

# 基于高光谱成像的玉米收获后根茬行分割方法

王春雷<sup>1,2</sup> 陈婉芝<sup>1,2</sup> 卢彩云<sup>1,2</sup> 王庆杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测实验站, 北京 100083)

**摘要:** 在华北一年两熟区,利用联合收获机留茬收获玉米后,玉米根茬行与行间秸秆及裸露地表颜色相近,采用传统的图像检测方法对其进行分割比较困难。针对该问题,采集了利用联合收获机留茬收获玉米后的根茬行高光谱图像,以根茬顶端切口为目标,提出了一种玉米根茬行高光谱图像的分割方法。首先,对黑白校正后的全波段图像进行主成分分析,根据主成分图像权重系数优选出3个特征波长,分别为1 260、1 658、2 131 nm;然后,对3个特征波长处的图像再次进行主成分分析,并对所得到的PC2图像进行单阈值分割;最后,通过中值滤波、形态学开运算、根茬行区域外噪声滤除对分割结果进行优化。为验证该分割方法的效果,利用采集的50幅玉米根茬行高光谱图像进行试验,并选取分割准确率、召回率和F1值对分割结果进行定量评价。结果表明:该分割方法下的玉米根茬行图像分割效果较好,分割准确率、召回率和F1值分别为91.85%、90.49%和91.16%。研究结果表明基于高光谱成像技术可对玉米根茬行进行分割。

**关键词:** 玉米根茬行; 高光谱图像; 光谱分析; 主成分分析; 图像分割

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0421-06

## Segmentation Method for Maize Stubble Row Based on Hyperspectral Imaging

WANG Chunlei<sup>1,2</sup> CHEN Wanzhi<sup>1,2</sup> LU Caiyun<sup>1,2</sup> WANG Qingjie<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (North Hebei), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Traditional vision detection methods generally have better image segmentation effect when image foreground and background have obvious chromaticity difference. However, for the maize stubble field harvested by combine harvester, there are other backgrounds besides maize stubble row such as maize residues, naked land surface, and their color are very similar. Therefore, traditional image processing methods are not suitable for the segmentation of maize stubble row. In order to achieve precise and rapid segmentation of maize stubble row, a segmentation method for maize stubble row based on hyperspectral imaging technology was put forward. Firstly, the original hyperspectral image of maize stubble row was corrected by black and white correction algorithm. Then, the principal components analysis algorithm (PCA) was used to analyze the hyperspectral image. And the feature wavelengths (1 260 nm, 1 658 nm and 2 131 nm), which could maximum highlight the stubble tip incision and lighten the backgrounds, was selected according to the weight coefficient curve. In addition, the PCA algorithm was widely used in hyperspectral image analysis because of its effective dimension reduction effect and convenience. Secondly, images at three wavelengths were extracted and analyzed by PCA. After that, the PC2 image was convert into binarization image via single threshold method. Thirdly, the median filtering algorithm, morphological open operation, and edge noise removing algorithm were applied to ensure the precision and integrity of the maize stubble row. Totally 50 test images were collected to verify the segmentation effect of the presented method. At the same time, the segmentation precision rate, recall rate, and F1 value were calculated. The results revealed that the method proposed had good segmentation effect, and the segmentation precision rate, recall rate, and F1 value were 91.85%, 90.49%, and 91.16%, respectively. Therefore, the developed method realized good

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目(CARS-03)和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2020RC025)

作者简介: 王春雷(1994—),男,博士生,主要从事保护性耕作研究,E-mail: chlwang@cau.edu.cn

通信作者: 卢彩云(1986—),女,副教授,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lucaiyun@cau.edu.cn

performance in maize stubble row segmentation and can provide great help for detection of navigation line in maize stubble cropland harvested by combine harvester.

