

李健, 江洪, 罗文彬, 等. 融合无人机多光谱和纹理特征的马铃薯 LAI 估算 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 93-101.
 LI Jian, JIANG Hong, LUO Wenbin, et al. Potato LAI estimation by fusing UAV multi-spectral and texture features[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 93-101.

融合无人机多光谱和纹理特征的马铃薯 LAI 估算

李 健^{1✉}, 江 洪^{1✉}, 罗文彬², 麻 霞¹, 张 雍¹

(1 福州大学 数字中国研究院 (福建)/空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室/卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350108; 2 福建省农业科学院 作物研究所, 福建 福州 350013)

摘要:【目的】研究融合无人机遥感影像多光谱信息和纹理特征估算马铃薯 *Solanum tuberosum* 叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 方法, 提高马铃薯 LAI 反演精度。【方法】利用大疆 P4M 无人机采集 2021 年 2—4 月南方冬种马铃薯幼苗期、现蕾期、块茎膨大期多光谱影像, 用 LAI-2000 冠层分析仪实测 LAI 数据。提取影像光谱、纹理等信息, 分析植被指数、纹理特征与 LAI 的相关性, 基于 R^2_{adj} 的全子集分析优选特征变量。采用主成分分析, 融合光谱和纹理特征, 用 PCA-MLR(Principal component analysis-multiple linear regression) 模型估算马铃薯 LAI。【结果】从幼苗期到块茎膨大期, PCA-MLR 估算模型优于 T-MLR(Texture multiple linear regression) 和 VI-MLR(Vegetation index multiple linear regression) 模型, R^2 分别为 0.73、0.59 和 0.66。【结论】本研究提出一种估算马铃薯 LAI 的 PCA-MLR 方法, 为马铃薯的长势监测和田间管理提供数据支持。

关键词: 无人机; 遥感影像; LAI; 多光谱; 纹理特征; 马铃薯

中图分类号: S532; S127

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)01-0093-09

Potato LAI estimation by fusing UAV multi-spectral and texture features

LI Jian^{1✉}, JIANG Hong^{1✉}, LUO Wenbin², MA Xia¹, ZHANG Yong¹

(1 Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University/Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education/Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou 350108, China; 2 Crop Research Institue, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: 【Objective】Develop a method to improve the potato (*Solanum tuberosum*) leaf area index (LAI) estimation accuracy using the UAV multiple spectral wavebands and texture information. 【Method】The DJI P4M drone was used to collect multispectral images of the southern winter potato at seedling period, budding period and tuber swelling period from February to April 2021. LAI data were measured by LAI-2000 canopy analyzer. The spectral and texture characteristics of images were extracted. The correlations between vegetation index, texture characteristics and LAI were analyzed. The selected characteristic variables were analyzed based on subset of adjusted R^2_{adj} . The principal component analysis was used to fuse spectrum and texture features, and the principal component analysis-multiple linear regression (PCA-MLR) model was used to estimate potato LAI. 【Result】From the seedling period to the tuber swelling period, the PCA-MLR estimation model was better than texture multiple linear regression (T-MLR) and vegetation index multiple linear regression (VI-MLR)

收稿日期:2022-01-04 网络首发时间:2022-10-31 08:46:12

首发网址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20221027.1657.004.html

作者简介:李 健, 硕士研究生, 主要从事无人机遥感技术与应用研究, E-mail: 1432492120@qq.com; 通信作者: 江 洪, 副研究员, 博士, 主要从事遥感信息处理与应用研究, E-mail: jh910@fzu.edu.cn

基金项目:福建省科技计划引导性项目 (2021Y0005); 国家重点研发计划 (2017YFB0504203)

model, with R^2 of 0.73, 0.59 and 0.66 respectively. 【Conclusion】 This study proposed a method of PCA-MLR to estimate the potato LAI and improve the levels of the potato growth monitoring and field management.

Key words: UAV; Remote sensing; LAI; Multi-spectral; Texture feature; Potato

2015 年以来,我国启动了马铃薯主粮化战略,马铃薯成为我国又一主粮作物^[1]。叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 作为作物生长的重要参数,与地上生物量积累和地下块茎产量有密切的关系,是监测作物长势、指导田间管理的重要指标^[2]。当前,地面实测与遥感估算是测量农作物 LAI 的主要方式。地面实地测量分为直接测量法与间接测量法^[3]。直接测量法是利用直接测定的植被叶面积计算 LAI,间接测量法是用光学仪器测量有关参数得到 LAI^[4]。卫星遥感估算法主要采用光学遥感影像估测农作物 LAI,估算面积大,但受天气、时空分辨率的影响。相比卫星遥感,无人机遥感具有空间分辨率高、能准确反映地块作物长势、监测灵活机动等优势,适用于田块尺度作物的信息获取与 LAI 估算。国内外学者利用光学遥感影像计算植被指数 (Vegetation index, VI) 来估算 LAI 已有大量的研究^[5],研究表明 VI 能较好地估算 LAI^[6]。其中,归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 被广泛用于建立 LAI 估算模型^[7],但茂密作物的 NDVI 会出现饱和现象^[8],在估算 LAI 时存在一定的局限性。因此,综合利用遥感影像光谱、纹理特征估算作物生长参数的研究逐渐增多。VI 与纹理特征融合可以提高生物量^[9]、叶绿素含量^[10]以及氮含量^[11]估算精度,将两者结合估算作物氮含量、生物量的研究较多,如玉米、小麦、水稻等^[12-14],对马铃薯 LAI 估算的研究较少。前人研究大多从植被光谱指数或者单一的纹理特征入手,忽略了无人机多光谱影像光谱、纹理信息的融合,本研究基于高分辨率的大疆 P4M 无人机多光谱影像,比较马铃薯不同生育期光谱、纹理单一指标以

