

基于车载三维激光雷达的玉米叶面积指数测量

张漫¹ 苗艳龙¹ 仇瑞承¹ 季宇寒¹ 李寒² 李民赞¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为使用车载三维激光雷达快速获取作物的株高、叶面积指数(LAI)等作物形态参数,以玉米为研究对象,采用车载三维激光雷达点云数据,提出了一种基于玉米分层点云数量或分层点云数量与地面点云数量比值计算 LAI 的方法。使用车载平台获取京农科 728 和农大 84 玉米的三维点云数据;对点云数据进行预处理,获得已测量 LAI 真值区域的点云数据;进行玉米植株点云与地面点云分割,根据地面起伏程度,基于随机一致性平面分割算法,将距离阈值设置为 0.06 m;依据玉米垂直结构分布,将玉米植株划分为上、中、下 3 层,计算每层点云数量并分别标记为 H 、 M 和 L ,同时将上、中、下每层的点云数量与地面点云数量的比值标记为 H_r 、 M_r 和 L_r ,分别建立 H 、 M 、 L 和 H_r 、 M_r 、 L_r 与 LAI 真值的线性回归模型。试验结果表明:采用 H_r 、 M_r 变量建立的 LAI 二元线性回归测量模型最优,京农科 728 玉米训练集 R^2 为 0.931,验证集 R^2 为 0.949;农大 84 玉米训练集 R^2 为 0.979,验证集 R^2 为 0.984,本文方法可为田间快速测量 LAI 提供解决方案。

关键词: 玉米;叶面积指数;激光雷达;分层

中图分类号: S126; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0012-10

Maize Leaf Area Index Measurement Based on Vehicle 3D LiDAR

ZHANG Man¹ MIAO Yanlong¹ QIU Ruicheng¹ JI Yuhan¹ LI Han² LI Minzan¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important crop phenotyping parameter and an important indicator of crop growth and yield. Using vehicle-mounted three-dimensional (3D) LiDAR, crop morphological parameters such as plant height and LAI can be quickly obtained. Maize was taken as the research object, and a method of calculating LAI based on the ratio of the number of stratified point clouds or the number of stratified point clouds to the number of ground point clouds was proposed by using the data of three-dimensional LiDAR point clouds in vehicle. 3D point cloud data of Jingnongke 728 and Nongda 84 were obtained by vehicle platform. Firstly, the point cloud data were preprocessed to obtain the point cloud data of the measured LAI true value region. Secondly, the point cloud of maize plant and the ground point cloud were segmented. According to the fluctuation degree of the ground, the distance threshold of random sample consensus's plane model was set to be 0.06 m. then according to the vertical structure distribution of maize, the maize plants were divided into high, middle and lower layers, and each layer was calculated. The number of clouds was marked as H , M and L , respectively. At the same time, the ratio of the number of point clouds in each layer of high, middle, and lower layers to the number of ground point clouds was marked as H_r , M_r and L_r . Finally, the linear regression models of the true values of H , M , L and H_r , M_r , L_r and LAI were established respectively. The experimental results showed that the LAI binary linear regression measurement model established by H_r and M_r variables was the best. The R^2 of Jingnongke 728 training set was 0.931, the verification set R^2 was 0.949, the R^2 of

收稿日期: 2019-02-03 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571570)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700400~2017YFD0700403)和北京农业信息技术研究中心开放课题项目(KF2018W002)

作者简介: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

Nongda 84 training set was 0.979, and the verification set R^2 was 0.984. The research result provided a solution for rapid measurement in the LAI field.

Key words: maize; leaf area index; LiDAR; stratification

0 引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是重要的作物表型参数,它与光合作用、水循环、碳循环密切相关,是描述作物生长状况和产量的重要指标^[1-3],因此,叶面积指数的快速测量具有重要意义。LAI测量方法分为直接测量和间接测量^[4],直接测量是对植株叶片面积进行测量,具有破坏性,消耗大量人力,且效率低下。间接测量是通过测量冠层辐射的透过率计算 LAI,使用的传感器有彩色相机、多光谱传感器和激光雷达。

彩色图像分析技术为快速测量 LAI 提供了一种快速、高效的方法^[5-8],但其易受外界环境影响,尤其是光照影响,测量精度还可以进一步提高。使用多光谱或高光谱数据可以实现作物 LAI 的准确、快速测量^[9-14],不过同样存在受外界光照的影响。此外还有一些学者使用红外图像或卫星遥感数据进行作物叶面积指数测量研究^[15-20]。

激光雷达受外界光照影响较小,具有分辨率高、扫描速度快等优点^[21],可以为 LAI 快速测量提供一种方法。文献[22-23]使用机载激光雷达数据建立回波点云密度、激光穿透力指数、孔隙度和叶倾角与 LAI 的回归模型,使用地面激光雷达数据,提出运用体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法。文献[24]使用地面激光雷达数据,运用球极平面投影和 Lambert 方位角等面积投影方法,计算点云数据的孔隙度,进而计算单木真实 LAI。文献[25]使用地面雷达数据,运用点云切片算法,计算森林的角度孔隙度和消光系数,进而估算森林的 LAI。文献[26]使用多个不同方向的车载二维激光雷达,使用迭代最近点算法配准点云数据,对室内玉米植株进行三维重建。地面雷达存在数据量大、算法复杂、测量范围较小等问题;机载激光雷达分辨率较小,LAI 计算精度有待提高;车载三维激光雷达可以有效弥补以上缺点。

本文以大喇叭口期的玉米为研究对象,使用车载 16 层三维激光雷达采集点云数据,提出一种以玉米分层点云数量或分层点云数量与地面点云数量比值为自变量计算玉米 LAI 的方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

