

基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级方法

雷雨^{1,2} 韩德俊^{3,4} 曾庆东⁴ 何东健^{1,5}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学农业部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100;

4. 西北农林科技大学旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

5. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了快速、准确地对小麦条锈病病害程度进行分级评估,提出了一种基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级方法。首先利用 HyperSIS 高光谱成像系统采集受条锈菌侵染后不同发病程度的小麦叶片高光谱图像,通过分析叶片区域与背景的光谱特征,对 555 nm 波长的特征图像进行阈值分割获得掩膜图像,并用掩膜图像对高光谱图像进行掩膜处理,提取仅含叶片的高光谱图像;然后用主成分分析法(Principal component analysis,PCA)得到利于条锈病病斑和健康区域分割的第 2 主成分(The second principal component,PC2)图像,采用最大类间方差法(Otsu)分割出条锈病病斑区域;最后根据条锈病病斑区域面积占叶片面积的比例对小麦条锈病病害程度进行分级。试验结果表明:测试的 270 个不同小麦条锈病病害等级的叶片样本中,265 个样本可被正确分级,分级正确率为 98.15%。该研究为田间小麦条锈病害程度评估提供了基础,也为小麦条锈病抗性鉴定方法提供了新思路。

关键词: 小麦条锈病; 病害程度; 高光谱成像; 主成分分析; 分级; 最大类间方差法

中图分类号: S435.121.4⁺2; TP312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0226-07

Grading Method of Disease Severity of Wheat Stripe Rust
Based on Hyperspectral Imaging Technology

LEI Yu^{1,2} HAN Dejun^{3,4} ZENG Qingdong⁴ HE Dongjian^{1,5}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

5. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, is one of the most important and devastating diseases in wheat production. Identification and classification of wheat stripe rust plays an important role in high-quality production of wheat, which helps to quantitatively assess the level of wheat stripe rust severity in the field to make strategies to achieve effective control for wheat stripe rust in early. Currently, estimation disease severity of wheat stripe rust is mainly relied on naked-eye observation according to the manual field investigation. However, this method is labour-intensive, time-consuming, besides requiring workers with high professional knowledge. In order to quickly and accurately evaluate the disease level of wheat stripe rust, a novel grading method of disease severity of wheat stripe rust based on hyperspectral imaging technology was proposed. Firstly, hyperspectral images of 320 infected at different levels and 40 healthy wheat leaf samples were captured by a HyperSIS hyperspectral system covering the visible and near-infrared region (400 ~ 1 000 nm). Secondly, via the analysis of spectral reflectance of leaf and background regions, there were obvious differences in spectral reflectance at the 555 nm wavelength. Therefore, the image of the 555 nm wavelength was named the feature image, which was manipulated by threshold segmentation to obtain a mask image. The logical and operation was

收稿日期: 2017-11-08 修回日期: 2017-12-09

基金项目: 陕西省重点产业链项目(2015KTZDNY01-06)

作者简介: 雷雨(1990—),男,博士生,主要从事农业电子与自动化技术研究,E-mail: ly759059219@163.com

通信作者: 何东健(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事智能检测与农业信息技术研究,E-mail: hdj168@nwsuaf.edu.cn

conducted by using the original hyperspectral image and mask image to remove the background information. Thirdly, the principal component analysis (PCA) method was used for the dimension reduction of hyperspectral images. The operation results showed that the second principal component image (PC2) can significantly identify the stripe rust spot area and healthy area. On this basis, stripe rust spots area was efficiently segmented by using an Otsu method. Finally, the degree of the disease severity of wheat stripe rust was graded according to the proportion of stripe rust spots area on a whole leaf. To verify the effectiveness of the proposed method, a total of 270 leaf samples were collected for the performance evaluation. Experimental results showed that 265 samples could be accurately classified at different disease severities of wheat stripe rust and the overall classification accuracy was 98.15%. In conclusion, the experimental results indicated that the method using hyperspectral imaging technology proposed is able to satisfy the precision demand of quantitative calculation and provide a foundation for evaluating the field disease level of wheat stripe rust and a new idea for resistance identification method of wheat stripe rust.