及光谱和纹理融合方法,进行马铃薯 LAI 估算。

1 研究区数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省宁德市霞浦县沙江镇 (E119°59', N26°47') 粮食产能区“五星”示范片区,面积约 37.33 hm²。该地属于亚热带季风气候,年平均气温为 17°~23°,春季雨水丰沛,夏有台风,冬季少见霜雪。研究区是福建省农科院南方马铃薯研究基地之一,田间管理完善,进行 2 个施肥试验,分别为肥料联合筛选试验和氮肥分期施用试验。

2 种试验各 6 个处理,3 次随机重复试验。肥料联合筛选试验处理有:不施肥、常用有机肥+常规化肥、沃尔田生物有机肥、沃尔田生物有机肥+缓释高钾肥、生命源黄腐酸生物有机肥、生命源黄腐酸生物有机肥+缓释高钾肥;氮肥分期施用试验中,氮、磷、钾用量分别为 225、150 和 300 kg/hm²,分为基肥 (播种前施用) 和追肥 (播种后施用),试验处理及各种肥料质量分数为:不施肥、100% 基肥+无追肥、75% 基肥+25% 追肥、50% 基肥+50% 追肥、25% 基肥+75% 追肥、无基肥+100% 追肥。

1.2 数据源

1.2.1 实测数据的获取 于马铃薯幼苗期 (2021 年 2 月 20 日)、现蕾期 (2021 年 3 月 15 日)、块茎膨大期 (2021 年 4 月 1 日) 3 个关键生育期分别采集马铃薯 LAI 数据,测量样本均来自 2 种试验处理地块,每次随机重复试验中至少采集 1 个样本,测量样地在田间有相应的标记牌,每个生育期 45 个样本,3 个生育期 LAI 值的箱线图如图 1a 所示。LAI 的测量使用 LAI-2000 冠层分析仪,测量时

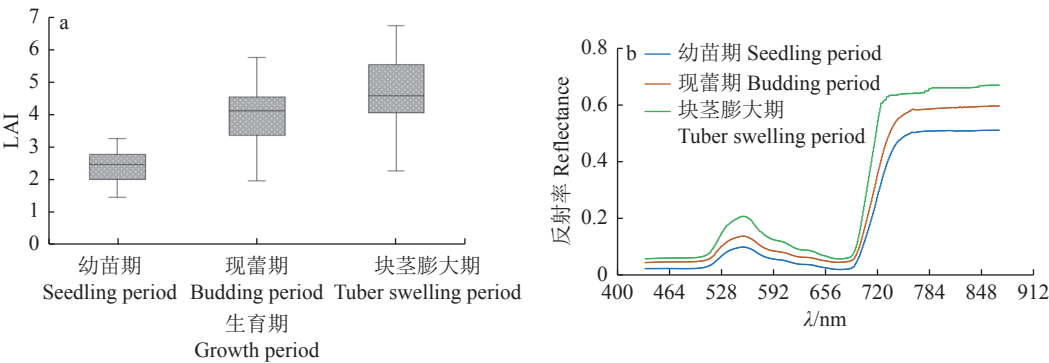


图 1 实测 LAI 值的箱线图 (a) 和实测光谱曲线 (b)

Fig. 1 Box plot of the measured LAI value (a) and measured spectral curve (b)

间在 17:00—18:30, 排除太阳直射对仪器测量的影响。每次测量测 1 次 A 值 (天空光)、4 次 B 值 (冠层下方)。同时, 选择样区内多个相同植株, 标记多个样点, 在正午日照充足且无云层遮盖的时候, 用 ASD 光谱仪测量不同生育期的光谱 (图 1b)。

1.2.2 多光谱数据获取与预处理 利用大疆 P4M 多光谱无人机在无风且阳光充足的中午时段采集影像, 飞行航高 100 m, 速度 50 km/h, 航向和侧向重叠率在 80% 以上, 像片分辨率为 1600 像素×1300 像素, 实际地面分辨率约 5 cm, 相机具体参数见表 1。3 次采集的数据运用大疆智图软件拼接, 利用反射率为 0.5 的标准定标版进行辐射校正, 得到反射率数据, 用 ENVI 软件裁剪拼接的影像。

1.3 马铃薯 LAI 估算方法

通过预处理的多光谱影像计算植被指数和纹理特征, 提取马铃薯植被。将实测的 LAI 与植被指

表 1 大疆 P4M 多光谱相机波段信息
Table 1 Band information of DJI P4M multispectral camera

波段 Band	中心波长/nm Center wavelength	波长宽度/nm Wavelength width
蓝波段 Blue band	450	32
绿波段 Green band	560	32
红波段 Red band	650	32
红边波段 Red edge band	730	32
近红外波段 Near-infrared band	840	52

数、纹理特征进行相关性分析, 基于 R^2_{adj} 全子集回归分析筛选最优特征变量, 用主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 融合光谱、纹理得到主要成分进行马铃薯 LAI 估算。流程如图 2 所示。