选用 Velodyne LiDAR 公司的 VLP-16 型三维

激光雷达采集玉米生长期的三维点云数据。VLP-16 型三维激光雷达水平视角范围 $0^\circ \sim 360^\circ$,分辨率 $0.1^\circ \sim 0.4^\circ$;垂直视角范围 $0^\circ \sim 30^\circ$,分辨率 2° ;测量范围为 $0.5 \sim 100 \text{ m}$;采集频率为 10 Hz 。在 Windows 7 操作系统下,以 Visual Studio 2013 为平台,安装点云库 PCL 1.8.0 (Point cloud library) 和 Cmake 3.8.0,使用 C++ 语言进行软件编程实现对三维点云数据的处理。叶面积指数真值获取的方法有网格法、复印称量法、回归方程法等破坏性测量方法和 LI 叶面积仪、LAI 冠层分析仪等非破坏测量方法。结合试验需求,使用 LI-COR 公司的 LAI-2200 型植物冠层分析仪测量叶面积指数作为真实值。LAI-2200 型植物冠层分析仪通过测定透过冠层后辐射能量的削弱程度确定叶面积指数;利用“鱼眼”光学传感器,垂直视野范围 $0^\circ \sim 148^\circ$,水平视野范围 $0^\circ \sim 360^\circ$,测量冠层上下 5 个角度光线强度的变化。

试验地点为北京市中国农业大学上庄实验站。试验时间为 2017 年 7 月 13 日 09:00—18:00,玉米品种为农大 84 和京农科 728,其中:农大 84 为舒展型品种,京农科 728 为紧凑型品种。玉米种植区长 64.8 m ,宽 11 m ,共分为 21 个种植小区,每个小区种植 3 行,1 个小区种植 1 个玉米品种,2 种玉米交替种植,如图 1a 所示。小区种植行间距为 90 cm ,株间距为 30 cm ,每行种植 36 株玉米,如图 1b 所示,生长期为大喇叭口期。使用冠层分析仪测量玉米的叶面积指数。每行以 0.9 m 等间距确定 6 个测量样本区域,6 个测量区域中心点把该行均匀分为 7 个区域,2 个测量中心点的距离为 1.5 m ,每个测量样本区域长度为 0.6 m ,测量区域中心位置为玉米种植点,前后边缘为相邻玉米种植点,样本测量区域包含测量中心点的 1 株完整玉米,和前后各 1 株玉米的部分。每个样本区域测量 3 次,取平均值作为该区域的叶面积指数真值,共计获得 12 个区域的叶面积指数,测量位置如图 1b 所示。VLP-16 型三维激光雷达安装在车载测量平台顶端,如图 2 所示,采集平台长为 2.0 m ,宽为 1.3 m ,垂直采集玉米三维点云数据,其与玉米冠层顶端的距离约为 60 cm 。采集玉米点云数据之前,为了降低地面起伏和松软造成采集平台俯仰倾斜和通行困难,对地面进行平整处理,保证激光雷达始终垂直采集。车载测量平台以 1 m/s 左右的速度向前行进,VeloView 软件同时进行三维点

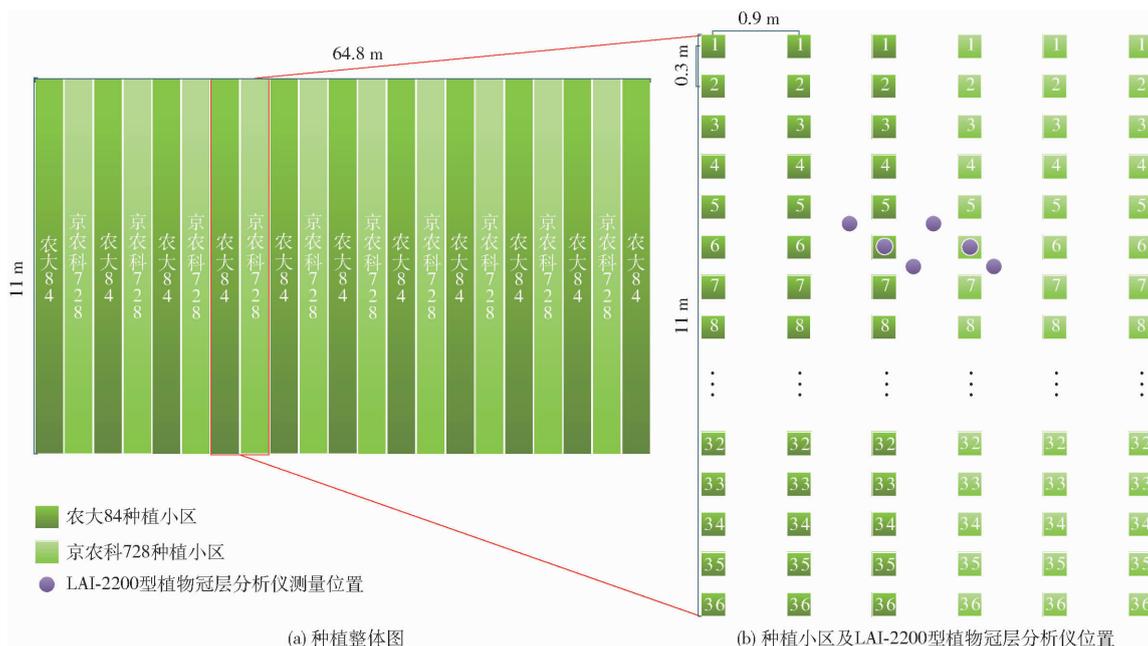


图1 玉米种植及 LAI-2200 型植物冠层分析仪测量位置图

Fig. 1 Location map of maize planting and LAI-2200 plant canopy analyzer

云数据的采集,采集频率为 10 Hz,存储为 .pcap 格式,用于后续处理。本次试验采集了 2 行玉米的点云数据,每个玉米品种 1 行;其中:京农科 728 有 32 株,农大 84 有 28 株,总共获得 3 000 帧点云数据。测量 LAI 真值区域共有 400 帧点云数据。