**Key words:** maize stubble row; hyperspectral image; spectral analysis; principal components analysis; image segmentation

## 0 引言

华北一年两熟区,在联合收获机留茬收获玉米后的地表,采用视觉导航引导小麦对行免耕播种机在根茬行间进行避茬作业,不仅能够有效地减少机具堵塞,提高机具通过性,还可以提高对行精度及作业效率,降低驾驶员作业强度,对于保护性耕作在该地区的发展具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。然而,联合收获机留茬收获玉米后,由于根茬行与行间秸秆、裸露地表的颜色相近,且田间情况较复杂,导致根茬行识别的难度大大增加。因此,亟需研发一种快速、准确的玉米根茬行识别方法。

高光谱成像技术是将光谱分析技术和图像处理技术有效融合,能够准确、快速且无损地识别出研究对象的内外部特性,目前已在农业生产领域得到大量应用<sup>[4-6]</sup>。如在农产品品质定性或定量检测领域,研究人员通过对健康与非健康农产品(如病虫害<sup>[7-8]</sup>或脂肪<sup>[9-10]</sup>、蛋白质<sup>[11-12]</sup>、水分<sup>[13]</sup>等含量不同)的高光谱全波段或特征波段信息进行分析,建立分类识别模型实现农产品品质定性和定量检测。在作物长势监测领域,研究人员通过采集作物不同生长时期的高光谱数据,通过对作物几项重要生长指标(如生物量、叶面积指数等)的定量分析建立作物生长模型,进而实现作物长势的监测<sup>[14-17]</sup>。此外,也有部分研究探索了采用高光谱图像进行目标检测的可行性,张航等<sup>[18]</sup>提出了一种混入棉花中地膜的高光谱图像分割方法,黄文情等<sup>[19]</sup>开发了一种用于分割苹果轻微损伤区域的方法。以上成果均为玉米根茬行检测方法研究奠定了基础,但对比分析发现,上述研究的环境多为结构化环境,而玉米田联合收获机留茬收获后的地表为非结构化环境,故需进一步研究适用于该环境的玉米根茬行分割方法。

针对联合收获机留茬收获玉米后根茬行检测较难的问题,本文基于高光谱成像技术,采集短波红外(SWIR)光谱范围内的玉米根茬行高光谱图像,以识别根茬切口为目标,利用主成分分析法优选能够最大程度突显根茬、同时抑制背景的特征波长;对特征波长下的图像再次进行主成分分析获得主成分图像,并研究玉米根茬行图像的分割方法。以验证采用高光谱成像进行玉米根茬行检测的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 玉米根茬行样本

以联合收获机留茬收获玉米后的根茬行为研究对象,于2017、2018年10月初,在农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测实验站的联合收获机留茬收获玉米后的区域内,随机选取场景进行玉米根茬行高光谱图像采集,选取场景面积为 $1\text{ m} \times 3\text{ m}$ ,包含3~5株玉米根茬,根茬高度约为15~20 cm。共采集50幅高光谱图像,并从中随机选取25幅作为样本集用于特征光谱选取,剩下的25幅作为测试集,用于验证本文方法的有效性。

### 1.2 玉米根茬行高光谱图像采集

采用的高光谱成像系统为Micro-HyperSpec型(Headwall Photonics Inc.,美国),结构如图1所示,该系统主要由1台成像光谱仪、CCD摄像机、电控回转平台、三角架、Teflon白板(反射率为99%)、计算机等组成。其中,光谱仪的光谱范围为1000~2500 nm(SWIR,短波红外光谱范围),光谱分辨率为7.516 nm,图像分辨率为320像素 $\times$ 583像素。为保证采集信号强度,选择晴天无云且太阳光最强的时间段(10:00—14:00)采集图像。系统工作前先将机器预热30 min,然后从正对玉米根茬行的方向获取高光谱图像,采集时各参数设置如下:镜头距地面高度1 m,倾斜角约 $45^\circ$ ,相机曝光时间为40 ms,电控回转平台的扫描速度为30 mm/s。

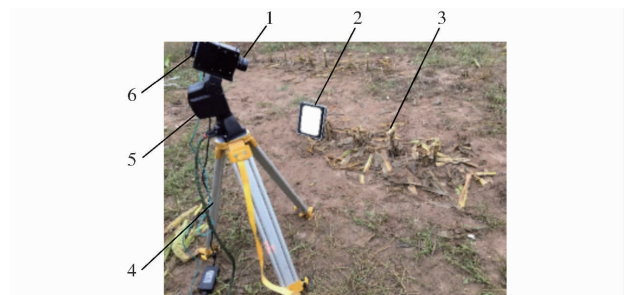


图1 高光谱成像系统

Fig. 1 Hyperspectral imaging system

1. 成像镜头 2. Teflon 白板 3. 样本 4. 三角架 5. 电控回转平台
6. 成像光谱仪

## 2 数据处理与分析方法

高光谱数据采集由Micro-HyperSpec系统完成,后续数据处理采用ENVI 5.3(Research System

Inc., 美国)、Matlab 2018a(The MathWorks Inc., 美国)和 Origin 2018(OriginLab Inc., 美国)软件。

