

基于图谱特征的番茄种子活力检测与分级

彭彦昆¹ 赵芳¹ 白京¹ 郑晓春¹ 王文秀¹ 孙群²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100094)

摘要:为解决现存分级过程中损伤种子问题,替代仅根据种子表面特征评价的粗筛查方法,本研究基于高光谱的图谱融合技术,提出了一种番茄种子图像采集并辨识种子特征进而将种子分级的算法。试验随机选取170粒番茄种子作为样品,校正集与验证集比例约为3:1。通过标准发芽试验得到种子活力结果,基于连续投影算法(Successive projections algorithm, SPA)求得反映番茄种子活力的特征波长为:535、577、595、654、684、713、744、768、809、840 nm。对特征波长下的光谱图像进行解析,通过双边滤波法、大津法、形态学变换算法提取了种子边缘轮廓,计算求出每粒种子的面积、圆形成度以及图像灰度平均值。基于统计学分析,利用校正集128粒种子的特征值及其标准发芽试验结果求出分级阈值,其中有活力为合格,无活力为不合格。然后,利用验证集42粒种子的特征值对阈值进行验证,结果显示,在713 nm波长下的图像特征对活力结果判断分级的正确率最高,校正集和验证集的正确率分别为93.75%和90.48%。

关键词:番茄种子;活力;高光谱;图像处理

中图分类号: S123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0327-07

Detection and Classification of Tomato Seed Vitality Based on Image Processing

PENG Yankun¹ ZHAO Fang¹ BAI Jing¹ ZHENG Xiaochun¹ WANG Wenxiu¹ SUN Qun²

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

(2. College of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: Precision seeding put forward higher requirements for the seed quality. However, existing grading methods of seeds are destructive and unsuitable for sorting seeds based on internal characteristics, and a classification method based on the seed vitality is required. An algorithm of image acquisition and characteristics identification and classification of tomato seeds was proposed based on hyperspectral technique and image processing technology. Totally 170 grains of tomato seeds were randomly selected as the research object, and the ratio of calibration set and validation set was about 3:1. Images of tomato seeds were collected by hyperspectral acquisition system which was composed of high performance lighting CCD camera, line scanning spectrometer, oriel instruments, image acquisition card and computer. The resolution of the camera and range of spectrometer were respectively 1 376 pixels × 1 040 pixels and 400 ~ 1 100 nm. An average spectrum of interest region of each seed could be obtained. Then the results of seed vigor were obtained from the standard germination test. And the characteristic wavelengths of tomato seed vigor were acquired by successive projections algorithm (SPA), including 535 nm, 577 nm, 595 nm, 654 nm, 684 nm, 713 nm, 744 nm, 768 nm, 809 nm and 840 nm. The images under above characteristic wavelengths were preprocessed by bilateral filtering, Ostu and morphological transformation to gain the seed eigenvalues including area, circularity and average gray. The classification thresholds were calculated according to the eigenvalues and vitality results of the calibration set based on statistical regularity, and prediction analysis of validation set was carried out. The results showed that both of average of area and gray had significant difference between viable seeds and non-viable seeds, while the difference of circularity between viable seeds and non-viable seeds was insignificant. Classification accuracy of calibration and validation sets was above 85% in eight characteristics wavelengths. And

收稿日期: 2017-09-21 修回日期: 2017-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701205)和北京市科技计划项目(Z151100001015004)

作者简介: 彭彦昆(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事农畜产品无损检测技术与装置研究, E-mail: ypeng@cau.edu.cn

713 nm gave the best result, the accuracy of the calibration and validation set were 93.75% and 90.48%, respectively. The results provided a new method for rapid nondestructive grading of tomato seeds, and lay the foundation for the development of tomato seed grading equipment based on seed vitality.

Key words: tomato seeds; vitality; hyperspectral; image processing

0 引言

番茄种植的精确定量播种,对其种子的质量要求较高^[1]。以往评价种子的指标主要有发芽率、净度、纯度与质量等。近年来,种子活力得到了农业生产工作者的重视,种子活力是种子发芽率、出苗率、幼苗生长的潜势、植株抗逆能力和生产潜力的总和,是全面衡量种子质量状况的一个指标^[2]。目前检测种子活力的方法主要有发芽试验、生物化学法、组织化学法、软X射线法以及荧光分析法^[3]。很多研究表明^[4-6],发芽指数和活力指数等幼苗生长指标比较可信,尤其是活力指数,能够反映发芽速率、发芽总数、植物幼苗的生长势,可以在多方面研究上应用。但这些方法所需测定时间较长,且都需要破坏种子结构品质,不能满足农业生产对种子活力检测快速、准确、无损的要求。

