指数反演,从而提出一套指导精准农业研究的方法。然而通过无人机遥感这一技术手段来反演作物生物量的研究报道还比较少,所以本文用无人机遥感这一技术手段来获取中小面积的大豆影像数据,从而进行大豆生物量的估算。目前,很多学者研究了很多利用植被指数进行生物量的反演。如Hame等^[10]结合地面调查,利用TM和AVHRR数据对数百万平方公里欧洲森林生物量的估算。李素英等^[14]研究了基于TM影像数据建立5种植被指数与地上生物量的线性及3种非线性关系回归模型来反演锡林浩特草原的生物量。但单一用植被指数反演生物量时还存在一些问题,比如植被指数出现饱和情况,单一植被指数反演生物量时可能只适用单一作物,不能普及,没有推广性。

本文以多载荷无人机获取数据和地面实测的数据为基础,将大豆全生育期分段建模,采用植被指数和光谱参数相结合再加上农学参数株高,通过最小二乘法建立多元线性回归模型的方法来估算

大豆开花期和结荚期的鲜生物量,采用高光谱植被指数法估算大豆鼓粒期和成熟期的鲜生物量。最终,用两种模型对大豆生殖生长期生物量进行反演填图,从而快速有效监测大豆生物量和长势情况,为辅助大豆育种提供了便利。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区域位于山东省济宁市西部,E116°22'10"~116°22'20",N35°25'50"~35°26'20"的国家大豆改良中心圣丰试验站大豆育种基地,属黄河冲积平原。前茬作物为小麦,土质为黏壤土,土壤pH7.9,属暖温带季风区大陆性气候,春暖秋爽,夏热冬冷,降水集中,雨热同季,四季分明。多年平均气温13.9℃,大于或等于0℃的积温为5 136℃,大于或等于10℃的积温为4 644℃。研究区域日照较充足,年平均日照时数为2 405.2 h,无霜期210.7 d。该区以小麦、玉米、大豆为主。

1.2 试验设计

试验于2015年在山东省济宁市山东圣丰种业科技有限公司12号地进行,试验区面积为2.1 hm²。6月13日开始用温特斯泰格小区点播机播种大豆,播种方式为精量点播法,播种密度为19.5万株·hm⁻²,播种深度为5 cm,行间距为0.5 m、行长为5 m,4行区,底肥播种时施复合肥300 kg·hm⁻²(氮磷钾各含15%)。尿素设2个处理:0,450 kg·hm⁻²(正常),分基肥和追肥各1/2施用;供试大豆品种51个,种植306个小区,重复3次。田间管理方式采用常规管理。

利用八旋翼电动无人机(无人机净重约6 kg,飞行时间20 min,飞行高度50 m),同步搭载高清数码相机(表1)和成像高光谱仪(表2)对研究区进行连续飞行监测,共进行5次观测,日期分别为:8月1日(开花期)、8月13日(结荚期)、9月1日(鼓粒初期)、9月17日(鼓粒盛期)、9月30日(成熟期)。

在大豆品比种植区同时开展地面取样,选取试验区内长势及品种具有代表性的63个育种小区进行田间取样,为不影响品种正常选育,在每个小区的边缘行取2株长势均匀的大豆作为试验样本。用实验室高精度天平测量大豆鲜生物量,平均后得到小区大豆鲜生物量(FB),并经烘箱烘干后精确量测小区大豆干生物量(DB),并计算单位面积上的干生物量和鲜生物量。用直尺测量63个育种小区的株高,每个小区测3次,最终取其平均值得到小区株高。

表 1 高清数码相机的主要参数

Table 1 Main parameters of high-definition digital camera

参数 Parameter	参数值 Parameter value	参数 Parameter	参数值 Parameter value
型号 Model	Canon Powershot G16	生产厂家 The manufacturer	Canon
传感器尺寸 Sensor size/mm	7.530 × 5.647	质量 Quality/g	356
焦距长度 Focal length/mm	6	采集频率 Sampling frequency/Hz	12
照片像素数 Photo number	4000 × 3000	波段范围 Wavelength range	红、绿、蓝 Red, Green, Blue
视场角 Viewing angle/°	63.4 × 49.7	地面分辨率 The ground resolution/m	0.016

表 2 成像高光谱仪的主要参数

Table 2 Main parameters of High imaging spectrometer

参数 Parameter	参数值 Parameter value	参数 Parameter	参数值 Parameter value
型号 Model	UHD 185	光谱覆盖范围 Spectral range/nm	454 ~ 950
品牌 Brand	Cubert	光谱分辨率 Spectral resolution/nm	4
像元分辨率 Pixel resolution/m	0.034	扫描速度 Scanning speed/lines	15 ~ 60
视场角 Viewing angle/°	20	标准镜头焦距 The standard lens focal length/mm	25

1.3 数据处理方法及流程

1.3.1 数据处理方法 数据处理主要由无人机影像数据的处理和地面实测数据处理两部分组成。首先,处理无人机遥感影像,包括数码影像拼接和高光谱影像拼接,然后,将拼接好的影像进行预处理。最后,根据处理好的高清数码正射影像进行小区划分,在 ArcGIS 软件中,通过画好后的小区矢量和几何校正后的高光谱影像进行小区平均光谱反射率和株高的提取。

