

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S2.027

基于彩色空间距离优化的秸秆覆盖率检测算法研究

安晓飞¹ 代均益^{1,2} 路振田¹ 徐新刚¹ 尹彦鑫¹ 孟志军¹

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097;2.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052)

摘要: 秸秆覆盖率是保护性耕作重要的评价指标之一。针对田间秸秆形态各异、细碎秸秆难以识别的难题,基于机器视觉技术,提出了一种基于 K-means 和彩色空间距离灰度化方法相结合的田间秸秆覆盖率检测算法。采用彩色空间距离方法对秸秆图像进行预处理,基于 K-means 算法实现秸秆和土壤背景的分类识别,使用数学形态学腐蚀和膨胀方法对识别后的图像进行处理,降低细碎秸秆对覆盖率的影响,最后计算秸秆图像的覆盖率。2022 年 10 月,通过田间试验对北京小汤山国家精准农业研究示范基地采集的 220 幅玉米秸秆图像进行了算法验证。试验结果表明,对低秸秆覆盖率(0~30%)图像,识别准确率达到 90%;对中等秸秆覆盖率(30%~60%)图像,识别准确率达到 88%;对高秸秆覆盖率(60%以上)图像,识别准确率达到 86%;整体秸秆覆盖率分等定级准确率达到 98.18%。本研究设计的基于 K-means 和彩色空间距离灰度化方法相结合的田间秸秆覆盖率检测算法为保护性耕作评价提供了快速检测方法和手段。

关键词: 保护性耕作; 秸秆覆盖率; K-means 算法; 彩色空间距离灰度化

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0229-06

Development of Rapid Detection Algorithm of Straw Coverage Rate Based on Color Spatial Distance Gray and K-means Method

AN Xiaofei¹ DAI Junyi^{1,2} LU Zhentian¹ XU Xin'gang¹ YIN Yanxin¹ MENG Zhijun¹

(1. Intelligent Equipment Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Straw coverage rate is one of the most important evaluation indexes for conservation tillage. In view of the difficult problem of different shapes of straw and difficult recognition of the fine straw, a straw coverage rate detection algorithm based on K-means and color space distance gray-scale method was proposed to solve the problem of different straw shapes and difficult identification of broken straw. The color spatial distance method was used to preprocess the straw image. The classification recognition of the straw and soil background was realized based on the K-means algorithm. After the identified images were processed by using the mathematical morphology method, the coverage rate of the straw image was calculated. In 2022, the field experiment was conducted to verify the algorithm on 220 corn straw images collected from Beijing Xiaotangshan National Precision Agriculture Research Demonstration Base. The experimental results showed that the recognition accuracy of low straw coverage rate (0~30%) was 90%. And the recognition accuracy of medium straw coverage rate (30%~60%) was 88%. For the high straw coverage rate (more than 60%), the recognition accuracy reached 86%. The accuracy rate of overall identification grading reached 98.18%. The straw coverage rate detection algorithm based on K-means and color spatial distance gray provided a rapid detection method and means for conservation tillage evaluation.

Key words: conservation tillage; straw coverage rate; K-means algorithm; color spatial distance gray

收稿日期: 2023-06-26 修回日期: 2023-08-27

基金项目: 科技创新 2030-新一代人工智能重大项目(2021ZD0110900)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)和北京市农林科学院创新能力项目(KJXC20210433)

作者简介: 安晓飞(1986—),男,正高级工程师,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail: anxif@necita.org.cn

通信作者: 孟志军(1975—),男,研究员,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail: mengzj@necita.org.cn

0 引言

保护性耕作是对农田实行免耕、少耕,尽可能减少土壤耕作,并用作物秸秆、残茬覆盖地表,科学控制杂草和病虫害,从而减少土壤风蚀水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力的一项先进农业耕作技术,是一种可持续发展的耕作方式^[1-4]。秸秆覆盖率和秸秆覆盖量是评价保护性耕作作业质量的 2 个重要指标^[5-6],其中秸秆覆盖率更是秸秆还田补贴的重要依据,因此准确高效的秸秆覆盖率检测对于推进保护性耕作具有重要意义^[7-8]。而国家标准 GB/T 20865—2017《免(少)耕施肥播种机》中采用人工“拉绳法”进行秸秆覆盖率测量,存在作业效率低、误差大、劳动强度大等缺点,已经严重落后于当前“互联网+农机作业”模式下的实际生产需要。

