

无人机多光谱影像的马铃薯地上生物量估算

刘 杨^{1,2,4}, 孙 乾^{1,4}, 黄 珏², 冯海宽^{1,3,4*}, 王娇娇^{1,4}, 杨贵军^{1,4}

1. 农业部农业遥感机理与定量遥感重点实验室, 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097
2. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590
3. 南京农业大学国家信息农业工程技术中心, 江苏 南京 210095
4. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097

摘 要 地上生物量(AGB)是评估作物生长发育和指导田间农业生产管理的重要指标。因此, 高效精准地获取作物 AGB 信息, 可以及时准确地估算产量, 对于保障粮食供应和贸易提供有力依据。传统获取 AGB 的方法是采用破坏性取样法, 这使得大面积、长期的测量变为困难。然而, 随着精准农业的快速发展, 无人机遥感技术被认为是估算大面积作物 AGB 最有效的技术方式。通过无人机平台搭载多光谱传感器获取马铃薯块茎形成期、块茎增长期和淀粉积累期的多光谱影像, 地面实测株高和 AGB 以及地面控制点(GCP)的空间位置信息。首先, 基于 SFM(structure from motion, SFM)技术利用无人机影像数据结合 GCP 的三维坐标生成试验田的 DSM(digital surface model, DSM), 通过 DSM 提取出马铃薯各生育期的株高(Hdsm); 然后, 选取原始 4 个单波段植被指数、9 个多波段组合的植被指数、红边波段的高频信息(HFI)和提取的 Hdsm 分别与 AGB 作相关性分析; 最后基于单波段植被指数(x_1)、多波段组合的植被指数(x_2)、植被指数结合 Hdsm(x_3)、植被指数结合 HFI(x_4)以及植被指数融合 HFI 和 Hdsm(x_5)为模型输入参数, 采用偏最小二乘回归(PLSR)和岭回归(RR)估算各生育期的 AGB。结果表明: (1)提取的 Hdsm 和实测株高拟合的 R^2 为 0.87, NRMSE 为 14.34%; (2)各模型参数都与 AGB 达到极显著水平, 相关性均从块茎形成期到淀粉积累期先升高后降低; (3)各生育期以 5 种变量使用同种方法估算马铃薯 AGB 的效果, 均从块茎形成期到淀粉积累期先后变差, 其估算精度由高到低依次为 $x_5 > x_4 > x_3 > x_2 > x_1$; (4)各生育期使用 PLSR 以不同变量估算 AGB 的效果要优于 RR 方法, 其中在块茎增长期基于 x_5 变量估算马铃薯 AGB 效果最佳, R^2 为 0.73, NRMSE 为 15.22%。因此, 选取多光谱植被指数结合红边波段的高频信息和 Hdsm 并使用 PLSR 方法可以明显提高 AGB 的估算精度, 这为大面积马铃薯作物 AGB 的监测提供了新的技术支撑。

关键词 马铃薯; 多光谱; 株高; 植被指数; 高频信息; 地上生物量

中图分类号: S25 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)08-2549-07

引 言

地上生物量(above-ground biomass, AGB)是作物活力和净初级生产力的基础, 能够表征作物光合作用强度和评估作物营养状况以及长势情况^[1]。故快速无损地获取 AGB 信息可监测作物长势变化, 这对于指导农业生产管理和精准施肥至关重要。传统上, AGB 测量是采用破坏性取样方法, 需要人工收割作物、称重和记录, 这使得大面积、长时间的监测作物变为困难^[2]。

随着遥感平台的多样性和影像空间分辨率的提高, 遥感技术被当今认为是监测和估算大面积作物 AGB 最有效的技术手段^[3]。其中低空无人机遥感平台具有机动灵活, 能够提供更高的时间、空间和光谱分辨率的遥感数据等优势, 成为了精准农业中定量观测使用最为频繁的技术工具^[4]。当前, 无人机平台搭载的传感器主要有 3 种(数码、多光谱和高光谱)。数码相机虽然价格低廉, 但是波段数目较少, 难以解译作物冠层光谱中包含的复杂信息^[5]。高光谱传感器在高精度表征光谱响应能力方面虽表现突出, 但价格昂贵, 数据后续处理较为复杂^[6]。而多光谱传感器由于经济上更适宜, 且包

收稿日期: 2021-03-11, 修订日期: 2021-06-26

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B020216001), 国家自然科学基金项目(41601346)资助