Key words: wheat stripe rust; disease severity; hyperspectral imaging; principal component analysis; grading; Otsu method

0 引言

由条形柄锈菌 (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) 引起的小麦条锈病是我国西北、西南、华北和淮北等冬麦区和西北春麦区小麦的重要病害,特大流行年份可致小麦减产 50% ~ 60%,对我国粮食安全生产具有重大威胁^[1-3]。小麦叶片感染条锈病后,产生 2 ~ 3 nm 的椭圆形黄色夏孢子堆,沿叶脉成行排列^[4-5]。在我国,小麦条锈病是重要的防控对象,国家投入大量的人力和物力用于该病的调查和监测。叶片病害程度是病情指数的重要参数,传统小麦条锈病病情调查完全靠人工凭经验在田间进行^[6],对病害程度进行目测定级。然而,这种识别和分级方法不仅效率低、劳动强度大,且因调查人的主观判断差异导致识别精度低,分级误差较大。因此,寻求一种快速、准确的小麦条锈病监测方法具有重要意义。

光谱技术是植物病害检测中常用的一种监测技术,具有无损、无污染、高效等特点。目前,已有光谱技术^[7-12]应用于小麦条锈病检测方面的研究。李小龙等^[13]利用近红外光谱技术结合偏最小二乘法对小麦条锈病严重度进行了分级识别。然而,可见近红外光谱技术只能获取被检测对象上点的光谱信息,无法获取目标物整体综合信息。致使小麦条锈病早期识别检测较为困难,特别表现在发病初期小病斑的检测识别上,其检测精度较低。高光谱成像技术 (Hyperspectral images) 是一种融合了被测对象的图像信息和光谱信息的新技术,具有多波段、高分辨率与图谱合一等优点^[14]。目前,该技术已广泛应用于植物病害诊断^[15-17]、农产品品质检测^[18-19]、作物生长状态监测^[14, 20]等。近年来,有学者将该技术应用用于植物病害胁迫诊断研究并取得了初步进展。MOSHOU 等^[21]结合自组织映射神经网络 (Self-

organizing map, SOM) 及二次判别分析 (Quadratic discriminant analysis, QDA),在冠层尺度上利用光谱图像识别和检测了小麦条锈病害的信息。文献[4,22]利用机载高光谱成像技术在冠层尺度上对冬小麦条锈病害程度进行了预测。郑志雄等^[23]利用高光谱成像技术对水稻叶瘟病病害程度进行分级评估,分级正确率达到 96.39%。LEE 等^[24]利用航空高光谱成像检测柑橘黄龙病,通过光谱角制图 (Spectral angle mapping, SAM) 和光谱特征拟合 (Spectral feature fitting, SFF) 进行图像分类。综上分析表明,可见近红外光谱技术可对小麦条锈病严重度进行分级,但在发病初期小病斑的检测识别上,其检测精度较低;高光谱成像技术可对植物病害进行诊断,但目前尚无基于高光谱成像技术进行小麦条锈病叶片病害程度识别分级的报道。故需要研究快速、准确识别小麦条锈病叶片病害程度的技术和方法。

本研究以人工接种方式获得不同发病程度的小麦条锈病叶片为研究对象,利用 HyperSIS 高光谱成像系统获取其高光谱图像数据,结合化学计量学及图像处理方法,建立小麦条锈病病害程度的分级方法,以期小麦条锈病病害程度分级提供一种新方法。

1 供试材料与高光谱图像采集

1.1 实验材料

供试小麦材料为小麦品种小堰 22,属易感病品种,经浸种、催芽后,于 2016 年 10 月 20 日播种在与西北农林科技大学小麦人工病圃相隔 20 m 的 2 块农田区域 (区域 1、2),播种面积均为 200 m²。该病圃位于咸阳市杨凌示范区崔西沟村,位于 34°17'N, 103°4'E,海拔高度为 510 m,年均降水量为 635 ~

800 mm。待小麦长到拔节期,用0.02%吐温-80溶液,将实验室繁育的新鲜小麦条锈病菌夏孢子配制成质量浓度为0.125 mg/mL的孢子悬浮液,于2017年4月10日傍晚在区域1接种。接种方式为采用人工喷雾接种,即将制备的孢子悬浮液摇匀,均匀喷在叶表面直至叶片完全布满小水珠为止。接种后用经水喷雾处理的塑料薄膜覆盖过夜,以保持饱和湿度,次日08:30揭去塑料薄膜,以促其发病;在区域2利用等量蒸馏水喷雾处理,作为健康对照。