### 2.1 高光谱图像黑白校正

由于各波长光源强度分布不均匀,且摄像机存在噪声,容易导致光强较弱波长的图像产生较大噪声,因此需要对采集的原始高光谱图像进行校正。本研究利用 Teflon 白板对采集的高光谱图像进行黑白校正以消除噪声,校正公式为

$$I_c = \frac{I_R - D}{W - D} \quad (1)$$

式中  $I_c$ ——校正后的高光谱数据

$I_R$ ——采集到的原始高光谱数据

$D$ ——盖上相机镜头后采集到的高光谱数据

$W$ ——对准 Teflon 白板采集到的高光谱数据

### 2.2 基于主成分分析的特征波长选取

经过黑白校正后的玉米根茬行高光谱数据包含 200 幅波长图像,且相邻波长图像高度相关,冗余严重,不利于实时处理和存储。因此,在进行高光谱图像分割前,需对数据进行降维;此外,若能较为准确地选择包含目标主要光谱信息的特征波长,便可达到相同甚至更好的效果<sup>[18]</sup>。主成分分析法(Principal component analysis, PCA)是一种广泛应用于光谱数据降维和特征波长选取的数据分析方法<sup>[20-21]</sup>。本研究采用 PCA 对玉米根茬行高光谱图像降维,并根据主成分图像权重系数选取特征波长。

### 2.3 玉米根茬行高光谱图像分割方法

利用主成分分析法对选取的特征波长图像再次进行分析,然后采用单阈值分割法对选取的主成分图像进行分割,最后通过中值滤波、形态学处理、根茬行区域外噪声滤除等对分割后的结果进行优化,得到最终的玉米根茬行分割结果。光谱分析与图像处理的算法流程图如图 2 所示。

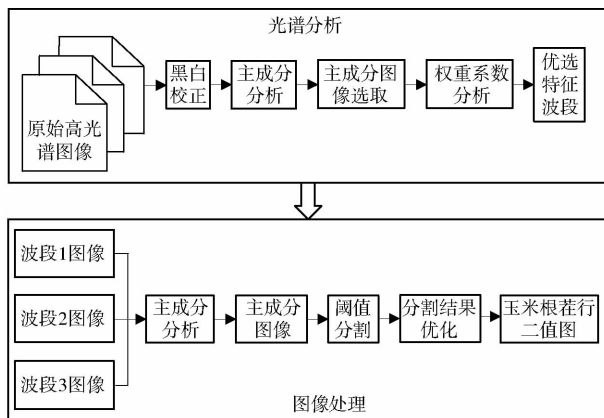


图 2 玉米根茬行高光谱图像处理流程图

Fig. 2 Flow chart of hyperspectral image processing of maize stubble row

为客观评价本文所提出方法的准确性,利用 Photoshop 人工分割得到的玉米根茬行图像作为真实分割结果,然后选取分割准确率  $P$ 、召回率  $R$  和  $F1$  值对优化后的分割结果进行定量评价<sup>[22]</sup>。其中,分割准确率用于分析算法分割结果与真实分割结果间的差异,计算公式为

$$P = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $A_1$ ——分割结果中根茬切口被正确分割的像素数

$A_2$ ——分割结果中背景被误分割为根茬切口的像素数

召回率  $R$  用于评价分割算法所得到玉米根茬行的完整性,计算公式为

$$R = \frac{A_1}{A_1 + A_3} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $A_3$ ——分割结果中根茬切口被误分割为背景的像素数

$F1$  值统筹分割算法的准确率和召回率,对分割结果进行综合评价,计算公式为

$$F_1 = \frac{2PR}{P + R} \quad (4)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 特征波长选取

对样本集 25 幅玉米根茬行高光谱图像进行主成分分析,并选取最有利于根茬顶端切口分割的图像 PC3、PC4 进行分析(PC3、PC4 为 25 幅图像主成分分析后的典型结果,其他也都获得了相似的结果)。图 3 为图像 PC3、PC4 的权重系数曲线。根据两条曲线极值点的分布进行特征波长选取,选取原则如下:①由于光谱曲线首尾两端噪声大,故排除首尾两端区域的极值点。②选取的局部极大值点或局部极小值点应同时为两条曲线上的极值点,且绝对值在邻近波长较大。③考虑到邻近波长之间相关性较高,选取的两特征波长间相差波段数应大于 10。