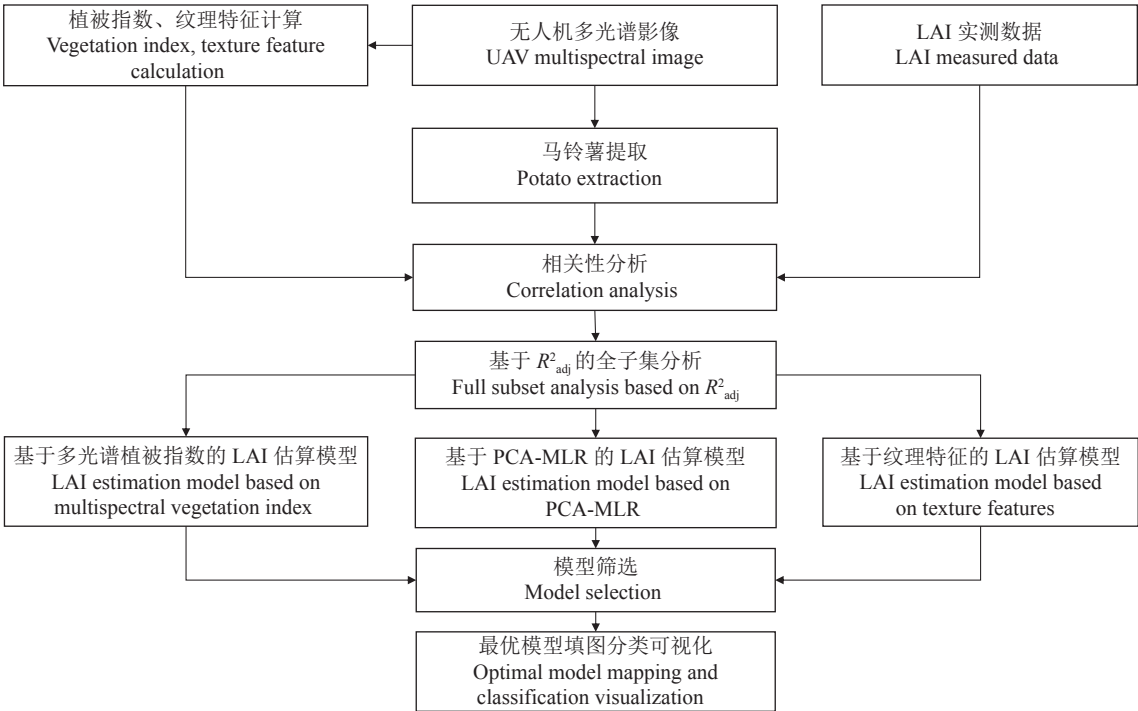


图 2 LAI 估算流程图
Fig. 2 LAI estimation flowchart

1) 马铃薯提取。用支持向量机 (Support vector machine, SVM) 分类方法提取马铃薯植被像元, 去除土壤、阴影、地膜等背景。2) 植被指数计算。根据大疆 P4M 多光谱波段、实测的不同生育期光谱曲线和已有的研究, 选取与叶面积指数相关的植被指数 (表 2)。3) 纹理特征计算。计算 8 类基于灰度共生矩阵 (Gray-level co-occurrence matrix, GLCM) 的纹理特征值有: 均值 (Mean)、协同性

(Homogeneity, Hom)、相异性 (Dissimilarity, Dis)、信息熵 (Entropy, En)、二阶矩 (Second moment, Sm)、相关性 (Correlation, Cor)、对比度 (Contrast, Contr) 方差 (Variance, Var), 共 40 个纹理特征值。4) 特征优选。将 LAI 与植被指数、纹理特征进行相关性分析, 挑选出相关性较高的特征, 并引入调整的 $R^2(R^2_{adj})$ 对植被指数、纹理特征进行全子集回归分析, 对相关性较高的特征进行二次优选。5) 光

表 2 多光谱植被指数

Table 2 Multispectral vegetation index

植被指数 Vegetation index	计算公式 ¹⁾ Calculating formula	文献来源 Literature source
NDVI	NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)	[15]
GNDVI	GNDVI=(NIR-Green)/(NIR+Green)	[16]
NDRE	NDRE=(NIR-Rededge)/(NIR+Rededge)	[17]
LCI	LCI=(NIR-Rededge)/(NIR+Red)	[18]
OSAVI	OSAVI=(NIR-Red)/(NIR+Red+0.16)	[19]
DVI	DVI=NIR-Red	[20]
DVI_GRE	DVI_GRE=NIR-Green	
DVI_EDG	DVI_EDG=NIR-Rededge	
RVI	RVI=NIR/Red	[21]
RVI_GRE	RVI_GRE=NIR/Green	
RVI_EDG	RVI_EDG=NIR/Rededge	
RDVI	RDVI=(NDVI) ^{1/2}	[22]
RDVI_GRE	RDVI=(GNDVI) ^{1/2}	
RDVI_EDG	RDVI_EDG=(NDRE) ^{1/2}	
G	G=Green	
R	R=Red	
EDG	EDG=Rededge	
NIR	NIR=NIR	

1) Green、Red、Rededge和NIR分别表示绿、红、红边及近红外波段反射率

1) Green, Red, Rededge and NIR represent the reflectance of green, red, red edge and near-infrared bands respectively

谱、纹理特征融合。利用 PCA 融合二次优选特征，用少量的主要成分表示原始光谱、纹理信息，融合成新的指标。6) 模型比较及验证。将 PCA 方法融

合的主要成分进行多元回归建模，并与植被指数、纹理特征回归模型进行比较。在所测试样本中，分别由 30 个建模样本和 15 个验证样本组成。利用 R^2 、 R^2_{adj} 和均方根误差 (RMSE) 作为模型的评价指标。7) 选较优模型进行马铃薯 LAI 估算。

