

朱景福,李 雪. 玉米叶片病害彩色图像识别的降维和聚类方法[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):350-354.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.103

玉米叶片病害彩色图像识别的降维和聚类方法

朱景福^{1,2}, 李 雪¹

(1. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院,黑龙江大庆 163319;2. 黑龙江八一农垦大学农业工程博士后流动站,黑龙江大庆 163319)

摘要:应用流形学习算法研究玉米叶片病害图像的识别。首先分别利用 PCA、LLE、LE 算法对玉米病害灰度图像和彩色图像进行降维,以得到高维空间中的低维特征,然后采用 K-means 算法进行聚类分析。结果表明:LLE 算法作为玉米病害灰度图像识别的特征提取算法,识别率为 76.5%;对玉米病害彩色图像进行识别,识别率达到 99.5%以上。研究最终提出 1 种在 RGB 彩色空间用流形学习算法进行玉米叶片病害彩色图像识别的方法。

关键词:降维;聚类;玉米叶片病害;识别

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)07-0350-04

农作物病害是影响粮食生产安全的主要因素之一,准确识别出病害是病害防治的前提。应用计算机图像处理技术实现玉米病害的识别,可以提高病害识别的准确性、精度、效率,同时降低劳动强度^[1]。曹丽英等将图像处理技术与 BP 神经网络算法相结合应用于玉米病害的识别和诊断^[2]。Montalvo 等利用双阈值法设计了 1 个在玉米田地里自动识别植物的专家系统^[3]。张善文等利用局部判别映射(local discriminant projects, LDP)算法将高维空间的一维向量映射到低维子空间,实现对玉米病害叶片图像的识别^[4]。目前图像识别主要的研究方法分为 2 大类:一类是直接提取叶片图像的颜色、形状或纹理等特征,实现分类识别;另一类是利用流形学习算法等对叶片图像进行维数约简,实现分类识别。这些方法基本都能达到较好的识别率。但是,这些图像识别方法大多基于灰度图像或将彩色图像变换到 HSI 等彩色空间进行识别,由于灰度变换会丢掉大量的颜色信息,而且由 RGB 彩色空间转换到其他彩色空间时会使变换后的分量值不再均匀,RGB 分量值的细微变化可能导致其他彩色空间分量值的重大变化,所以这些方法仍存在一些问题。为了克服这些问题,本研究提出 1 种在 RGB 彩色空间将流形学习算法直接用于玉米叶片病害彩色图像维数约简的方法,解决 RGB 彩色空间三分量间相关性的问题,并与灰度图像的识别结果进行对比分析,以进一步提高叶片病害识别的精度。

1 算法介绍

玉米叶片病害彩色图像包括纹理、颜色和形状等特征,基于叶片图像的作物病害识别方法一直是主要的研究方向^[5]。其中,对叶片图像进行维数约简和特征提取是最重要的环节。但是,彩色图像显示和存储一般都是在 RGB 色彩空间表示,

R、G、B 3 个分量之间常常有很高的相关性,直接利用这些分量不能得到所需的效果^[6]。因此,大多数特征提取方法都是基于灰度图像或是变换到其他彩色空间进行处理。流形学习算法是一类非常有效的降维方法,本研究以期克服彩色图像 3 个分量间相关性的缺陷,利用流形学习算法分别对玉米叶片灰度图像和彩色图像进行降维。

流形学习算法是近年来发展较为迅速、有效的降维算法,已经成功应用于人脸识别和医学数据处理等方面。Aljabar 等基于流形学习算法,提出 1 种利用体形和外貌来分析新生儿大脑发育情况的方法^[7]。Hadid 等基于流形学习算法,设计出从视频序列中识别出人脸并分类的系统^[8]。阎庆等针对局部线性嵌入(locally linear embedding, LLE)算法不适用于分类问题的特点,提出 1 种基于 Fisher 变换的改进 LLE 算法,应用于植物叶片图像识别^[9]。Czaja 等提出 1 种新的流形学习算法来分析生物医学数据和新的多光谱视网膜图像^[10]。Chahooki 等利用流形学习算法提出 1 种对二值图像进行目标识别和图形索引的方法,以提高识别率^[11]。