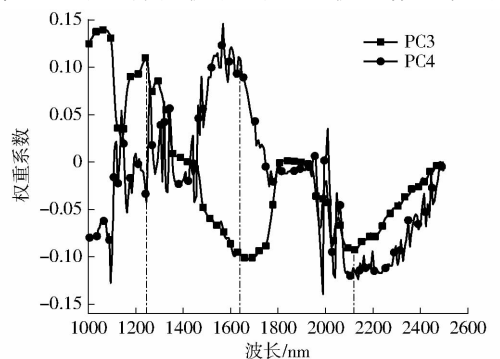


图 3 PC3 和 PC4 图像的权重系数曲线

Fig. 3 Weight coefficient curves of PC3 and PC4

按照上述选取原则,最终选取了 1 260、1 658、2 131 nm 作为最佳特征波长,如图 4 所示。

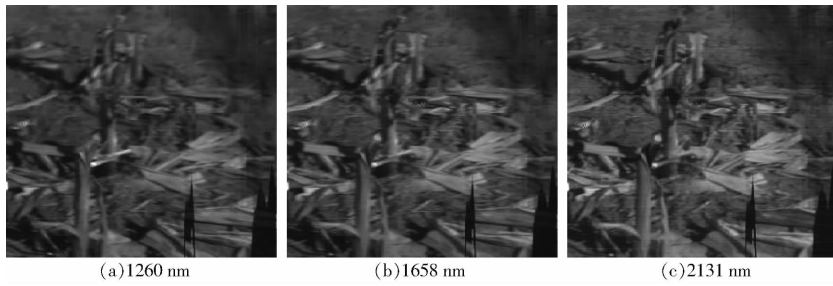


图 4 不同特征波长处的图像

Fig. 4 Images of different feature wavelengths

### 3.2 玉米根茬行分割

将特征波长处图像进行主成分分析,并利用单阈值分割法(分割阈值为 100)对所得到的图像 PC2 进行图像分割。然后对分割的结果依次进行中值滤波、形态学开运算、根茬行区域外噪声滤除以优化分割结果。其中,根茬行区域通过对二值图列向求平均,并以平均值最大列作为中心列,向两侧各取 35 个像素列的区域,通过将该区域外的灰度全部置 0 以滤除噪声。

为验证本文方法的有效性,将本文方法应用于样本集和测试集中的玉米根茬行高光谱图像。另外,试验还选取了波段算术运算<sup>[23]</sup>,最小噪声分离(MNF)<sup>[24]</sup>替换 PCA,将算术分割方法和 MNF 分割方法与本文方法进行比较,处理过程中的一些典型

结果如图 5、6 所示。其中,MNF 分割方法选取图像 MNF2 进行分割,分割阈值为 100;算术分割方法的分割阈值为 1。两种分割方法的分割结果优化处理方法与本文方法一致。算术分割方法波段计算公式为

$$I_F = n_1 i_{m_1} + n_2 i_{m_2} + n_3 i_{m_3} \quad (5)$$

式中  $I_F$ ——算术运算后的图像

$i_{m_1}$ ——特征波长 1 260 nm 处图像

$i_{m_2}$ ——特征波长 1 658 nm 处图像

$i_{m_3}$ ——特征波长 2 131 nm 处图像

$n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ ——系数

经多次预试验确定当  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  分别取 1.5、-1 和 -1 时,得到的玉米根茬行区域较完整,分割结果最佳。