近几年,随着机器学习、深度学习、人工智能等技术与农业场景的不断深度融合,秸秆覆盖率快速检测成为了一个研究热点,国内外许多学者都致力于这一领域的研究,并取得了一些重要研究成果^[9-22]。李洪文等^[23]提出了一种图像分类方法,采用了 BP 神经网络和纹理特征相结合的方式,用于秸秆图像分类和识别,与传统的图像分类方法相比,结合 BP 神经网络和纹理特征的方法具有更高的分类精度和鲁棒性,但耗时较长。王丽丽等^[24]提出了一种秸秆覆盖率检测方法,该方法运用了 Sauvola 和 Otsu 算法,在不同地区的试验中,最大平均误差约为 2.5%,提高了秸秆识别的准确率。刘媛媛等^[25]提出了一种基于多阈值图像分割算法的秸秆覆盖率检测方法。试验结果表明,该算法的误差在 8% 以内,平均耗时为人工测量的 1/1 500。刘媛媛等^[26]提出了一种改进的 U-Net 语义分割的算法对秸秆覆盖率进行了检测,在模块中引入注意力机制,平均像素精确度为 91.20%,覆盖率平均误差为 0.80%。杨光等^[27]基于改进的 Bernsen 方法,提出了秸秆覆盖率的图像处理算法,实现了秸秆覆盖率 20%~90% 的准确检测。

综上所述,国内外对区域秸秆覆盖率的估算研究很多,但对不同类型土壤背景下的细碎秸秆准确识别研究较少。本文针对不同类型土壤背景下田间秸秆形态多样分散、细碎秸秆难以识别的难题,提出一种基于 K-means 和彩色空间距离灰度化方法相结合的田间秸秆覆盖率检测算法,并开展不同梯度条件下的秸秆覆盖率检测验证试验。

1 材料与方法

1.1 秸秆图像采集方法

2022 年 10 月,温度 10~22℃,选取北京昌平小

汤山国家精准农业研究示范基地东北角玉米地块(40.1825554144993°~40.183211151363814°N, 116.45268191311644°~116.45422686550901°E),地块种植模式为小麦-玉米轮作。使用华为 HAWEI Mate20 型手机采集图像,系统版本 Android 9.0,图像分辨率为 4 096 像素×3 072 像素,采用水平拍摄。为防止光线阴影造成采集效果不佳,采用背光拍摄,共采集不同秸秆覆盖率图像 220 幅。秸秆图像分为 3 类,低秸秆覆盖率(0~30%)、中秸秆覆盖率(30%~60%)和高秸秆覆盖率(60%以上),图 1 为田间秸秆图像采集现场。

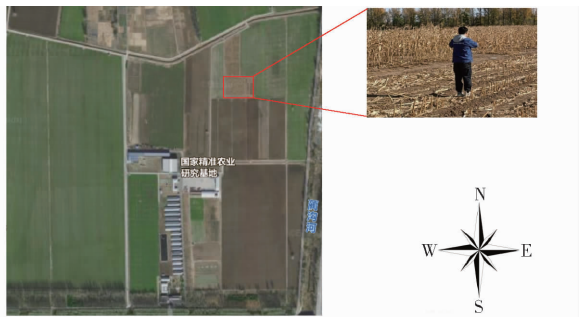


图 1 田间秸秆图像采集

Fig. 1 Field straw picture collection

1.2 人工真值标注方法

使用“人工标注真值+图像二值化”方法获取图像的真实秸秆覆盖率。手动对原始图像中的秸秆部分进行标注上色,然后进行二值化区分和形态学处理,最终进行秸秆占比计算。人工标注和图像二值化获取秸秆图像的覆盖率过程中要保证:不对图像中的内容进行处理,只对图像中手工标注的颜色进行处理,选取指定的标注颜色 R、G、B 值为(251, 48, 67),人工对秸秆图像进行秸秆真值标注。图 2 为人工标注图像效果。

