

基于 Sentinel-1A 双极化时序数据的甘蔗株高反演方法

孙 盛¹ 刘立露¹ 胡忠文² 余 旭³

(1. 广东工业大学计算机学院, 广州 510006; 2. 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 深圳 518000;
3. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要: 甘蔗株高为甘蔗品种与土壤、气象、水文等因素的综合反映,是甘蔗长势监测与估产的重要指标。研究以华南地区气候与天气条件为基础,通过对覆盖甘蔗全生长期的 23 景时间序列 Sentinel-1A 数据进行预处理、矩阵转换与 Cloude-Pottier 分解,求得双极化雷达植被指数(Dual-pol radar vegetation index, DPRVI)。分析了该指数与甘蔗长势参数(株高)随甘蔗不同生长期的动态变化规律。采用 4 种经典的经验回归模型(线性、二次多项式、指数、对数),以分段函数形式对不同生长期的甘蔗株高进行反演,建立最佳反演模型。实验结果表明,拟合模型在分蘖期前相关性最高,二次多项式模型拟合效果最优,决定系数 R^2 与均方根误差分别达到了 0.882 与 0.118 cm,对反演效果最好的分蘖期之前的二次函数模型进行验证,结果表明决定系数 R^2 达 0.839,平均绝对偏差为 7.4%,说明 DPRVI 反演甘蔗株高是有效的。将 DPRVI 与其他 3 种经典的反演参数进行对比,结果表明,DPRVI 的性能优于其他 3 种参数。通过分析可得,DPRVI 可以较好地反演甘蔗生长前期的株高变化,反演的株高参数可供农业管理部门参考。

关键词: 时序数据; Sentinel-1A; 甘蔗; 株高反演; 双极化雷达植被指数

中图分类号: S566.1; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)02-0186-09

OSID:



Inversion Method of Sugarcane Plant Height Based on Sentinel-1A Dual-polarization Time Series Data

SUN Sheng¹ LIU Lili¹ HU Zhongwen² YU Xu³

(1. School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Ministry of Natural Resources, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China

3. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Sugarcane plant height is a comprehensive reflection of soil, meteorology, hydrology and other factors, and it is also an important index for sugarcane growth monitoring and yield estimation. Based on the climate and pre weather conditions in South China, the dual-pol radar vegetation index (DPRVI) was obtained by preprocessing, matrix transformation and Cloude-Pottier decomposition of the time series Sentinel-1A data of 23 landscapes covering the whole growth period of sugarcane. The dynamic changes of this index and sugarcane growth parameters (plant height) with different growth periods of sugarcane were analyzed. Then four classic empirical regression models (linear, quadratic polynomial, exponential and logarithmic) were used to invert the height of sugarcane plants in different growth periods in the form of piecewise function to establish the best inversion model. Through the experimental results, it can be found that the fitting model had the highest correlation before the tillering stage, and the quadratic polynomial model had the best fitting effect. The determination coefficient R^2 and the root mean square error were 0.882 and 0.118 cm, respectively. Then the quadratic function model with the best inversion effect before tillering stage was verified and analyzed. The results showed that the determination coefficient R^2 was up to 0.839, and the average absolute deviation was 7.4%, which indicated that the model could better guarantee the accuracy of predicting plant height by using DPRVI. Finally, DPRVI

收稿日期: 2021-01-28 修回日期: 2021-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61672007)、自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室开放基金项目(2019002)、广东省海洋与渔业厅渔港建设和渔业发展专项(A201701D04)和广东省国际合作领域项目(2019A050509009)

作者简介: 孙盛(1980—),男,副教授,博士,主要从事遥感图像处理和计算机视觉研究,E-mail: sunsheng@gdut.edu.cn

was compared and analyzed with other three classical remote sensing parameters. The results showed that the performance of DPRVI was better than that of the other three parameters. Through the analysis, it was concluded that DPRVI can better invert the change of plant height in the early growth stage of sugarcane, and the parameters of plant height can be used as a reference for agricultural management departments.

Key words: time series data; Sentinel-1A; sugarcane; plant height inverse; dual-polarization radar vegetation index

0 引言

甘蔗是我国主要的糖料作物,被农业部列为九大主要农作物之一,广东省作为甘蔗的主要生产区,2019 年种植面积达 1 030 065.01 hm², 占据全国的 12.28%^[1]。因此,多维度地监测甘蔗的生长变化规律,对广东甘蔗产业的可持续发展具有较好的推动作用^[2]。甘蔗株高作为甘蔗生长情况、产量的重要评估标准之一,选择株高进行反演对于甘蔗的生长监测具有较好的代表意义。

传统反演作物参数主要通过实地调研,需要耗费较多人力物力与时间,遥感技术以其在时空尺度上的优势,逐渐在几种大宗粮食作物如水稻^[3-4]、玉米^[5-6]、小麦^[7-8]、油菜^[9-10]等得到了广泛应用,但应用于甘蔗的研究仍然较少。

目前,学术界较多采用光学遥感技术完成甘蔗种植信息的识别^[11-12]、生物物理参数反演与估计^[13]。但是,光学遥感图像受天气和气候影响较大,我国甘蔗种植多在中国南部广东、广西地区,这些地区空气湿度大,常年多云多雨,应用光学遥感技术进行甘蔗生长监测的效果较差。合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)遥感^[14]具有全天时、全天候的特点,可以较好地适用于广东地区农作物生长监测。近年来,基于 SAR 后向散射系数对甘蔗进行作物类型鉴定^[15-16]和长势参数株高^[17]等生长监测的研究有所增加。但是,后向散射系数过早饱和的特点限制了对甘蔗生长后期的监测,因此,需进一步挖掘 SAR 的极化特征在甘蔗株高反演中的潜力。