常见的流形学习算法可分为线性、非线性两大类。主成分分析(principal component analysis, PCA)算法是最常用的 1 种线性降维算法。PCA 算法是用线性变换的方法找到 1 个新的低维投影空间来减少信息的冗余。非线性降维算法中比较有代表性的有 LLE 算法和拉普拉斯特征映射(Laplacian eigenmap, LE)算法。LLE 是 1 种利用流形的局部线性将高维空间流形展开到低维空间的算法^[12]。LLE 认为数据是局部线性的,任何 1 点可由其近邻点的线性组合来表示^[13]。LE 采用图片的拉普拉斯算子描述流形的局部特征,求解能够保持数据之间远近关系的低维嵌入^[14]。本研究主要采用 PCA、LLE、LE 算法这 3 种算法来对玉米叶片病害图像进行特征提取,以期实现对玉米病害的识别。

1.1 流形学习算法

定义 1(同胚):1 个连续函数的逆还是连续函数则称为同胚。

定义 2(流形):当 M 满足以下条件时称为 n 维流形。

(1) M 为 Hausdorff 空间。即对于空间 M 中任意 2 个点 $X、Y$,存在 $U、V$ 为点 $X、Y$ 的邻域,且满足 $U \cap V = \Phi$ 。

收稿日期:2015-05-25

基金项目:黑龙江省自然科学基金面上项目(编号:F201428);黑龙江省教育厅面上项目(编号:12541596);黑龙江八一农垦大学校级博士启动基金(编号:XDB2009-17)。

作者简介:朱景福(1970—),男,黑龙江克山人,博士,教授,硕士生导师,主要从事计算机应用研究。E-mail:jingfuz@163.com。

(2) 对于 M 中任意 1 点 P , 都有 1 个开邻域 $U \subset M$, 使 U 和 n 维欧式空间 R^n 中的开子集同胚。

定义 3(坐标图册): 1 个 d 维流形 M 是 1 个与空间 R^d 局部同胚的集合, 即对 1 个 $x \in M$, 都存在 1 个开邻域 U_x , 以及 1 个同胚映射 $f: U_x \rightarrow R^d$ 。则映射 f 称为坐标图册。

定义 4(流形学习): 1 个高维数据集 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in R^v$, 假设它在由坐标图 $h: M \rightarrow R^d$ 所确定的 d 维流形 M 上, 流形学习就是寻找 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \in R^d$, 使 $y_i = h(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

1.2 PCA 算法

PCA 算法是在假设样本数据之间关系是线性的前提下运用的。它的主要目标是通过线性变换寻找 1 组最优的单位正交向量基, 并用它们的线性组合来重构原样本, 以使重建后的样本和原样本的误差最小^[15]。PCA 算法的基本步骤如下。

(1) 对输入矩阵 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n \in R^n\}$ 进行中心化, 即计算 $\bar{X} = X \left(I = \frac{1}{n} ee^T \right)$ 。

(2) 对 $\bar{X}\bar{X}^T$ 进行特征值分解, 即求解 $\bar{X}\bar{X}^T = U\Lambda U^T$ 。其中 U 是正交矩阵, Λ 是对角矩阵且满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ (λ 为特征值)。

(3) 计算 $Y = U_d^T \bar{X}$, 其中 U_d 是由 U 的前 d 列组成的矩阵。

(4) 返回 Y 。

1.3 LLE 算法

LLE 算法认为数据流形是局部线性的, 算法强调在数据集的结构不满足全局线性结构时, 观测空间与内在低维空间之间在局部意义下的序可以用线性空间来近似^[16]。LLE 算法是基于局部保序的思想。LLE 算法的基本步骤如下。

(1) 将数据集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n \in R^n\}$ 中每个点 x_i 的 k 个近邻点 x_j ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k$) 构成点 x_i 的邻域: $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$ 。