转换为 .pcd 格式。在每帧三维点云数据中,非测量区域玉米植株和测量平台为背景点云,对后续处理无用,且影响处理时间。因此,本文采用简单快速的直通滤波算法去除非测量区域玉米植株和测量平台点云数据,获得叶面积指数测量区域的三维点云数据。三维点云数据 X 轴与作物行垂直, Y 轴与地面垂直, Z 轴与作物行平行。田间采集试验时,测量 VLP-16 型激光雷达的安装位置,通过位置数据确定测量玉米区域的二维空间范围,进而分别设置点云坐标 X 、 Z 的阈值范围。



图2 玉米三维点云数据采集

Fig. 2 3D point cloud data acquisition map of maize

1. VLP-16 型激光雷达 2. 数据采集终端

1.2 三维点云数据处理

首先通过预处理去除背景点云,主要有其他区域玉米点云和测量平台车体点云。预处理之后的点云数据包括玉米植株点云和地面点云;使用随机采样一致性平面分割算法分离玉米植株点云和地面点云;对玉米植株点云使用直通滤波算法进行分层处理,并统计每层点云个数。对得到的每层点云数量或其与地面点云数量比值和测量得到的叶面积指数,进行数据分析和模型建立。

1.2.1 数据预处理

使用 PCL 软件把三维点云数据,从 .pcap 格式

1.2.2 点云分割

预处理后的点云由玉米植株点云和地面点云组成。因为地面起伏较小,地面点云组成一个近似平面的形状,符合平面模型。选择基于随机采样一致性(Random sample consensus, RANSAC)平面分割算法对点云数据进行分割。点云变化如图 3 所示,平面分割步骤如下:

(1) 读入预处理之后的点云,对点云进行一次直通滤波,把点云分为两部分:一部分为地面点云与少量植株点,另一部分为大量植株点。因为在植株稠密处点云数据,地面点数量占点云数量比例较低,难以分割出地面点云,分离出的数据多是几个位于同一平面叶子的点云,所以要先进行一次直通滤波把点云数据分为上下两层。

(2) 对地面点与少量植株点数据进行基于随机采样一致性平面分割。一部分为分割平面点,即地面点云,另一部分为非平面点云,即植株点和凹陷地面点。

(3)对非平面点云 Y 轴数据与地面点平均值比较,大于平均值,即为地面点插入平面点云,得到最终的地面点云;并从非平面点云中删除。

(4)把非平面点云插入到步骤(1)得到的植株点云中,获得最终的植株点云。

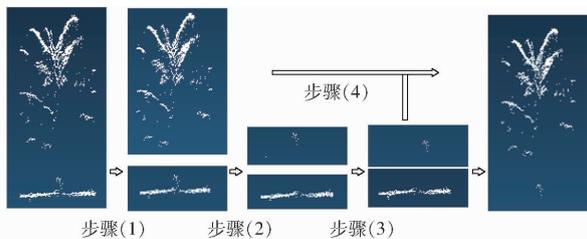


图3 平面分割点云变化

Fig.3 Change of plane segmentation point cloud

1.2.3 点云分层

玉米植株垂直结构分布一般为3层,植株上层、中层和下层,其中植株中层也称为高效叶层^[27]。玉米灌浆期植株达到最高,平均高度在300 cm,上层为240 cm以上,中层为120~240 cm,下层为120 cm以下。本次试验采集玉米生长期为大喇叭口期,玉米平均高度没有达到300 cm,需要对每层边界高度进行等比例变化。

根据分层边界高度使用直通滤波对植株点云进行分层,首先分离下层点云数据,对中层和上层点云进行两种处理:①滤波处理,去除叶片边缘噪声点,对点云数据进行中层和上层分离。②不做处理,对点云数据进行中层和上层分离,记录每层点云的数量,作为建立叶面积指数模型的自变量。通过对滤波处理和不做滤波处理建立的模型进行对比分析,判断滤波处理的必要性。

1.2.4 叶面积指数模型

模型的自变量分为两类:一类是以玉米植株上、中、下每层点云数量 H 、 M 、 L ,或它们的组合作为自变量;另一类是以玉米上、中、下每层的点云数量与地面点云数量的比值 H_r 、 M_r 、 L_r ,或它们的组合作为自变量。因变量为植物冠层分析仪测得的玉米叶面积指数LAI。对样本进行数据分析,包括共线性检测、线性回归分析和验证集检验。

对自变量进行共线性检测,使用自变量之间的相关系数和方差膨胀因子(VIF)。如果VIF值小于10,则认为自变量之间不存在共线性。方差膨胀因子计算公式为

$$D_{\text{VIF}} = \frac{1}{1 - r^2}$$

式中 r ——相关系数

D_{VIF} ——方差膨胀因子

对样本数据进行一元线性回归和多元线性回归

分析,建立玉米大喇叭口期的叶面积指数测量模型。使用决定系数 R^2 、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(rRMSE)作为评价模型精度的指标。

一般 R^2 值较大、RMSE和rRMSE值较小表示回归模型测量的值准确度高。使用 F 检验和 t 检验对自变量和因变量之间的线性显著性进行检验。

2 结果分析

2.1 数据预处理

测量VLP-16型激光雷达安装位置与车架边缘的距离,LAI-2200型植物冠层分析仪测量位置与车架边缘的距离。确定点云坐标 X 和 Z 的阈值分别是 $X \in [-0.55 \text{ m}, 0.45 \text{ m}]$ 、 $Z \in [-0.50 \text{ m}, 0.50 \text{ m}]$,坐标 Y 不作处理。对玉米三维点云数据进行直通滤波处理,其中京农科728有208帧数据,农大84有216帧数据。直通滤波前有非测量区域玉米植株和测量平台的点云数据,滤波后去除了这些无关数据,获得测量区域的玉米植株点云数据和地面点云内数据,平均每帧点云数据有2288个点,其中植株点2008个,地面点280个。如图4所示。