作者简介: 刘 杨, 1994 年生, 北京农业信息技术研究中心实习研究员 e-mail: liuyanghe810@163.com

* 通讯作者 e-mail: fenghaikuan123@163.com

含监测农学参数信息重要的红边波段,因此在农业定量遥感中得到广泛关注^[7]。国内外学者基于无人机多光谱遥感技术开展了作物理化参数监测的大量研究,如 Han 等^[4]使用 6 种植被指数结合不同的回归技术,评估了玉米不同生育期 AGB 的估算效果;肖武等^[8]利用 22 种植被指数结合 BP 神经网络有效地估算采煤沉陷区上方玉米作物的 AGB; Qi 等^[7]使用 8 种植被指数通过人工神经网络估算花生不同生育期的叶面积指数;孙诗睿等^[9]运用 10 种植被指数结合随机森林估算冬小麦叶面积指数;Zheng^[10]和 Brinkhoff 等^[11]分别通过 19 种和 6 种植被指数估算冬小麦和水稻氮素含量,结果发现 RDVI 和 NDRE 植被指数估算效果最佳;陈鹏等^[12]和奚雪等^[13]分别使用植被指数估算马铃薯和冬小麦叶绿素含量。

以上基于无人机多光谱遥感技术的研究,主要通过单个或多个植被指数估算作物不同生育期的理化参数,没有引入新的模型变量去参与建模。然而,随着生育期的推进,植被指数可能会达到饱和,当理化参数值较大时,会存在低估的现象。为了更全面地估算作物多生育的理化参数,一些学者通过多类别变量或者回归技术提高了估算模型精度,较好地实现作物长势监测^[14-19]。但还未见有报道关于从无人机多光谱影像中提取高频信息(high frequency information, HFI)和作物株高(Hdsm)并结合植被指数估算马铃薯不同生育期的 AGB。因此,本研究基于光谱信息以及融合结构信息采用偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)和岭回归(ridge regression, RR)方法构建马铃薯不同生育期的 AGB 估算模型,探究融合新的模型因子对 AGB 估算结果的影响,从而为提高马铃薯 AGB 监测效果提供新的方法。

1 实验部分

1.1 研究位置与试验设计

马铃薯试验在北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地进行,该区域位于北纬 40°10′32″—40°10′36″,东经 116°26′34″—116°26′41″,气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候。试验设计为小区完全随机试验,共设计密度试验、氮素试验、钾肥试验 3 个试验区。试验品种均为早熟的中薯 5 和中薯 3,每个品种进行相同的控制试验,每种试验重复 3 次,每种重复进行不同程度的密度、氮素和钾肥处理,其中密度、氮素和钾肥具体处理详情见文献^[14]。小区总计 48 个,每个小区面积为 32.5 m²。为了更精确地获取试验田的数字表面模型,在试验小区周围均匀布控 11 个地面控制点(ground control point, GCP),并用差分 GPS 测定其三维空间位置。

1.2 无人机多光谱数据获取及处理

分别于天空晴朗、无风无云的 2019 年 4 月 20 日(裸土期)、2019 年 5 月 28(块茎形成期)、2019 年 6 月 10 日(块茎增长期)和 2019 年 6 月 20 日(淀粉积累期)进行无人机多光谱遥感数据采集。各次起飞地点固定和飞行航线基本保持一致,操作时间为 12:00,飞行高度为 30 m,航向重叠度为 80%,旁向重叠度为 85%。获取影像数据前,首先采集传感

器自带的多光谱反射率校正板数据,用于多光谱影像像元亮度值的标定。采用八旋翼电动无人机搭载 Parrot Sequoia 农业遥感专用的 4 通道多光谱相机,其由光照传感器和多光谱传感器组成,能获取 1 个 1 600 万像素的 RGB 影像和 4 个 120 万像素的单波段影像。多光谱相机内置的波段参数信息见表 1 所示。

表 1 多光谱传感器的波段参数

Table 1 Band parameters of multispectral sensor

波段	中心波长/nm	带宽/nm
绿	550	40
红	660	40
红边	735	10
近红外	790	40

无人机多光谱影像获取后需要预处理,处理前,首先对无人机采集的多光谱影像进行筛选,去除姿态角异常,成像存在问题的影像。将选取的多光谱影像和 11 个地面控制点导入到以运动结构为核心算法的 Agisoft PhotoScan Professional 软件中,通过 GCP 的空间位置对多光谱影像作地形精纠正,各时期的校正误差均小于 2 cm。基于密集点云生成试验区域的数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)和数字表面模型(digital surfacemap, DSM)。采用 ENVI 5.1 软件通过校正板获取各波段的反射率影像,并以 TIF 格式储存。使用 ArcGIS 软件基于划分的小区绘制出最大面积矢量并对其编号,分别计算统计出所有感兴趣区域在各波段的平均光谱反射率,将其作为各小区马铃薯冠层在该波段下的光谱反射率。