2017年4月25日,于小麦发病后,连续7 d采集不同病害等级的叶片样本。根据国家标准 GB/T 15795—2011《小麦条锈病测报技术规范》中的小麦条锈病严重度分级标准,从区域1中分别选取发病严重度为1%、5%、10%、20%、40%、60%、80%和100%的小麦叶片,并以区域2中健康小麦叶片(严重度记为0%)作为对照,同时按小麦条锈病严重度级别(0%、1%、5%、10%、20%、40%、60%、80%和100%)分别设置为1、2、3、4、5、6、7、8、9级。不同严重度叶片和健康叶片各取40片,共计360片,采摘后立即送回实验室采集样品的高光谱图像数据。

1.2 高光谱成像系统

本文使用的高光谱成像系统(HyperSIS-VNIR-QE,北京卓立汉光仪器有限公司,中国)如图1所示,由可见/近红外成像光谱仪(ImSpector V10E, Spectra Imaging公司,芬兰)、CCD相机(OPCA05G, Hamamastu公司,日本)、4个100 W卤素灯、电控移动载物台、暗箱以及计算机组成。采集光谱所用软件为SpectraSENS(Gilden-Photonics公司,芬兰)。成像光谱仪波长范围为400~1 000 nm,共256个波段,光谱分辨率为2.5 nm; CCD相机的分辨率为320像素×250像素;为了确保采集的图像清晰且不失真,经预备实验,确定曝光时间为5 ms,物距为65 cm,图像采集速度为14 mm/s。

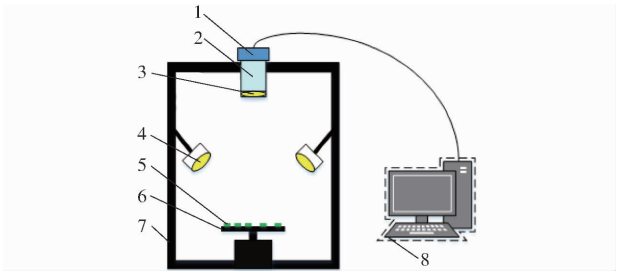


图1 HyperSIS 高光谱成像系统

Fig.1 HyperSIS hyperspectral imaging system

1. CCD相机 2. 光谱仪 3. 镜头 4. 光源 5. 样本 6. 电控移动载物台 7. 暗箱 8. 计算机

1.3 高光谱图像采集与校正

为了防止基线漂移,采集高光谱图像数据之前

预热高光谱成像系统30 min。由于CCD相机中存在的暗电流及不均匀光强会产生图像噪声,故对高光谱成像装置进行黑白校正。首先扫描反射率为100%的标准白板,得到全白的标定图像;然后盖上摄像头盖和关闭光源采集图像,得到反射率为零的全黑标定图像;在密闭光箱内采集叶片样本的光谱图像,其像素区域在波段*i*处的光谱反射率*R*为

R(i) = (I_s(i) - I_d(i)) / (I_w(i) - I_d(i)) (1)

式中 I_s——样本光谱图像
I_d——反射率为零的全黑标定图像
I_w——反射率为100%的全白标定图像

由于小麦叶片为细长条形,为了确保采集到的光谱信息的准确性和完整性,将5片叶片为1组平铺于载物台上,小麦叶片随载物台匀速移动,高光谱成像仪在400~1 000 nm波段内,采集256个波段的320像素×250像素的高光谱图像。

2 小麦条锈病病害程度分级方法

采集的高光谱图像用ENVI 4.8 (Research System Inc, Boulder, Co., 美国)和Matlab 2014a (The Math Works, Natick, 美国)软件进行分析和处理。

2.1 健康与条锈病斑区域的光谱曲线分析

用ENVI对采集到的高光谱图像进行裁剪处理,得到360个不同病害等级的叶片样本,选取90个样本进行分析(1~9级样本各10个),其余270个样本用于验证。用ENVI分别随机提取叶片健康部位和条锈病病斑部位感兴趣区域(Region of interest, ROI)各125个用于光谱分析。分别计算出健康部位和条锈病病斑部位感兴趣区域的平均光谱,其光谱曲线如图2所示。由图2可知,病斑和健康部位的光谱反射率曲线形状基本相似。在可见光区530~720 nm波段内,条锈病病斑部位反射率比健康部位高,这是由于叶片感染条锈病后,内部细胞组