目前,已有不少利用极化特征开展其他作物的研究,如 CHANG 等^[18]通过对全极化 PALSAR(L 波段)卫星数据进行极化特征分解,推得极化雷达植被指数(Polarimetric radar vegetation index, PRVI)定量反演灌木丛生物量,该研究认为灌木丛生物量与 PRVI 的相关性($R^2 = 0.75$)优于雷达植被指数(Radar vegetation index, RVI)^[19]的相关性($R^2 = 0.5$)。WANG 等^[20]基于全极化无人机合成孔径雷达(Uninhabited aerial vehicle synthetic aperture radar, UAVSAR)数据的极化分解方法,为不同的散射机制定义 SAR 监测作物生长的植被生长指数。

结果表明,散射特性可以随作物类型和物候发展阶段而变化,该植被生长指数与作物株高和生物量的地面测量值具有很好的相关性。尽管这些雷达植被指数可以很好地表征植被情况,但仅限于全极化或简缩极化 SAR 卫星数据;另一方面,这些研究都是基于经济成本较高的商业 SAR 卫星,不太适用于大范围区域作物监测的应用。

本文采用欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提供的免费科研模式的双极化 SAR Sentinel-1A 时序数据,分析双极化雷达植被指数(DPRVI)^[21]对于株高反演的可行性;分析讨论 DPRVI 对甘蔗不同生长期的响应,采用 4 种经典的经验回归模型定量反演甘蔗株高并对最佳反演模型进行验证。将 DPRVI 与 3 种经典的极化参数的时间模型进行性能评价,以验证本文提出的株高反演方法的效果和性能。

1 研究区域和实验数据

1.1 研究区域与研究作物概况

研究区域位于广东省广州市南沙区,中心坐标东经 113°56′,北纬 22°78′,年降雨量为 1 623.6 ~ 1 899.8 mm,2017 年、2018 年与 2019 年甘蔗种植面积分别达到 6 600.00、5 973.34、4 913.34 hm²,是该区域种植面积最大的农作物^[22]。在广州市南沙区大岗镇庙贝村进行研究区域的数据采集,如图 1 所示。甘蔗生长周期一般分为发芽期、幼苗期、分蘖期、伸长期和成熟期 5 个时期。在 2、3 月播种,至当年 11 月或次年 1、2 月收获结束。其中分蘖期 5 月至 6 月上中旬,伸长期 6 月下旬至 10 月,成熟期 11 月至次年 1、2 月。因甘蔗伸长期较长,将 6 月下旬至 8 月下旬分为伸长前期,8 月下旬至 10 月分为伸长后期。

1.2 研究区域数据获取

通过多次调研获取了研究区域甘蔗生长周期内 23 景时间序列 Sentinel-1A 数据及卫星过境时间基本同步的 3 期实地数据采集;此外,在当地气候与农业气象中心的支持下,补充了 3 个调研时间节点之间的甘蔗生长数据。数据获取时间为 2020 年 2 月底(甘蔗播种期)至 2020 年 12 月底(甘蔗成熟期)。

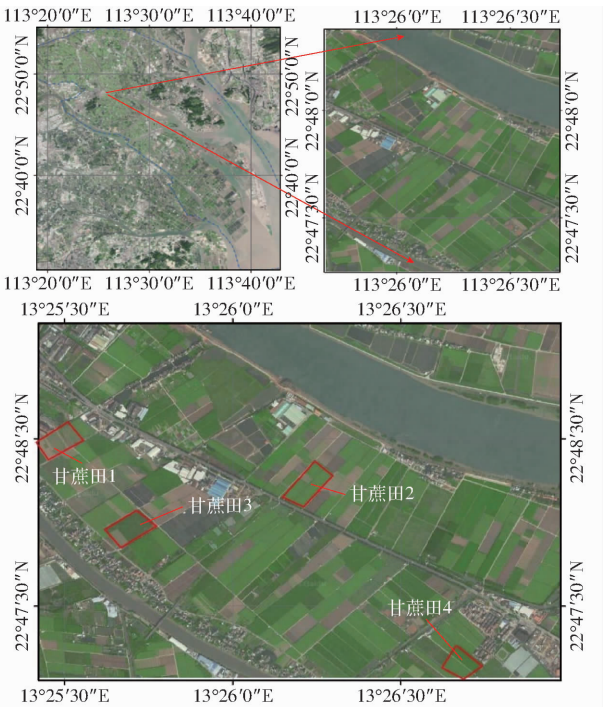


图 1 研究区域位置

Fig. 1 Location of study area

1.2.1 SAR 数据

为避免不同传感器观测配置对观测结果的影响,选取 Sentinel-1A 卫星的 IW 模式一级产品 (Level-1) 中的单复视 (Single looking complex, SLC) 图像,其重返周期为 12 d、空间分辨率为 5 m (距离向) × 20 m (方位向),运行轨道为升轨右视;单次成像时,完整条带长约 250 km,距离向上由 3 个子条带构成,每个子条带在方位向上有 9 个 bursts 并按方位向顺序排列 (图 2)。

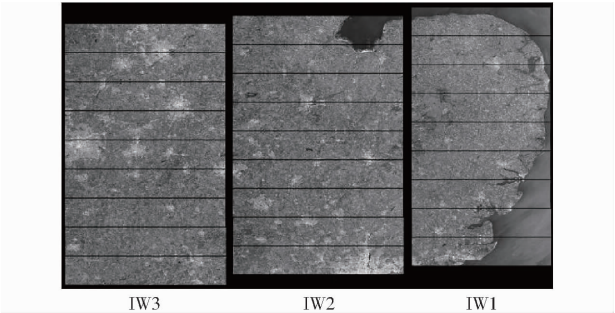


图 2 Sentinel-1A IW 图像

Fig. 2 Sentinel-1A IW image

1.2.2 实地调研数据

Sentinel-1A 时序数据覆盖了研究区甘蔗的整个周期,地面实地调研时间分别为与卫星过境采集基本同步的 3 个时间节点:2019 年 11 月 24 日、2020 年 9 月 29 日与 2020 年 12 月 22 日 (表 1)。为保证足够的纯净像元,减少其他作物的影响,即降低混杂像元,实验区域要求种植面积不小于 20 hm²,并通过北斗高精度分米级移动平台 Qmini A5 (亚米级差分