从图 5、6 可以看出,3 种方法都能够分割出根

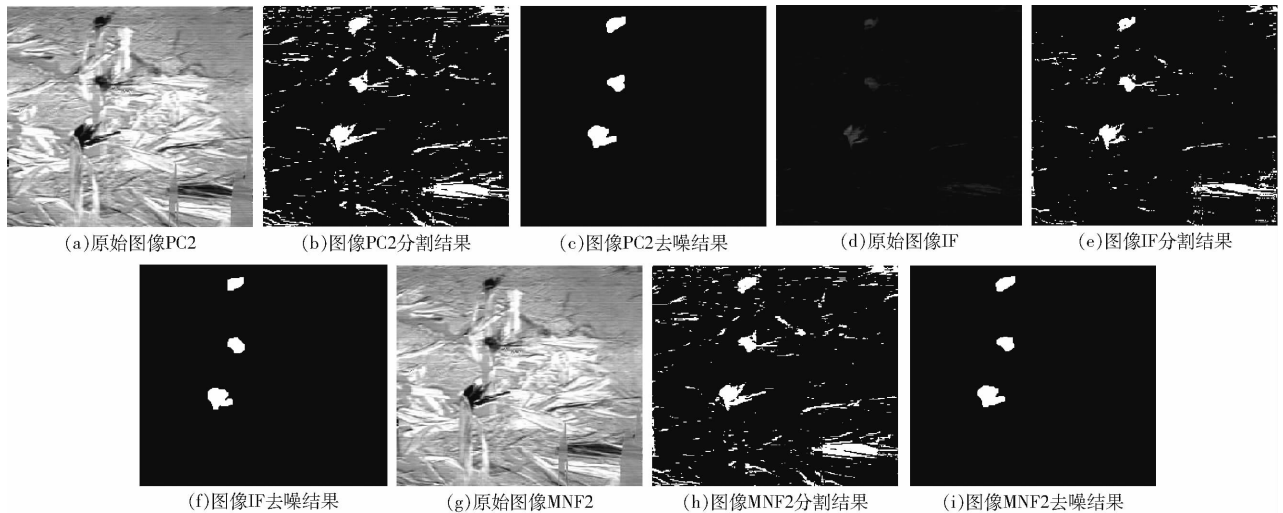


图 5 样本集玉米根茬行高光谱图像分割结果

Fig. 5 Segmentation results of maize stubble row hyperspectral image from sample set

茬顶端切口区域,但通过与分割前灰度图像对比,发现 3 种方法都存在误分割情况,即将根茬切口误分为背景区域,其中以算术分割方法最为严重(图 5f、6f),MNF 分割方法次之(图 5i、6i),本文方法效果最佳,保留的根茬切口区域较完整(图 5c、6c)。但本文方法也存在不足,如当行间秸秆距离根茬顶端切口较近时也会被误分为根茬顶端切口,今后仍需探索提高分割准确率的方法。

### 3.3 性能评价

本文方法分割 50 幅玉米根茬行高光谱图像得到平均分割准确率( $P$ )、平均召回率( $R$ )和平均 F1 值。总体上看,本文方法的 F1 值为 91.16%,与 IF 分割的 F1 值(78.04%)和 MNF 分割方法 F1 值(85.84%)相比,分别提高了 13.12、5.32 个百分点,表明本文方法对玉米根茬行的分割效果最佳。在分割准确率方面,IF 分割的  $P$ (85.53%)和 MNF 分割

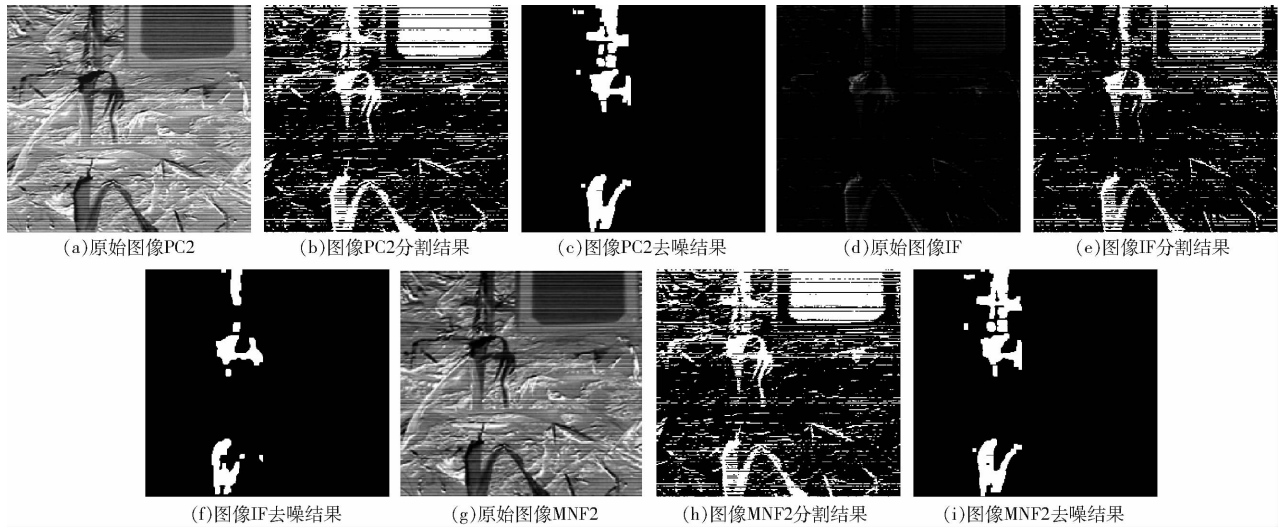


图6 测试集玉米根茬行高光谱图像分割结果

Fig. 6 Segmentation results of maize stubble row hyperspectral image from test set