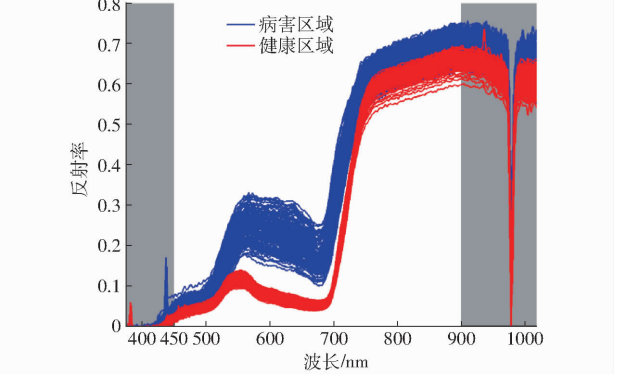


图2 健康部位及条锈病病斑部位感兴趣区域光谱曲线

Fig.2 Reflectance spectrum of normal and disease regions

织受到破坏,叶绿素含量减少,导致光谱的吸收减少,小麦病叶的反射率增大^[22]。其中,在 555 nm 附近出现峰值,且两者差异最大,在 680 nm 附近波谷处两者差异显著。在近红外光区 750 ~ 1 000 nm 波段内,反射率主要受叶片内部结构、生物量、蛋白质、纤维素等影响,条锈病斑部位反射率比健康部位高,说明内部结构已遭到破坏^[25]。同时,波长在 450 nm 以下及 900 nm 以上时,光谱噪声较明显。通过以上分析,故后续对 450 ~ 900 nm 的高光谱图像进行分析。

2.2 高光谱图像的掩膜处理

为了将叶片区域与背景区域相分离,对可见/近红外波段采集到的高光谱图像,用 ENVI 进行掩膜处理,分割处理过程如图 3 所示。如图 3c 所示,在

520 ~ 570 nm 之间背景(反射率在 0.03 左右波动)与叶片的病斑区域与健康区域的光谱特征有较大差异。为了将叶片区域从背景中分离出来(图 3a),分割阈值应大于背景的最大反射率,小于叶片的最小反射率,通过对比分析可知,在 555 nm 时背景与叶片病斑区域与健康区域光谱反射率差异最大,对应的高光谱图像如图 3b 所示。故设定合适的分割阈值便可将背景和叶片分离。经过预实验可知,分割阈值取 0.08 时分割效果最好。分割出的叶片掩膜图像如图 3d 所示,然后将原始图像与叶片掩膜图像(单个叶片图像)作逻辑与运算,得到去除背景后的叶片高光谱图像如图 3e 所示。270 个叶片样本均进行上述处理提取出叶片区域。

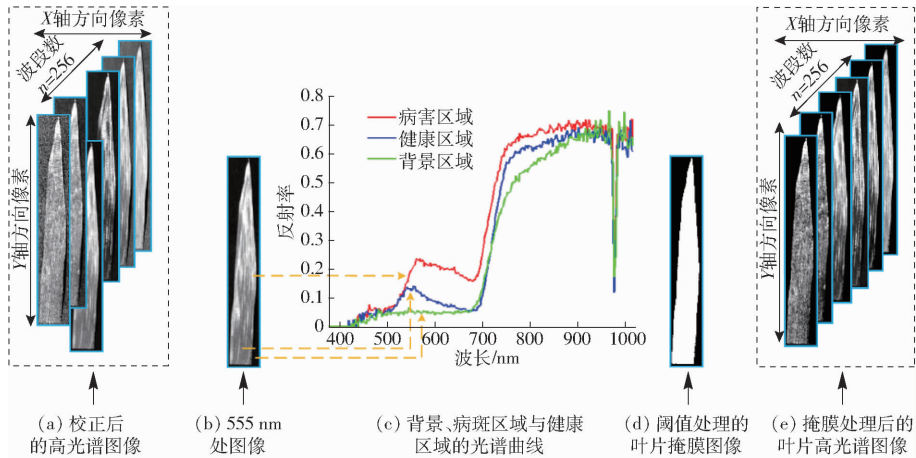


图 3 图像分割流程
Fig. 3 Procedure for image segmentation

2.3 病斑高光谱图像的主成分分析

由于 450 ~ 900 nm 间有 180 个波段的高光谱图像,数据量大且相邻波段之间的相关性强,造成信息的冗余,从而导致不同波段图像数据间相关性较大。而主成分分析^[26](Principal component analysis, PCA)主要是沿协方差最大的方向由高维数据空间向低维数据空间投影,将相关的 1 组数据,通过正交变换使其变为 1 组相互独立变量的方法,能够充分去除相关性,最大限度地表征原始数据的信息,把有用的信息集中到数目尽可能少的主分量中。因此,本文选择 PCA 对高光谱数据降维,以消除原始数据中的冗余信息。