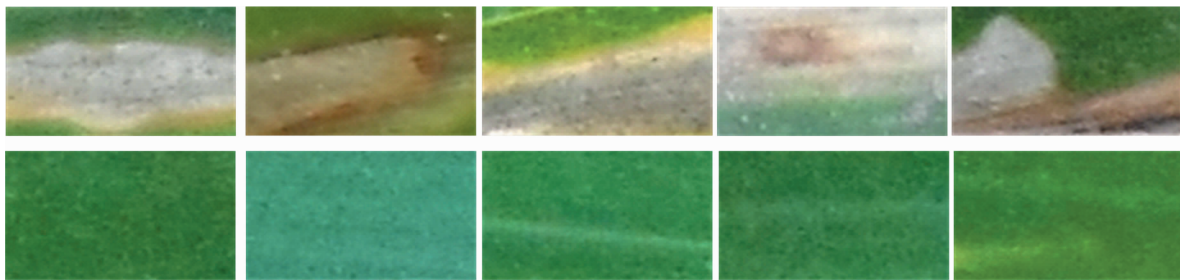


图1 预处理后的病害图像(上)和无病害图像(下)

采集图片的器材是 SONY DSC - W350D 数码相机。在 Windows XP 环境下, 用 CPU 为 E4600、主频为 2.4 G、内存 2 GB 的计算机对玉米图像进行处理, 处理的程序用 Matlab 7.1 语言编写。

3 玉米病害图像的特征提取

目前以高斯模型算法为代表的图像处理技术, 只是提取玉米病斑图像的颜色特征, 根据得到的单一颜色特征与特征模板进行匹配, 确定病斑的类型, 从而完成对玉米病斑的识别^[18]。但是, 不同病害图像的颜色、纹理和形状特征各不相同, 单纯采用某一种特征进行病害识别, 会丢失信息, 很难提

(2) 针对每个数据点 x_i , 计算重建系数: $W_i = \frac{\sum_k C_{jk}^{-1}}{\sum_l m C_{lm}^{-1}}$,

使 $|x_i = \sum_j W_{ij} X_{ij}|$ 最小, 并且 $\sum_j W_{ij} = 1$ 。

(3) 求解 $(I - W)^T(I - W)$ 的非零特征值和特征向量, 第 2 至 $(d + 1)$ 个最小特征值所对应的特征向量按列排列所构成的矩阵则为输出矩阵 Y 。

(4) 返回 Y 。

1.4 LE 算法

LE 算法的基本思想: 在高维空间中距离很近的点投影到低维空间中的像也应该离得很近, 保持高维空间与变换后的低维空间的拓扑关系不变性^[17]。LE 算法的基本步骤如下。

(1) 将数据集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n \in R^n\}$ 中每个点 x_i 的 k 个近邻点 x_j ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k$) 构成点 x_i 的邻域: $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$ 。

(2) 为各条边赋权值。若任意点 x_i 和 x_j 之间有边相连, 则其权值为: $W_{ij} = \exp(-|x_i - x_j|^2/t)$ 或 $W_{ij} = 1$; 否则 $W_{ij} = 0$ 。其中 t 为参数。

(3) 计算拉普拉斯算子 $L = D - W$ 的特征值、特征向量, 其中: D 为对角矩阵, 且 $D_{ij} = \sum_j w_{ji}$ 。第 2 至 $(d + 1)$ 个最小特征值所对应的特征向量按列排列构成的矩阵则为输出矩阵 Y 。