的  $P(89.58\%)$  与本文方法的  $P(91.85\%)$  相比,分别低 6.32、2.27 个百分点,表明本文方法出现背景区域被误分割为根茬切口的概率较低,分割根茬顶端切口的准确性较高。在召回率方面,本文方法的  $R$  为 90.49%,相比 IF 分割方法和 MNF 分割方法分别提高了 18.73、8.08 个百分点,表明本文方法的分割完整性较好,图像 IF 和图像 MNF2 的确存在误分割情况,且前者误分割情况更为严重。综上,采用本文方法对根茬行图像进行分割的准确率较高,完整性较好,有利于后续根茬行直线检测。

## 4 结论

(1) 采用主成分分析法 (PCA) 对黑白校正后的 SWIR 范围内全波段高光谱图像进行分析,并结合

主成分图像权重系数选取了 1 260、1 658、2 131 nm 特征波长处图像进行分析。

(2) 分别使用本文方法 (PCA)、IF 分割方法和 MNF 分割方法对 3 个特征波长处的图像进行分割。结果表明,本文方法得到的根茬顶端切口区域较完整,与算术分割和 MNF 分割方法相比,误分割和过分割情况较少。

(3) 选取分割准确率  $P$ 、召回率  $R$  和 F1 值对本文所用玉米根茬行图像分割算法的性能进行客观评价。结果表明本文方法处理效果最优,与算术分割方法和 MNF 分割方法相比,F1 值 (91.16%) 分别高 13.12、5.32 个百分点, $P(91.85\%)$  分别提高 6.32、2.27 个百分点, $R(90.49\%)$  分别提高 18.73、8.08 个百分点。

## 参 考 文 献

- [1] 王晓燕,陈媛,陈兵旗,等. 免耕覆盖地秸秆行茬导航路径的图像检测[J]. 农业机械学报,2009,40(6):158-163. WANG Xiaoyan, CHEN Yuan, CHEN Bingqi, et al. Detection of stubble row and inter-row line for computer vision guidance in no-till field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):158-163. (in Chinese)
- [2] 陈婉芝. 基于机器视觉的免耕播种机对行避茬技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2018. CHEN Wan zhi. Study on maize stubble avoidance technology based on machine vision for row-follow no-till seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [3] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):1-19. (in Chinese)
- [4] SABERIOON M, CISAR P, LABBE L, et al. Spectral imaging application to discriminate different diets of live rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165:104949.
- [5] 邵园园,王永贤,玄冠涛,等. 高光谱成像的猕猴桃货架期快速预测[J]. 光谱学与光谱分析,2020,40(6):1940-1946. SHAO Yuanyuan, WANG Yongxian, XUAN Guantao, et al. Hyperspectral imaging technique for estimating the shelf-life of kiwifruits[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6):1940-1946. (in Chinese)
- [6] BADARO A T, GARCIA-MARTIN J F, LOPEZ-BARRERA M D C, et al. Determination of pectin content in orange peels by near infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2020, 323:126861.
- [7] YUAN L, YAN P, HAN W, et al. Detection of anthracnose in tea plants based on hyperspectral imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167:105039.
- [8] 郭伟,朱耀辉,王慧芳,等. 基于无人机高光谱影像的冬小麦全蚀病监测模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):162-169.