对掩膜后的高光谱图像进行主成分分析,得出前 4 个主成分图像(PC1 ~ PC4),如图 4 所示。图 4a 中伪彩色原始图像波段选取为:红(639.89 nm)、绿(550.43 nm)、蓝(469.50 nm)。与图 4a 相比,前 4 幅 PC 图像基本上保留了原始图像的绝大部分信息。比较 4 幅 PC 图像可知,PC1 图像包含了叶片原始数据的最多信息,然而叶片健康区域的灰度较高,与条锈病斑区域的灰度相近,导致与病斑区域界线

比较模糊,不利于病斑提取;PC3 图像包含病斑信息较少;PC4 图像病斑信息少且噪声较大;而 PC2 图像中条锈病斑与健康区域的灰度有明显的差异,利

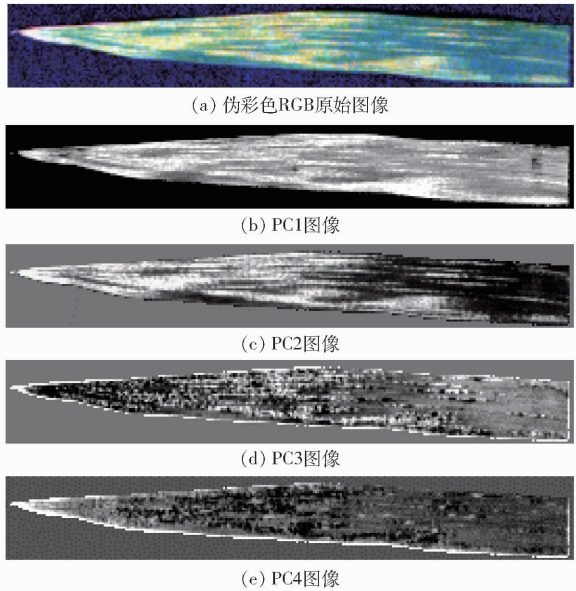


图 4 原始图像和基于叶片的前 4 个主成分图像
Fig.4 Original image and the first four principal component images by PCA on whole leaf

于病斑区域的分割。故本文选择 PC2 图像作为后续处理的主成分图像。

2.4 病斑面积分割方法

高光谱图像经过主成分分析处理后,在 PC2 图像中能较完整地体现出条锈病斑与健康区域的差异。其中亮区域为条锈病斑,暗区域为健康区域。采用最大类间方差法^[27]对 PC2 图像中条锈病斑区域和非病斑区域进行分割处理。具体的步骤为:①用阈值 K 将像素分为病斑和非病斑区域,计算这 2 个区域灰度的类间方差 σ^2 ,寻找最优阈值 K 使得 σ^2 最大,使类间分离性最佳。②标记每个独立的区域,计算每个区域的平均灰度值 n 。③对于 PC2 图像中的每一个独立的区域,如果 n 大于分割阈值 K ,则认为该区域内所有点均为条锈病斑点;否则,该区域为非病斑点,提取出的条锈病斑二值图像如图 5a 所示。④提取掩膜图像背景的坐标信息,根据坐标值相应地将二值图像中背景的灰度变换成与条锈病斑和健康区域不同的值 y ,得到的灰度图像如图 5b 所示。⑤为了更好地区分病斑,将背景区域、健康区域和条锈病病斑区域分别设置成黑色、绿色和红色,得到的分割效果如图 5c 所示。