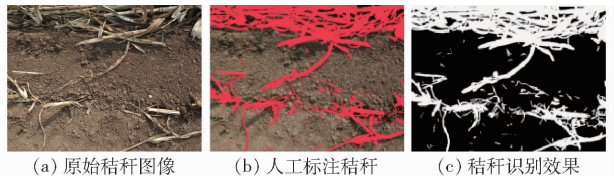


图 2 人工标注秸秆图像效果

Fig. 2 Artificially annotated straw images

1.3 基于 K-means 和彩色空间距离灰度化的秸秆覆盖率检测算法设计

基于 K-means 和彩色空间距离灰度化的田间秸秆覆盖率检测算法的总体思路是:首先读取原始秸秆图像进行数据类型转换,进行直方图均衡化处理,降低强光和弱光对图像内容的影响;接着使用彩色空间距离灰度化方法对图像中的秸秆部分进行提取,提高图像灰度化过程中边缘信息的保持率;然后使用 K-means 二值化算法对图像进行二值化处理,

获取到二值图像后,使用形态学方法进行腐蚀和膨胀操作,使二值图像更加符合真实的秸秆覆盖占比;最后对图像进行覆盖率的计算,输出最终结果。算法基于 PyCharm 2021. 2. 4 软件,采用 Python 3. 6. 8 和 OpenCV 4. 6. 0 实现。图 3 为算法总体流程图。

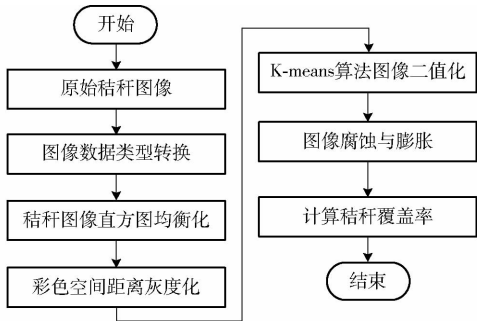


图 3 算法总体流程图

Fig. 3 Overall flowchart of algorithm

在该算法中,采用彩色空间距离灰度化方法对秸秆原始图像进行了预处理,根据彩色图像的每个分量的统计特性分别进行统计,包括 R 、 G 、 B 各分量的平均值、标准差、权重,计算像素空间距离,将秸秆图像基于空间距离方法进行秸秆内容提取,提取后的秸秆图像对比度明显提高,方便后期进行二值化处理。通过彩色空间距离灰度化方法,提取出秸秆图像中的秸秆部分,实现秸秆与土壤的边界区分,增强图像的可视性和内容对比度。对整幅图像进行遍历,计算像素

$$R(x, y)_{ij} = \begin{cases} f(x, y)_{ij}(C_i + 1) & (D_i > S_i \text{ 且 } f(x, y)_{ij} > A_i) \\ f(x, y)_{ij}C_i & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $R(x, y)_{ij}$ ——目标背景区分后输出图像像素
 $f(x, y)_{ij}$ ——目标提取前像素
 A_i ——颜色分量平均值
 C_i ——各分量权重
 S_i ——颜色各分量标准差
 D_i ——整幅图像进行遍历获得的空间距离
得到最终图像。图 4 为彩色空间距离灰度化流程图。

K-means 聚类算法是经典无监督分类算法,本研究设计的算法应用场景为小尺度秸秆图像,内容区分为土壤和秸秆,将 K 设置为 2 最适合对于秸秆图像的识别,在秸秆图像中随机选取初始聚类中心点。计算每个像素点到聚类中心的距离并进行类别划分,重新计算聚类中心点进行聚类,当聚类中心不再发生改变时停止循环计算。