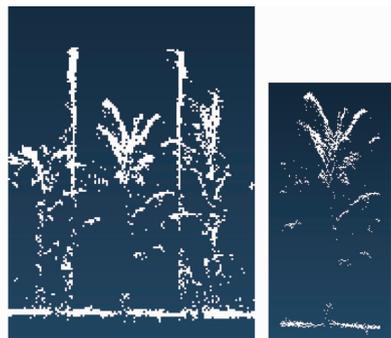


图4 玉米点云直通滤波处理

Fig.4 Maize point cloud pass filter processing

2.2 玉米植株点云和地面点云分割

读入预处理后的点云数据,进行平面分割算法步骤(1)操作,设置坐标轴 Y 直通滤波的阈值为 $[2.7 \text{ m}, 5.0 \text{ m}]$,获得 Y 坐标大于2.7 m的地面点云数据和少量植株数据, Y 坐标小于2.7 m的大量玉米点云数据。对地面点数据和少量植株数据进行步骤(2)操作,设置分割模型为平面模型,分割方法为随机采样一致性算法;根据地面起伏程度设置距离阈值为0.06 m,获得分割平面点云数据和非平面点云数据。进行步骤(3)操作,京农科728和农大84地面点云数据 Y 坐标的平均值分别为2.95 m和2.96 m,非平面点云数据中 Y 坐标大于地面平均值的点,插入平面点云数据,得到所有地面点云,记录地面点云数量;并在非平面点云中删除这些点。进行步骤(4)操作,合并步骤(1)获得的大量植株点云

数据和步骤(3)获得的非平面点云数据,得到完整植株点云数据。

2.3 玉米植株点分层

经过测量京农科 728 和农大 84 玉米植株的平均高度分别为 250 cm 和 220 cm。依据玉米植株垂直结构分层方法,确定京农科 728 和农大 84 的分层边界高度:京农科 728 上层为 200 cm 以上,中层为 100 ~ 200 cm,下层为 100 cm 以下;农大 84 上层为 176 cm 以上,中层为 88 ~ 176 cm,下层为 88 cm 以下。

读入玉米植株点云数据,根据分层边界高度,使用直通滤波算法对玉米植株点云数据进行分层,并记录每层点云数量。对中层和上层进行基于统计分析滤波,临近点数量设置为 6,标准差倍数设置为 1.2。对滤波后的点云进行分层处理,记录每层点云数量。

2.4 玉米叶面积指数模型建立

分别将京农科 728 和农大 84 的 200 多组数据

分为训练集(Train set)和验证集(Validation set)。随机选择其中的 40 组数据作为验证集,其余数据作为训练集。对每类处理自变量进行共线性检测,计算自变量之间的相关系数和方差膨胀因子。对训练集数据进行一元线性回归和多元线性回归分析,建立玉米大喇叭口期的叶面积指数测量模型,计算训练集和验证集的 R^2 、RMSE 和 rRMSE,作为模型评价指标。

2.4.1 共线性检测

对玉米植株上、中、下 3 层点云数量 H 、 M 、 L 和上、中、下每层的点云数量与地面点云数量的比值 H_r 、 M_r 、 L_r 进行共线性检测。针对不同的处理类型,京农科 728 中 H 、 M 、 L 或 H_r 、 M_r 、 L_r 间的相关系数和 VIF 如表 1 所示,其中 H 、 M 、 L 间的 VIF 的取值范围为 1.040 ~ 1.081, H_r 、 M_r 、 L_r 间的 VIF 的取值范围为 1.197 ~ 1.414。可以看出,京农科 728 引入地面点后,VIF 值有小幅增加。农大 84 中 H 、 M 、 L 或 H_r 、 M_r 、 L_r 间的相关系数和 VIF 如表 2 所示,其中 H 、 M 、 L

表 1 京农科 728 中 H 、 M 、 L 或 H_r 、 M_r 、 L_r 间的相关系数和 VIF

Tab. 1 Correlation coefficients and VIF values among H , M , L or H_r , M_r , L_r of Jingnongke 728

处理类型	参数	H	M	L	处理类型	参数	H_r	M_r	L_r		
无滤波	相关系数	H	1	-0.229	0.205	无滤波	相关系数	H_r	1	0.527	0.411
		M	-0.229	1	0.261			M_r	0.527	1	0.534
		L	0.205	0.261	1			L_r	0.411	0.534	1
	VIF	H		1.055	1.044		VIF	H_r		1.385	1.203
		M	1.055		1.073			M_r	1.385		1.399
		L	1.044	1.073				L_r	1.203	1.399	
滤波	相关系数	H	1	-0.250	0.197	滤波	相关系数	H_r	1	0.508	0.406
		M	-0.250	1	0.274			M_r	0.508	1	0.541
		L	0.197	0.274	1			L_r	0.406	0.541	1
	VIF	H		1.067	1.040		VIF	H_r		1.349	1.197
		M	1.067		1.081			M_r	1.349		1.414
		L	1.040	1.081				L_r	1.197	1.414	

表 2 农大 84 中 H 、 M 、 L 或 H_r 、 M_r 、 L_r 间的相关系数和 VIF

Tab. 2 Correlation coefficients and VIF values among H , M , L or H_r , M_r , L_r of Nongda 84

处理类型	参数	H	M	L	处理类型	参数	H_r	M_r	L_r		
无滤波	相关系数	H	1	-0.687	-0.292	无滤波	相关系数	H_r	1	0.072	0.123
		M	-0.687	1	0.597			M_r	0.072	1	0.859
		L	-0.292	0.597	1			L_r	0.123	0.859	1
	VIF	H		1.894	1.093		VIF	H_r		1.005	1.015
		M	1.894		1.554			M_r	1.005		3.815
		L	1.093	1.554				L_r	1.015	3.815	
滤波	相关系数	H	1	-0.706	-0.295	滤波	相关系数	H_r	1	0.031	0.121
		M	-0.706	1	0.582			M_r	0.031	1	0.857
		L	-0.295	0.582	1			L_r	0.121	0.857	1
	VIF	H		1.994	1.095		VIF	H_r		1.001	1.015
		M	1.994		1.512			M_r	1.001		3.766
		L	1.095	1.512				L_r	1.015	3.766	