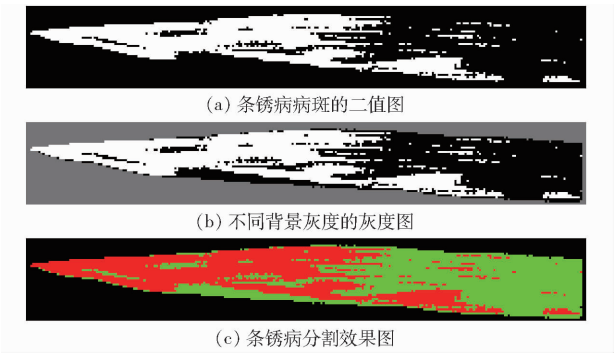


图 5 小麦条锈病斑分割结果
Fig. 5 Segmentation results of wheat stripe rust leaf

2.5 小麦条锈病病害程度分级

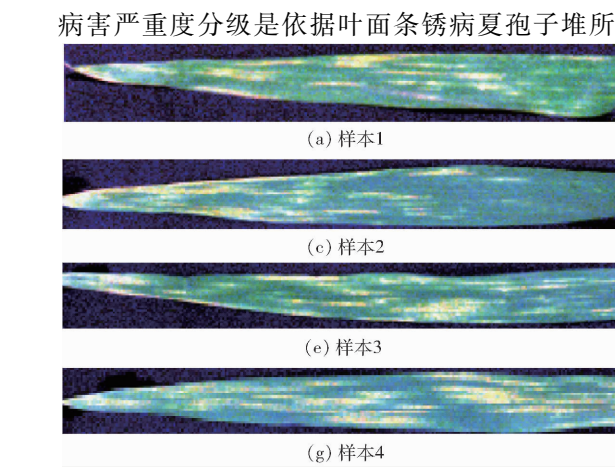


图 6 部分病害样本处理效果
Fig. 6 Processing effect of partial disease samples

占叶片面积的比率设计的,1 级为健康样本,无病斑,而条锈病叶在达到 100% 严重度前已经枯死,因此根据文献[28]将夏孢子堆覆盖率为 35% 时定为 100% 严重度,病害严重度的计算公式为

$$C = \frac{\frac{A_2}{A_1} \times 100}{35} \times 100\% \tag{2}$$

式中 C ——病害严重度
 A_1 ——单个叶片的总面积,像素
 A_2 ——小麦条锈病病斑的面积,像素

3 结果与分析

在采集的 360 个不同病害等级的叶片样本中,其中 270 个样本用于验证(以植保专家目测为标准),测试样本的分级正确率如表 1 所示。部分病害样本处理效果如图 6 所示。

表 1 小麦条锈病病害程度分级测试结果
Tab. 1 Test results of disease severity grading of wheat stripe rust

级别	样本数量	误识别数	分级正确率/%
1	30	0	100
2	30	1	96.67
3	30	0	100
4	30	1	96.67
5	30	1	96.67
6	30	2	93.33
7	30	0	100
8	30	0	100
9	30	0	100
总计	270	5	98.15

由表 1 可看出,270 个测试样本中,共有 5 个样本被错误分级,分级平均正确率为 98.15%。其中,病害等级为 1、3、7、8、9 级的测试样本分级正确率均为 100%;病害等级为 2 级的样本中,有 1 个样本被误分为 1 级,分级正确率为 96.67%;病害等级为 4

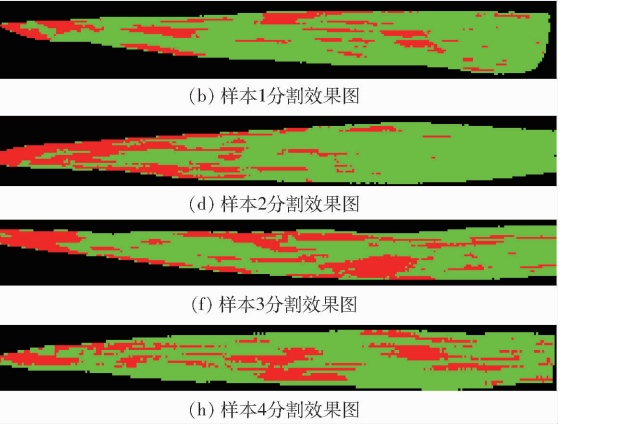


图 6 部分病害样本处理效果
Fig. 6 Processing effect of partial disease samples

级的样本中,有 1 个样本被误分为 5 级,分级正确率为 96.67%;病害等级为 5 级的样本中,有 1 个样本被误分为 4 级,分级正确率为 96.67%;病害等级为 6 级样本中,有 1 个样本被误分为 5 级,1 个样本被误分为 7 级,分级正确率为 93.33%。

影响分类正确率的原因有:①高光谱成像仪分辨率的限制。小麦条锈病病斑呈针点状时,由于高光谱成像仪分辨率的限制,获取的高光谱图像不能将针尖状条锈病病斑较完整的体现出来,易将 2 级误分为 1 级。②临界样本的影响。不同病害级别之间的条锈病病斑受害面积与叶片面积的比值指标仅相差 1%,如果测试样本的病害等级处于两级别之间的临界点附近,也易被错误分类。

从生理学的角度上来看,在小麦受到条锈菌侵染以后,其叶片的内部细胞组织受到破坏,叶绿素浓度也会下降,并且叶片结构也随之发生变化,在小麦的叶片表面形成长条状鲜黄色的锈斑,导致叶片表皮破裂,甚至叶片坏死^[29]。病害小麦叶片的高光谱图像在可见近红外区域反映的正是其叶片结构以及