1.4 评价指标

为了开展秸秆覆盖率算法的评价,采用秸秆覆

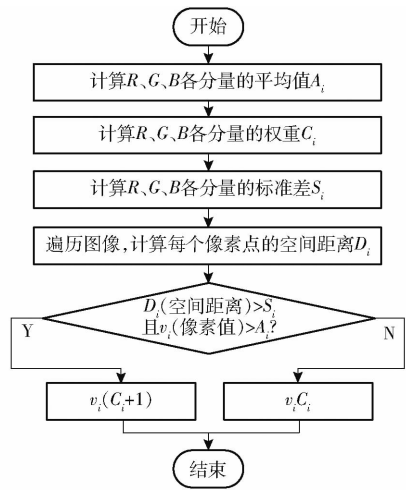


图 4 彩色空间距离灰度化流程图

Fig. 4 Color spatial distance gray

盖率识别准确率和分等定级准确度 2 个指标评估算法的准确性和分级准确度,分级设置为 3 级。计算公式分别为

$$R_i = \left(1 - \frac{M_i - T_i}{T_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$D_i = \frac{P_i}{N_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中 R_i ——秸秆覆盖率识别准确率, %
 M_i ——算法检测秸秆覆盖率, %
 T_i ——人工标注获得的秸秆覆盖率, %
 D_i ——秸秆覆盖分级准确度, %
 P_i ——算法检测秸秆覆盖率后与人工分级一致的数量
 N_i ——人工标注后分等定级数量

2 结果与讨论

2.1 彩色空间距离灰度化秸秆图像识别效果

通过彩色空间距离灰度化方法,可以将秸秆图像和土壤背景分别识别,图 5 为不同土壤背景下彩色空间距离灰度化方法秸秆识别结果,通过图像对比可以看出,图像土壤背景和秸秆目标分离更加明显,边缘结构也保持得更加完整。通过直方图对比可以发现,彩色空间距离灰度化方法直方图峰与峰之间有明显的谷,有利于后期二值化处理。

通过对比不同地区(华北褐土、东北黑土、西北黄土)的秸秆图像彩色空间灰度化效果发现,该预处理方法对华北褐土(北京昌平)背景秸秆图像、东北黑土(吉林双阳)背景秸秆图像、西北黄土(陕西杨凌)背景秸秆图像均具有较好的识别效果,图 5d、5h、5l 为对 3 种背景图像彩色空间灰度化处理后的直方图,通过 3 个直方图对比发现,该方法对 3 种背景秸秆图像均具有较好的适用性,为后续秸秆覆盖