信号)采集经纬度等数据。每次调研获取实验区域 12 块代表性地块的甘蔗株高、伸长期、种植密度与现场天气情况等;每个代表性地块大小为 2 m × 2 m,以米尺测量地面至甘蔗自然状态下最高点的距离作为甘蔗株高,将测量得到的每个地块的株高平均值作为该地块的甘蔗株高。

表 1 实地调研时间点及现场图

Tab. 1 Field research date and scene pictures

实地调研时间	2019-11-24	2020-09-29	2020-12-22
卫星过境时间	2019-11-23	2020-09-28	2020-12-21
生长期	成熟期 (已收割)	伸长期	成熟期
现场图			

2 株高反演总体方案及双极化雷达植被指数

2.1 总体反演方案

首先对时间序列 Sentinel-1A 数据进行预处理,将 SAR 散射矩阵转换为协方差矩阵;再通过 Cloude-Pottier 目标分解方法^[23]求得特征值与极化度 (Degree of polarization, DoP)^[24],算出雷达双极化植被指数 DPRVI;对甘蔗株高 h 进行反演,得出甘蔗生长最佳反演模型。对于模型采用决定系数 R^2 与均方根误差 RMSE 进行性能评测,并将 DPRVI 与 3 种经典极化参数进行对比。总体设计方案见图 3。

2.2 时间序列 Sentinel-1A 数据预处理

由于 SAR 卫星的成像体制, Sentinel-1A 图像数据含有相干斑噪声^[25]。因此首先需对 Sentinel-1A 原始图像进行预处理。

利用 Python 搭建欧洲航天局哨兵系列卫星产品的综合应用平台 SNAP (Sentinel application platform) 二次开发环境;结合 SNAP 平台中的子模块完成图像的预处理。

将图像从散射矩阵转换为 2×2 的协方差矩阵 (C_2),该矩阵是一个二阶散射信息量,由双极化散射矩阵目标向量 $k^{[26]}$ 的空间平均生成,计算式为

$$k = [\langle S_{VV} \rangle \quad \langle S_{VH} \rangle]^T \tag{1}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |S_{VV}|^2 \rangle & \langle |S_{VV}S_{VH}^*| \rangle \\ \langle |S_{VH}S_{VV}^*| \rangle & \langle |S_{VH}|^2 \rangle \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 S_{VH} 、 S_{VV} ——双极化数据 VH、VV 极化通道的散射矩阵

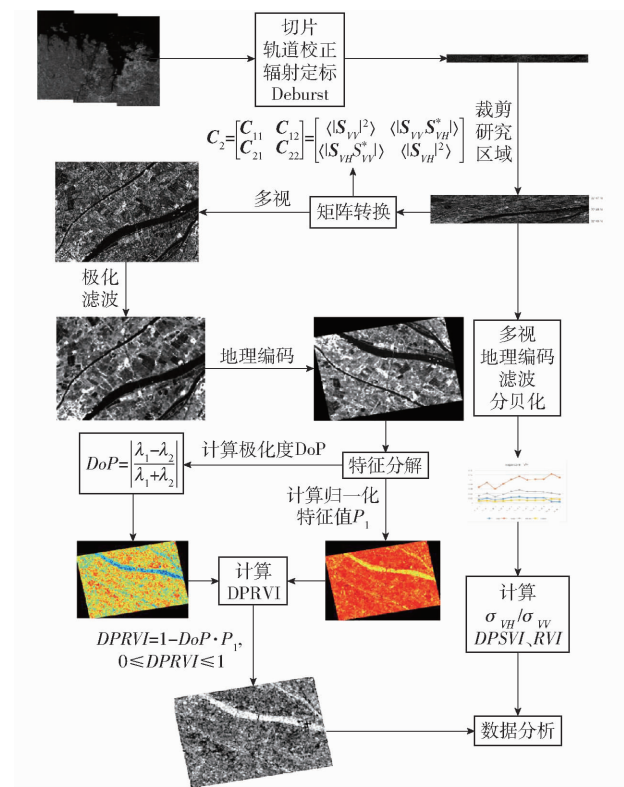


图 3 株高反演总体方案

Fig. 3 Scheme of plant height inversion

$\langle \cdot \rangle$ ——各向同质情况下随机散射介质的空间平均

上标 * 表示复共轭。

在距离向和方位向上以 4:1 进行多视处理^[27], 减弱相干斑噪声影响和减少后续数据处理量; 采用 refined Lee filter 方法进行极化滤波处理; 最终, 将这些像素地理编码到 UTM 投影坐标系中。

2.3 双极化雷达植被指数 DPRVI 的计算

2.3.1 Cloude-Pottier 目标分解与特征值归一化

因同极化与交叉极化通道不相关, $\langle |S_{VV} S_{VH}^*| \rangle$ 与 $\langle |S_{VH} S_{VV}^*| \rangle$ 均为零^[23], 式(2)可表示为

$$C_2 = \Lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\Lambda = \langle |S_{VV}|^2 \rangle$$

$$\alpha = \langle |S_{VV}|^2 \rangle / \langle |S_{VH}|^2 \rangle$$

由式(3)可知, 协方差矩阵 C_2 为半正定的 Hermite 矩阵, 故 Cloude-Pottier 分解可表达为

$$C_2 = \sum_{i=1}^2 \lambda_i c_i c_i^* = \lambda_1 e_1 e_1^* + \lambda_2 e_2 e_2^* \quad (4)$$

式中 c_i ——秩为 1 的独立矩阵

λ_i, e_i —— C_2 的实特征值与特征向量

从式(3)、(4)得到协方差矩阵的两个特征值为 $\lambda_1 = \Lambda, \lambda_2 = \Lambda\alpha$ 。

由定义可知, 特征值量化了主要的散射机制。 λ_1 与 VV 极化通道相关, 代表奇偶次散射强度; λ_2 与

VH 极化通道相关, 代表多次散射(体散射)强度。当目标由奇偶次散射占主导时, 有 $\lambda_1 \gg \lambda_2$ 。将 λ_1 归一化处理得到归一化参数 P_1 , 计算式为