- GUO Wei, ZHU Yaohui, WANG Huifang, et al. Monitoring model of winter wheat take-all based on UAV hyperspectral imaging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 162 - 169. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190918&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190918&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.018. (in Chinese)
- [9] SUN J, WANG G, ZHANG H, et al. Detection of fat content in peanut kernels based on chemometrics and hyperspectral imaging technology [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 105: 103226.
- [10] 马文强, 张漫, 李源, 等. 核桃仁脂肪含量的近红外光谱无损检测 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 374 - 379. MA Wenqiang, ZHANG Man, LI Yuan, et al. Non-destructive detection for fat content of walnut kernels by near infrared spectroscopy [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 374 - 379. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s057&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s057&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.057. (in Chinese)
- [11] 王伟, 姜洪喆, 贾贝贝, 等. 基于高光谱成像的生鲜鸡肉糜中大豆蛋白含量检测 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 357 - 364. WANG Wei, JIANG Hongzhe, JIA Beibei, et al. Detection of soybean protein content in fresh minced chicken meat using hyperspectral imaging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 357 - 364. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191241&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191241&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.041. (in Chinese)
- [12] MA J, SUN D, PU H, et al. Protein content evaluation of processed pork meats based on a novel single shot (snapshot) hyperspectral imaging sensor [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 240: 207 - 213.
- [13] 於海明, 徐佳琪, 刘浩鲁, 等. 基于高光谱和频谱特征的注水肉识别方法 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 367 - 372, 366. YU Haiming, XU Jiaqi, LIU Haolu, et al. Identification of water injection meat based on hyperspectral technique and spectrum characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 367 - 372, 366. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191141&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191141&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.041. (in Chinese)
- [14] JIA M, LI W, WANG K, et al. A newly developed method to extract the optimal hyperspectral feature for monitoring leaf biomass in wheat [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104942.
- [15] GE Y, BAI G, STOERGER V, et al. Temporal dynamics of maize plant growth, water use, and leaf water content using automated high throughput RGB and hyperspectral imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 625 - 632.
- [16] 谢莉莉, 王福民, 张垚, 等. 基于多生育期光谱变量的水稻直链淀粉含量监测 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 165 - 173. XIE Lili, WANG Fumin, ZHANG Yao, et al. Monitoring of amylose content in rice based on spectral variables at the multiple growth stages [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(8): 165 - 173. (in Chinese)
- [17] 陶惠林, 徐良骥, 冯海宽, 等. 基于无人机高光谱长势指标的冬小麦长势监测 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 180 - 191. TAO Huilin, XU Liangji, FENG Haikuan, et al. Monitoring of winter wheat growth based on UAV hyperspectral growth index [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 180 - 191. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2002020&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002020&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.020. (in Chinese)
- [18] 张航, 乔曦, 李振波, 等. 皮棉中地膜的高光谱图像分割方法 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 161 - 167. ZHANG Hang, QIAO Xi, LI Zhenbo, et al. Hyperspectral image segmentation method for plastic films in ginned cotton [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 161 - 167. (in Chinese)
- [19] 黄文倩, 陈立平, 李江波, 等. 基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 272 - 277. HUANG Wenqian, CHEN Liping, LI Jiangbo, et al. Effective wavelengths determination for detection of slight bruises on apples based on hyperspectral imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 272 - 277. (in Chinese)
- [20] HONG G, ABD EL-HAMID H T. Hyperspectral imaging using multivariate analysis for simulation and prediction of agricultural crops in Ningxia, China [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105355.
- [21] 王翔宇, 朱晨光, 傅泽田, 等. 基于可见光光谱分析的黄瓜白粉病识别研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1864 - 1869. WANG Xiangyu, ZHU Chenguang, FU Zetian, et al. Research on cucumber powdery mildew recognition based on visual spectra [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6): 1864 - 1869. (in Chinese)
- [22] 程焱焱, 祁力钧, 程一帆, 等. 基于 M-LP 特征加权聚类的果树冠层图像分割方法 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 191 - 198, 260. CHENG Yizhen, QI Lijun, CHENG Yifan, et al. Fruit tree canopy image segmentation method based on M-LP features weighted clustering [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 191 - 198, 260. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200422&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200422&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.022. (in Chinese)
- [23] 曹玉栋, 祁伟彦, 李娴, 等. 苹果无损检测和品质分级技术研究进展及展望 [J]. 智慧农业, 2019, 1(3): 29 - 45. CAO Yudong, QI Weiyan, LI Xian, et al. Research progress and prospect on non-destructive detection and quality grading technology of apple [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(3): 29 - 45. (in Chinese)
- [24] 蔡庆空, 李二俊, 蒋金豹, 等. 联合光谱-空间信息的短波红外高光谱图像茶叶识别模型 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(8): 2522 - 2527. CAI Qingkong, LI Erjun, JIANG Jinbao, et al. Study on the tea identification of near-infrared hyperspectral image combining spectra-spatial information [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(8): 2522 - 2527. (in Chinese)