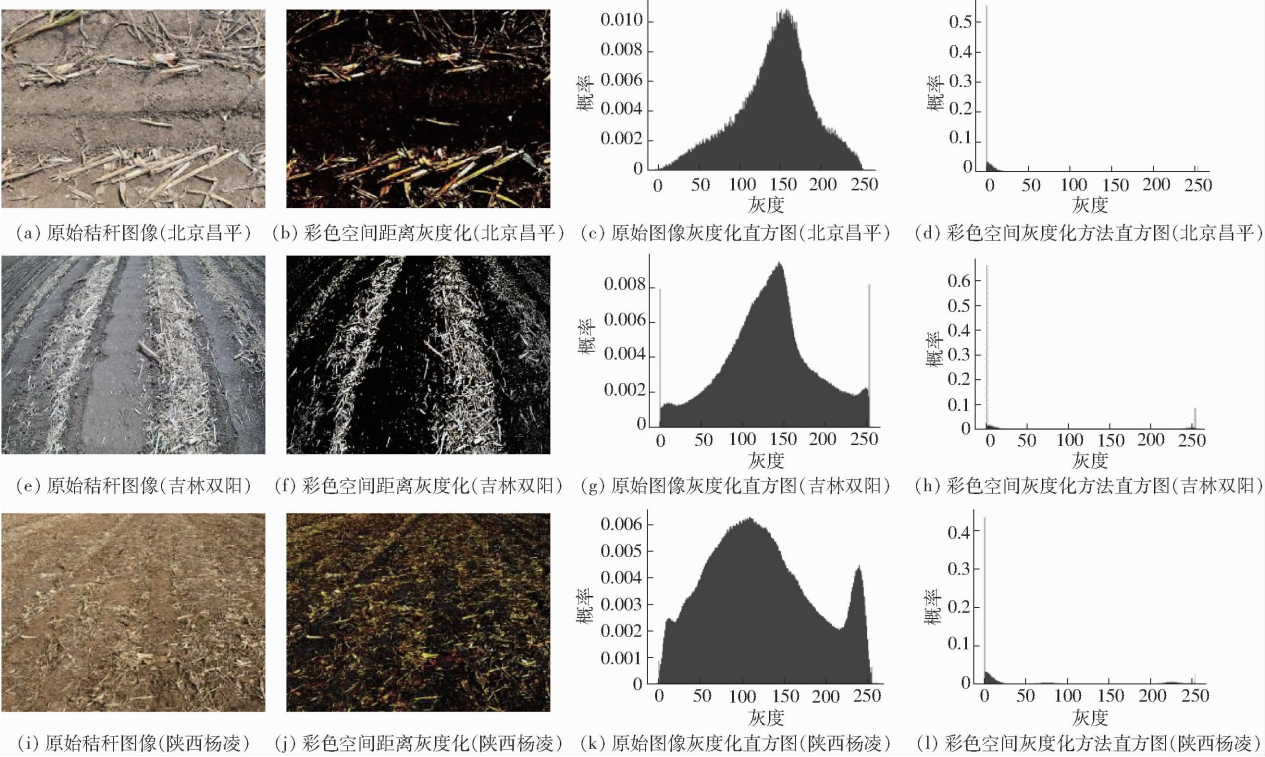


图 5 不同土壤背景下彩色空间距离灰度化方法秸秆识别结果

Fig. 5 Process result images for different area soil background conditions

率的计算提供了良好的条件。

2.2 不同梯度秸秆覆盖率验证试验

将 220 幅不同梯度的秸秆图像按照低秸秆覆盖率(0~30%)、中秸秆覆盖率(30%~60%)、高秸秆覆盖率(60%以上)3个等级分类,其中低秸秆覆盖率图像 60 幅,中秸秆覆盖率图像,104 幅,高秸秆覆盖率图像 56 幅。通过本研究提出的基于 K-means 和彩色空间距离灰度化结合的秸秆覆盖率检测算法对不同梯度秸秆覆盖率进行试验验证。图 6 为

不同秸秆覆盖率结果对比。试验结果表明,针对低、中、高秸秆覆盖率图像识别准确率分别达到 90%、88% 和 86%。对于高秸秆覆盖率图像的识别准确率降低,可能是秸秆量大形成的覆盖、遮挡阴影等情况,造成类别识别错误,进而影响识别准确率。秸秆覆盖率分等定级中,1 等定级准确度 96.43%,2 等准确度 99.04%,3 等准确度 98.33%,整体分等定级准确度 98.18%,可以满足秸秆覆盖率分等定级实际需要。

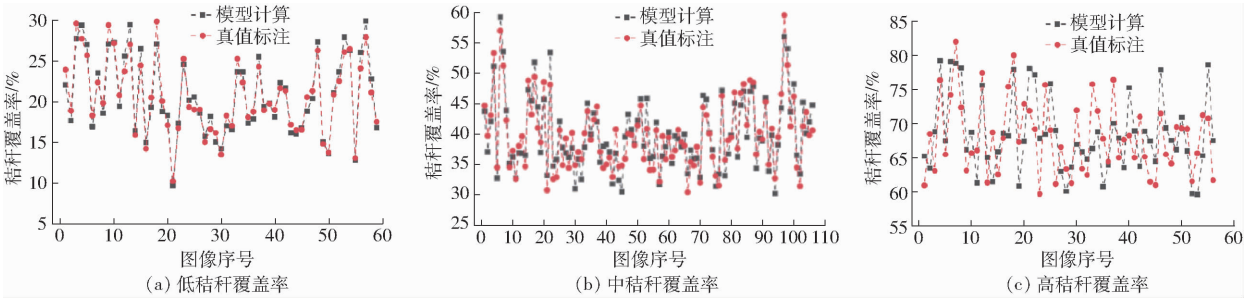


图 6 不同梯度秸秆覆盖率结果对比

Fig. 6 Comparison charts of straw coverage rate with different gradients

3 结论

(1)提出了一种基于 K-means 和彩色空间距离灰度化相结合的田间秸秆覆盖率检测算法,算法对不同地区土壤背景识别效果显著,边缘结构保持完整,能够对秸秆图像进行快速识别。