2 结果与分析

2.1 马铃薯植被提取

马铃薯叶片、地膜、土壤、阴影分类结果如图 3 所示，每个生育期总体精度和用户精度达到 95% 以上。将马铃薯纯植被像元区域转换为矢量，裁剪出各地块马铃薯植被区域。

2.2 光谱、纹理特征与 LAI 的相关性分析

幼苗期、现蕾期、块茎膨大期马铃薯多光谱植被指数与 LAI 的相关性见表 3。幼苗期除 Green、Rededge、NIR 外，其余植被指数与 LAI 相关系数绝对值均为 0.50 以上， $P<0.01$ ；现蕾期，除 Green、Rededge 外，植被指数与 LAI 相关系数绝对值大多为 0.60~0.80， $P<0.01$ ；块茎膨大期，NDVI、GNDVI、RVI、RDVI、OSAVI、Red 和 RDVI_GRE 相关系数绝对值约为 0.50~0.65， $P<0.01$ 。

马铃薯各生育期纹理特征与 LAI 的相关性如图 4 所示。幼苗期， $b1_Contr$ 、 $b1_Hom$ 、 $b2_Cor$ 、 $b2_Mean$ 、 $b3_Dis$ 、 $b3_Ent$ 、 $b3_Mean$ 、 $b4_Cor$ 和 $b5_Mean$ 的相关系数绝对值为 0.40~0.60， $P<0.01$ 。现蕾期， $b1_Contr$ 、 $b1_Hom$ 、 $b2_Cor$ 、 $b3_Mean$ 、 $b3_Dis$ 、 $b4_Cor$ 和 $b5_Mean$ 相关系数绝对值为 0.40~0.60， $P<0.01$ 。块茎膨大期， $b1_Mean$ 、 $b3_Cor$ 、 $b3_Ent$ 、 $b3_Hom$ 、 $b3_Mean$ 、 $b4_Hom$ 、 $b5_Hom$ 和 $b5_Mean$ 相关系数绝对值为 0.40~0.60， $P<0.01$ 。

2.3 马铃薯 LAI 估算模型构建

依据 VI、纹理特征与 LAI 相关性分析结果，基于 R^2_{adj} 全子集回归构建 LAI 多元线性估算模型，

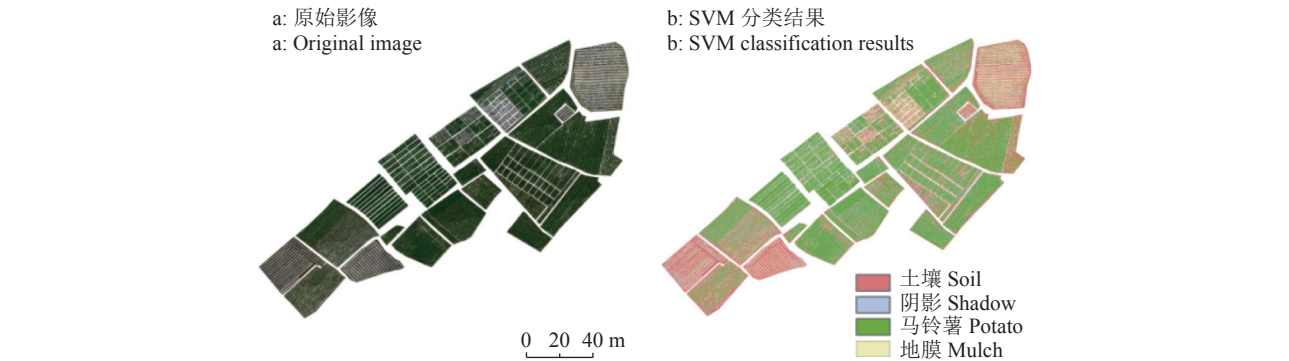


图 3 马铃薯提取前后的马铃薯植被区域对比
Fig. 3 Comparison of potato planting area before and after potato extraction

表 3 光谱特征与 LAI 的相关系数绝对值

Table 3 Absolute value of correlation coefficient between spectral feature and LAI

植被指数	幼苗期	现蕾期	块茎膨大期
Vegetation index	Seedling period	Budding period	Tuber swelling period
Green	0.49	0.46	0.30
Red	0.73	0.58	0.64
Rededge	0.30	0.48	0.15
NIR	0.43	0.61	0.24
NDVI	0.77	0.76	0.73
GNDVI	0.66	0.70	0.65
NDRE	0.53	0.63	0.30
OSAVI	0.69	0.70	0.66
LCI	0.58	0.66	0.33
RVI	0.76	0.79	0.73
RVI_GRE	0.54	0.64	0.54
RVI_EDG	0.67	0.74	0.24
DVI	0.54	0.64	0.35
DVI_GRE	0.50	0.65	0.32
GVI_REDED	0.51	0.70	0.30
RDVI	0.77	0.76	0.73
RDVI_GRE	0.66	0.69	0.54
RDVI_EDG	0.52	0.62	0.30