1.3 地面数据采集及处理

地面数据采集时,获取了各小区马铃薯实测 AGB 和株高数据。马铃薯 AGB 和株高的测定方法见文献^[14]。

1.4 植被指数的选取

根据以往的研究成果,各生育期选取 9 种在 AGB 估算方面表现较好的多波段组合植被指数(multi-band combined vegetation indices, MVIs)和本研究提取的 4 个单波段植被指数(single-band vegetation indices, SVIs)用于构建马铃薯 AGB 估算模型,具体的模型参数见表 2 所示。

1.5 高频信息获取

二维离散小波变换的影像分解技术通过包含低通和高通的滤波器组对无人机多光谱影像做两次滤波,分别得到水平方向(HL)、垂直方向(LH)和对角线方向(LL)3 种高频信息和 1 种低频信息,其中高频信息反映的是影像的大致概貌和轮廓,与影像的真实信息接近。由于红边是植被反射率从红光波段到近红外波段快速升高变化的区域,是区分植被和地物的最显著标志,经常被用来估算作物的理化参数^[2]。因此,提取各生育期红边波段的 3 种高频信息(REGHL, REGLH 和 REGLL)用来参与模型构建。

1.6 分析方法

马铃薯株高的提取,利用数据管理、分析和可视化显示为平台的 ArcGIS 软件,将马铃薯块茎形成期、块茎增长期

表 2 模型参数
Table 2 Model parameters

光谱变量	计算公式	参考文献
GREVI	GREVI=GRE	本工作
REDVI	REDVI=RED	本工作
REGVI	REGVI=REG	本工作
NIRVI	NIRVI=NIR	本工作
RVI	RVI=NIR/RED	[10]
MSR	MSR=(NIR/RED-1)/(NIR/RED+1) ^{1/2}	[11]
GNDVI	GNDVI=(NIR-GRE)/(NIR+GRE)	[11]
NLI	NLI=(NIR ² -RED)/(NIR ² +RED)	[7]
SAVI	SAVI=1.5×(NIR-RED)/(NIR+RED+0.5)	[10]
RDVI	RDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED) ^{1/2}	[7]
OSAVI	OSAVI=1.16×(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)	[11]
DVI	DVI=NIR-RED	[7]
NDVI	NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED)	[11]

注: GRE, RED, REG 和 NIR 分别为绿、红、红边和近红外波段的反射率值
Note: GRE, RED, REG and NIR are reflectance values in green, red, red edge and near infrared bands

和淀粉积累期的 DSM 分别与裸土期的 DSM 进行差值运算,可以得到相应的作物高度模型,最后利用 ROI 工具提取出各生育期试验小区的马铃薯平均高度 Hdsm。

构建 AGB 估算模型时,若输入变量存在严重的共线性问题,则会降低模型的稳定性和准确性。因此,采用 2 种方法(PLSR 和 RR)估算马铃薯各生育期 AGB。PLSR 利用了多元线性回归、典型相关分析和主成分分析结合为一体,可以提供一种多对多的线性回归建模方法,能够消除自变量之间的相关性,用较少数据来估测因变量^[14]。RR 是一种专用于共线性数据分析的有偏估计回归方法,实质上是一种改良的最小二乘估计法,通过放弃最小二乘法的无偏性,以损失部分信息、降低精度为代价获得回归系数更为符合实际、更可靠的回归方法^[2]。

1.7 精度评价

各生育期提取 48 组数据构成样本数据集,选取 32 个用来构建模型,剩余 16 个用来验证模型效果。为了评估不同模型的估算效果和稳定性,选用决定系数(coefficient of determination, R^2)和标准均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)作为精度评价指标。

2 结果与讨论

2.1 马铃薯株高的提取

3 个生育期共提取 144 个马铃薯株高,为了评估提取的精度,将地面采集的实测株高数据和 Hdsm 作比较分析, R^2 为 0.87, NRMSE 为 14.34%,说明提取的株高 Hdsm 较为可靠。