本文选取红边位置 (REP)、绿峰峰值 (R_G)、红光吸收谷 (R_R)、绿峰与红谷的比值 (R_G/R_R) 和绿峰和红谷的归一化值 [$(R_G - R_R)/(R_G + R_R)$] 共 5 种光谱参数^[12], NDVI、RVI、DVI、OSAVI、VOG1、PRI、NDVI₇₀₅ 共 7 种植被指数 (表 3) 和株高作为反演生物量的因子,采用多元线性回归模型进行大豆生物量的反演。

表 3 参试的植被指数

Table 3 Tested vegetation index in this study

植被指数 Vegetation index	公式 Formula
归一化植被指数 NDVI	$NDVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})$
比值植被指数 RVI	$RVI = R_{nir} / R_{red}$
差值植被指数 DVI	$DVI = R_{nir} - R_{red}$
优化土壤调节植被指数 OSAVI	$OSAVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red} + 0.16)$
红边归一化植被指数 NDVI ₇₀₅	$NDVI_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$
红边植被指数 VOG1	$VOG1 = R_{740} / R_{720}$
光化学植被指数 PRI	$PRI = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$

在大豆开花和结荚期中采用混合法进行生物量的估算,混合法就是用植被指数和光谱参数相结合再加上农学参数株高通过最小二乘法建立多元线性回归模型来估算大豆鲜生物量的一种方法。在大豆鼓粒期和成熟期中采用高光谱植被指数法进行生物量的估算,高光谱植被指数法就是首先用灰色关联分析法来排序植被指数,然后通过偏最小二乘法排除相关关系高的植被指数,选择相关关系

小的植被指数参与回归建模,最后采用赤池信息量准则选择特定的植被指数建立多元线性回归模型来估算大豆鲜生物量的一种方法。

1.3.2 技术流程 大豆生物量反演的分析流程如图 1 所示,其中,首先是无人机遥感数据的收集、预处理和分析,得出该研究区的株高、光谱参数和植被指数,然后是地面实测数据的收集与处理,最后是大豆生殖生长期分段建模与模型精度验证。