其叶绿素特征,表明应用高光谱成像技术对小麦条锈病病害程度进行分级是可行的,可为小麦条锈病病害程度分级提供一种新方法。

4 结论

(1)根据叶片与背景区域在 555 nm 处的光谱差异,通过阈值分割获得掩膜图像,并用掩膜图像对高光谱图像进行掩膜处理,提取了仅含叶片的高光谱图像;采用 PCA 方法对高光谱图像数据进行降维处理,得到易于区分条锈病斑和健康区域的 PC2 图像,用 PC2 图像可分割出条锈病病斑和健康区域,克服了叶片尺度上由于病斑小或条锈病病斑与健康区域灰度差异不明显而无法检测的问题。

(2)用条锈病病斑和健康叶片区域的光谱差异,建立了与植保专家目测抗性分级标准一致的基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级标准,病害程度的分级正确率为 98.15%。该研究可为小麦条锈病的田间病害程度检测提供基础,也为小麦条锈病的抗性分级检测提供了新思路。

参 考 文 献

- 1 李振岐,曾士迈. 中国小麦锈病[M]. 北京:中国农业出版社, 2002:1 - 204.
- 2 ZHANG D Y, LIN F F, HUANG Y B, et al. Detection of wheat powdery mildew by differentiating background factors using hyperspectral imaging[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2016, 18(4): 747 - 756.
- 3 ZHANG J C, YUAN L, PU R L, et al. Comparison between wavelet spectral features and conventional spectral features in detecting yellow rust for winter wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 79 - 87.
- 4 HUANG W, LAMB D W, NIU Z, et al. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J]. Precision Agriculture, 2007, 8(4 - 5): 187 - 197.
- 5 CHEN W Q, WELLINGS C, CHEN X M, et al. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*[J]. Molecular Plant Pathology, 2014, 15(5): 433 - 446.
- 6 韩德俊,王琪琳,张立,等. “西北-华北-长江中下游”条锈病流行区系当前小麦品种(系)抗条锈病性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2889 - 2896.
- 7 HAN Dejun, WANG Qilin, ZHANG Li, et al. Evaluation of resistance of current wheat cultivars to stripe rust in Northwest China, North China and Middle and lower reaches of Changjiang River epidemic area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2889 - 2896. (in Chinese)
- 8 李小龙,马占鸿,赵龙莲,等. 基于近红外光谱技术的小麦条锈病和叶锈病的早期诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2661 - 2665.
- 9 LI Xiaolong, MA Zhanhong, ZHAO Longlian, et al. Early diagnosis of wheat stripe rust and wheat leaf rust using near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2661 - 2665. (in Chinese)
- 10 李小龙,马占鸿,赵龙莲,等. 基于近红外光谱技术的小麦条锈病菌潜伏侵染的检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1853 - 1858.
- 11 LI Xiaolong, MA Zhanhong, ZHAO Longlian, et al. Detection of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* latent infections in wheat leaves using infrared spectroscopy technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1853 - 1858. (in Chinese)
- 9 艾效夷,宋伟东,张竞成,等. 结合冠层光谱和叶片生理观测的小麦条锈病监测模型研究[J]. 植物保护, 2016, 42(2): 38 - 46.
- 10 AI Xiaoyi, SONG Weidong, ZHANG Jingcheng, et al. Combined canopy spectral and leaf physiological observations in model development for wheat stripe rust detection[J]. Plant Protection, 2016, 42(2): 38 - 46. (in Chinese)
- 10 张玉萍,马占鸿. 基于遥感技术的不同施氮水平下小麦条锈病病情反演研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(4): 42 - 51.
- 11 ZHANG Yuping, MA Zhanhong. Wheat stripe rust disease index inversion by remote sensing technology under different nitrogen application[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(4): 42 - 51. (in Chinese)
- 11 WANG H, QIN F, RUAN L, et al. Identification and severity determination of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on hyperspectral data acquired using a black-paper-based measuring method[J]. PLOS ONE, 2016, 11(4): 1 - 25.