计算模型 R^2_{adj} 、 R^2 、RMSE。由图 4 光谱特征可知, 全子集优化植被指数效果较好的指标, 在幼苗期有 RDVI、RVI_GRE、Red、RDVI_EDG、GVI_EDG、LCI 和 GNDVI, 在现蕾期有 RDVI、NDRE、LCI、GNDVI 和 Green, 在块茎膨大期有 NDVI、OSAVI、RVI_EDG、LCI、NIR 和 GNDVI。优选的纹理特征重要度效果较好指标, 在幼苗期有 $b2_Hom$ 、 $b2_Dis$ 、 $b1_Mean$ 和 $b3_Contr$, 在现蕾期有 $b3_Mean$ 、 $b4_Cor$ 和 $b5_Mean$, 在块茎膨大期有 $b3_Mean$ 、 $b5_Mean$ 、 $b5_Hom$ 、 $b3_Hom$ 、 $b3_En$ 和 $b1_Mean$ (图 5)。

利用 PCA 方法对植被指数和纹理特征进行降维, 将累计贡献率大于 99% 的成分用来反映原始信息。确定 3 个生育期最佳主成分为 6、3 和 4 个, 基于 PCA 主成分多元线性回归 (Principal component analysis-multiple linear regression, PCA-MLR) 建模, 并与纹理特征多元回归 (Texture multiple linear regression, T-MLR)、植被指数多元回归 (Vegetation index multiple linear regression, VI-MLR) 模型进行

表 4 纹理特征与 LAI 的相关系数绝对值 ($|r|$)

Table 4 Absolute value of correlation coefficient ($|r|$) between texture feature and LAI

生育期	纹理特征 ¹⁾	$ r $
Growth period	Texture feature	
幼苗期 Seedling period	$b1_Contr$	0.57
	$b1_Hom$	0.63
	$b2_Cor$	0.58
	$b2_Mean$	0.42
	$b3_Dis$	0.55
现蕾期 Budding period	$b3_En$	0.44
	$b3_Mean$	0.30
	$b3_Var$	0.38
	$b4_Cor$	0.56
	$b5_Mean$	0.56
	$b1_Contr$	0.53
	$b1_En$	0.50
	$b1_Mean$	0.36
	$b2_Cor$	0.46
	$b2_Con$	0.57
块茎膨大期 Tuber swelling period	$b2_Dis$	0.52
	$b2_En$	0.65
	$b3_Mean$	0.49
	$b4_Cor$	0.62
	$b5_Mean$	0.54
	$b1_Mean$	0.63
	$b2_Var$	0.24
	$b3_Com$	0.53
	$b3_En$	0.47
	$b3_Hom$	0.43
	$b3_Sm$	0.62
	$b3_Mean$	0.69
	$b4_Hom$	0.63
	$b5_Mean$	0.45
	$b5_Hom$	0.53

1) $b1$ 、 $b2$ 、 $b3$ 、 $b4$ 和 $b5$ 分别代表蓝、绿、红、红边、近红外波段
1) $b1$, $b2$, $b3$, $b4$ and $b5$ represent blue, green, red, red edge and near-infrared bands respectively

对比。在马铃薯的 3 个不同生育期内, PCA-MLR 模型精度更高, 幼苗期、现蕾期与块茎膨大期的 R^2 分别约为 0.73、0.59 和 0.66, RMSE 分别为 0.426、0.540 和 0.432, 模型稳定性较好, 其 R^2 和 R^2_{adj} 都较高, RMSE 明显降低 (表 5)。

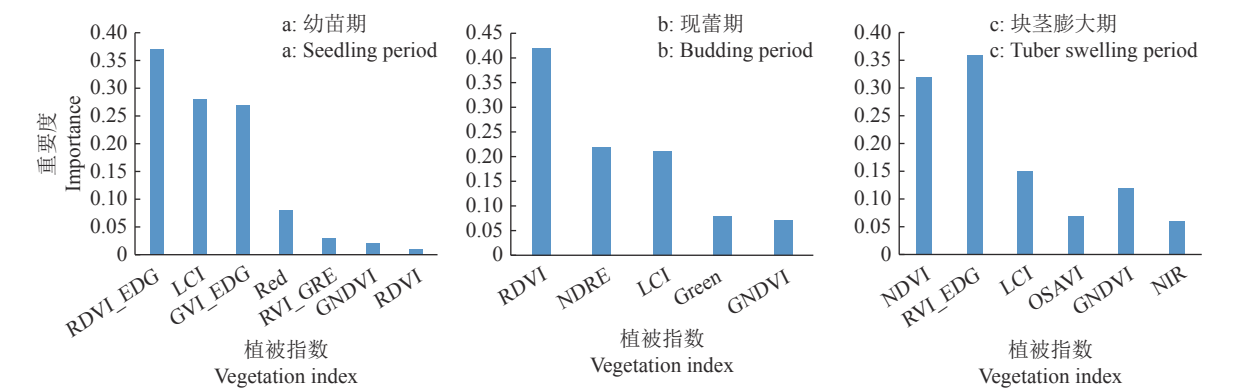
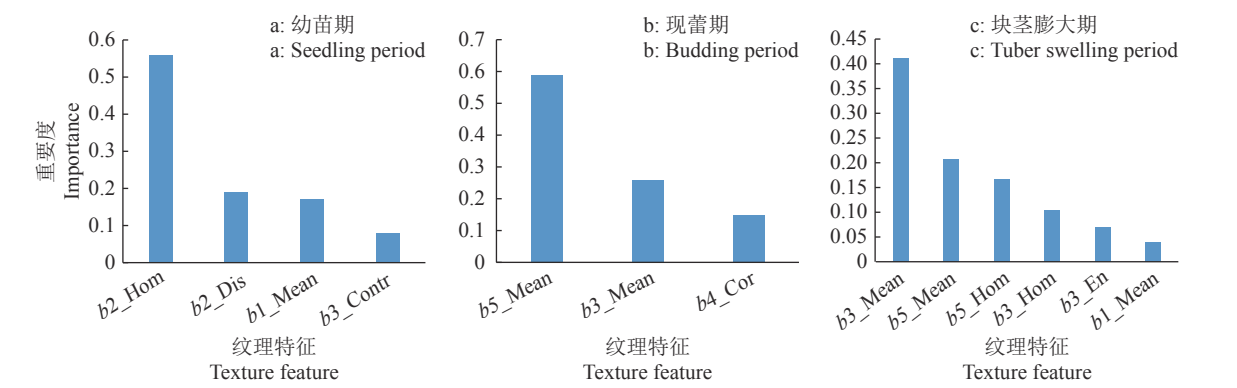