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (5)$$

2.3.2 极化度(DoP)的计算

BARAKAT^[24]提出了 DoP 的表达式并将其用于全极化数据的 NN 协方差矩阵。针对双极化数据进行改进, 计算式为

$$DoP = \sqrt{1 - \frac{4C_2}{\text{Tr}(C_2)^2}} = \left| \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right| \quad (6)$$

式中 $\text{Tr}()$ ——矩阵的迹操作符

根据极化度定义可知, 它量化了不同散射机制之间的相对强度, 当 $DoP = 1$ 时, 认为目标处于完全极化状态, 由单一散射机制占主导, 当 $DoP = 0$ 时, 认为目标处于完全去极化状态, 由多次散射占主导, 多种散射机制共存。

2.3.3 DPRVI 参数计算

随着作物冠层的发育, 散射机制的类型也变得复杂。作物的发育初期, 主要为土壤表面的漫散射(奇次散射类型之一); 发育晚期则由来自于冠层和土壤的多次散射占主导, 散射类型的随机性增加。因此, 从作物发育初期到晚期, DoP 与 P_1 均呈下降趋势。MANDAL 等^[21]发现这两个参数对作物生长状态的表征存在一定差异性, 基于这两个参数得到一个新的参数, 即双极化雷达植被指数(DPRVI)^[8,28], 并成功用于反演油菜花与小麦的叶面积指数(Leaf area index, LAI)和植物含水率。另一方面, 文献[28-32]均证明了叶面积指数与株高有较好的相关性, 对于甘蔗, 通过对比何亚娟等^[13]的甘蔗不同生育期 LAI 分析与本文的实验结果, 可发现甘蔗伸长前期与株高具有很好的正相关性, 即株高越高, 叶面积越大。但随着后期叶片衰老、叶面积减少, 株高并不降低甚至在增高, 二者的正相关性不明显。综上, 本文将 DPRVI 用于甘蔗伸长前期状态的监测并反演株高; 同时对该参数在甘蔗伸长后期的株高反演进行初步分析和讨论。DPRVI 的计算式为

$$DPRVI = 1 - DoP \cdot P_1 \quad (7)$$

从定义可知, $DPRVI \in [0, 1]$, DoP 和 P_1 的乘积对应于奇偶次散射的比例, 通过单位 1 减去该比例可以推得目标生长过程的多次散射变化, 即散射随机程度。理论上, 当目标完全随机散射时, $DoP = 0$ (完全去极化), $\lambda_1 = \lambda_2$, 即 $P_1 = 0.5$, 此时 $DPRVI = 1$, 等价于作物冠层完全发育状态下的散射特征; 在光滑的裸露表面, 散射现象主要为布拉格散射时, 有

$DoP = 1$ (完全极化), $\lambda_1 = \lambda_1 + \lambda_2$, $\lambda_2 = 0$ 。此时 $DPRVI = 0$, 等价于裸土的散射特征; 数值在 $0 \sim 1$ 之间的变化反映了作物生长的过程。

3 反演方法实现及实验分析

3.1 双极化雷达植被指数 (DPRVI) 对甘蔗株高 (h) 的反演

通过实地数据采集和咨询当地气候与农业气象中心及蔗农, 得到不同生长期甘蔗平均株高, 见图 4。分析发现, 株高随生长时间变化明显, 通过比较, 以 Sigmoid 函数进行拟合效果最佳, 决定系数为 0.980。从拟合曲线可看出, 从发芽开始到伸长期前期甘蔗呈加速生长趋势, 株高迅速增加, 这是因为此期间光合作用逐渐增强, 在此阶段, 甘蔗生长特点为叶面积迅速增大, 节间伸长增粗; 进入伸长后期, 甘蔗拔节变缓, 株高增加变缓, 这是由于此期间甘蔗吸收的营养转向蔗茎的增粗与糖分的积累。

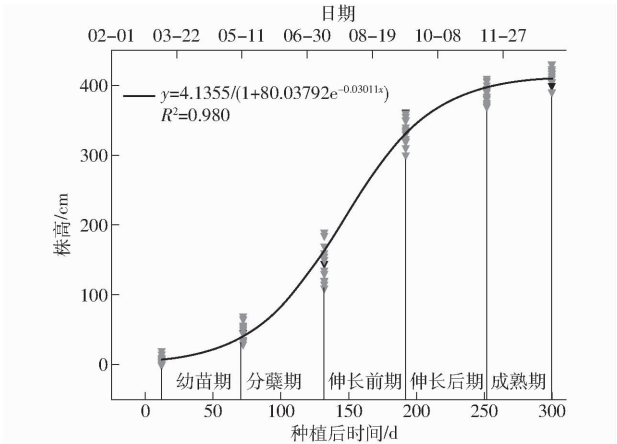


图 4 甘蔗不同生长期株高的 Sigmoid 函数拟合模型
Fig. 4 Sigmoid function fitting model for plant height of sugarcane at different growth stages

基于 2—12 月的时间序列 Sentinel-1A 数据, 将株高拟合曲线与对应研究区域 3 个甘蔗田 (甘蔗田 1、甘蔗田 2、甘蔗田 3) 的植被指数 DPRVI 绘制于图 5。其中, 甘蔗田 1、甘蔗田 2 与甘蔗田 3 的种植面积分别约为 3.33、4.00、3.67 hm^2 。通过实地测量, 3 块甘蔗田的平均行距约为 100 cm, 平均株距约为 30 cm。

由图 5 可知, 在 2、3 月 DPRVI 的值较低, 这是由于南沙甘蔗播种采取覆膜技术, 田地经整土覆膜后以有序的奇偶次散射 λ_1 为主导; 随后, 甘蔗进入幼苗期, 体散射分量 λ_2 增加, DoP 降低, 但仍以奇偶次散射为主导 ($\lambda_1 \gg \lambda_2$), DPRVI 从 3 月到 4 月下旬的缓慢上升也验证了这一变化; 而后 DPRVI 加速上升, 于 6 月中旬达到峰值, 这时甘蔗到了分蘖期, 分蘖加快, 冠层的快速发育使得体散射分量 λ_2 进一步