(4) 返回 Y 。

2 玉米叶片病害图像处理

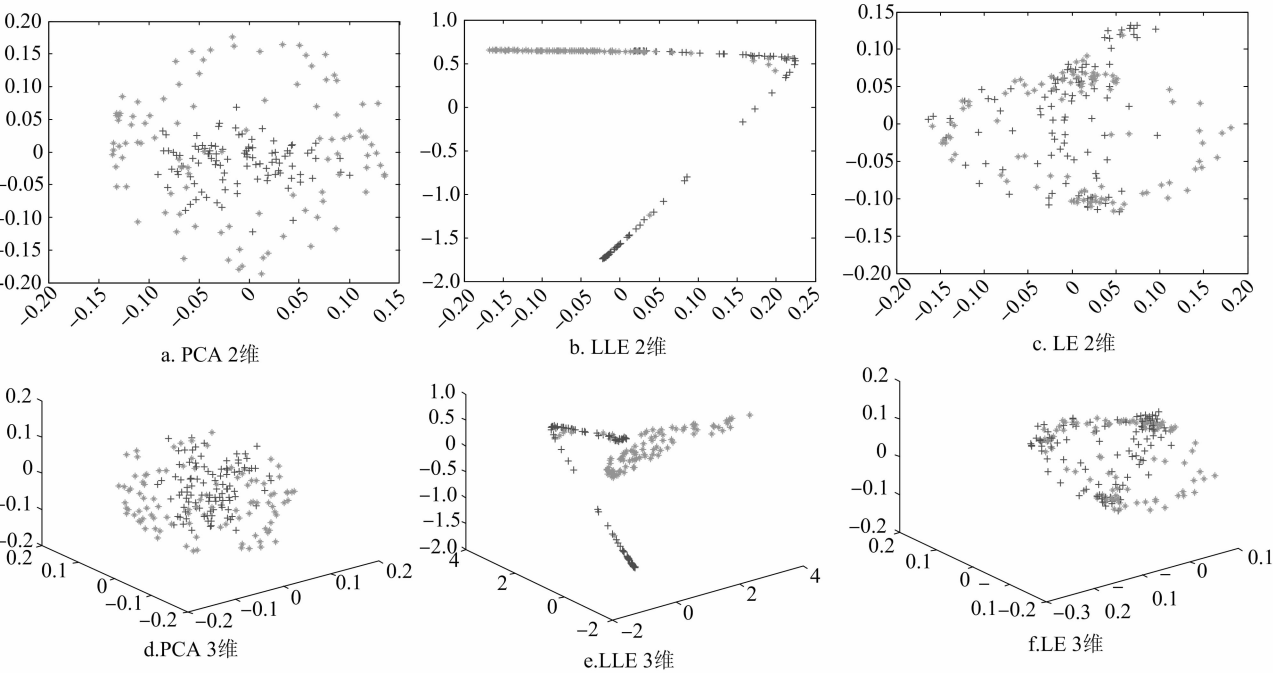
本试验采用从黑龙江八一农垦大学试验田中实地采集到的玉米叶片病害和无病害的真色彩图像, 用 Photoshop 软件把病害图像分割成只含有叶片背景、病斑的图像, 图像大小为 131×86 像素, 将无病害图像分割成只含有绿色叶片的图像, 图像大小也为 131×86 像素, 详见图 1。选取 100 幅病害图像和 100 幅无病害图像进行试验。

高识别率^[19]。本研究主要采用 PCA、LLE、LE 算法这 3 种算法分别对玉米叶片病害灰度图像和彩色图像进行特征提取, 再运用 K-means 算法^[20]进行聚类, 实现对玉米病害的识别, 从而综合考虑病斑的不同特征, 提高识别率。

3.1 灰度图像特征提取的聚类试验

将处理后的 100 幅病害图像、100 幅无病害图像运用 rgb2gray 函数转换成灰度图, 再用 PCA、LLE、LE 算法对图片进行降维来提取特征, 分别降到 2、3、4、 \dots 、50 维并保存(降到几维即保留几个特征)。其中降为 2、3 维后的效果见图 2, 图中黑点表示无病害图像、灰点表示病害图像。