间的 VIF 的取值范围为 1.093 ~ 1.994, H_r 、 M_r 、 L_r 间的 VIF 的取值范围为 1.001 ~ 3.815。可以看出农大 84 引入地面点后有一定的增加,增幅大于京农科 728。但是自变量之间的 VIF 都小于 10,表明它们之间的共线性可以忽略,都可以用来建立线性回归模型。

2.4.2 模型及评价

分别以 H 、 M 、 L 为自变量,或者几个变量的组合为自变量。以测量的叶面积指数值为因变量。使用训练集数据建立一元线性回归或多元线性回归模

型,计算训练集和验证集模型评价指标 R^2 、RMSE 和 rRMSE。京农科 728、农大 84 中 H 、 M 、 L 叶面积指数模型及评价如表 3、4 所示。对 H_r 、 M_r 、 L_r 自变量进行相同的处理,京农科 728、农大 84 中 H_r 、 M_r 、 L_r 叶面积指数模型及评价如表 5、6 所示。

上述叶面积指数测量模型没有通过 F 检验和 t 检验的有:表 3 中编号为 3、11 的模型,表 5 中编号为 1、9 的模型。模型通过 F 检验,没有通过 t 检验的有:表 3 中编号为 6、14 的模型,表 4 中编号为 5、13 的模型,表 5 中编号为 6、14 的模型,表 6 中编号为

表 3 京农科 728 中 H 、 M 、 L 叶面积指数模型及评价

Tab. 3 LAI model and evaluation indicators of H , M and L variables in Jingnongke 728

处理类型	编号	叶面积指数模型	训练集评价指标			验证集评价指标		
			R^2	RMSE/%	rRMSE/%	R^2	RMSE/%	rRMSE/%
无滤波	1	1.10338 + 0.00064H	0.319	0.207	0.141	0.472	0.208	0.143
	2	2.32232 - 0.00079M	0.660	0.147	0.101	0.732	0.151	0.112
	3	1.59894 + 0.00039L	0.013	0.250	0.190	0.020	0.280	0.219
	4	1.86267 + 0.00046H - 0.00070M	0.812	0.109	0.067	0.884	0.097	0.060
	5	2.25716 - 0.00088M + 0.00119L	0.774	0.120	0.084	0.778	0.137	0.097
	6	1.10391 + 0.00064H - 0.00011L	0.319	0.207	0.141	0.472	0.208	0.143
	7	1.89707 + 0.00037H - 0.00078M + 0.00088L	0.868	0.091	0.057	0.892	0.095	0.058
	8	1.96238 - 0.00017(H + M + L)	0.054	0.245	0.190	0.059	0.276	0.223
滤波	9	1.10527 + 0.00066H	0.320	0.207	0.141	0.476	0.208	0.142
	10	2.29310 - 0.00084M	0.664	0.146	0.100	0.742	0.148	0.109
	11	1.59894 + 0.00039L	0.013	0.250	0.190	0.020	0.280	0.219
	12	1.84802 + 0.00045H - 0.00074M	0.804	0.111	0.068	0.879	0.099	0.061
	13	2.22527 - 0.00095M + 0.00125L	0.787	0.116	0.081	0.780	0.136	0.094
	14	1.10483 + 0.00066H - 0.00011L	0.320	0.207	0.141	0.476	0.208	0.142
	15	1.88656 + 0.00036H - 0.00084M + 0.00094L	0.869	0.091	0.057	0.884	0.099	0.060
	16	1.93140 - 0.00017(H + M + L)	0.045	0.246	0.191	0.053	0.277	0.223

表 4 农大 84 中 H 、 M 、 L 叶面积指数模型及评价

Tab. 4 LAI model and evaluation indicators of H , M and L variables in Nongda 84

处理类型	编号	叶面积指数模型	训练集评价指标			验证集评价指标		
			R^2	RMSE/%	rRMSE/%	R^2	RMSE/%	rRMSE/%
无滤波	1	3.05348 - 0.00042H	0.839	0.133	0.050	0.811	0.138	0.052
	2	1.82011 + 0.00072M	0.728	0.173	0.070	0.728	0.165	0.067
	3	2.12269 + 0.00573L	0.322	0.273	0.113	0.250	0.277	0.114
	4	2.51267 - 0.00028H + 0.00036M	0.934	0.085	0.035	0.926	0.087	0.037
	5	1.78864 + 0.00068M + 0.00092L	0.733	0.171	0.069	0.721	0.168	0.067
	6	2.70751 - 0.00037H + 0.00331L	0.937	0.083	0.031	0.916	0.093	0.036
	7	2.49179 - 0.00031H + 0.00022M + 0.00216L	0.962	0.065	0.026	0.945	0.075	0.030
	8	3.42902 - 0.00035(H + M + L)	0.334	0.270	0.102	0.256	0.275	0.102
滤波	9	3.05632 - 0.00044H	0.842	0.132	0.049	0.815	0.136	0.051
	10	1.87701 + 0.00075M	0.735	0.171	0.069	0.740	0.162	0.066
	11	2.12269 + 0.00573L	0.322	0.273	0.113	0.250	0.277	0.114
	12	2.54988 - 0.00030H + 0.00036M	0.929	0.088	0.036	0.920	0.090	0.038
	13	1.83534 + 0.00070M + 0.00105L	0.742	0.168	0.068	0.733	0.164	0.066
	14	2.71299 - 0.00039H + 0.00328L	0.938	0.082	0.031	0.917	0.092	0.035
	15	2.51633 - 0.00032H + 0.00022M + 0.00224L	0.960	0.066	0.026	0.943	0.076	0.031
	16	3.42769 - 0.00038(H + M + L)	0.338	0.269	0.101	0.269	0.272	0.101

表5 京农科728中 H_r 、 M_r 、 L_r 叶面积指数模型及评价Tab.5 LAI model and evaluation indicators of H_r , M_r and L_r variables in Jingnongke 728