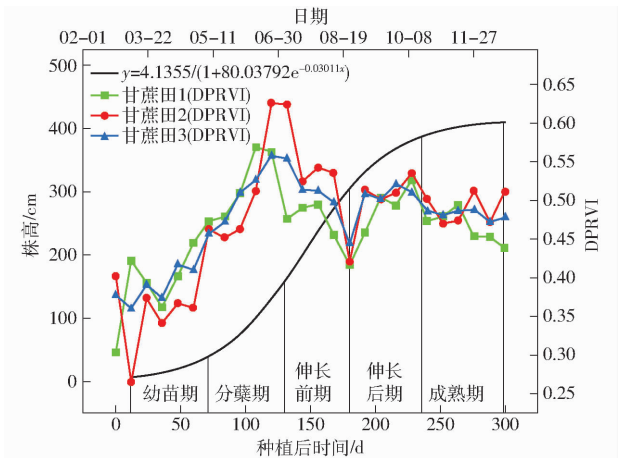


图 5 甘蔗 h 与 DPRVI 随播期的动态变化曲线
Fig. 5 Dynamic changes of h and DPRVI with sowing date of sugarcane

增加, 此时田地表现为多种散射类型并存, 散射随机程度最高; 之后 DPRVI 下降, 是由于甘蔗进入伸长前期, 甘蔗分蘖变慢, 节间加速分节与增粗, 叶面积迅速增大, 使得奇偶次散射分量 λ_1 增加; 到 8 月下旬后, DPRVI 缓慢上升则是由于甘蔗进入伸长后期, 分节与增粗变缓, 叶片数积累增多, 甘蔗冠层逐渐完全发育, 体散射分量 λ_2 增加, 奇偶次散射分量 λ_1 减少, DoP 变小; 进入成熟期后, DPRVI 或因甘蔗叶枯萎掉落降低体散射分量 λ_2 而有所降低, 数值不再有较大波动。综上, 图 5 中 DPRVI 的变化规律较好地反演了甘蔗的物候周期。在甘蔗生长期的分蘖期之前与伸长后期之后两者呈正相关关系, 伸长前期两者呈负相关关系。鉴于以上分析, 采用分段函数与 4 种经典经验回归模型 (线性、二次多项式、指数、对数) 针对不同生育期进行株高回归模型反演, 以决定系数 R^2 和均方根误差 (RMSE) 评价反演性能, 结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, DPRVI 与株高有较显著相关性, 综合考量计算量、 R^2 与 RMSE 性能, 以二次函数模型反演效果最好, 决定系数分别为 0.882、0.625 与 0.716; 将不同生育期的回归曲线绘制如图 6 所示, 可以看出, 幼苗期、分蘖期的相关性最佳, 其次为伸长后期与伸长前期。

为进一步验证模型的可靠性, 使用甘蔗田 4 (面积大约为 20 hm^2 , 平均行距约为 100 cm, 平均株距约为 30 cm, 位置见图 1) 作为验证数据, 选择预测效果最佳的幼苗期、分蘖期二次函数模型进行比较 (图 7)。可以看出, 相对于甘蔗田 1、甘蔗田 2 和甘蔗田 3, 甘蔗田 4 的数据离散程度略大, 这是由于甘蔗田 4 较少的耕种面积, 受到了更多混杂像元的影响。接着进行预测值与实测值的比较 (图 8), 求得决定系数 R^2 为 0.839, 平均绝对偏差为 7.4%,

表 2 甘蔗各生长期 h 与 DPRVI 的关系

Tab.2 Relationship between h and DPRVI in sugarcane growth period

生长期	株高(y)与 DPRVI(x)的关系式	R^2	RMSE/cm
	$y = \exp(-12.92035 + 41.08801x - 32.30699x^2)$	0.916	0.100
幼苗期和分蘖期	$y = 0.60823 - 4.80632x + 9.53096x^2$	0.882	0.118
	$y = -1.22982 + 3.70573x$	0.825	0.141
伸长前期	$y = \exp(3.15899 - 5.87327x + 1.73664x^2)$	0.625	0.375
	$y = 10.51891 - 26.1251x + 17.90789x^2$	0.625	0.375
	$y = 5.73554 - 7.49615x$	0.608	0.371
	$y = \ln(26.33107 - 37.64933x)$	0.528	0.408
伸长后期	$y = 5.75007 - 19.35501x + 28.80951x^2$	0.716	0.202
	$y = \exp(1.26462 - 3.19531x + 6.07508x^2)$	0.716	0.203
	$y = -2.80041\ln(-0.44425\ln x)$	0.710	0.196
	$y = -0.66118 + 7.92515x$	0.708	0.197

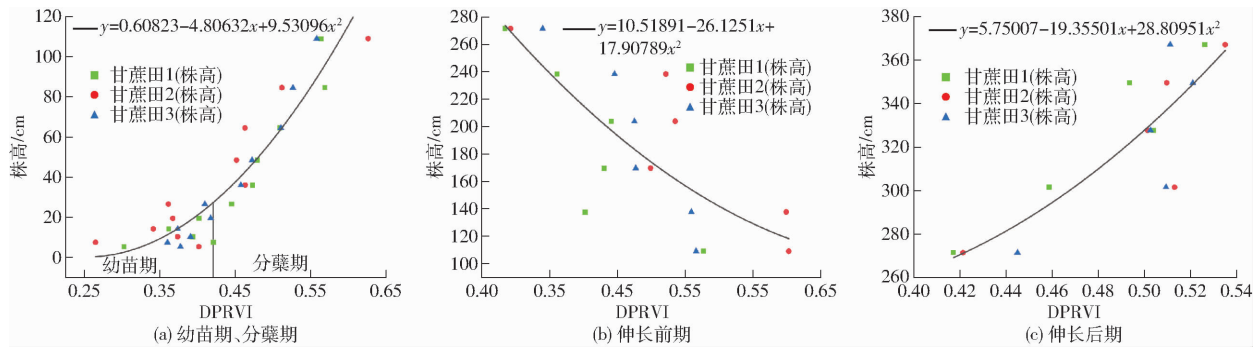


图 6 甘蔗不同生育期株高最佳反演模型

Fig.6 Optimal inversion model of plant height in different growth stages of sugarcane