2.2 植被指数、高频信息和 Hdsm 与 AGB 的相关性

将表 2 的 13 种植被指数、红边波段的 3 种高频信息和基于无人机多光谱遥感技术提取的 Hdsm 分别与马铃薯各生育期的 AGB 作相关性分析,得到结果见表 3 所示。由表 3 可

知,各生育期提取的模型参数均与 AGB 达到 0.01 显著水平,相关性均从块茎形成期到淀粉积累期先升高后降低。整体上,各模型参数与 AGB 的相关性由高到低依次为多波段组合植被指数、高频信息、单波段植被指数和 Hdsm。块茎形成期相关性最高的模型参数为 RVI,相关性系数为 0.750,块茎增长期和淀粉积累期相关性最高的模型参数均为 GNDVI,相关性系数分别为 0.762 和 0.759。

表 3 植被指数和 Hdsm 与马铃薯 AGB 的相关性系数
Table 3 The correlation coefficients of vegetation indices and Hdsm with potato AGB

模型参数	块茎形成期	块茎增长期	淀粉积累期
GREVI	0.686	0.659	0.672
REDVI	0.421	0.621	0.494
REGVI	0.703	0.721	0.727
NIRVI	0.684	0.731	0.724
RVI	0.750	0.727	0.744
MSR	0.739	0.741	0.746
GNDVI	0.718	0.762	0.759
NLI	0.716	0.748	0.747
SAVI	0.712	0.748	0.747
RDVI	0.712	0.749	0.747
OSAVI	0.711	0.747	0.747
DVI	0.710	0.750	0.746
NDVI	0.711	0.745	0.747
REGHL	0.709	0.711	0.700
REGLH	0.695	0.734	0.678
REGLL	0.721	0.744	0.732
Hdsm	0.606	0.682	0.564

2.3 基于植被指数估算 AGB

为了评估原始 4 个单波段植被指数(SVIs)和 9 个多波段组合植被指数(MVIs)估算 AGB 的能力,分别使用 PLSR 和 RR 方法构建各生育期 AGB 估算模型,其结果见表 4 所示。由表可知,各生育期使用 2 种方法基于 SVIs 和 MVIs 构建的模型效果均从块茎形成期到淀粉积累期先好后变差。使用同种方法以 MVIs 构建的模型精度更高,稳定性更强,且均在块茎增长期达到最佳估算效果(PLSR:建模 $R^2=0.65$, NRMSE=17.48%;验证 $R^2=0.68$, NRMSE=16.71%。RR:建模 $R^2=0.62$, NRMSE=18.42%;验证 $R^2=0.65$, NRMSE=17.75%)。另外,从 3 个生育期的估算模型精度和稳定性来看,使用 PLSR 方法估算 AGB 的效果要优于 RR 方法。

2.4 基于植被指数结合 HFI 或 Hdsm 估算 AGB

为了探究融合新的模型因子(HFI 或 Hdsm)对 AGB 估算结果的影响,将各生育期提取的 13 种植被指数(vegetation indices, VIs)分别结合红边波段的 3 种高频信息和 Hdsm 使用 PLSR 和 RR 方法建立各生育期的 AGB 估算模型,其结果见表 5 所示。从表 5 可以看出,各生育期基于植被指数结合 HFI 或 Hdsm 利用 2 种方法估算 AGB 的效果同表 4 的结果保持一致,也从块茎形成期到淀粉积累期先好后变差。相较于仅以植被指数构建的 AGB 估算模型(表 4),结合 HFI 或

Hdsm 明显提高了估算模型的拟合性和稳定性(表 5), 其中植被指数融合红边波段的高频信息效果较优, 2 种方法均在块茎增长期达到最高的估算效果(PLSR: 建模 $R^2 = 0.72$, NRMSE = 15.44%; 验证 $R^2 = 0.74$, NRMSE = 15.33%。

RR: 建模 $R^2 = 0.67$, NRMSE = 16.34%; 验证 $R^2 = 0.70$, NRMSE = 15.62%)。通过分析各生育期的表 5 建模和验证结果, 发现使用 PLSR 方法基于植被指数结合高频信息或 Hdsm 估算 AGB 的效果也优于 RR 方法。

表 4 基于植被指数使用 PLSR 和 RR 估算马铃薯 AGB

Table 4 Estimation of potato AGB using partial least squares regression and ridge regression based on vegetation indices