处理类型	编号	叶面积指数模型	训练集评价指标			验证集评价指标		
			R^2	RMSE/%	rRMSE/%	R^2	RMSE/%	rRMSE/%
无滤波	1	$1.70512 - 0.02213H_r$	0.012	0.250	0.194	0.001	0.285	0.227
	2	$2.04923 - 0.13718M_r$	0.759	0.123	0.094	0.787	0.137	0.109
	3	$1.73875 - 0.24660L_r$	0.060	0.244	0.185	0.071	0.274	0.216
	4	$1.89559 + 0.10007H_r - 0.17763M_r$	0.931	0.066	0.040	0.949	0.065	0.042
	5	$2.00753 - 0.16316M_r + 0.31038L_r$	0.828	0.104	0.080	0.848	0.115	0.091
	6	$1.74213 - 0.00172H_r - 0.24313L_r$	0.060	0.244	0.185	0.068	0.274	0.217
	7	$1.87764 + 0.09170H_r - 0.19344M_r + 0.22929L_r$	0.967	0.045	0.030	0.965	0.054	0.035
	8	$1.99698 - 0.05816(H_r + M_r + L_r)$	0.367	0.200	0.159	0.375	0.229	0.190
滤波	9	$1.70329 - 0.02205H_r$	0.011	0.250	0.194	0.001	0.285	0.227
	10	$2.04250 - 0.15054M_r$	0.767	0.121	0.092	0.795	0.133	0.106
	11	$1.73875 - 0.24660L_r$	0.060	0.244	0.185	0.071	0.274	0.216
	12	$1.89181 + 0.09662H_r - 0.19055M_r$	0.923	0.070	0.043	0.944	0.068	0.044
	13	$1.99805 - 0.18059M_r + 0.32505L_r$	0.841	0.100	0.076	0.854	0.112	0.087
	14	$1.74117 - 0.00126H_r - 0.24415L_r$	0.060	0.244	0.185	0.069	0.274	0.217
	15	$1.87229 + 0.08743H_r - 0.20963M_r + 0.24755L_r$	0.965	0.047	0.031	0.959	0.059	0.039
	16	$1.99176 - 0.06112(H_r + M_r + L_r)$	0.357	0.202	0.160	0.366	0.231	0.191

表6 农大84中 H_r 、 M_r 、 L_r 叶面积指数模型及评价Tab.6 LAI model and evaluation indicators of H_r , M_r and L_r variables in Nongda 84

处理类型	编号	叶面积指数模型	训练集评价指标			验证集评价指标		
			R^2	RMSE/%	rRMSE/%	R^2	RMSE/%	rRMSE/%
无滤波	1	$2.96087 - 0.05271H_r$	0.795	0.150	0.055	0.775	0.153	0.055
	2	$2.43965 + 0.03415M_r$	0.133	0.308	0.132	0.104	0.301	0.128
	3	$2.48324 + 0.34943L_r$	0.070	0.319	0.136	0.022	0.317	0.134
	4	$2.72629 - 0.05454H_r + 0.04037M_r$	0.979	0.048	0.020	0.984	0.040	0.016
	5	$2.46367 + 0.04901M_r - 0.24366L_r$	0.142	0.307	0.132	0.137	0.295	0.126
	6	$2.74162 - 0.05548H_r + 0.50215L_r$	0.937	0.083	0.035	0.928	0.086	0.036
	7	$2.72271 - 0.05466H_r + 0.03779M_r + 0.04263L_r$	0.980	0.047	0.020	0.984	0.040	0.016
	8	$2.95706 - 0.02478(H_r + M_r + L_r)$	0.272	0.282	0.107	0.256	0.277	0.102
滤波	9	$2.96072 - 0.05459H_r$	0.794	0.150	0.055	0.775	0.153	0.056
	10	$2.42646 + 0.04045M_r$	0.161	0.303	0.130	0.128	0.297	0.127
	11	$2.48324 + 0.34943L_r$	0.070	0.319	0.136	0.022	0.317	0.134
	12	$2.72921 - 0.05540H_r + 0.04326M_r$	0.978	0.049	0.021	0.983	0.042	0.017
	13	$2.47090 + 0.06637M_r - 0.39615L_r$	0.185	0.299	0.129	0.189	0.286	0.122
	14	$2.74252 - 0.05740H_r + 0.49906L_r$	0.935	0.085	0.036	0.926	0.087	0.036
	15	$2.72647 - 0.05554H_r + 0.04123M_r + 0.03104L_r$	0.978	0.049	0.021	0.983	0.042	0.017
	16	$2.95619 - 0.02647(H_r + M_r + L_r)$	0.274	0.282	0.107	0.262	0.276	0.102

5、7、13、15 的模型;其他模型均通过了 F 检验和 t 检验。从表中可以看出,没有通过检验的模型,基本评价指标显示的回归效果不好,只有表6中的编号为7和15模型评价 L_r 变量没有通过 t 检验,可以把 L_r 变量从模型中去除。

对通过 F 检验和 t 检验的模型进行对比分析可以得出,在每个表格中最优三元线性回归模型回归效果好于最优二元线性回归模型,最优二元线性回归模型回归效果好于最优一元线性回归模型。其中 R^2 最大、RMSE和rRMSE最小的模型是三元线性回

归模型中编号为7或15的回归模型。对比每个表格中无滤波处理和滤波处理后相应模型, R^2 、RMSE和rRMSE只有微小变化,滤波效果不显著,说明在使用分层点云数量建立叶面积指数测量模型的方法中,滤波处理作用不大。原因是离群点数量占点云数量的比例很小,所以对于点云数量建立的模型影响小;滤波会对中、上层点云数量产生一定比例的降低,可以通过系数的变化进行补偿。因此,以下只对无滤波处理进行分析。