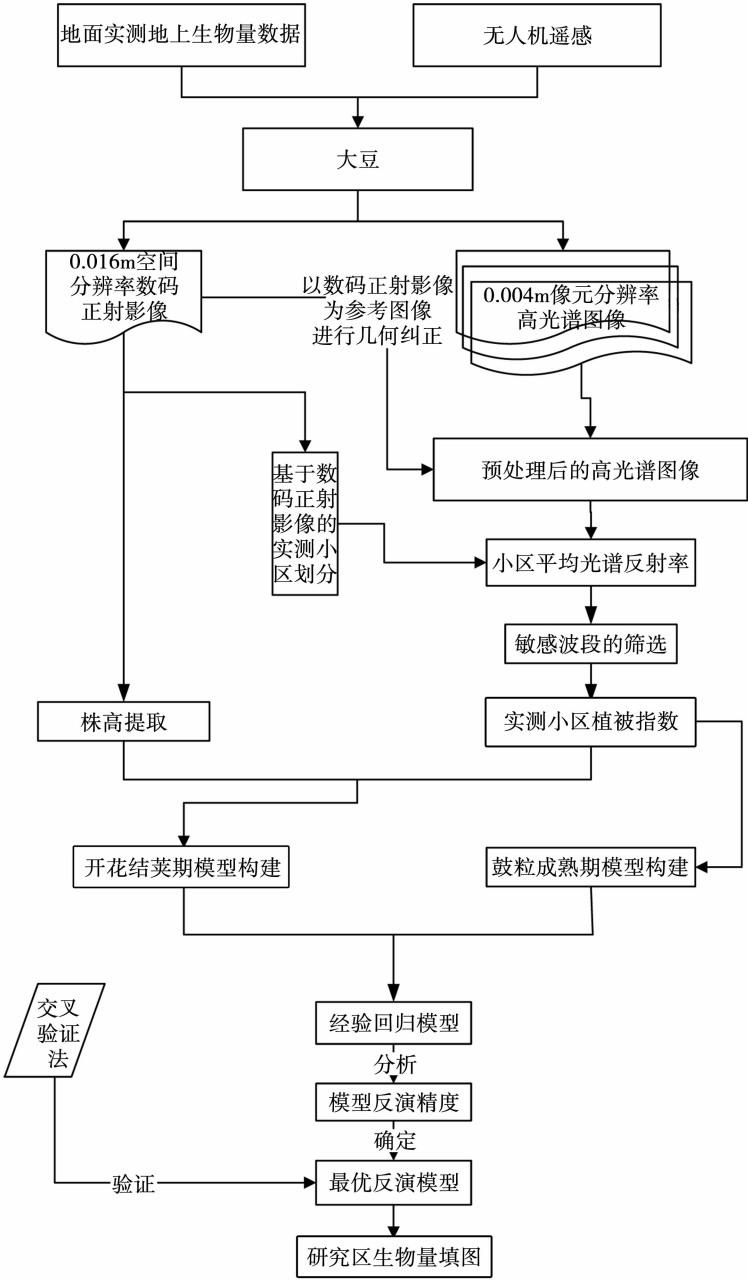


图 1 大豆生物量反演技术流程图

Fig. 1 Soybean biomass inversion technique flow chart

2 结果与分析

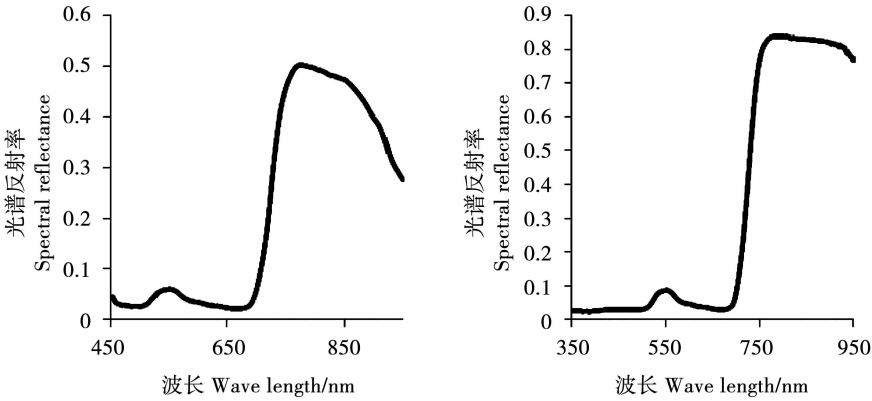
大豆生物量受多因素影响,生育期相对较长。想要通过建立一个模型来反演大豆整个生育期生

物量是很难实现的,模型精度不高,达不到实际需求。因此,需要分段建模来反演生物量。本文根据实际需求将大豆生殖生长期分成两段,开花期和结荚期为一段,鼓粒期和成熟期为另一段。

2.1 高光谱成像数据质量验证

如图 2 所示,机载高光谱曲线趋势基本上与地面 ASD 高光谱曲线趋势是一致的,机载高光谱曲线在 900 nm 处之后,光谱反射率出现了大幅度下降,与前人研究结论一致, Bareth 等^[13] 指出 UHD185 获取到的作物冠层光谱反射率在超过 900

nm 以后会出现反射率大幅下降;Aasen 等^[14] 更是指出 466 ~ 850 nm(第 5 ~ 100 波段)的 UHD185 光谱数据具有较好的辐射分辨率和光谱质量,所以本文选用 850 nm 前的波段来反演生物量是可行的。



a: 无人机机载高光谱曲线; b: 地面 ASD 高光谱曲线。
a: UAV airborne hyperspectral curve; b: The ground ASD hyperspectral curve.

图 2 大豆冠层高光谱曲线
Fig. 2 Soybean crown height spectrum curve

2.2 构建大豆开花期和结荚期生物量反演模型

2.2.1 反演因子的确定 根据 NDVI、RVI、DVI 和 OSAVI 的公式,分别选取红波段任意一个和近红外波段任意一个组合计算归一化植被指数、比值植被指数、差值植被指数和优化土壤调节植被指数,分别与大豆开花结荚期的鲜生物量进行敏感性分析。结果表明,利用 642 和 850 nm 处反射率计算得到的 NDVI 与鲜生物量相关性最大,决定系数达到 0.616;利用 750 和 766 nm 处反射率计算得到的 RVI 与鲜生物量相关性最大,决定系数达到 0.616;利用 754 和 770 nm 处反射率计算得到的 DVI 与鲜生物量相关性最大,决定系数达到 0.672;利用 642 和 850 nm 处反射率计算得到的 OSAVI 与鲜生物量相关性最大,决定系数达到 0.701;通过筛选出的敏感波段构建的 4 种植被指数和 3 种固定波段构建的 3 种植被指数共 7 种植被指数作为参与生物量反演的植被指数因子。

通过采用一阶微分分析法得出,在 726 nm 处的一阶微分值最大,即红边位置。在绿光范围内,554 nm 处的光谱反射率最大,即绿峰峰值。在红光范围内,666 nm 处的光谱反射率最小,即红光吸收谷。绿峰与红谷的比值和归一化值的建立。总共 5 种光

谱参数作为参与生物量反演的因子。

由于在大豆开花结荚期中,株高增长较快,与生物量呈极显著的正相关关系。株高对生物量的影响极大,在开花结荚期中,本文将株高作为参与大豆生物量反演的农学因子。而在鼓粒成熟期中,株高趋于稳定,变化不大,对生物量影响较小,所以株高不作为参与大豆生物量反演的农学因子。株高提取的流程主要包括:(1)根据高清数码影像及影像拍摄时刻的 POS 信息(无人机飞行经纬度、高度、翻转、俯仰及旋转角度),采用测绘学自由网平差方法,经高精度空三加密解算得到育种田块的 DSM 分布图。(2)由精确 DSM 图,可提取得到每个育种小区离散地面高程值,采用克里金插值法得到育种基地地形趋势。(3)利用育种基地 DSM 与育种基地地形趋势图相减,并利用少量实测株高进行标定后得到小区高分辨率株高(图 3)。

在地面测量上,随机选择 63 个小区,通过用卷尺测得 63 个小区的株高与通过上述方法预测的株高进行精度验证,由图 4 可得,预测株高和实测株高基本上在一条直线上,相差不大,基本上可以用预测的株高来代替实测的株高。