生育期	模型参数	PLSR				RR			
		建模		验证		建模		验证	
		R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%
块茎形成期	SVIs	0.48	20.12	0.59	19.21	0.46	21.61	0.55	20.14
	MVIs	0.61	18.34	0.64	17.37	0.59	19.58	0.62	18.83
块茎增长期	SVIs	0.58	18.26	0.61	17.18	0.53	19.58	0.58	18.78
	MVIs	0.65	17.48	0.68	16.71	0.62	18.42	0.65	17.75
淀粉积累期	SVIs	0.46	23.68	0.54	22.84	0.42	24.09	0.49	23.87
	MVIs	0.59	21.45	0.62	20.96	0.56	23.34	0.60	22.85

表 5 基于植被指数结合 HFI 或 Hdsm 使用 PLSR 和 RR 估算马铃薯 AGB

Table 5 Estimation of potato AGB using partial least squares regression and ridge regression based on vegetation indices combined with HFI or Hdsm

生育期	模型参数	PLSR				RR			
		建模		验证		建模		验证	
		R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%
块茎形成期	VIs+Hdsm	0.65	17.42	0.67	16.16	0.60	18.86	0.65	17.19
	VIs+HFI	0.68	16.56	0.70	15.46	0.62	17.61	0.68	16.74
块茎增长期	VIs+Hdsm	0.68	16.07	0.71	15.84	0.65	17.58	0.69	16.95
	VIs+HFI	0.72	15.44	0.74	15.33	0.67	16.34	0.70	15.62
淀粉积累期	VIs+Hdsm	0.62	20.34	0.64	19.53	0.58	21.03	0.63	20.72
	VIs+HFI	0.63	19.36	0.66	18.85	0.61	20.17	0.65	19.98

2.5 基于植被指数结合 HFI 和 Hdsm 估算 AGB

将植被指数结合 HFI 和 Hdsm 作为模型输入参数, 同样使用 PLSR 和 RR 方法构建各生育期 AGB 估算模型, 其结果见表 6 所示。从表 6 可以看出, 整个生育期基于 VIs+Hdsm+HFI 使用 2 种方法估算 AGB 效果变化趋势(先后好变差)与表 4 和表 5 结果相一致, 其中基于融合所有特征为变量得到的估算结果最出色(表 6)。2 种方法也均在块茎增长期达到最佳估算精度(PLSR: 建模 $R^2 = 0.73$, NRMSE =

15.22%; 验证 $R^2 = 0.75$, NRMSE = 14.62%)。RR: 建模 $R^2 = 0.69$, NRMSE = 15.56%; 验证 $R^2 = 0.71$, NRMSE = 15.47%)。各生育期基于融合所有特征的 PLSR-AGB 模型的 R^2 分别提高 7.69% 和 2.94%, 7.35% 和 1.38%, 4.83% 和 3.17, RR-AGB 模型的 R^2 分别提高 10% 和 6.45%, 6.15% 和 2.99%, 10.34% 和 4.9% (相较于表 4)。分析表 6 建模和验证结果可知, 马铃薯 3 个生长期使用 PLSR 方法基于融合特征估算 AGB 效果也同样优于 RR 方法。

表 6 基于植被指数结合 HFI 和 Hdsm 使用 PLSR 和 RR 估算马铃薯 AGB

Table 6 Estimation of potato AGB using partial least squares regression and ridge regression based on vegetation indices combined with HFI and Hdsm

生育期	模型参数	PLSR				RR			
		建模		验证		建模		验证	
		R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%	R^2	NRMSE/%
块茎形成期	VIs+Hdsm+HFI	0.70	16.46	0.71	15.08	0.66	16.98	0.68	16.33
块茎增长期	VIs+Hdsm+HFI	0.73	15.22	0.75	14.62	0.69	15.56	0.71	15.47
淀粉积累期	VIs+Hdsm+HFI	0.65	18.83	0.68	17.62	0.64	19.17	0.67	18.26

通过马铃薯 3 个生育期的无人机多光谱影像, 结合 GCP 生成了试验田的 DSM, 提取了各生育期株高 Hdsm, 实测株

高和 Hdsm 拟合的 R^2 为 0.87, 证实了基于 DSM 提取的 Hdsm 效果较优, 此结论与他人提取作物株高的研究基本相

同^[5]。但是,基于无人机多光谱影像提取的马铃薯株高相比于实测株高偏小,这是因为多光谱传感器获取的是马铃薯冠层数据,而地面实测的株高最高点位置在生成 3D 点云时被去除,导致基于 DSM 提取的 Hdsm 较小;另外,获取的多光谱影像中包含一些裸土像元,在提取 Hdsm 时也参与了运算,这同样会使提取的株高偏低。