图 4 基于 R^2_{adj} 全子集回归优选的光谱特征重要度

Fig. 4 Importance of spectral features based on R^2_{adj} full subset regression optimization



b1、b2、b3、b4 和 b5 分别代表蓝、绿、红、红边、近红外波段
b1, b2, b3, b4 and b5 represent blue, green, red, red edge and near-infrared bands respectively

图 5 基于 R^2_{adj} 全子集回归优选的纹理特征重要度

Fig. 5 Importance of texture features based on R^2_{adj} full subset regression optimization

表 5 马铃薯各生育期 LAI 估算建模比较¹⁾

Table 5 Comparison of LAI estimation modeling for potatoes at different growth stages

生育期 Growth Period	自变量 Independent variable	建模方式 Modeling method	R^2	R^2_{adj}	RMSE	优化的回归模型 Optimized regression model
幼苗期 Seedling period	RDVI、RVI_GRE、Red、RDVI_EDG、GVI_EDG、LCI、GNDVI	VI-MLR	0.647	0.587	0.490	
	b2_Hom、b2_Dis、b1_Mean、b3_Contr	T-MLR	0.637	0.581	0.511	
	PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6	PCA-MLR	0.739	0.674	0.426	LAI=PC6×4.16+PC4×0.27+PC2×0.89-PC1×0.19-PC3×3.06-PC5×3.17+0.9
现蕾期 Budding period	RDVI、NDRE、LCI、GNDVI、Green	VI-MLR	0.483	0.470	0.571	
	b3_Mean、b4_Cor、b5_Mean	T-MLR	0.465	0.417	0.609	
	PC1、PC2、PC3	PCA-MLR	0.592	0.558	0.542	LAI=PC3×1.17-PC2×0.84-PC1×0.11+0.34
块茎膨大期 Tuber swelling period	NDVI、OSAVI、RVI_EDG、LCI、NIR、GNDVI	VI-MLR	0.608	0.539	0.540	
	b3_Mean、b5_Mean、b5_Hom、b3_Hom、b3_En、b1_Mean	T-MLR	0.594	0.561	0.536	
	PC1、PC2、PC3、PC4	PCA-MLR	0.659	0.592	0.432	LAI=PC1×0.53+PC2×0.26-PC3×0.72-PC4×0.15-0.08

1)PC1~PC6表示对应的主成分
1)PC1~PC6 represent the corresponding principal components respectively

2.4 马铃薯 LAI 估算结果分析

PCA-MLR 模型较优, 利用其进行 LAI 估算作图 (图 6), 实测值与预测值如图 7 所示。从幼苗期到块茎膨大期, LAI 逐渐增大, 图中颜色逐渐加深。