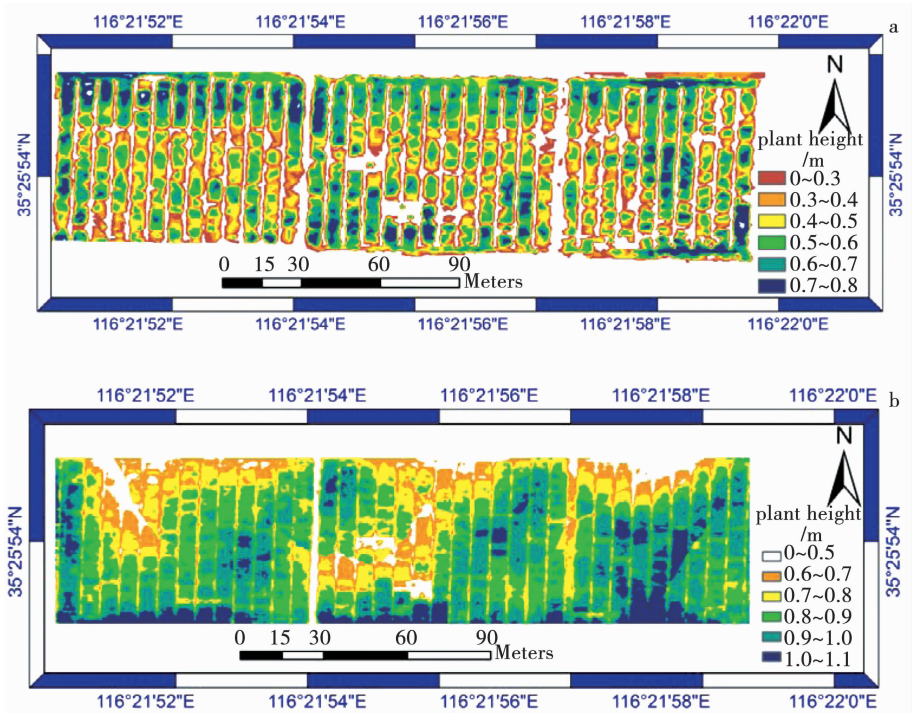


图3 大豆品比区中的开花(a)和结荚期(b)的株高分布图

Fig.3 Distribution of plant height flowering(a) and podding(b) stage

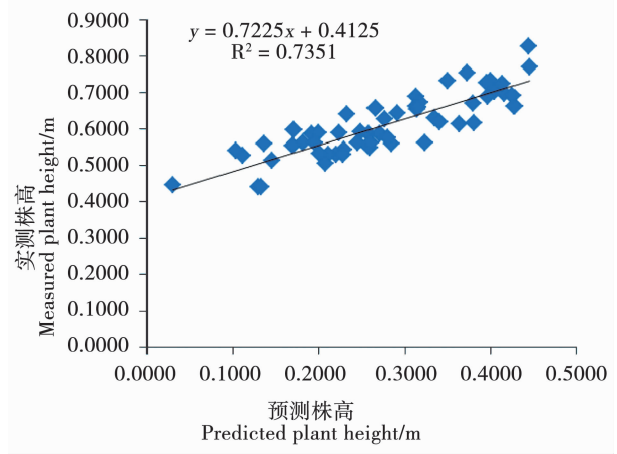


图4 实测与预测株高之间的关系

Fig.4 The relationship between the predicted and the measured plant height

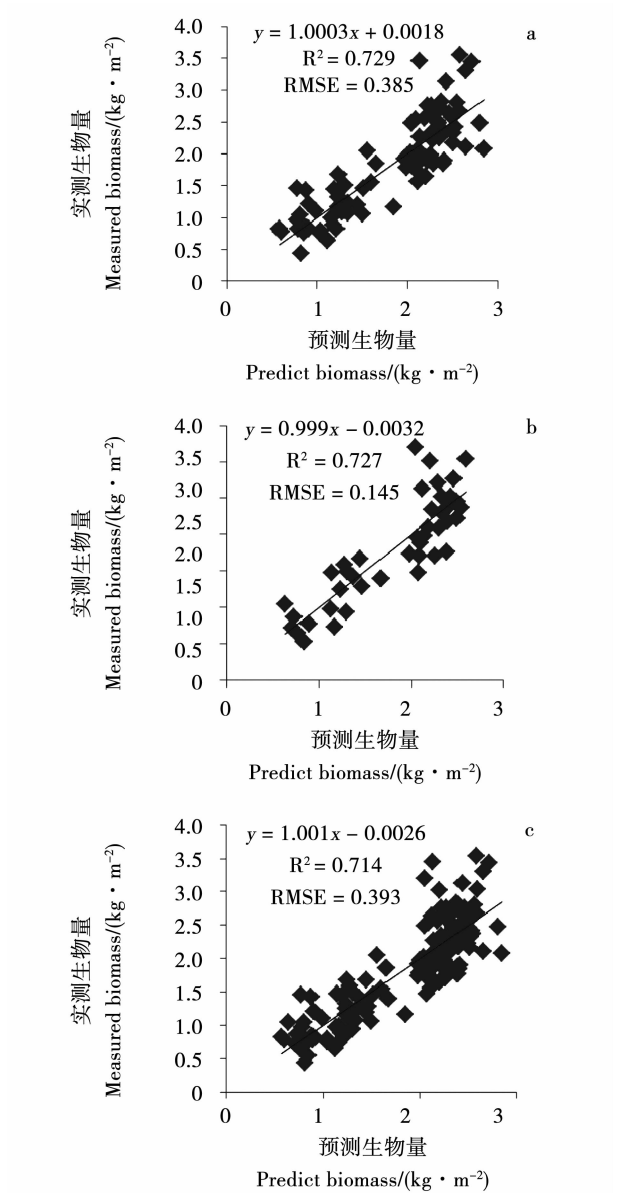
2.2.2 建模与验证 利用2015年山东圣丰品比种植区开花期和结荚期大豆的实测生物量的数据,通过上述参与生物量反演的因子,满足参与建模因子