对表3~6进行分析,在一元线性回归模型中,

京农科 728 的 M 和 M_r 变量,农大 84 的 H 和 H_r 变量线性拟合度高于其他一元线性回归模型。产生差异的原因是,京农科 728 是紧凑型玉米,叶倾角大,叶片紧凑,三维点云主要分布在中层,农大 84 是舒展型玉米,叶倾角小,叶片舒展,三维点云主要分布在上层。对比京农科 728 的 M 和 M_r 变量模型与农大 84 的 H 和 H_r 变量模型,引入地面点后,京农科 728 编号 2 的模型 R^2 从 0.660 提升至 0.759,农大 84 编号 1 的模型 R^2 从 0.839 降至 0.795, RMSE 和 rRMSE 变化很小,所以引入地面点对一元线性回归模型贡献不大。

在二元线性回归模型中,京农科 728 的 H 、 M 和 H_r 、 M_r 两个变量组合,农大 84 的 H 、 M 和 H_r 、 M_r 两个变量组合线性拟合度高于其他二元线性回归模型。两个品种的二元线性回归模型中最优模型自变量组合相同,说明在不同品种的叶面积指数测量模型中贡献最大的层虽然不同,但是最优变量组合却是相同的。其原因是中、上层点云的数量占全部点云数量的 90% 以上,基本包含了点云数量的全部信息。并且 H 、 M 和 H_r 、 M_r 的二元线性回归模型与其对应最优一元线性回归模型比较, R^2 有 0.2 左右的提升, RMSE 和 rRMSE 降低了一半左右,明显优于一元线性回归。对比表 3 和表 5 中编号 4 的模型,训练集 R^2 从 0.812 升至 0.931, RMSE 从 0.109% 降至 0.066%, rRMSE 从 0.067% 降至 0.040%, 验证集 R^2 从 0.884 升至 0.949, RMSE 从 0.097% 降至 0.065%, rRMSE 从 0.060% 降至 0.042%; 对比表 4 和表 6 中编号 4 的模型,训练集 R^2 从 0.934 升至 0.979, RMSE 从 0.085% 降至 0.048%, rRMSE 从 0.035% 降至 0.020%, 训练集 R^2 从 0.926 升至 0.984, RMSE 从 0.087% 降至 0.040%, rRMSE 从 0.037% 降至 0.016%。可以看出引入地面点对不同玉米品种二元回归模型的线性拟合度和测量精度都有很大程度的提高。所以选择二元线性回归模型中的 H_r 、 M_r 的变量组合,放弃 H 、 M 变量组合。

在三元线性回归模型中,全部植株点云数量作为自变量的模型 8 回归的效果很差,说明叶面积指数测量模型需要对点云植株进行分层处理。编号为 7 的模型在表 3、4、5 中通过了 F 检验和 t 检验,所以只对这 3 个模型进行分析。 H 、 M 、 L 和 H_r 、 M_r 、 L_r 三元线性回归模型与其对应最优二元线性回归模型比

较, R^2 只有 0.04 左右提高, RMSE 和 rRMSE 只降低了 20% 左右。模型的线性拟合度和测量精度提高不大,且增加了变量,使模型变得复杂,且适应性降低。

综合分析,选择最优二元线性回归模型,放弃三元线性回归模型。

3 讨论

使用玉米的垂直结构分层,及每层点云的数量或每层点云数量与地面点云数量的比值,建立了 LAI 测量模型,为 LAI 田间快速测量提供了一种新的思路。本研究目前只建立了玉米一个生长期的 LAI 测量模型,后续还需要对玉米不同生长期的 LAI 测量模型进行研究,验证该方法的通用性。

本文主要针对大喇叭口期的玉米开展研究,后续研究中,需进一步针对玉米的不同生长阶段,采取不同的点云分析处理方法。例如在玉米苗期、拔节期,玉米植株低矮,叶片较小,就需要先考虑玉米植株是否同样是存在 3 层的垂直分布,并根据植株的垂直分布对植株点云进行分层处理;在抽雄期、吐丝期等生育后期,植株完全长成,叶片交错纵横,遮挡严重,造成地面点云数量减少,可能会导致地面点云与植株点云分离出现问题。在模型建立部分,由于不同生育时期的植株点云和地面点云数量都存在不同程度的变动,在苗期时地面点云数量多,在吐丝期时地面点云数量少,依然要考虑是否要引入地面点云数量的问题。

4 结论

(1) 提出了一种基于车载三维激光雷达的叶面积指数测量算法,通过对玉米植株点云和地面点云进行分离,并根据垂直结构对玉米植株进行分层处理,建立了较高精度的叶面积指数计算模型。

(2) 通过对点云滤波处理前、后建立的 LAI 测量模型进行分析比较可知, R^2 、RMSE 和 rRMSE 没有显著优化。即有无滤波处理对基于分层点云数量建立 LAI 测量模型的影响可忽略不计。

(3) 通过对建立的叶面积指数测量模型进行综合分析可知,京农科 728 和农大 84 虽然株型不同,但都选择了以 H_r 、 M_r 为变量建立的叶面积指数测量模型,说明此方法在玉米的大喇叭口期具有一定的通用性。

参 考 文 献

- [1] ROSELL J, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81: 124 - 141.
- [2] 杨邦杰,裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 214 - 218.