- 12 ZHAO J, HUANG L, HUANG W, et al. Hyperspectral measurements of severity of stripe rust on individual wheat leaves[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2014, 139(2): 401–411.
- 13 李小龙, 秦丰, 赵龙莲, 等. 近红外光谱技术的小麦条锈病严重度分级识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(2): 367–371.
LI Xiaolong, QIN Feng, ZHAO Longlian, et al. Identification and classification of disease severity of wheat stripe rust using near infrared spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(2): 367–371. (in Chinese)
- 14 YU K Q, ZHAO Y R, ZHU F L, et al. Mapping of chlorophyll and SPAD distribution in pepper leaves during leaf senescence using visible and near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(1): 13–24.
- 15 黄双萍, 齐龙, 马旭, 等. 基于高光谱成像的水稻穗瘟病害程度分级方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 212–219.
HUANG Shuangping, QI Long, MA Xu, et al. Grading method of rice panicle blast severity based on hyperspectral image[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 212–219. (in Chinese)
- 16 虞佳佳, 何勇. 基于高光谱成像技术的番茄叶片灰霉病早期检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2168–2171.
YU Jiajia, HE Yong. Study on early detection of gray mold on tomato leaves using hyperspectral imaging technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2168–2171. (in Chinese)
- 17 柴阿丽, 廖宁放, 田士勋, 等. 基于高光谱成像和判别分析的黄瓜病虫识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(5): 1357–1361.
CHAI A L, LIAO N F, TIAN S X, et al. Identification of cucumber disease using hyperspectral imaging and discriminate analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(5): 1357–1361. (in Chinese)
- 18 QIN J W, BURKS T F, RITENOUR M A, et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(2): 183–191.
- 19 迟茜, 王转卫, 杨婷婷, 等. 基于近红外高光谱成像的猕猴桃早期隐性损伤识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 235–241. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150334&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.034.
CHI Qian, WANG Zhuanwei, YANG Tingting, et al. Recognition of early hidden bruises on kiwifruits based on near-infrared hyperspectral imaging technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 235–241. (in Chinese)
- 20 赵艳茹, 余克强, 李晓丽, 等. 基于高光谱成像的南瓜叶片叶绿素分布可视化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1378–1382.
ZHAO Yanru, YU Keqiang, LI Xiaoli, et al. Study on SPAD visualization of pumpkin leaves based on hyperspectral imaging technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1378–1382. (in Chinese)
- 21 MOSHOU D, BRAVO C, OBERTI R, et al. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps[J]. *Real-Time Imaging*, 2005, 11(2): 75–83.
- 22 HUANG L S, ZHAO J L, ZHANG D Y, et al. Identifying and mapping stripe rust in winter wheat using multi-temporal airborne hyperspectral images[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, 14(5): 697–704.
- 23 郑志雄, 齐龙, 马旭, 等. 基于高光谱成像技术的水稻叶瘟病害程度分级方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 138–144.
ZHENG Zhixiong, QI Long, MA Xu, et al. Grading method of rice leaf blast using hyperspectral imaging technology [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 138–144. (in Chinese)
- 24 LEE W S, EHSANI R, ALBRIGO L G. Citrus greening disease (Huanglongbing) detection using aerial hyperspectral imaging [C]//The Proceedings of the 9th International Conference on Precision Agriculture, 2008.
- 25 李京, 陈云浩, 蒋金豹, 等. 用高光谱微分指数识别冬小麦条锈病害研究[J]. *科技导报*, 2007, 25(6): 23–26.
LI Jing, CHEN Yunhao, JIANG Jinbao, et al. Using hyperspectral derivative index to identify winter wheat stripe rust disease [J]. *Science and Technology Review*, 2007, 25(6): 23–26. (in Chinese)
- 26 田有文, 程怡, 王小奇, 等. 基于高光谱成像的苹果虫害检测特征向量的选取[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 132–139.
TIAN Youwen, CHENG Yi, WANG Xiaoqi, et al. Feature vectors determination for pest detection on apples based on hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(12): 132–139. (in Chinese)
- 27 杜奇, 向健勇, 袁胜春. 一种改进的最大类间方差法[J]. *红外技术*, 2003, 25(5): 33–36.
DU Qi, XIANG Jianyong, YUAN Shengchun. An improved method of maximum classes square error[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(5): 33–36. (in Chinese)
- 28 商鸿生, 任文礼, 王素梅. 小麦条锈病严重度分级标准图的探讨[J]. *植物保护*, 1990, 1(1): 31.
- 29 王利民, 刘佳, 杨福刚, 等. 基于 GF-1/WFV 数据的冬小麦条锈病遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 153–160.
WANG Limin, LIU Jia, YANG Fugang, et al. Winter wheat stripe rust remote sensing monitoring based on GF-1/WFV data [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(20): 153–160. (in Chinese)