将图 2 中的 6 幅图进行对比可以看出: 2、3 维的 LLE 算



黑点 (+) 表示无病害图像；灰点 (*) 表示病害图像。坐标轴的每 1 维代表 1 个特征。下同

图2 叶片病害灰度图像集降维效果

法的降维结果要优于 PCA、LE 算法,较好地分开了红点、绿点,交集部分较少。

为了进一步研究哪种降维算法更适用于玉米叶片病斑图像的识别,降到几维(保留几个特征)效果最好,本研究采用

K - means 算法对降维后的数据进行聚类(聚成 2 类)分析,得到正确识别率(简称正识率)见表 1。试验表明:误识率 = 1 - 正识率,漏识率 = 0。

表 1 叶片病害灰度图像集算法的正识率

算法	不同维度的正识率(%)											
	2 维	3 维	4 维	5 维	6 维	7 维	8 维	9 维	10 维	20 维	30 维	50 维
PCA	50.5	53.0	52.0	51.0	51.0	50.5	53.0	53.0	51.0	51.5	52.0	52.0
LLE	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5	76.5
LE	54.5	55.5	54.5	54.0	54.5	55.5	55.5	56.0	53.0	54.0	53.0	56.0

从表 1 中 3 种降维算法的正识率可以清晰地看出,LLE 算法降维结果的聚类正识率要远远高于 PCA、LE 算法,并且可以稳定在 76.5%。因此,对于灰度图像,选取 LLE 算法作为玉米病害图像识别的特征提取算法是可行的。

3.2 彩色图像特征提取的聚类试验

(1)方法 1。流形学习算法可以直接应用于图像的每个颜色分量上,以分别提取特征,再进行聚类分析。试验采用 PCA、LLE、LE 算法对每个颜色分量进行降维,依次降到 2、3、4、…、50 维;运用 K - means 算法对降维后的数据进行聚类

(聚成 2 类)并标记。对聚类结果进行分析,对于每幅图像,当 R、G、B 3 个分量中有 2 个及 2 个以上分量被标记为有病,则判定该幅图像为病害图像;然后,再将判定结果与原图像进行对比,验证其是否被正确识别,得到的正识率见表 2。

从表 2 中的正识率可以看出,LLE 算法尽管在降为 9 维及以后,B 颜色分量上聚类试验出错,得不到正识率,但是在 2 至 8 维之间其降维结果的聚类正识率要远远高于 PCA、LE 算法,并且稳定在 77.0% ~ 77.5%。但是,此方法与灰度图像试验方法相比并没有提高识别率。

表 2 叶片病害彩色图像集方法 1 的正识率

算法	不同维度的正识率(%)											
	2 维	3 维	4 维	5 维	6 维	7 维	8 维	9 维	10 维	20 维	30 维	50 维
PCA	56.0	54.0	46.5	50.0	56.0	50.0	51.5	52.5	53.5	52.0	52.0	55.0
LLE	77.5	77.5	77.0	77.0	77.0	77.5	77.5	—	—	—	—	—
LE	53.0	58.0	55.5	54.0	51.0	54.5	49.0	54.5	53.5	54.0	51.0	56.0

注:“—”表示因聚类试验出错,未得到正识率。表 3 同。

(2)方法 2。运用流形学习算法将图像中的每 1 点由 3 维彩色空间映射到 1 维灰度空间,然后再进行特征提取,这样既可以去除 3 个分量之间的相关性,又可以很好地保持彩色图像丰富的特征信息^[21]。1 幅彩色图像是 1 个 131 × 86 × 3

的矩阵,试验依次提取每个像素点的 3 个分量使其转化为 33 798 × 1 的矩阵再进行堆叠,然后采用 PCA、LLE、LE 算法、K - means 算法进行降维和聚类分析,得到降为 2、3 维后的效果见图 3,正识率见表 3。