近年来,应用图像处理技术对种子品质进行分级受到了很多研究者的关注,但主要集中在利用图像中的物理特征值直接对种子外部品质进行评定分级^[7-11]。陈兵旗等^[8]利用稻种图像的面积和宽长比作为特征参数,将等价矩形长、宽的最小差值作为标准,识别发霉和破损种子,正确率为76.8%~100%。彭江南等^[9]利用图像中棉籽的 R (red)、 G (green)、 B (blue)、 H (hue)、 S (saturation)、 B (brightness)和灰度以及物理指标对种子进行快速分选,棉籽发芽率可以由89%提高至95%。利用近红外光谱技术对种子内部品质检测的研究也逐渐增多^[12-13]。耿立格等^[13]采集不同年限的大豆种子的近红外光谱信息,建立了其生活力的无损测定模型,校正集的判定系数为0.937,验证集判定系数为0.902。光谱成像技术能同时获取研究对象的空间信息和光谱信息,开始逐步应用于种子的品种分类及品质分析^[14-15],许思等^[15]利用高光谱图像技术对不同老化程度的水稻种子进行判别分析,采用连续投影算法挑选的特征波长建立的定性分析模型,其预测集的判别正确率能达到98.75%。

上述研究为利用图像处理技术和光谱检测技术检测种子质量提供了理论基础和方法依据,但研究对象主要集中在大豆、水稻等大颗粒种子的活力研究上。目前对番茄种子活力检测及分级的研究鲜有报道。本研究意在获取番茄种子的图像信息和光学信息,综合分析番茄种子不同波长下的图像,确定与

种子活力相关的最佳波长并提取番茄种子图像及其特征值,解析其特征值与种子活力的关系,求取与种子活力相关的种子图像特征值的最佳阈值,进一步对种子进行分级验证。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与设备

本试验共随机选用170粒番茄种子,每粒种子单独为一份样本,品种为“奇奇”樱桃番茄,购自北京市博收种子有限公司。将样本按照一定比例随机划分为校正集和验证集,校正集为128粒样本,验证集为42粒样本。所选种子粒型有扁椭圆形、圆形、椭圆形等。将样品放置在 $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温环境下,并保持环境湿度恒定,用于后续图像采集以及种子活力的测定。

本研究使用实验室自主研发的高光谱试验系统^[16]采集样本的高光谱反射图像。系统主要由高性能背照明CCD相机、行扫描光谱摄制仪、卤钨灯直流光源(Oriel instruments)、图像采集卡和控制计算机组成。相机分辨率为 $1\,376$ 像素 \times $1\,040$ 像素,光谱仪的光谱范围是 $400 \sim 1\,100$ nm。为排除外界光的干扰,试验时将系统放置在体积为 $450\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 750\text{ mm}$ 铝合金支架组成的暗箱中。

1.2 试验方法

将所有样本标号并均匀平铺在黑色背景板上,利用高光谱图像采集系统获取番茄种子的高光谱图像,该图像包含了种子表面的图像信息和光谱反射信息^[17]。由于不确定样本种子的活力,故按照标准发芽试验对采集过高光谱图像之后的种子进行发芽试验,测定种子活力。根据最终试验观察结果,将可以发芽的种子归为合格种子,将不能发芽的种子归为不合格种子。

本研究是基于图像处理技术提取种子区域的大小、形状、颜色特征值,与标准方法得到的样本活力分级相结合,利用校正集寻求相关阈值,然后利用验证集对该阈值进行校对判断分级。具体试验方法思路如图1所示。