幼苗期叶子较少, 块茎膨大期马铃薯茎叶增长都达到了峰值, 是叶面积最大的时期^[23], 叶子相对茂密, LAI 较高, 不同处理的空间分布更为明显。

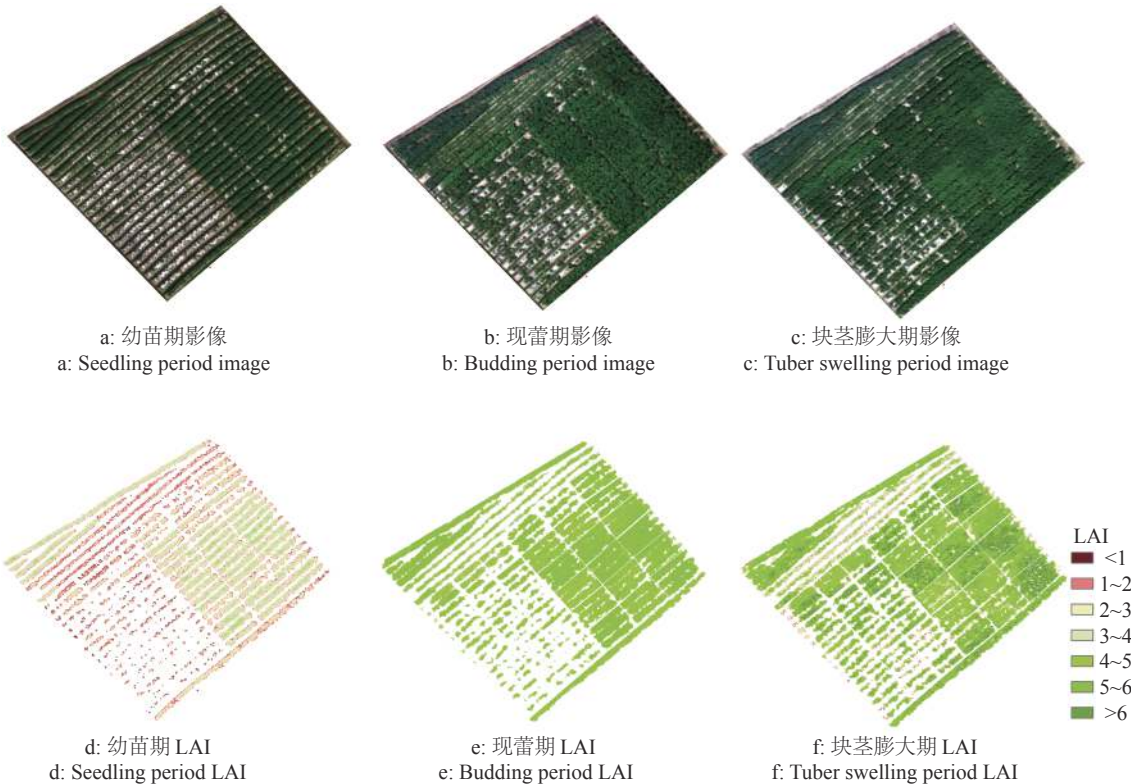


图 6 施肥处理地块 LAI 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of LAI in fertilized plots

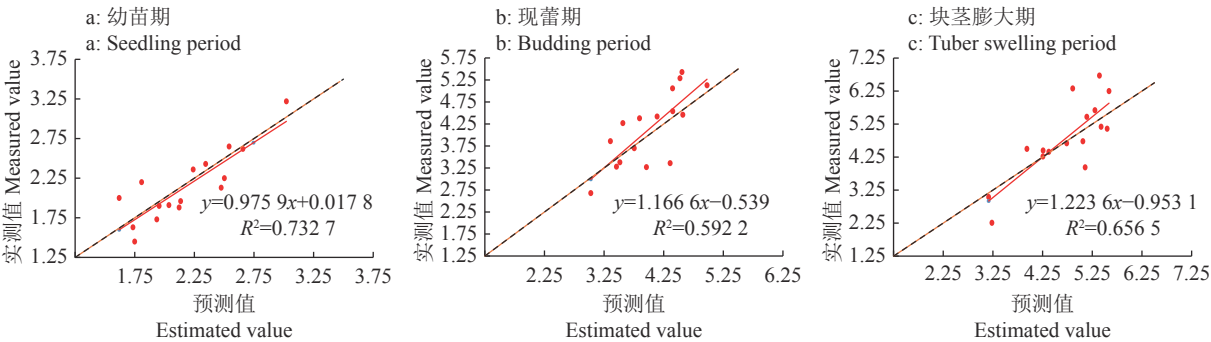


图 7 马铃薯各生育期 LAI 预测值与实测值

Fig. 7 Estimated and measured values of LAI of potato at different growth stages

2 种施肥试验统计如表 6 所示, 不同处理地块的 LAI 在 3 个时期皆大于不施肥处理。肥料联合筛选试验地块的 3 个生育期 LAI 均值分别为 2.89、4.88 和 5.21, 不同组合肥料施用地块 LAI 普遍高于单种肥料施用地块 LAI。常用有机肥+常规化肥处理 LAI 在块茎膨大期最大, 为 5.67, 比不施肥处理同期 LAI 增加约 20%。单种

肥料施用, 沃尔田生物有机肥处理块茎膨大期 LAI 最大, 为 5.00, 相比不施肥处理同期 LAI 增加约 5%; 在氮肥分期施用试验中, 3 个生育期 LAI 均值分别为 1.40、4.13 和 4.56。75% 基肥+25% 追肥处理地块块茎膨大期 LAI 最大, 为 4.92, 与同期不施肥处理相比, LAI 增加约 14%。

表 6 施肥试验各处理地块 LAI 统计结果

Table 6 Statistical results of LAI of each treatment plot in fertilization experiment

施肥试验类型 Type of fertilization experiment	处理 Treatment	幼苗期 Seedling period	现蕾期 Budding period	块茎膨大期 Tuber swelling period
肥料联合筛选试验 Fertilizer joint screening experiment	常用有机肥+常规化肥 Commonly used organic fertilizer + conventional chemical fertilizer	2.90	4.95	5.67
	生命源黄腐酸生物有机肥+缓释高钾肥 Life source fulvic acid bio-organic fertilizer + slow-release high potassium fertilizer	2.91	5.08	5.63
	沃尔田生物有机肥+缓释高钾肥 Waltian bio-organic fertilizer + slow-release high potassium fertilizer	2.99	5.05	5.46
	沃尔田生物有机肥 Waltian bio-organic fertilizer	2.82	4.78	5.00
	不施肥 No fertilization	2.81	4.61	4.75
	生命源黄腐酸生物有机肥 Life source fulvic acid bio-organic fertilizer	2.88	4.79	4.72
	均值 Mean	2.89	4.88	5.21
氮肥分期施用试验 Nitrogen fertilizer application experiment by stages	25%基肥+75%追肥 25% basic fertilization+75% additional fertilization	1.37	4.09	4.68
	50%基肥+50%追肥 50% basic fertilization+50% additional fertilization	1.36	4.12	4.40
	100%基肥+无追肥 100% basic fertilization+no additional fertilization	1.36	4.11	4.44
	不施肥 No fertilization	1.33	4.03	4.25
	无基肥+100%追肥 No basic fertilization+100% additional fertilization	1.55	4.24	4.69
	75%基肥+25%追肥 75% basic fertilization+25% additional fertilization	1.45	4.16	4.92
	均值 Mean	1.4	4.13	4.56