将 4 个单波段的植被指数、9 个多波段组合的植被指数、红边波段的 3 种高频信息和 Hdsm 分别与 AGB 作相关性分析,结果表明各生育期的模型参数与 AGB 的相关性均达到 0.01 显著水平,这说明提取的各类参数都能够反映作物的长势情况^[1]。3 个生育期的相关性均从块茎形成期到淀粉积累期先升高后降低,这与马铃薯作物自身的生长状况相关。前期主要表现为马铃薯生殖器官发育,茎节和叶片不断地增长,当进入块茎增长期,马铃薯植株地上各部位的鲜重达到峰值,植被覆盖度为整个生育期的最优时期,此阶段提取的冠层光谱反射率能够真实反映作物 AGB 的变化情况。而生长后期地上的同化物需要向地下块茎转移,基部叶片自下而上逐渐衰老变黄,马铃薯作物长势变差,植被覆盖度也明显降低,此时提取的光谱信息并不是马铃薯植株冠层真实的反射率,使得上述 3 种光谱参数与 AGB 的相关性降低。

以 SVIs(x_1), MVIs(x_2), VIs 结合 Hdsm(x_3), VIs 结合 HFI(x_4),以及 VIs 结合 Hdsm 和 HFI(x_5)为模型输入变量,使用 PLSR 和 RR 方法估算马铃薯各生育期的 AGB。结果发现,基于 5 种变量使用同样的方法构建的模型效果变化趋势,均从块茎形成期到淀粉积累期先好后变差,这与模型参数和 AGB 的相关性变化趋势相一致。各生育期以不同变量使用同样的方法估算 AGB 的精度由高到低依次为 $x_5 > x_4 > x_3 > x_2 > x_1$, 主要因为融合结构信息(HFI 和 Hdsm)解决了生育期效应引起的植被指数饱和性问题,提高了模型预测能力,这与刘杨等^[14]得到的结论一致。相较于单波段植被指数(x_1)估算模型,基于多波段组合植被指数(x_2)构建的模型精度和稳定性都较优,主要因为通过多波段组合的植被指数能够去除或者降低背景土壤对马铃薯冠层光谱信息的影响,增强了植被指数与 AGB 的敏感性(表 3),以此提高了 AGB 估算精度,如 Bispo 等^[15]研究结果也认为多波段组合的植被指数估算 AGB 效果较优。当采用波段组合的植被指数估算 AGB 时,大多通过绿、红和近红外波段的反射率经过波段运算得到宽波段参数^[15],忽略了红光波段与近红外区域的红边参数,红边是植被特有的光谱特征,在整个生育期内与作物参数敏感性较高,因此红边位置对于研究 AGB 的动态变化非常重要^[18]。然而,仅仅通过植被指数估算作物不同生育

期的 AGB,随着生育期的推进,植被指数会出现饱和的现象,这会造成估算 AGB 不准确^[4]。因此,将提取红边波段的 3 种高频信息(HFI)和作物株高(Hdsm)一起融入到植被指数中形成新的模型因子来估算各生育期的 AGB,结果表明结合作物光谱信息和结构信息构建的模型精度最高,稳定性最强(表 6),这与 Li 等^[1]和 Yang 等^[3]研究作物理化参数结果一致,都表明融入作物结构信息能够解决植被指数造成的低估现象。

为了减弱模型参数之间的自相关性,使用 PLSR 和 RR 方法构建各生育期 AGB 估算模型,探究了这 2 种方法估算 AGB 的效果。结果表明每种变量以 PLSR 方法构建的模型 R^2 较大, NRMSE 较小,说明此方法估算效果要优于 RR 方法,这与 Tao 等^[17]和 Yue 等^[19]研究冬小麦 AGB 结果一致,都证明 PLSR 方法估算效果较优。综上,研究作物不同生育期 AGB 时,模型参数类别和建模方法的选取对构建 AGB 估算模型的精度影响不同。因此利用无人机多光谱遥感技术估算作物 AGB 时,模型参数的适用性和建模方法的筛选还需要进一步研究。此外,还需要获取不同年限和不同地点的马铃薯冠层光谱数据对模型的外推性进行验证,以便得到一个更具有代表性的 AGB 估算模型。