1.3 数据处理

1.3.1 特征波长图像选取

为了提取与种子活力相关的图像信息,需在获取的大量光谱信息中提取特征波长。光谱信息之间存在大量的冗余和共线性信息特征,对光谱有效信

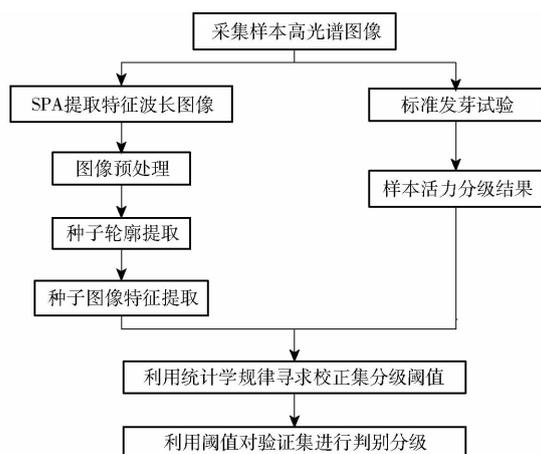


图 1 分级方法的建立过程

Fig. 1 Establishment process of classification method

息的提取产生了较大的干扰,且大量光谱数据造成模型复杂、计算量大的问题^[18]。连续投影算法(Successive projections algorithm, SPA)是一种特征变量前向选择算法,在光谱特征波长中取得了广泛的应用^[19]。本文采用 SPA 提取特征波长,从光谱变量矩阵中找出冗余信息最少的变量,从而提取该特征波长下的图像信息。

1.3.2 图像预处理及种子轮廓提取

利用 ENVI 软件提取上述特征波长下的图像信息图。为了提取番茄种子的图像特征值,本文首先对原始图像进行双边滤波,二值化和形态学变换等预处理。双边滤波法作为一种非线性的滤波方式,可以达到保留边缘信息去除噪声的目的^[20-21]。本文采用大津法对平滑后的图像进行二值化处理。大津法能根据图像灰度分布情况,自动计算出分割阈值,提高算法的适应性^[22]。由于采集到的图像中均有多个种子,且种子的灰度各不相同,故为保证每个种子图像经过二值化处理后得到较为准确结果,采用掩膜方法,定位种子位置,并通过计算得到窗口大小后通过窗口移动的方式,单独对种子进行大津法处理图像。形态学变换通过对图像进行腐蚀、膨胀处理,可以有效去除细小杂质轮廓,提取到种子图像轮廓^[23]。本文利用轮廓算法^[24]对经过预处理后的图像中每粒种子的大小、形状特征值进行提取。

1.3.3 特征参数计算

对采集到的图像进行特征提取,主要提取种子的面积、圆弧度、灰度,提取之前,需要对每幅图像中每粒种子进行区域标记,将各个种子区分开来,从而提取各个连接成分的特征参数^[25]。提取面积特征值时,统计标记轮廓内像素点的个数作为每粒种子面积特征值。番茄种子区域的圆弧度刻画的是其与圆形的偏离程度,通过面积和周长确定,其中种子周长为提取的种子轮廓长度。计算公式为

$$C = 4\pi A/p^2 \quad (1)$$

式中 C ——种子圆弧度

A ——种子区域面积,像素

p ——种子区域周长,像素

提取灰度平均值时,为去除边缘灰度不准确的影响,选择每粒种子特征区域为种子内部最大内切圆的区域,提取其灰度平均值。

1.3.4 阈值的确定

以种子发芽试验的活力分级结果为基础,具体寻求阈值步骤如下:

(1)按照发芽试验种子将合格种子与不合格种子各个特征值区分开,并分别求取平均值。

(2)单独取阈值,对灰度来说,选取不合格种子灰度平均值为阈值,计算校正集判别正确率,依次提高或减小阈值,依据统计学规律,得到阈值在某一个值情况下,合格种子与不合格种子判别正确率均最高。面积阈值依此求取。

(3)番茄种子圆弧度基本都接近于 1,不合格种子与合格种子未有明显特征,故选择圆弧度最小值作为阈值,以期去除其他杂质影响。

(4)将 3 个特征参数结合,验证集中种子圆弧度小于阈值的为不合格种子,其他 2 个特征值均需小于其阈值才被判断为不合格种子。

综合阈值分级算法如图 2 所示。

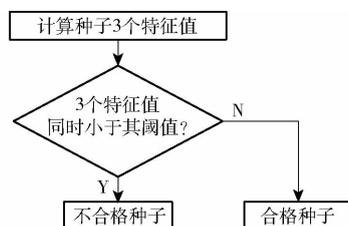


图 2 综合阈值分级算法

Fig. 2 Classification algorithm of integrated thresholds

2 结果与讨论

2.1 活力测定结果

根据种子本身发芽结果特性,得到样本中是否有活力种子的分布结果。其中校正集 128 粒种子中有 97 粒为有活力种子,所占比例为 75.78%;而验证集 42 粒种子中有 31 粒为有活力种子,所占比例为 73.81%。由此得出两类集合中不同级别的种子分布比较均匀。