尽量少且达到反演生物量的精度要求,建模组合因子的决定性系数最大的原则,筛选了2个植被指数、红边位置和株高作为自变量的生物量最优估算模型。2个植被指数分别为NDVI₇₀₅和OSAVI。从表4和图5可以看出,用植被指数和光谱参数相结合再加上农学参数株高,通过最小二乘法建立多元线性回归模型来估算大豆鲜生物量,用2/3样本建模,R²和RMSE分别为0.729和0.385,其建模精度较为理想。为了验证模型的精度,利用剩下的样本个数进行验证,结果显示R²和RMSE分别为0.727和0.145,由于上述选择建模样本和验证样本具有不确定性,所以本文再次用交叉验证法来进行生物量的估算,结果显示R²和RMSE分别为0.714和0.393,预测值和实测值的散点图具有较好的一致性,该算法与生物量的相关性达到极显著水平,表明采用混合法进行生物量估算具有较好的可靠性。

表4 生物量的估算与验证

Table 4 Estimation and validation of Biomass

建模方法 Modeling method	建模 Modeling			验证 Validation			交叉验证 Cross validation		
	样本个数 Samples	R ²	RMSE	样本个数 Samples	R ²	RMSE	样本个数 Samples	R ²	RMSE
混合法 Mixing method	84	0.729	0.385	42	0.727	0.145	126	0.714	0.393



a:2/3 样本建模;b:1/3 样本验证;c:交叉验证。
a: Modeling by two-thirds of sample; b: Validation by a third sample; c: Cross validation.

图 5 混合法中生物量预测值与实测值之间的关系
Fig.5 The relationship between the hybrid method of biomass predicted and the measured values

表 5 植被指数与生物量之间灰色关联度大小顺序					
Table 5 Grey relational degree and rank of evaluation index for biomass at the whole growth stages					
评估指数	灰色关联度	顺序	评估指数	灰色关联度	顺序
Assessment index	Grey correlation degree(ε = 0.5)	Order	Assessment index	Grey correlation degree(ε = 0.5)	Order
RVI	0.822187	1	OSAVI	0.495531	6
R ₁	0.748554	2	R ₂	0.482233	7
VOG1	0.642224	3	DVI	0.480604	8
NDVI	0.513611	4	PRI	0.457061	9
NDVI ₇₀₅	0.496053	5			

大豆开花期和结荚期的生物量反演模型为

$$\text{Biomass} = 3.3988 + 19.9728\text{OSAVI} - 16.9473\text{NDVI}_{705} - 9.3464\text{R}_{726} + 0.016638\text{PH} \quad (1)$$

式中: Biomass 为生物量, OSAVI 和 NDVI₇₀₅ 分别为优化土壤调节植被指数和红边归一化植被指数, R₇₂₆ 为红边位置, PH 为株高。

2.3 大豆鼓粒期和成熟期的生物量反演模型的构建

2.3.1 反演因子的确定 通过 NDVI、RVI、DVI 和 OSAVI 的计算公式, 分别选取红波段任意一个和近红外波段任意一个组合计算归一化植被指数、比值植被指数、差值植被指数和优化土壤调节植被指数, 分别与大豆开花结荚期的鲜生物量进行敏感性分析。结果表明, 利用 622 和 850 nm 处反射率计算得到的 NDVI 与鲜生物量相关性最大, 决定系数达到 0.630; 利用 710 和 834 nm 处反射率计算得到的 RVI 与鲜生物量相关性最大, 决定系数达到 0.612; 利用 710 和 824 nm 处反射率计算得到的 DVI 与鲜生物量相关性最大, 决定系数达到 0.539; 利用 622 和 850 nm 处反射率计算得到的 OSAVI 与鲜生物量相关性最大, 决定系数达到 0.569; 通过筛选出的敏感波段构建的 4 种植被指数和 3 种固定波段构建的 3 种植被指数共 7 种植被指数作为参与生物量反演的植被指数因子。将绿峰与红谷的比值 R_G/R_R 记为 R₁, 绿峰与红谷归一化值 $[(R_G - R_R)/(R_G + R_R)]$ 记为 R₂, 也作为参与生物量反演的植被指数因子。

2.3.2 建模与验证 两种光谱参数被当作 2 个新型的植被指数和原来 7 种常用植被指数共记 9 种植被指数与生物量进行灰色关联度分析, 从表 5 可以看出, 植被指数与生物量的灰色关联度大小顺序为: RVI > R₁ > VOG1 > NDVI > NDVI₇₀₅ > OSAVI > R₂ > DVI > PRI。植被指数中的 RVI 是关联度最高的, 关联度为 0.822, 关联度最低的是 PRI, 关联度是 0.457。

利用 AIC 确定最优回归模型指标,当进入方程的植被指数自变量根据灰色关联度顺序参与回归时,AIC 值在各个回归方程中的值发生了变化。当 4 个植被指数参与回归时,AIC 值最小,最小值为 -233.13。AIC 的原则是寻找可以更好解释数据但包含最少自由参数的模型,因此选择 4 个植被指数自变量参与回归的模型作为最优方程。

利用 2015 年山东圣丰大豆鼓粒期和成熟期的数据,建立了以 4 个植被指数作为自变量的生物量最优估算模型。前 4 个植被指数分别为 RVI、R₁、VOG1 和 NDVI。其估算结果见表 7 和图 6。从表 7 可以看出,用高光谱植被指数法估算大豆生物量,用 2/3 样本建模,R² 和 RMSE 分别为 0.73 和 0.376,其建模精度较为理想。为了验证模型的精度,利用剩下的样本个数进行验证,结果显示 R² 和 RMSE 分别为 0.698 和 0.238,而用交叉验证法来进行生物量的估算,结果显示 R² 和 RMSE 分别为