(2)开展了不同梯度田间秸秆覆盖率验证试验,试验结果表明,低、中、高秸秆覆盖率检测准确率分别达到 90%、88% 和 86%,整体分等定级准确度达到 98.18%,满足了生产实际需要,为田间秸秆覆盖率快速准确检测提供了一种新的技术手段。

参 考 文 献

- [1] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1325 – 1335. LIANG Aizhen, ZHANG Yan, CHEN Xuewen, et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(8): 1325 – 1335. (in Chinese)
- [2] 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43 – 48. GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying. Development of conservation farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43 – 48. (in Chinese)
- [3] 张宁宁, 刘硕. 哈尔滨地区秸秆燃烧环境经济损益分析[J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(10): 26 – 28. ZHANG Ningning, LIU Shuo. Analysis on economic profit and loss of straw burning environment in Harbin[J]. Recycling Research, 2021, 14(10): 26 – 28. (in Chinese)
- [4] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155 – 165. ZHAO Yali, XUE Zhiwei, GUO Haibin, et al. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 155 – 165. (in Chinese)
- [5] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 东北稻区不同秸秆还田模式机具作业效果研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 68 – 74. SUN Ni'na, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Performance of straw returning equipment under different mechanized straw returning pattern in northeast rice area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 68 – 74. (in Chinese)
- [6] 马钦, 万传峰, 卫建, 等. 基于 U – Net 和特征金字塔网络的秸秆覆盖率计算方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 224 – 234. MA Qin, WAN Chuanfeng, WEI Jian, et al. Calculation method of straw coverage based on U – Net network and feature pyramid network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 224 – 234. (in Chinese)
- [7] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30 – 41. ZHANG Xiaoqing, WANG Zifan, CAN Muiyou, et al. Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(9): 30 – 41. (in Chinese)
- [8] 赵丽, 张晋国. 地表秸秆覆盖度图像识别技术的研究[J]. 农机化研究, 2005, 27(4): 240 – 242. ZHAO Li, ZHANG Jinguo. Study on the image identify methods about degree of soil straw cover[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005, 27(4): 240 – 242. (in Chinese)
- [9] 刘现悦, 刘卉, 王侨, 等. 农田秸秆覆盖率检测方法 with 试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 203 – 208. LIU Xian Yue, LIU Hui, WANG Qiao, et al. Method and test of straw coverage detection in farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 203 – 208. (in Chinese)
- [10] 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 秸秆还田下土壤水分时间稳定性与玉米穗质量的相关性[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 320 – 326. LIU Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Relationship between temporal stability of soil water and corn ear weight under straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 320 – 326. (in Chinese)
- [11] 李佳, 吕程序, 苑严伟, 等. 快速傅里叶变换结合 SVM 算法识别地表玉米秸秆覆盖率[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 194 – 201. LI Jia, LÜ Chengxu, YUAN Yanwei, et al. Fast Fourier transform combined with SVM algorithm to identify surface maize straw coverage[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 194 – 201. (in Chinese)
- [12] ZHOU Deyi, LI Mao, LI Yang, et al. Detection of ground straw coverage under conservation tillage based on deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105369.
- [13] CAI W, ZHAO S, WANG Y, et al. Estimation of winter wheat residue coverage using optical and SAR remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1163 – 1169.
- [14] 苏艳波, 张东远, 李洪文, 等. 基于自动取阈分割算法的秸秆覆盖率检测系统[J]. 农机化研究, 2012, 34(8): 138 – 142. SU Yanbo, ZHANG Dongyuan, LI Hongwen, et al. Measuring system for residue cover rate based on automation threshold[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(8): 138 – 142. (in Chinese)
- [15] 郝盼红, 郭元术. 彩色图像去雾清晰化研究[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(7): 271 – 276. HAO Panhong, GUO Yuanshu. Research on dehazing and clarity of color image[J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(7): 271 – 276. (in Chinese)
- [16] GAO Lulu, ZHANG Chao, YUN Wenju, et al. Mapping crop residue cover using adjust normalized difference residue index based on Sentinel – 2 MSI data[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105374.
- [17] 施印炎, 罗伟文, 胡志超, 等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 58 – 67. SHI Yinyan, LUO Weiwen, HU Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 58 – 67. (in Chinese)
- [18] 王军强, 高雅, 杨数强. 基于遗传算法的二维最大类间方差图像分割算法[J]. 微计算机应用, 2011, 32(8): 24 – 30.