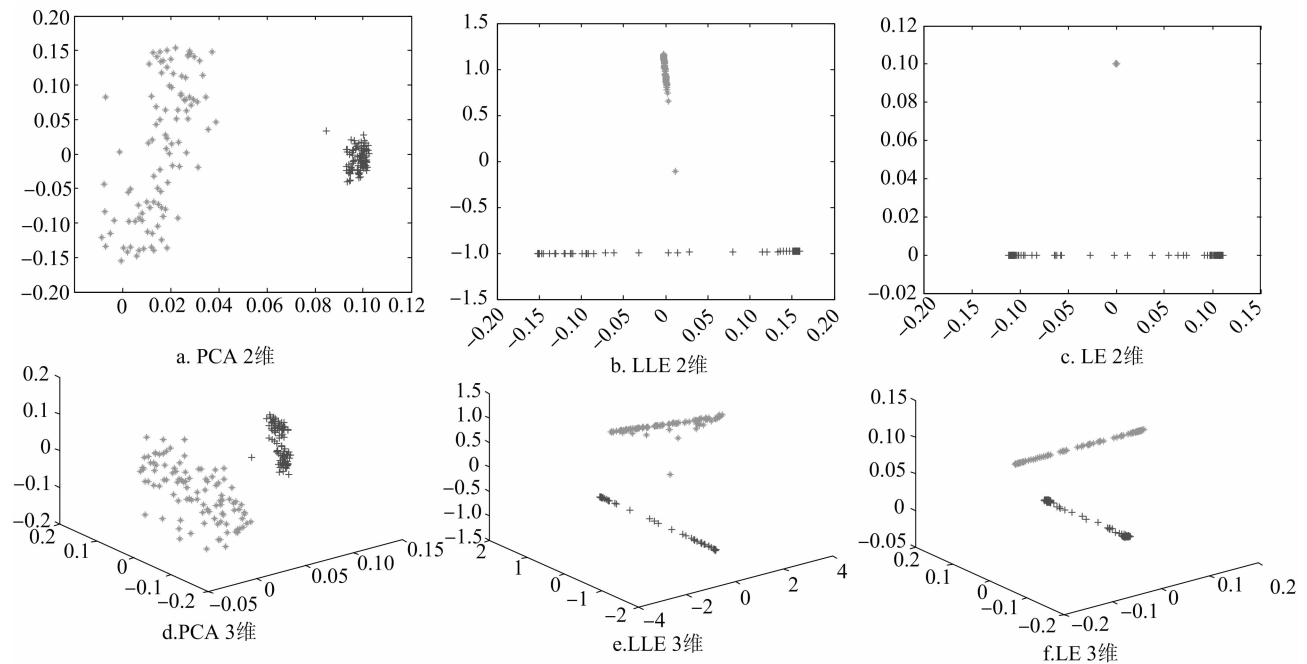


图3 叶片病害彩色图像集降维效果

从图 3 可以看出,3 种算法都良好地区分开了黑点、灰点,与图 2 相比均有所改善,识别出了病害图像、无病害图像。

从表 3 中的正识率可以清晰地看出,尽管 LLE 算法在降为 20 维及以后,聚类试验出错,得不到正识率,但整体来看,3

种算法降维结果的聚类正识率都非常好,尤其是 PCA、LE 算法可以 100% 识别出病害图像、无病害图像。该方法的识别率明显高于灰度图像的试验方法,因此将这种方法作为玉米病害彩色图像的识别方法是可行的。

表 3 叶片病害彩色图像集方法 2 的正识率

算法	不同维度的正识率(%)											
	2 维	3 维	4 维	5 维	6 维	7 维	8 维	9 维	10 维	20 维	30 维	50 维
PCA	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
LLE	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	—	—	—
LE	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

4 结论

本研究针对玉米叶片的病斑及其相关特征可以直接反映病害的种类及程度的特点,通过采用 PCA、LLE、LE 算法 3 种降维算法分别对玉米叶片病害的灰度图像、彩色图像进行降维,并对降维结果进行聚类分析,由于灰度图像只保留了病斑的部分颜色特征,而彩色图像则完全保留了病斑的全部特征,因此针对彩色图像的识别率远远高于针对灰度图像的识别率。通过试验表明,选取 LLE 算法作为玉米病害灰度图像识别的特征提取算法,正确识别率为 76.5%;对于玉米病害彩色图像,将 3 维矩阵转化为 1 维矩阵再进行处理的方法,PCA、LLE、LE 算法均有较高的正确识别率,识别率达到 99.5% 以上。

参考文献:

[1]温长吉,王生生,于合龙,等. 基于改进蜂群算法优化神经网络的玉米病害图像分割[J]. 农业工程学报,2013,29(13):142-149.