0.697 和 0.386。从图 6 可以看出,预测值和实测值的散点图具有较好的一致性,该算法与生物量的相关性达到极显著水平,表明采用高光谱植被指数法进行生物量估算具有较好的可靠性。

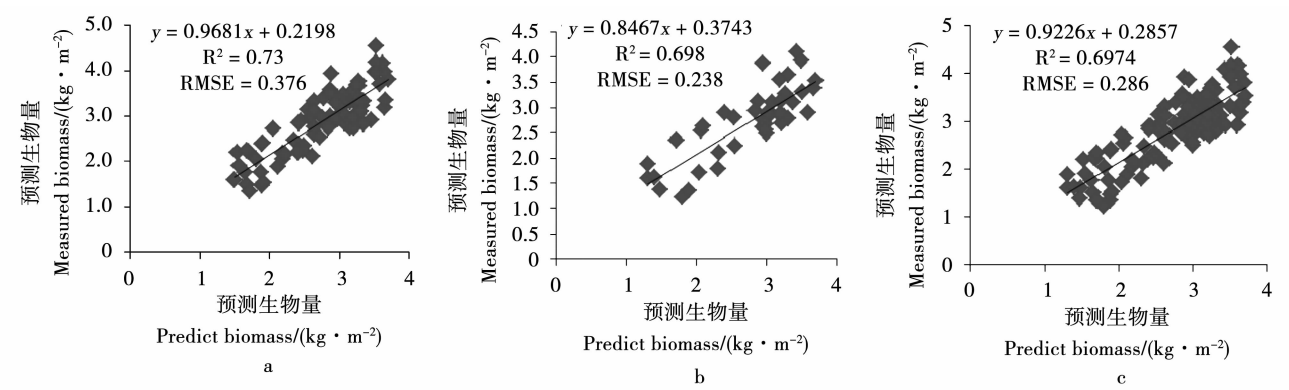
表 6 AIC 值比较
Table 6 Comparison of PLS

自变量个数 The number of the independent variables	AIC
1	-182.93
2	-213.90
3	-213.53
4	-233.13
5	-231.14
6	-229.26
7	-227.48
8	-225.58
9	-225.70

表 7 生物量的估算与验证

Table 7 Estimation and validation of Biomass

建模方法 Modeling method	建模 Modeling			验证 Validation			交叉验证 Cross validation		
	样本个数 Samples	R ²	RMSE	样本个数 Samples	R ²	RMSE	样本个数 Samples	R ²	RMSE
指数法 Index method	84	0.73	0.376	42	0.698	0.238	126	0.697	0.386



a;2/3 样本建模;b;1/3 样本验证;c;交叉验证。
a;Modeling by two-thirds of sample;b;Validation by a third sample;c;Cross validation.

图 6 高光谱植被指数法中生物量预测值与实测值之间的关系

Fig. 6 Hyperspectral vegetation index method in the biomass of the relationship between predicted values and the measured values

大豆鼓粒期和成熟期的生物量反演模型为：
$$\text{Biomass} = 2.987 + 0.576\text{RVI} - 0.051\text{R}_1 - 3.782\text{VOG1} + 6.526\text{NDVI} \quad (2)$$

式中：Biomass 为生物量,RVI、VOG1 和 NDVI 分别为比值植被指数、红边植被指数和归一化植被指数,R₁为绿峰与红谷的比值(R_c/R_r)。

2.4 研究区大豆生殖生长期生物量反演

利用大豆开花期和结荚期的生物量反演模型对研究区的两个生育时期的大豆生物量进行反演填图,反演结果如图 7 所示,图 7 中大豆开花期和结荚期的生物量分布情况专题图和根据地面实测的

生物量数据进行对比可以看出,反演结果基本上反映了研究区大豆开花期和结荚期的生物量的真实情况。利用大豆鼓粒期和成熟期的生物量反演模型对研究区的两个生育时期的大豆生物量进行反演填图,反演结果如图 8 所示,通过目视解译可以看出图上预测的生物量和地面采样实测的生物量基本上是一致的,在误差范围内。从大豆生殖生长期专题图中可以看出开花期到鼓粒期大豆生物量是逐渐增加的,到了大豆成熟期生物量又有降低的趋势,这是由于叶子的脱落和籽粒脱水造成的,在成熟期专题图中,有些区域是空白的这是由于哪些区

域的大豆收获了,图上看出的大豆鲜生物量变化的规律与大豆实际长势情况是一致的。说明通过将大豆生殖生长期分段建模来估算大豆生物量,能够真实反映出大豆生物量情况和大豆长势情况,通过