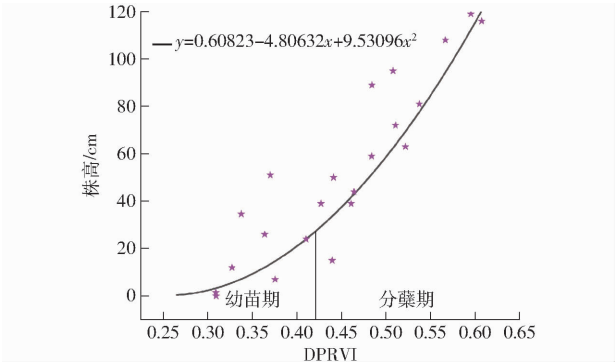


图 7 伸长前期株高反演模型与实测甘蔗株高的关系

Fig.7 Relationship between inversed plant height at early growth stage and measured plant height of sugarcane

了后期,由于随着甘蔗冠层的发育分蘖,散射机制复杂性增加,后向散射系数达到饱和,基于后向散射系数的 σ_{VH° 、 σ_{VV° 、 $\sigma_{VH^\circ}/\sigma_{VV^\circ}$ 与 RVI 也无法较好地表征株高,而基于极化特征求得的 DPRVI 在甘蔗不同生育期仍然保持了与株高较好的相关性。

说明利用该模型依然可以较好地反演甘蔗株高与 DPRVI 的关系,基本满足 DPRVI 对伸长前期(分蘖期之前)的甘蔗株高监测的动态需求,保证利用双极化雷达植被指数预测甘蔗伸长前期株高的准确性与可靠性。

3.2 不同极化参数对比分析

绘制 2—12 月的时间序列 Sentinel-1A 数据,求得 3 个甘蔗田研究区域的 DPRVI、交叉极化与同极化通道的后向散射系数强度(σ_{VH° 、 σ_{VV°)、不同极化比值($\sigma_{VH^\circ}/\sigma_{VV^\circ}$)、雷达植被指数(RVI)的时间模型,如图 9 所示。

由图 9 可知,3 种经典的极化参数 σ_{VH° 、 σ_{VV° 、 $\sigma_{VH^\circ}/\sigma_{VV^\circ}$ 与 RVI 的时间模型在 3 个甘蔗田的伸长前期均表现出一定的生长响应。其中 σ_{VH° 、 σ_{VV° 与 h 呈正相关性, $\sigma_{VH^\circ}/\sigma_{VV^\circ}$ 、RVI 与 h 呈负相关性。但是,从甘蔗进入伸长期开始,该 3 种参数均已经趋向稳定,难以反演伸长期之后株高的生长变化。这是由于甘蔗生长早期散射机制相对简单,而到

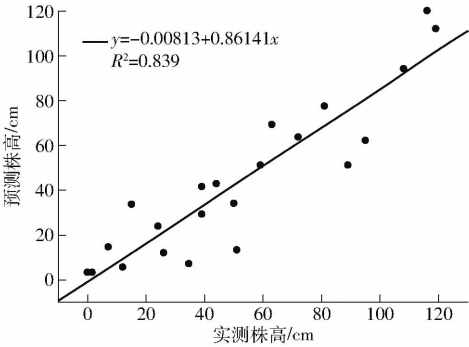


图 8 伸长前期甘蔗株高实测值与预测值比较

Fig.8 Comparison of measured and predicted height of sugarcane plant in early growth period