[2]曹丽英,张晓贤,伞晓辉,等. 基于图像处理技术和 BP 神经网络算法的玉米病害诊断方法的研究[J]. 计算机科学,2012,39(10):300-302.

[3]Montalvo M,Guerrero J M,Romeo J,et al. Automatic expert system

for weeds/crops identification in images from maize fields[J]. Expert Systems With Applications,2013,40(1):75-82.

[4]张善文,张传雷. 基于局部判别映射算法的玉米病害识别方法[J]. 农业工程学报,2014,30(11):167-172.

[5]朱景福,李 雪. 聚类算法在玉米叶片病斑降维识别中的应用[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):405-406.

[6]牛海晶,尚可可,刘 迎,等. 皮肤红斑彩色图像分割的降维方法研究[J]. 计算机工程与应用,2006,42(13):219-221.

[7]Aljabar P,Wolz R,Srinivasan L,et al. A combined manifold learning analysis of shape and appearance to characterize neonatal brain development[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging,2011,30(12):2072-2086.

[8]Hadid A,Pietikainen M. Demographic classification from face videos using manifold learning[J]. Neurocomputing,2013,100(2):197-205.

[9]阎 庆,梁 栋,张晶晶. 基于 Fisher 变换的植物叶片图像识别监督 LLE 算法[J]. 农业机械学报,2012,43(9):179-183.

[10]Czaja W,Ehler M. Schroedinger eigenmaps for the analysis of biomedical data[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2013,35(5):1274-1280.

[11]Chahooki M A,Charkari N M. Learning the shape manifold to improve object recognition[J]. Machine Vision and Applications,2013,24(1):33-46.

侯明涛,张红梅,王万章,等.玉米籽粒物理机械特性及机械化收获适应性[J].江苏农业科学,2016,44(7):354-357.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.104

玉米籽粒物理机械特性及机械化收获适应性

侯明涛^{1,2},张红梅^{1,2},王万章^{1,2},杨立权^{1,2}

(1.河南农业大学机电工程学院,河南郑州 450002, 2.河南粮食作物协同创新中心,河南郑州 450002)

摘要:针对黄淮海地区玉米收获时籽粒含水率高导致籽粒破碎较高的问题,探索河南省玉米籽粒物理机械特性及玉米籽粒机械化收获的适应性,在河南省某地开展试点研究,测试了机械化籽粒收获的11个试验品种的含水率、破碎率、含杂率、三维尺寸和体积等,并计算出等效压力,进行了籽粒正反面受力差异分析,并且分析不同玉米品种之间破碎率、体积和含水率三因素与等效压力之间的关系。结果表明:籽粒正反面的受力大小基本一致;不同玉米品种之间,玉米籽粒体积越大,等效压力越小;并提出适合玉米籽粒机械化收获的玉米籽粒特性和收获时期。

关键词:玉米籽粒;物理机械特性;等效压力;适应性;机械化收获

中图分类号: S513.04;S233.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)07-0354-04

玉米是世界上最重要的粮食作物之一,同时也是我国的三大粮食作物之一^[1]。2001年全世界的玉米播种面积为13 965.9万hm²,总产量达到5.99亿t,超过了水稻和小麦,成为世界第一大谷类作物^[2]。黄淮海地区是我国夏播玉米的主要种植区,种植面积占39%左右^[3],目前的玉米收获主要是以人工或机械摘穗的分段收获为主,需要投入大量劳动力,提高了生产成本。影响玉米籽粒机械化收获实现的关键技术因素在于玉米籽粒的破碎,破碎掉的玉米很容易发霉变质、感染虫害并产生毒素。2014年,我国玉米产量为2.1567亿t^[4],增加1%的破碎就代表很大的经济损失,所以研究玉米籽粒破碎的关键影响因素具有重要的现实意义。2012年河南省开始出现个别品种玉米籽粒机械化收获尝试。2013年政府予以高度关注,并进行一定范围的对比试验。2014年河南省成立玉米全程机械化生产模式攻关专家组分别在3个地级市进行试点,开展试验对比。