无人机同步搭载的成像高光谱仪和数码相机获取的影像数据来进行大豆生物量反演是可行的,这为辅助大豆育种提供了一种简洁有效的技术手段。

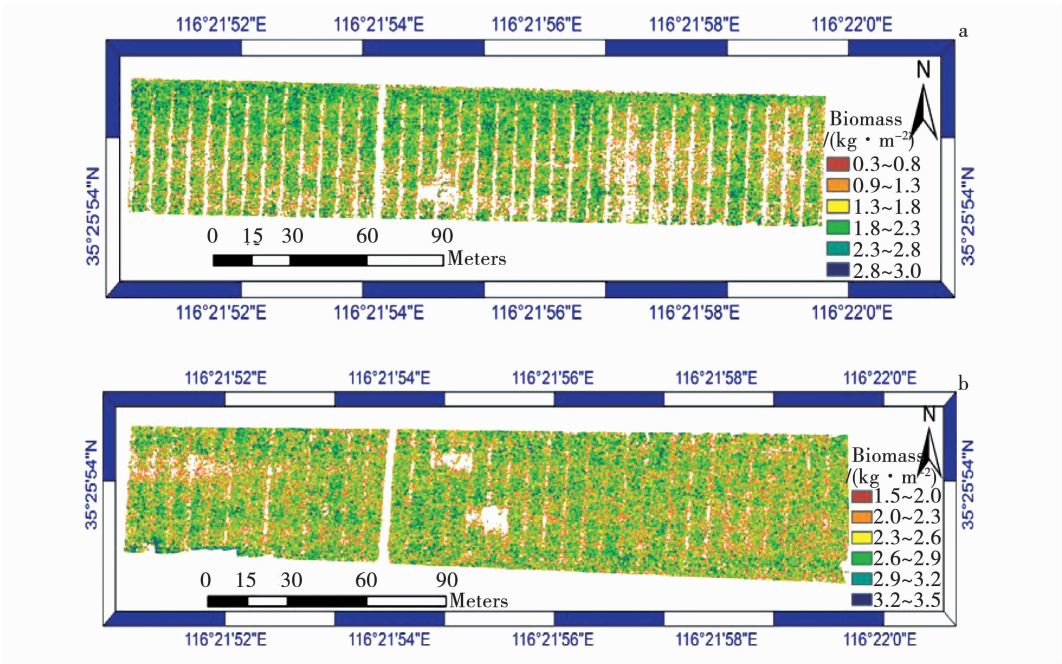


图 7 大豆开花期 (a) 和结荚期 (b) 的鲜生物量反演专题图
Fig. 7 Soybean flowering (a) and podding (b) stage the biomass inversion thematic map

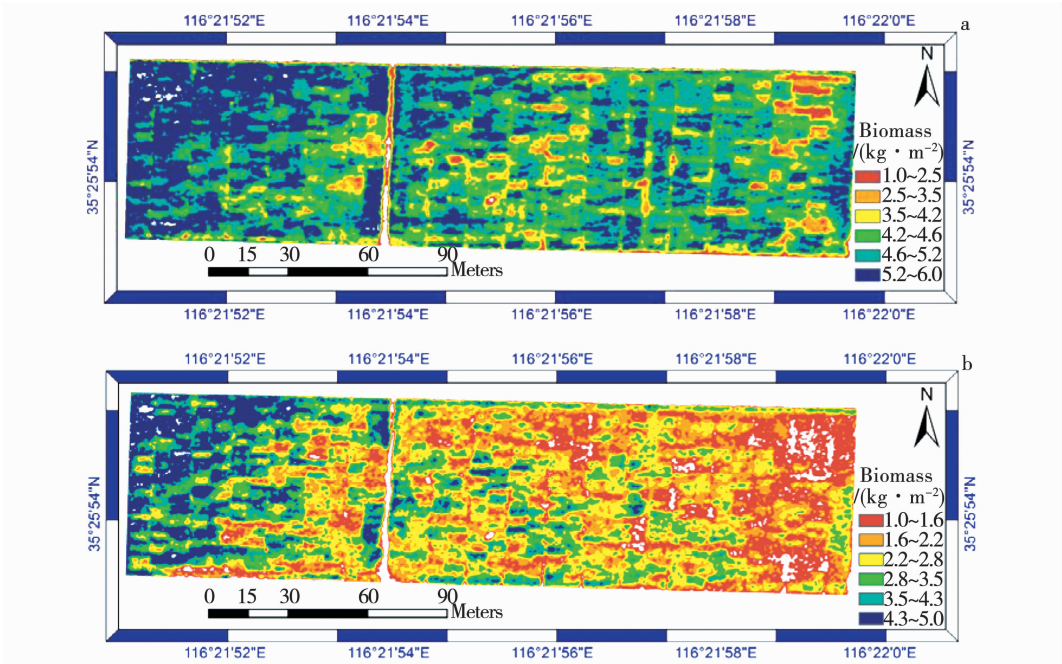


图 8 大豆鼓粒期 (a) 和成熟期 (b) 的鲜生物量反演专题图
Fig. 8 Soybean seed filling (a) and maturity (b) period of fresh biomass inversion thematic map

3 结论与讨论

当今,无人机遥感技术普遍应用到农业上,通过无人机搭载高清数码相机和多光谱传感器开展无人机遥感数据获取,前人已研究过并获得了巨大的成果。然而利用无人机搭载多个传感器开展无

人机遥感数据获取进行生物量反演,最终辅助农作物育种鲜有报道。本文通过无人机搭载多传感器获取数据,将大豆生殖生长期分段建模,在开花期和结荚期中,采用混合法进行生物量反演计算;在鼓粒期和成熟期中,采用高光谱植被指数法来估算生物量。

由于大豆生殖生长期相对较长,大豆的表型信息变化波动大,所以想要构建一个模型来反演大豆全生育期的生物量是难以实现的,本文采用分段建模的方法来反演大豆生殖生长期的生物量,将开花期和结荚期分为一段,鼓粒期和成熟期分为另一段。通过两段模型来反演大豆生殖生长期的生物量是可行的,精度高,估测出的生物量与实测的生物量基本一致。