2.2 特征波长下的图像

图 3 为番茄种子的反射光谱图。由图中光谱曲线可知,在采集光谱波段范围内,种子的光谱曲线趋势相同,但不同种子同一波长下反射强度不同,不能确定代表种子活力信息的波长,因此需要确定与种

子活力相关的特征波长。

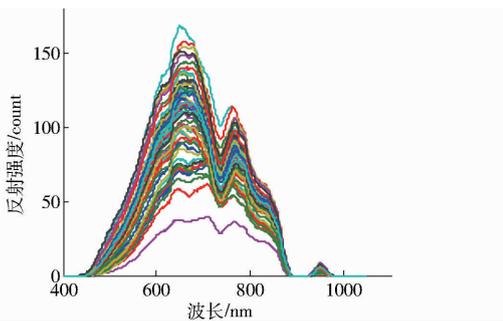


图3 光谱反射强度曲线

Fig. 3 Reflectance intensity curves of spectra

本研究中将合格种子理化值赋值为2,不合格种子理化值赋值为1。由于波段较多,因此进行SPA计算时,以建模集样本的光谱数据和类别赋值为输入,将光谱数据分成几个波段分别计算。变量数为运用SPA算法选择的与预测结果相关性最大的特征波长选择数量。图4为其中某一个波段计算结果。图4a为该波段下选择的特征波长具体位置,即在该波段范围内选择的特征波长为4个,分别为577、595、654、684 nm。图4b为变量个数与均方根

误差的关系,可以看到变量数在1~4范围内,均方根误差随着变量数的增加其下降趋势很大,表明种子反射光谱变量应该至少选择4个以免产生过拟合问题;且第4个变量之后保持平缓,均方根误差为0.1641,故在这个波段选择4个特征波长。SPA算法优先选择了10个波长,分别为:535、577、595、654、684、713、744、768、809、840 nm。