3 讨论与结论

从大疆 P4M 无人机影像的光谱、纹理信息及二者之间的融合入手,探究其对马铃薯 LAI 的估算能力。模型中马铃薯植被的植被指数和纹理特征的选取只考虑了不同生育期马铃薯冠层反射差异(即在红、蓝波段吸收,在绿波段反射以及在红边和近红外波段高反射的特性)。植被指数选用大多来自波段的比值、差值组合,而纹理特征选用仅能表现单波段植被冠层结构,没有进行组合,下一步研究中,还可以根据不同处理构建新的指标,更精细地反应施肥、水分等特征。在构造指标时,本文只采用了 PCA 主成分融合的方法,后面的研究还可考虑层次分析法、加权法等,比较不同方法的精度,加入其他纹理特征提取方法,增加样本量提升模型稳

定性,以及探究将 3 个生育期结合起来估算 LAI。也可以进一步探讨将马铃薯 LAI 估算结果应用于产量估算、作物表型特征研究、肥料筛选及施药指导等。

基于大疆 P4M 无人机多光谱数据,通过融合其光谱和纹理信息估算马铃薯 LAI: 1) 在现蕾期、幼苗期和块茎膨大期,基于植被指数的 LAI 估算模型比纹理特征模型表现得更为优越; 2) 基于 PCA-MLR 的马铃薯 LAI 估算模型优于基于多光谱植被指数和纹理特征的多元回归模型,其决定系数有所提高, RMSE 也明显降低; 3) 3 个不同生育期,马铃薯 LAI 值不断变化,从幼苗期 LAI 均值小于 2,到现蕾期 LAI 均值为 4~5,块茎膨大期 LAI 达到峰值,接近 6,这与原始测量数据相吻合。综上,通过

光谱、纹理信息融合的 PCA-MLR 模型, 能够较好地估算马铃薯 LAI, 可以为马铃薯长势监测和参数估算提供一种可行的方法。

参考文献:

[1] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2015(3): 1-7.

[2] LUO S, HE Y, LI Q, et al. Nondestructive estimation of potato yield using relative variables derived from multi-period LAI and hyperspectral data based on weighted growth stage[J]. *Plant Methods*, 2020, 16(1): 150. doi: 10.1186/s13007-020-00693-3.

[3] 常好雪, 蔡晓斌, 陈晓玲, 等. 基于实测光谱的植被指数对水稻叶面积指数的响应特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 205-211.

[4] 孙越, 顾祝军, 李栋梁. 无人机与卫星影像的叶面积指数遥感反演研究[J]. *测绘科学*, 2021, 46(2): 106-112.

[5] 李月, 何宏昌, 王晓飞, 等. 农作物冠层光谱分析及反演技术综述[J]. *测绘通报*, 2019(9): 13-17.

[6] HUNTE R, HIVELEY W D, FUJIKAWA S J, et al. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(1): 290-305.

[7] KAMAL M, SIDIK F, PRANANDA A R A, et al. Mapping leaf area index of restored mangroves using WorldView-2 imagery in Perancak Estuary, Bali, Indonesia[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23: 100567. doi: 10.1016/j.rsase.2021.100567.

[8] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 基于人工神经网络的大豆叶面积高光谱反演研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1138-1145.

[9] 刘畅, 杨贵军, 李振海, 等. 融合无人机光谱信息与纹理信息的冬小麦生物量估测[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(16): 3060-3073.

[10] 陈鹏, 冯海宽, 李长春, 等. 无人机影像光谱和纹理融合信息估算马铃薯叶片叶绿素含量[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 63-74.

[11] 杨福芹, 冯海宽, 肖天豪, 等. 融合无人机影像光谱与纹理特征的冬小麦氮营养指数估算[J]. *农业现代化研究*, 2020, 41(4): 718-726.

[12] RYU C, SUGURI M, UMEDA M. Multivariate analysis

of nitrogen content for rice at the heading stage using reflectance of airborne hyperspectral remote sensing[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(3): 214-224.

[13] 刘昌华, 王哲, 陈志超等. 基于无人机遥感影像的冬小麦氮素监测[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 207-214.

[14] YUE J, YANG G, TIAN Q, et al. Estimate of winter-wheat above-ground biomass based on UAV ultrahigh-ground-resolution image textures and vegetation indices[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 150: 226-244.

[15] TANAKA S, KAWAMURA K, MAKI M, et al. Spectral index for quantifying leaf area index of winter wheat by field hyperspectral measurements: A case study in Gifu prefecture, central Japan[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 5329-5346.

[16] 王来刚, 徐建华, 贺佳, 等. 基于无人机遥感的玉米叶面积指数与产量估算[J]. *玉米科学*, 2020, 28(6): 88-93.

[17] ZHANG J, WANG C, YANG C, et al. Assessing the effect of real spatial resolution of in situ UAV multispectral images on seedling rapeseed growth monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1207. doi: 10.3390/rs12071207.

[18] 李宗南. 冬小麦长势遥感监测指标研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.

[19] LIANG L, DI L, ZHANG L, et al. Estimation of crop LAI using hyperspectral vegetation indices and a hybrid inversion method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 165: 123-134.

[20] 夏天, 吴文斌, 周清波, 等. 冬小麦叶面积指数高光谱遥感反演方法对比[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 139-147.

[21] 姚雄, 余坤勇, 刘健. 基于无人机多光谱遥感的马尾松林叶面积指数估测[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 213-221.

[22] ROUJEAN J L, BREON F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3): 375-384.

[23] 周岑岑. 马铃薯生育期及形态建成的模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.

【责任编辑 庄 延】