在开花期和结荚期中,株高对生物量的影响较大,将株高作为反演生物量的因子将大幅度提高模型的精度。本文采用植被指数和光谱参数相结合再加上农学参数株高通过最小二乘法建立多元线性回归模型的方法来估算大豆开花期和结荚期的鲜生物量,采用混合法构建生物量反演模型,利用交叉验证法,验证结果的 R^2 和 RMSE 分别为 0.714 和 0.393,由此看出具有较高的精度和预测能力。

在鼓粒期和成熟期中,本文采用高光谱植被指数法进行生物量的估算,首先,用灰色关联分析法来排序植被指数,然后,通过偏最小二乘法排除相关关系高的植被指数,选择相关关系小的植被指数参与回归建模,最后,采用赤池信息量准则选择特定的植被指数建立多元线性回归模型来估算大豆鲜生物量。通过这种方法估算大豆生物量能够有效去除植被指数间的相关性,筛选出对生物量敏感的植被指数,进而提高模型精度。

总之,通过多载荷无人机获取的数据进行生物量的估算,能够实时、动态、非破坏性、快速有效地监测大豆群体的生长状况,为以后大豆的生产与管理提供了一种简便使用的方法,最终达到辅助大豆育种的目的。然而,研究中仍有许多不足,首先,本文采用的生物量反演方法是传统的经验法,植被指数的准确性和普适性难以保证;其次,通过多载荷无人机获取的数据来反演生物量,这只适用于中小范围,想要大面积区域反演植物的生物量这是很难做到的;最后,高光谱遥感由于原始数据信息量大、波段多且信息冗余度高等因素,带来了数据处理与分析的极大挑战。

参考文献

[1] 王登伟,黄春燕,马勤建,等. 棉花高光谱植被指数与 LAI 和地上鲜生物量的相关关系研究[J]. 新疆农业科学, 2008,45(5):426-429. (Wang D W, Huang C H, Ma Q J, et al. Relationships between Hyperspectral Vegetative index, LAI and aboveground fresh biomass of cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008,45(5):426-429.)

[2] 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. (Huang C Y, Wang D W, Cao L P, et al. Models for estimating cotton aboveground fresh biomass using hyperspectral data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2007,23(3):131-135.)

[3] 王建步,张杰,马毅,等. 基于高分一号 WFV 卫星影像的黄河口湿地草本植被生物量估算模型研究[J]. 激光生物学报, 2014(6):604-608. (Wang J B, Zhang J, Ma Y, et al. Study on the above ground vegetation biomass estimation model based on GF-1 WFV satellite image in the yellow river estuary wetland[J]. Journal of Laser Biological, 2014(6):604-608.)

[4] 高明亮,赵文吉,宫兆宁,等. 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究[J]. 生态学报, 2013,33(2):542-553. (Gao M L, Zhao W J, Gong Z N, et al. The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):542-553.)

[5] 刘芳,冯仲科,赵芳,等. 资源三号遥感卫星影像的生物量反演研究[J]. 西北林学院学报, 2015,30(3):175-181. (Liu F, Feng Z K, Zhao F, et al. Biomass inversion study of ZY-3 remote sensing satellite imagery[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015,30(3):175-181.)

[6] 崔霞,梁天刚,刘勇. 基于 MOD09GA 产品的草地生物量遥感估算模型[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2009,45(5):79-87. (Cui X, Liang T G, Liu Y. Modeling of aboveground biomass of grassland using remotely sensed MOD09GA data[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2009, 45 (5): 79-87.)

[7] 李继宇,张铁民,彭孝东,等. 小型无人机在农田信息监测系统中的应用[J]. 农机化研究, 2010,32(5):183-186. (Li J Y, Zhang T M, Peng X D, et al. The application of small UAV (SUAV) in farm and information monitoring system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(5):183-186.)

[8] 杨贵军,李长春,于海洋,等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. 农业工程学报, 2015(21):184-190. (Yang G J, Li C C, Yu H Y, et al. UAV based multi-load remote sensing technologies for wheat breeding information acquirement [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015(21):184-190.)

[9] 高林,杨贵军,王宝山,等. 基于无人机遥感影像的大豆叶面积指数反演研究[J]. 中国生态农业学报, 2015(7):868-876. (Gao L, Yang G J, Wang B S, et al. Soybean leaf area index retrieval with UAV remote sensing imagery[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015(7):868-876.)

[10] Hame T, Salli A, Andersson K, et al. A new methodology for the estimation of biomass of coniferdominated boreal forest using NO-AA AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997,18(18):3211-3243.

[11] 李素英,李晓兵,莺歌,等. 基于植被指数的典型草原区生物量模型 - 以内蒙古锡林浩特市为例[J]. 植物生态学报, 2007,31(1):23-31. (Li S Y, Li X B, Ying G, et al. Vegetation indexes-biomass models for typical semi-arid steppe - A case study for xilinhot in northern china[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1):23-31.)

[12] 侯学会,牛铮,黄妮,等. 小麦生物量和真实叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 国土资源遥感, 2012(4):30-35. (Hou X H, Niu Z, Huang N, et al. The hyperspectral remote sensing estimation models of total biomass and true LAI of wheat[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2012(4):30-35.)

[13] Bareth G, Aasen H, Bendig J, et al. Low-weight and UAV-based hyperspectral full-frame cameras for monitoring crops: Spectral comparison with portable spectroradiometer measurements [J]. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation,2015(1):69-79.

[14] Aasen H, Bendig J, Bolten A, et al. Introduction and preliminary results of a calibration for full-frame hyperspectral cameras to monitor agricultural crops with UAVs[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014,7(7):1-8.