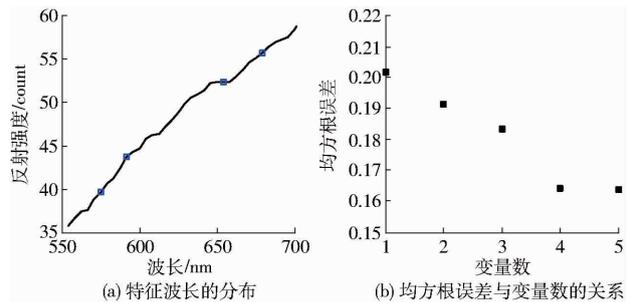


图4 555 ~ 700 nm 下的波长选择

Fig. 4 Wavelength selection under 555 ~ 700 nm

利用ENVI软件提取特征波长下的图像信息,如图5所示为部分试验种子分别在上述10个特征波长下的原始图像。

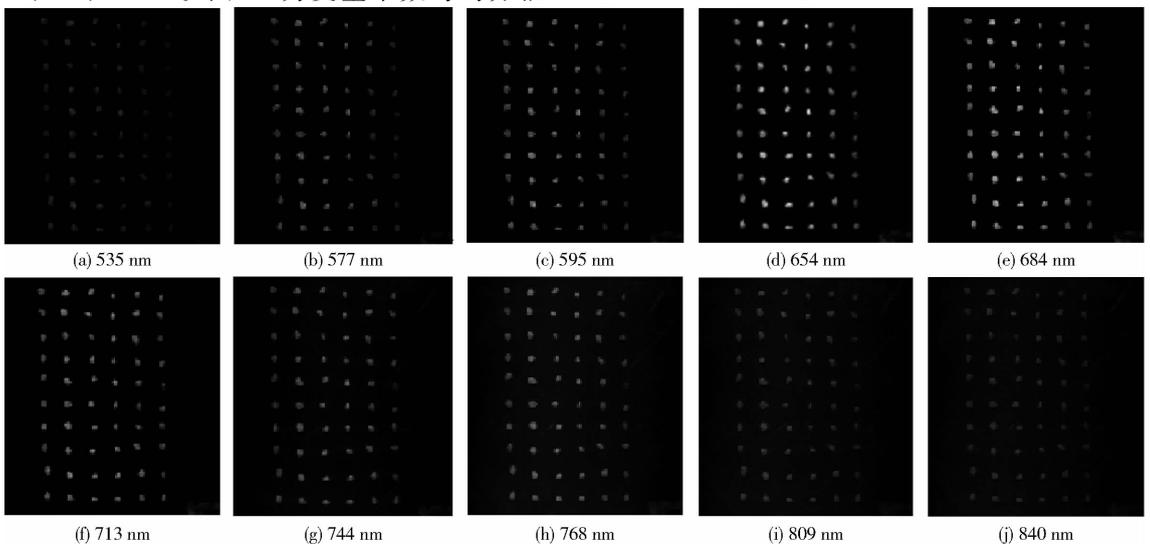


图5 各个特征波长下的原始图像

Fig. 5 Original images under different characteristic wavelengths

2.3 图像预处理及轮廓提取结果

由图5可以看出不同特征波长下原始图像并不相同,但不能确定最优波长下的图像。采用1.3.2节所述的预处理方法对原始图像进行去噪处理,其结果如图6所示。图6a为采集得到的712.58 nm特征波长下的60粒种子的原始图像,为去除其中的噪声,利用双边滤波法对图像进行平滑预处理,其效果如图6b所示。采用大津法对平滑后的图像中的单粒种子进行二值化处理,其效果如图6c所示。由图6c可以看出,经过预处理后的图像,可以较优质地保存图像的边缘信息,并且能够去除其中一些噪

声,但是种子区域外一些其他杂质轮廓并未去除,种子区域内的孔洞也没有填充。所以再采用形态学变换中的开运算对种子轮廓内部填充^[26],去除孔洞,图6d为形态学变换后种子区域提取效果图。

由提取轮廓图像(图6d)可以看出经过预处理后的图像,若杂质面积像素数与种子面积像素数相近,则易被误判做种子区域,造成种子轮廓提取不准确。且种子区域提取过程中若种子颜色过暗,面积过小,也会造成提取该种子轮廓不准确。在获取的图像中提取得到每个种子区域(图6d)后,利用轮廓算法^[24]准确、快速提取其轮廓线,如图7所示。

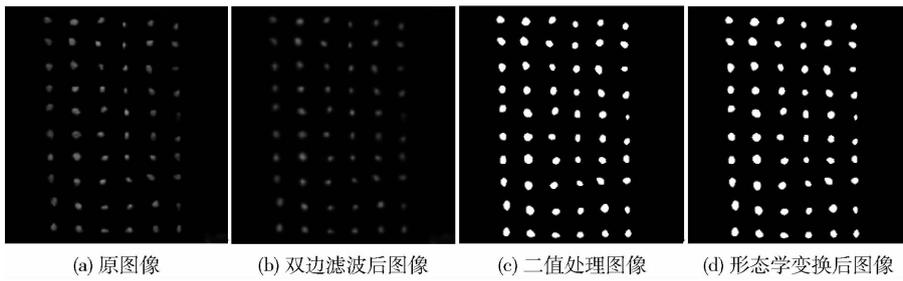


图 6 图像预处理结果

Fig. 6 Results of image processing

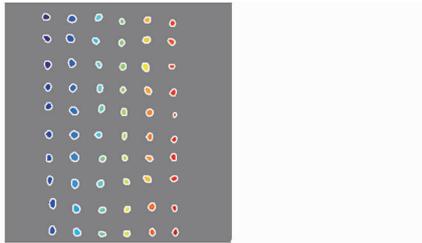


图 7 种子区域轮廓图像

Fig. 7 Contour plot of seed section

2.4 特征参数计算结果

依据前面所述算法处理各个特征波长下图像的过程中,各个图像灰度不相同,运用大津法二值化处理图像时,得到每粒种子的二值化图像不尽相同。随之进行的形态学变换处理不能弥补二值化图像区别,故不同特征波长下图像特征值提取也不相同。对校正集中 128 粒种子,按照标准发芽试验得到的结果,对不同特征波长下的图像,分别提取合格种子和不合格种子的各个特征值的平均值,其结果如表 1 所示。由表 1 可知,对各个波长下图像提取种子特征值,2 类种子的面积平均值和灰度平均值均有较大差别,在阈值分类时灰度平均值所占比例较大,而 2 类种子的圆形度平均值差别不大,故圆形度参数在阈值分类时所占比例较小。

表 1 不同特征波长下的图像特征值提取结果

Tab. 1 Results of image features extraction under different characteristic wavelengths