因此,在反演甘蔗作物时,DPRVI 比 Sentinel-1A 后向散射系数及其推导得出的参数性能更加优异,对于指导甘蔗生产具有一定应用价值。

4 结论

(1)将时序数据 Sentinel-1A 求得的 DPRVI 与

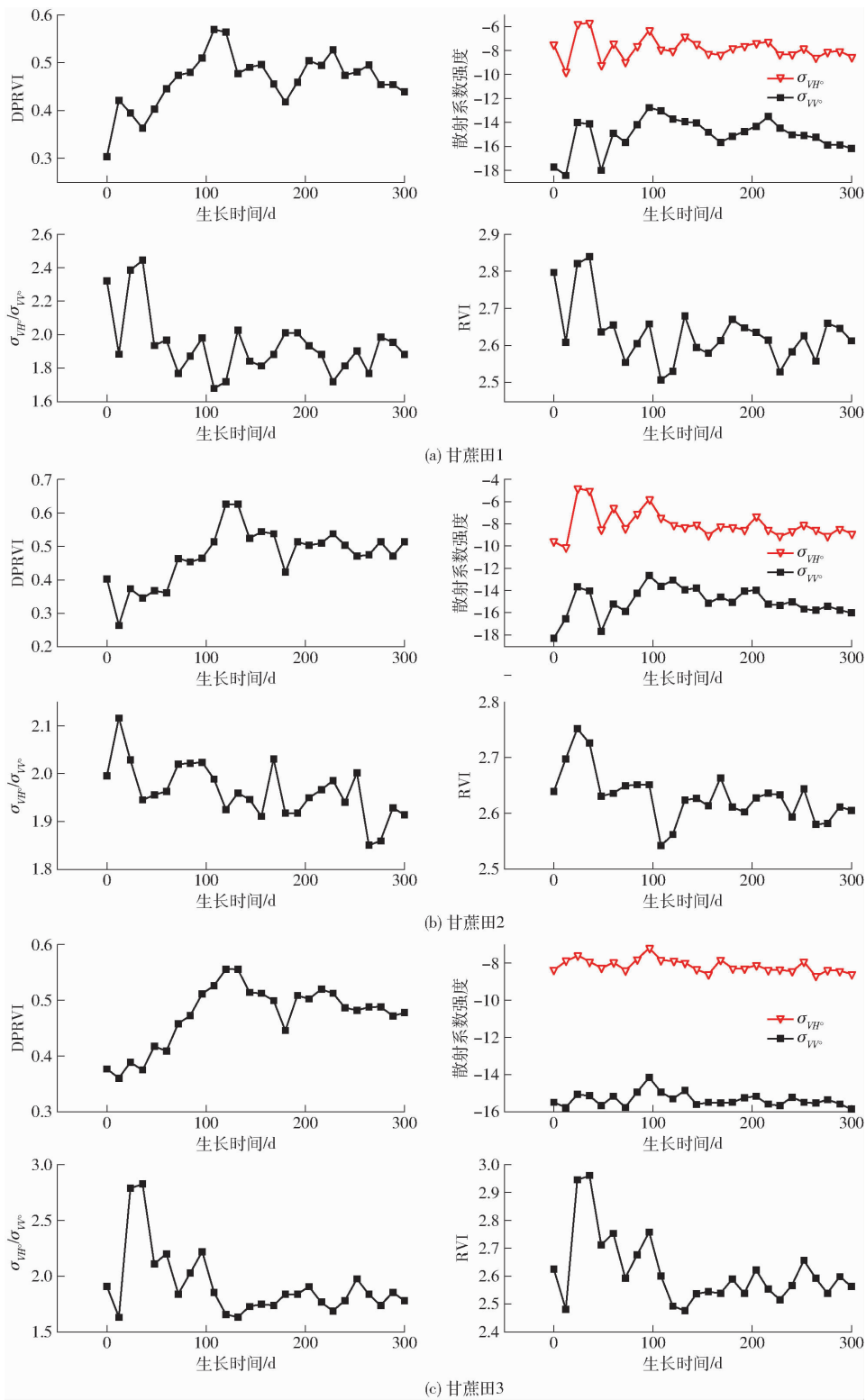


图 9 不同甘蔗田的极化参数(DPRVI、 σ_{VH^0} 、 σ_{VV^0} 、 $\sigma_{VH^0}/\sigma_{VV^0}$ 、RVI)时间模型

Fig. 9 Comparison of polarization parameter (DPRVI, σ_{VH^0} , σ_{VV^0} , $\sigma_{VH^0}/\sigma_{VV^0}$ and RVI) time models in different sugarcane fields

3 种经典极化参数进行对比。结果显示 DPRVI 能较好地反演甘蔗生长前期的株高变化。

(2) 采用 4 种经典的经验回归模型对甘蔗株高反演建模。结果显示分蘖期之前两者相关性最高, 二次多项式模型拟合效果最好, 决定系数 R^2 达 0.882, 均方根误差达 0.118 cm。

(3) 使用当地气候与农业气象中心数据进行对比分析, 决定系数 R^2 达 0.839, 平均绝对偏差为 7.4%, 验证了 Sentinel-1A 时序数据对粤港澳大湾区的甘蔗作物的连续监测是有效的, 对于大规模、低成本的甘蔗作物生长状态监测, Sentinel-1A 数据是一种较好的数据源。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 12-18.
- [2] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277-293.
ZHAO Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 277-293. (in Chinese)
- [3] ZHANG M, LIN H. Object-based rice mapping using time-series and phenological data[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 190-202.
- [4] 柳文杰, 曾永年, 张猛. 融合时间序列环境卫星数据与物候特征的水稻种植区提取[J]. 遥感学报, 2018, 22(3): 381-391.
LIU Wenjie, ZENG Yongnian, ZHANG Meng. Mapping rice paddy distribution by using time series HJ blend data and phenological parameters[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(3): 381-391. (in Chinese)
- [5] ZHOU L, CHENG S, SUN Q, et al. Remote sensing of regional-scale maize lodging using multitemporal GF-1 images[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2020, 14(1): 014514.
- [6] 刘二华, 周广胜, 周莉, 等. 夏玉米不同生育期叶片和冠层含水量的遥感反演[J]. 应用气象学报, 2020, 31(1): 52-62.
LIU Erhua, ZHOU Guangsheng, ZHOU Li, et al. Remote sensing retrieval of leaf and canopies water content in summer maize at different growth stages[J]. Journal of Applied Meteorology, 2020, 31(1): 52-62. (in Chinese)
- [7] KUMAR P, PRASAD R, GUPTA D K, et al. Estimation of winter wheat crop growth parameters using time series Sentinel-1A SAR data[J]. Geocarto International, 2017, 33(9): 942-956.
- [8] ALONSO-GONZALEZ A, LOPEZ-MARTINEZ C, PAPATHANASSIOU K P, et al. Polarimetric SAR time series change analysis over agricultural areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 99: 1-14.
- [9] ZHANG W, LI Z, CHEN E, et al. Compact polarimetric response of rape (*Brassica napus* L.) at C-Band: analysis and growth parameters inversion[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 591.
- [10] D'ANDRIMONT R, TAYMANS M, LEMOINE G, et al. Detecting flowering phenology in oil seed rape parcels with Sentinel-1 and -2 time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 239: 111660.
- [11] WANG J, XIAO X, LIU L, et al. Mapping sugarcane plantation dynamics in Guangxi, China, by time series Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 247: 111951.
- [12] 吴晗, 林晓龙, 李曦嵘, 等. 面向农业应用的无人机遥感影像地块边界提取[J]. 计算机应用, 2019, 39(1): 298-304.
WU Han, LIN Xiaolong, LI Xirong, et al. Block boundary extraction from UAV remote sensing image for agricultural application [J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(1): 298-304. (in Chinese)
- [13] 何亚娟, 潘学标, 裴志远, 等. 基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 226-231.
HE Yajuan, PAN Xuebiao, PEI Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 226-231. (in Chinese)
- [14] YUEN J H. Synthetic aperture radar polarimetry[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [15] BAGHDADI N, CRESSON R, TODOROFF P, et al. Multitemporal observations of sugarcane by TerraSAR-X images[J]. Sensors, 2011, 10(10): 8899-8919.
- [16] MURUGAN D, SINGH D. Development of an approach for monitoring sugarcane harvested and non-harvested conditions using time series Sentinel-1 data[C]//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, 2018: 5308-5311.
- [17] LIN H, CHEN J, PEI Z, et al. Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data[J]. IEEE Transactions on Geoenvironment & Remote Sensing, 2009, 47(8): 2572-2580.
- [18] CHANG J G, MAXIM S, YISOK O. Polarimetric radar vegetation index for biomass estimation in desert fringe ecosystems[J]. IEEE Transactions on Geoenvironment & Remote Sensing, 2018, 56(12): 7102-7108.
- [19] TRUDEL M, CHARBONNEAU F, LECONTE R. Using RADARSAT-2 polarimetric and ENVISAT-ASAR dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2012, 38(4): 514-527.
- [20] WANG H, MAGAGI R, GOITA K. Polarimetric decomposition for monitoring crop growth status[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(6): 870-874.
- [21] MANDAL D, KUMAR V, RATHA D, et al. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 247: 111954.
- [22] 广州市南沙区人民政府. 2019 年广州南沙国民经济和社会发展统计公报[R]. 2019.
- [23] CLOUDE S R, POTIER E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1996, 34(2): 498-518.
- [24] BARAKAT R. Degree of polarization and the principal idempotents of the coherency matrix[J]. Optics Communications, 1977, 23(2): 147-150.
- [25] SCHOWENGERDT R A. Models and methods for image processing[M]. Academic Press, Inc., 2006.