3 结 论

(1)基于无人机多光谱影像提取的 Hdsm 与马铃薯实测株高之间有较高的拟合性($R^2 = 0.87$, $NRMSE = 14.34\%$),表明提取的 Hdsm 精度可靠。

(2)选取的 4 个单波段植被指数、9 个多波段组合的植被指数、红边波段的 3 种高频信息和提取的 Hdsm 与 AGB 相关性均达到 0.01 显著水平,各种变量与 AGB 的相关性变化趋势保持一致,均从块茎形成期到淀粉积累期先升高后降低。块茎形成期,相关系数最高的模型变量为 RVI($r = 0.750$),块茎增长期和淀粉积累期,相关系数最高的模型变量均为 GNDVI($r = 0.762$ 和 0.759)。

(3)各生育期以 5 种变量使用相同的回归方法估算马铃薯 AGB,从块茎形成期到淀粉积累期估算效果先后后变差,其中估算精度由高到低依次为 $x_5 > x_4 > x_3 > x_2 > x_1$ 。

(4)各生育期使用 PLSR 以不同变量估算 AGB 的效果要优于 RR 方法,其中在块茎增长期使用 PLSR 结合 x_5 变量估算马铃薯 AGB,精度达到最高(建模 $R^2 = 0.73$, $NRMSE = 15.22\%$;验证 $R^2 = 0.75$, $NRMSE = 14.62\%$)。

References

- [1] Li B, Xu X, Zhang L, et al. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 162(4): 161.
- [2] ZHOU Min-gu, SHAO Guo-min, ZHANG Li-yuan, et al(周敏姑, 邵国敏, 张立元, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2020, 36(20): 125.
- [3] YANG Bao-hua, GAO Yuan, WANG Meng-xuan, et al(杨宝华, 高远, 王梦玄, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2021, 41(3): 936.
- [4] Han L, Yang G, Dai H, et al. Plant Methods, 2019, 15(1): 10.

- [5] Bendig J, Kang Y, Aasen H, et al. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 39(1): 79.
- [6] Tao H L, Feng H K, Xu L J, et al. Sensors, 2020, 20(4): 1231.
- [7] Qi H X, Zhu B Y, Wu Z Y, et al. Sensors, 2020, 20(23): 6732.
- [8] XIAO Wu, CHEN Jia-le, DAN Hong-zhi, et al(肖武, 陈佳乐, 笄宏志, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2018, 49(8): 169.
- [9] SUN Shi-rui, ZHAO Yan-ling, WANG Ya-juan, et al(孙诗睿, 赵艳玲, 王亚娟, 等). Journal of China Agricultural University(中国农业大学学报), 2019, 24(11): 51.
- [10] Zheng H B, Li W, Jiang J L, et al. Remote Sensing, 2018, 10(12): 2026.
- [11] Brinkhoff J, Dunn B W, Robson A J, et al. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1837.
- [12] CHEN Peng, FENG Hai-kuan, LI Chang-chun, et al(陈鹏, 冯海宽, 李长春, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2019, 35(11): 63.
- [13] XI Xue, ZHAO Geng-xing(奚雪, 赵庚星). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2020, 36(20): 119.
- [14] LIU Yang, FENG Hai-kuan, HUANG Jue, et al(刘杨, 冯海宽, 黄珏, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2021, 41(3): 903.
- [15] Bispo P C, Pedro R V, Zimbres B et al. Remote Sensing, 2020, 41(17): 2685.
- [16] Masjedi A, Crawford M, Carpenter N R, et al. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3587.
- [17] Tao H L, Feng H K, Xu J L, et al. Sensors, 2020, 20(5): 1296.
- [18] Vuorinne I, Heiskanen J, Pellikka P E. Remote Sensing, 2021, 13(2): 233.
- [19] Yue J B, Feng H K, Jin X L, et al. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1138.