玉米品质鉴定对玉米产业的发展非常重要,玉米籽粒物

理机械特性的研究不仅对机械损伤的分析有着重要意义,而且可以作为玉米品质鉴定的指标之一^[5]。适宜的收获期是提高玉米品质和产量的保障,黄淮海地区一般收获偏早,导致玉米的质量和产量下降^[6]。近几年关于玉米最佳收获期、玉米籽粒物理机械特性和脱粒性能的相关研究文献较多,李心平等利用LDS微机控制电子拉压试验机对种子玉米籽粒果柄断裂机理进行了试验研究^[7];杨玉芬等利用微机控制的电子拉压试验机对玉米籽粒进行了静压破损试验,结果表明含水率、压缩位置对玉米籽粒静压破损特性有明显的影响^[8];张永丽等利用微机控制电子拉压试验机对玉米籽粒剪切破碎进行了试验研究,得出含水率不同时,剪切破碎载荷也不同^[9];李心平等也分别利用跌落式冲击试验台和LDS微机控制电子拉压试验机对不同品种的玉米籽粒进行了冲击破碎试验和静态压缩试验,结果表明籽粒破碎的最大冲击力随含水率的增加而降低,同一含水率下,腹面承受的冲击力最大^[10,11]。高连兴等对不同含水率下的玉米种子籽粒破损强度、果柄强度和脱粒作用力等进行试验,结果表明随着含水率的下降,玉米种子籽粒破损强度显著提高^[12]。张烨等通过万能试验机压缩试验测得不同含水率下3个品种玉米籽粒的最大破碎力和对应应变值,结果表明随着含水率的增加,最大破碎力和应变值呈线性关系上升^[13]。陈孝海等采用ANSYS有限元分析软件对玉米单个籽粒、多个籽粒相互支撑时按照顶面、腹面和侧面受载等情况进行分析,结果表明腹面加载优于

收稿日期:2015-10-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:31501213);河南省玉米产业技术体系建设专项(编号:S2010-02-G07)。

作者简介:侯明涛(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事现代农业装备设计研究。E-mail:houtingtaomr@163.com。

通信作者:王万章,博士,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究。E-mail:wangwz@126.com。

[12]陈宏达,普哈啤,王 斌,等.基于图像欧氏距离的高光谱图像流形降维算法[J].红外与毫米波学报,2013,32(5):450-455.

[13]Roweis S T, Saul L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. Science, 2000, 290(550): 2323-2326.

[14]侯臣平,吴 翊,易东云.新的流形学习方法统一框架及改进的拉普拉斯特征映射方法[J].计算机研究与发展,2009,46(4):676-682.

[15]普哈啤,王 斌,张立明.基于流形学习的新高光谱图像降维算法[J].红外与激光工程,2014,43(1):232-237.

[16]许慢锋.无监督流行学习算法的若干探讨[D].杭州:浙江大

学,2010.

[17]黄启宏,刘 钊.流形学习中非线性维数约简方法概述[J].计算机应用研究,2007,24(11):19-25.

[18]何 倩,郑向阳.模糊识别技术在玉米病斑识别中的应用研究[J].计算机仿真,2012,29(5):251-253,286.

[19]王守志,何东健,李 文,等.基于核K-均值聚类算法的植物叶部病害识别[J].农业机械学报,2009,40(3):152-155.

[20]贲志伟,赵勋杰.基于改进的K均值聚类算法提取彩色图像有意义区域[J].计算机应用与软件,2010,27(9):11-13.

[21]肖 锋,郭丽娜.基于降维技术及空间矩的彩色图像亚像素边缘检测[J].计算机应用与软件,2014,31(6):204-207.