- [26] LEE J S, POTTIER E. Polarimetric radar imaging: basics to applications[M]. Second Edition. CRC Press, 2016.
- [27] FROST V S, STILES J A, SHANMUGAN K S, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1982, 4(2):157 – 166.
- [28] 单捷,孙玲,王志明,等. GF-1 影像遥感监测指标与冬小麦长势参数的关系[J]. 江苏农业学报,2019,35(6):1323 – 1333.
SHAN Jie,SUN Ling,WANG Zhiming, et al. Relationship between remote sensing monitoring indices and growth parameters in winter wheat based on GF-1 images[J]. Jiangsu J. of Agr. Sci., 2019, 35(6):1323 – 1333. (in Chinese)
- [29] 高铭阳,张锦水,潘耀忠,等. 结合植被指数与作物高度反演冬小麦叶面积指数[J]. 中国农业资源与区划,2020, 41(8):49 – 57.
GAO Mingyang,ZHANG Jinshui,PAN Yaozhong, et al. Retrieval of winter wheat leaf area index based on vegetation index and crop height[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020,41(8):49 – 57. (in Chinese)
- [30] 林超文,陈一兵,黄晶晶. 中国四川间作地区作物高度、覆盖度和叶面积指数的时间变化[J]. 水土保持研究,2007, 14(2):72 – 75.
LIN Chaowen,CHEN Yibing,HUANG Jingjing. Temporal variation of plant height, plant cover and leaf area index in inter-cropped area of Sichuan, China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(2):72 – 75. (in Chinese)
- [31] 陶惠林,徐良骥,冯海宽,等. 基于空中高光谱反射的冬小麦株高和叶面积指数突变[J]. 农业机械学报,2020,51(12): 193 – 201.
TAO Huilin,XU Liangji,FENG Haikuan,et al. Estimation of plant height and leaf area index of winter wheat based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):193 – 201. (in Chinese)
- [32] 苏伟,姚婵,李颖,等. 基于 SupReMe 影像重建和 RF 的玉米冠层 LAI 反演[J]. 农业机械学报,2021,52(4):190 – 196,256.
SU Wei,YAO Chan,LI Ying,et al. LAI retrieving of corn canopy based on SupReMe image reconstruction and random forest [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):190 – 196,256. (in Chinese)

(上接第 127 页)

- [36] 崔龙飞,薛新宇,丁素明,等. 大型喷杆及其摆式悬架减振系统动力学特性分析与试验[J]. 农业工程学报,2017, 33(9):61 – 68.
CUI Longfei,XUE Xinyu,DING Suming, et al. Analysis and test of dynamic characteristics of large spraying boom and pendulum suspension damping system[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(9):61 – 68. (in Chinese)
- [37] 崔龙飞,薛新宇,丁素明,等. 双钟摆主被动悬架式大型喷雾机喷杆动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(2):82 – 90.
CUI Longfei,XUE Xinyu,DING Suming, et al. Modeling and simulation of dynamic behavior of large spray boom with active and passive pendulum suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2):82 – 90. (in Chinese)
- [38] ANTHONIS J, AUDENAERT J, RAMON H. Design optimisation for the vertical suspension of a crop sprayer boom[J]. Biosystems Engineering, 2005,90(2):153 – 160.
- [39] 崔龙飞,薛新宇,乐飞翔,等. 大型喷杆喷雾机钟摆式主被动悬架自适应鲁棒控制研究[J]. 农业机械学报,2020, 51(12):130 – 141.
CUI Longfei,XUE Xinyu,LE Feixiang, et al. Adaptive robust control of active and passive pendulum suspension for large boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):130 – 141. (in Chinese)
- [40] 高国生,张祖翰. 摩托车车架动态性能的试验研究[J]. 振动与冲击,1994(3):66 – 69, 44.
GAO Guosheng,ZHANG Zuhan. Experimental research on dynamic performance of motorcycle frame[J]. Journal of Vibration and Shock, 1994(3):66 – 69, 44. (in Chinese)
- [41] 扈凯,张文毅,李坤,等. 基于模态规划法的履带拖拉机车架振动分析与优化[J]. 中国农机化学报,2021,42(8):121 – 126.
HU Kai,ZHANG Wenyi,LI Kun, et al. Vibration analysis and optimization of tracked tractor frame based on modal programming method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(8):121 – 126. (in Chinese)