- YANG Bangjie, PEI Zhiyuan. Definition of crop condition and crop monitoring using remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 214–218. (in Chinese)
- [3] 董莹莹. 农作物群体长势遥感监测及长势参量空间尺度问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
DONG Yingying. Analyzing spatial scale problems of crop growth parameters for growth monitoring with multi-scale remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [4] 黄星旻, 孙圆, 刘慧倩, 等. 多回波点云数据解算单株木叶面积指数[J]. 遥感学报, 2018, 22(6): 1042–1050.
HUANG Xingmin, SUN Yuan, LIU Huiqian, et al. Resolving leaf area index of individual trees based on multi-return terrestrial laser point cloud data[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(6): 1042–1050. (in Chinese)
- [5] 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.
NIU Qinglin, FENG Haikuan, YANG Guijun, et al. Monitoring plant height and leaf area index of maize breeding material based on UAV digital images[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 73–82. (in Chinese)
- [6] 李长春, 牛庆林, 杨贵军, 等. 基于无人机数码影像的大豆育种材料叶面积指数估测[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 147–158.
LI Changchun, NIU Qinglin, YANG Guijun, et al. Estimation of leaf area index of soybean breeding materials based on UAV digital images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 147–158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170816&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.016. (in Chinese)
- [7] 牛小桃, 樊军, 王胜, 等. 利用鱼眼摄像机测量植被叶面积指数动态变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3183–3190.
NIU Xiaotao, FAN Jun, WANG Sheng, et al. Measuring the dynamics of leaf area index of vegetation using fisheye camera[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3183–3190. (in Chinese)
- [8] ORLANDO F, MOVEDI E, CODUTO D, et al. Estimating leaf area index (LAI) in vineyards using the Pocket LAI smart-app[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2004.
- [9] 陈玉青, 杨玮, 李民赞, 等. 基于 Android 手机平台的冬小麦叶面积指数快速测量系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 123–128.
CHEN Yuqing, YANG Wei, LI Minzan, et al. Measurement system of winter wheat LAI based on Android mobile platform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 123–128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s020&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.020. (in Chinese)
- [10] 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.
XIA Tian, WU Wenbin, ZHOU Qingbo, et al. Comparison of two inversion methods for winter wheat leaf area index based on hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 139–147. (in Chinese)
- [11] 刘轲, 周清波, 吴文斌, 等. 基于多光谱与高光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 155–162.
LIU Ke, ZHOU Qingbo, WU Wenbin, et al. Comparison between multispectral and hyperspectral remote sensing for LAI estimation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 155–162. (in Chinese)
- [12] 高林, 杨贵军, 于海洋, 等. 基于无人机高光谱遥感的冬小麦叶面积指数反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 113–120.
GAO Lin, YANG Guijun, YU Haiyang, et al. Retrieving winter wheat leaf area index based on unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 113–120. (in Chinese)
- [13] 李岚涛, 李静, 明金, 等. 冬油菜叶面积指数高光谱监测最佳波宽与有效波段研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 156–165.
LI Lantao, LI Jing, MING Jin, et al. Selection optimization of hyperspectral bandwidth and effective wavelength for predicting leaf area index in winter oilseed rape[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 156–165. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180221&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.021. (in Chinese)
- [14] ROOSJEN P, BREDE B, SUOMALAINEN J, et al. Improved estimation of leaf area index and leaf chlorophyll content of a potato crop using multi-angle spectral data-potential of unmanned aerial vehicle imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 14–26.
- [15] 王传宇, 郭新宇, 杜建军. 基于时间序列红外图像的玉米叶面积指数连续监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 175–181.
WANG Chuanyu, GUO Xinyu, DU Jianjun. Maize leaf area index continuous monitoring based on time-series infrared images[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 175–181. (in Chinese)
- [16] WATANABE K, GUO W, ARAI K, et al. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8(421): 1–11.
- [17] 王双喜, 束美艳, 顾晓鹤, 等. 利用 Beer-Lambert 消光定律遥感反演玉米叶面积指数[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(12): 67–73.

- WANG Shuangxi, SHU Meiyang, GU Xiaohe, et al. Retrieval of corn leaf area index using Beer - Lambert extinction law[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(12): 67 - 73. (in Chinese)
- [18] 王丽爱, 谭昌伟, 杨昕, 等. 基于 MK - SVR 模型的小麦叶面积指数遥感反演[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 245 - 251.
- WANG Li'ai, TAN Changwei, YANG Xin, et al. Monitoring wheat leaf area index using MK - SVR algorithmic model and remote sensing data[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 245 - 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150535&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.035. (in Chinese)
- [19] KROSS A, MCNAIRN H, LAPEN D, et al. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 235 - 248.
- [20] FANG H, YE Y, LIU W, et al. Continuous estimation of canopy leaf area index (LAI) and clumping index over broadleaf crop fields: an investigation of the PASTIS - 57 instrument and smartphone applications[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253 - 254: 48 - 61.
- [21] LIN Y. LiDAR: an important tool for next-generation phenotyping technology of high potential for plant phenomics? [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 119: 61 - 73.
- [22] 苏伟, 展郡鸽, 张明政, 等. 基于机载 LiDAR 数据的农作物叶面积指数估算方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 272 - 277.
- SU Wei, ZHAN Junge, ZHANG Mingzheng, et al. Estimation method of crop leaf area index based on airborne LiDAR data [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 272 - 277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160338&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.038. (in Chinese)
- [23] 苏伟, 郭皓, 赵冬玲, 等. 基于地基激光雷达的玉米真实叶面积提取方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 345 - 353.
- SU Wei, GUO Hao, ZHAO Dongling, et al. Estimation of actual leaf area of maize based on terrestrial laser scanning[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 345 - 353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160747&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.047. (in Chinese)
- [24] 赵方博, 王佳, 高赫, 等. 地面激光雷达的单木真实叶面积指数提取[J]. *测绘科学*, 2019, 44(4): 81 - 86, 109.
- ZHAO Fangbo, WANG Jia, GAO He, et al. Extraction of real leaf area index of individual tree based on terrestrial laser scanner[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(4): 81 - 86, 109. (in Chinese)
- [25] 路璐, 郑光, 马利霞. 激光雷达和点云切片算法结合的森林有效叶面积指数估算[J]. *遥感学报*, 2018, 22(3): 432 - 449.
- LU Lu, ZHENG Guang, MA Lixia. Combining point cloud slicing and terrestrial laser scanning data to retrieve an effective leaf area index[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(3): 432 - 449. (in Chinese)
- [26] GARRIDO M, PARAFOROS D, REISER D, et al. 3D maize plant reconstruction based on georeferenced overlapping LiDAR point clouds[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 17077 - 17096.
- [27] 梁熠, 何文寿, 代晓华, 等. 株行配置对春玉米根冠空间分布及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24(6): 97 - 102.
- LIANG Yi, HE Wenshou, DAI Xiaohua, et al. Effects of planting density and row spacing on root-shoot spatial distribution and grain yield of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6): 97 - 102. (in Chinese)