Estimation of Potato Above Ground Biomass Based on UAV Multispectral Images

LIU Yang^{1, 2, 4}, SUN Qian^{1, 4}, HUANG Jue², FENG Hai-kuan^{1, 3, 4*}, WANG Jiao-jiao^{1, 4}, YANG Gui-jun^{1, 4}

1. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing in Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
2. College of Surveying Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
3. National Information Agriculture Engineering Technology Center of Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China
4. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

Abstract Above ground biomass (AGB) is an important indicator of evaluating crop growth and guiding agricultural production and management. Therefore, AGB information was obtained timely, accurately and efficiently to provide a strong basis for predicting yields and securing grain trade. The conventional way to obtain AGB is to use destructive sampling methods that require manual harvesting of crops, weighing, and recording, making large-area and long-term measurements difficult. However, UAV remote sensing technology is considered the most effective way to estimate AGB of large area crops with the rapid development of precision agriculture. In this study, the multispectral images of the tuber formation period, tuber growth period and starch accumulation period were obtained by the UAV platform equipped with multispectral sensors. The measured plant height, AGB and latitude, longitude and altitude of ground control point (GCP) were measured on the ground. Firstly, using UAV multispectral images combined GCP location information basing structure from motion (SfM) algorithm to generate the digital surface model (DSM) of the potato experimental field, and DSM extracted the plant height (H_{dsm}) of each growth period. Then, four original single band vegetation indices, 9 multiband vegetation indices, high-frequency information (HFI) in the red edge band and H_{dsm} were selected with AGB for correlation analysis. Finally, based on single-band vegetation indices (x_1), multiband vegetation indices (x_2), vegetation indices combined H_{dsm} (x_3), vegetation indices combined HFI (x_4) and their integration (x_5) as input parameters were used to estimate AGB of each growth period by partial least squares regression (PLSR) and ridge regression (RR). The results showed that: (1) The R^2 of extracted H_{dsm} and measured plant height was 0.87 and NRMSE was 14.34%. (2) All model parameters reached highly significant levels with the AGB, and correlations increased and then decreased from the tuber formation period to the starch accumulation period. (3) Using the same method to estimate potato AGB with five variables at different growth periods, it starts to get better and then it gets worse for the effect of potato AGB from tuber formation period to starch accumulation period with the estimation accuracy from high to low was $x_5 > x_4 > x_3 > x_2 > x_1$. (4) The results showed that PLSR was better than RR in estimating AGB for different growth stages and basing

x_5 combined PLSR method was the best in estimating AGB at tuber growth period with R^2 of 0.73 and NRMSE of 15.22%. Therefore, this study combined the selected multispectral vegetation indices combined HFI and Hdsm with the PLSR method can significantly improve the estimation accuracy of AGB, which provides new technical support for the monitoring of AGB in large areas of potato crops.

Keywords Potato; Multispectral; Plant height; Vegetation indices; High frequency information; Above ground biomass

* Corresponding author

(Received Mar. 11, 2021; accepted Jun. 26, 2021)

讣 告



著名分子光谱学家席时权同志因病医治无效，于 2021 年 7 月 25 日在长春逝世，享年 85 周岁。

席时权同志生于 1936 年 11 月 1 日，上海市人，中共党员、九三学社会员。1958 年北京大学化学系毕业分配到长春应化所，先后在应化所九室、二十九室、稀土化学与物理实验室工作过，任助理研究员、副研究员、研究员，曾担任研究室主任、所学术委员会副主任、技术委员会主任、学位委员会副主任、副所长。1980 年—1982 年在加拿大国家研究委员会化学部进修，1992 年获得国务院政府特殊津贴，1993 年当选长春市人大代表，1998 年当选为吉林省人大代表。2003 年 12 月退休。

席时权同志长期从事分子光谱及有机结构分析研究工作，在分子组装体的谱学研究方面做出了卓越贡献。1985 年“顺丁橡胶工业生产新技术”获国家科技进步特等奖；“火箭固体推进剂的应用”获国家科技进步一等奖。1989 年“彩色冲洗套药的研究”获中科院科技进步二等奖；1992 年“彩色照相冲洗套药系列产品”获长春分院科技进步一等奖。他是我国改革开放初期分子光谱界主要领导人之一，历任光谱专业委员会副主任、《光谱学与光谱分析》历任副主编。为第一届全国光谱会议召开并形成两年一届的盛会，做出了重要贡献。他兼任科技开发总公司总工程师，在技术开发、产品推广上成绩卓著。他是令人尊敬的导师，治学严谨，为人师表，桃李满天下，1990 年被评为中科院优秀研究生导师。他热爱党，热爱祖国，热爱研究所工作，始终保持良好的工作作风，多次荣获应化所先进工作者、先进个人奖励。他为应化所科研事业作出了积极贡献。

席时权同志安息吧！

中科院长春应化所离退休服务中心

2021 年 7 月 26 日