WANG Junqiang, GAO Ya, YANG Shuqiang. Algorithm of for 2D maximum between-cluster image segmentation based on GA [J]. Microcomputer Applications, 2011,32(8):24-30. (in Chinese)

[19] MENG Jun,LÜ Xingchen,FU Lifang,et al. Rice disease image recognition based on improved multi-scale stack autoencoder [J]. Journal of Agricultural Science,2020,13(1):18-29.

[20] ZHU Q,XU X,SUN Z,et al. Estimation of winter wheat residue coverage based on GF-1 imagery and machine learning algorithm[J]. Agronomy,2022,12:1051-1068.

[21] 安晓飞,王培,罗长海,等. 基于 K-means 聚类 and 分区寻优的秸秆覆盖率计算方法[J]. 农业机械学报,2021,52(10):84-89.
AN Xiaofei, WANG Pei, LUO Changhai, et al. Corn straw coverage calculation algorithm based on K-means clustering and zoning optimization method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10):84-89. (in Chinese)

[22] 杨光,丁博,宋昕. 基于改进的 Bernsen 秸秆覆盖率图像处理算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12):158-166.
YANG Guang,DING Bo,SONG Xin. Research on image processing algorithm of straw coverage based on improved Bernsen[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2021,35(12):158-166. (in Chinese)

[23] 李洪文,李慧,何进,等. 基于人工神经网络的田间秸秆覆盖率检测系统[J]. 农业机械学报,2009,40(6):58-62.
LI Hongwen, LI Hui, HE Jin, et al. Measuring system for residue cover rate in field based on BP neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(6):58-62. (in Chinese)

[24] 王丽丽,徐岚俊,魏舒,等. 基于 Sauvola 与 Otsu 算法的秸秆覆盖率图像检测方法[J]. 农业工程,2017,7(4):29-35.
WANG Lili, XU Lanjun, WEI Shu, et al. Straw coverage detection method based on Sauvola and Otsu segmentation algorithm [J]. Agricultural Engineering, 2017,7(4):29-35. (in Chinese)

[25] 刘媛媛,王跃勇,于海业,等. 基于多阈值图像分割算法的秸秆覆盖率检测[J]. 农业机械学报,2018,49(12):27-35,55.
LIU Yuanyuan, WANG Yueyong, YU Haiye, et al. Detection of straw coverage rate based on multi-threshold image segmentation algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):27-35,55. (in Chinese)

[26] 刘媛媛,周小康,王跃勇,等. 改进 U-Net 模型的保护性耕作田间秸秆覆盖检测[J]. 光学精密工程,2022,30(9):1101-1112.
LIU Yuanyuan,ZHOU Xiaokang, WANG Yueyong, et al. Straw coverage detection of conservation tillage farmland based on improved U-Net model[J]. Optics and Precision Engineering,2022,30(9):1101-1112. (in Chinese)

[27] 杨光,张洪熙,方涛,等. 基于改进 AdaBoost 算法的秸秆识别与覆盖率检测技术[J]. 农业机械学报,2021,52(7):177-183.
YANG Guang,ZHANG Hongxi,FANG Tao,et al. Straw recognition and coverage rate detection technology based on improved AdaBoost algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):177-183. (in Chinese)

[28] 沈峰,石璞,井逢瑞. 基于 Sentinel-2 影像的吉林省中部黑土区保护性耕作范围的遥感识别[J]. 世界地质,2022,41(4):873-891.
SHEN Feng,SHI Pu,JING Fengrui. Remote sensing identification of conservation tillage extent in black soil region in central Jilin Province based on Sentinel-2 image[J]. World Geology,2022,41(4):873-891. (in Chinese)

[29] 刘媛媛,张硕,于海业,等. 基于语义分割的复杂场景下的秸秆检测[J]. 光学精密工程,2020,28(1):200-211.
LIU Yuanyuan,ZHANG Shuo,YU Haiye,et al. Straw detection in complex scenarios based on semantic segmentation [J]. Optical Precision Engineering,2020,28(1):200-211. (in Chinese)