特征 波长/ nm	面积平均值/像素		圆形度平均值		灰度平均值	
	合格 种子	不合格 种子	合格 种子	不合格 种子	合格 种子	不合格 种子
535	53.83	43.45	0.98	0.97	70.93	56.64
577	61.12	48.08	0.98	0.98	76.02	59.97
595	63.14	46.77	0.99	0.98	90.36	70.53
654	63.48	48.97	0.99	0.98	100.43	87.44
684	63.97	49.14	0.99	0.99	115.85	93.00
713	64.56	53.08	0.99	0.99	99.33	87.52
744	64.79	54.11	0.99	0.98	84.20	74.80
768	63.58	52.43	0.99	0.99	80.52	68.97
809	63.76	51.86	0.98	0.98	79.23	67.63
840	62.48	51.13	0.99	0.98	77.17	66.65

2.5 特征值阈值选取

按照表 1 中 2 类种子的图像特征值提取结果平均值,基于统计学规律,按照阈值寻求方法,遵循验证集中 2 类种子判断正确率最高的原则,分别确定各个特征值的阈值,其中圆形度阈值选择时,因种子圆形度基本接近,故选择样本中种子圆形度最小值,以去除其他不规则杂质影响。以 713 nm 特征波长下选取最佳灰度阈值为例,其变化引起样本校正集、验证集识别正确率的规律如图 8 所示,最终依据阈值选取方法选取的不同特征波长下各个特征值阈值结果如表 2 所示。

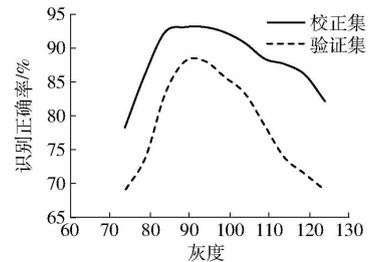


图 8 713 nm 特征值下灰度的最佳阈值选择

Fig. 8 Selection of accurate grey value thresholds in 713 nm wavelength

表 2 不同特征波长下的图像阈值提取结果

Tab. 2 Results of image threshold value extraction under different characteristic wavelengths

特征波长/nm	面积阈值/像素	圆形度阈值	灰度阈值
535	44.50	0.96	60.00
577	48.40	0.96	61.00
595	46.50	0.96	72.00
654	48.60	0.96	87.00
684	49.60	0.96	93.00
713	51.60	0.96	92.00
744	53.60	0.96	76.00
768	52.60	0.96	72.00
809	51.50	0.96	68.00
840	51.50	0.96	67.00

2.6 阈值判断分级结果

利用本研究算法计算的 3 个特征值的阈值将种子进行综合判别分类,分级完成后,不同活力种子的图像主要区别为:合格种子图像灰度平均值要高于

不合格种子,亮度较高,且合格种子面积要大于不合格种子。将本研究算法计算的不同特征波长下图像的分级结果与标准发芽试验检测番茄种子活力分级结果相对比,获得检测分级正确率如表 3 所示。其中,在特征波长 713 nm 下,校正集和验证集检测分级正确率综合最高,分别为 93.75% 和 90.48%。

表 3 不同波长下阈值分级统计结果

Tab. 3 Classification results of threshold under different wavelengths

特征 波长/ nm	校正集			验证集		
	实际 个数	分类错 误个数	识别正 确率/%	实际 个数	分类错 误个数	识别正 确率/%
535	128	57	55.47	42	20	52.38
577	128	27	78.91	42	13	69.05
595	128	12	90.63	42	6	85.71
654	128	12	90.63	42	6	85.71
684	128	9	92.97	42	4	90.48
713	128	8	93.75	42	4	90.48
744	128	9	92.19	42	5	88.10
768	128	12	90.63	42	5	88.10
809	128	14	89.06	42	6	85.71
840	128	14	89.06	42	6	85.71

2.7 讨论

灰度是用黑色调表示颜色的浓烈程度,也可称之为颜色的饱和度。种子中蛋白质、水分、酶等物质的含量与种子能否发芽具有较大关系,种子中该物质的含量影响特定波长下光的吸收,从而影响反射的灰度。采用高光谱技术检测种子质量的研究中主要是利用了高光谱图像中的光谱信息^[14-15],而本研

究主要利用了特征波长下图像信息,确定各个特征波长下图像特征值的阈值,在 713 nm 特征波长下,其分类正确率能够达到 90.48%,且有利于简易、低成本的基于图谱特征的种子活力分级设备的研发。本研究的对象为小颗粒的番茄种子,以上结果表明可以利用高光谱成像技术快速准确地鉴别番茄种子的活力,为小颗粒种子活力的无损快速识别提供一种方法。为了满足实际生产需要,未来还需对在线状态下的种子图像的动态采集和活力判别进行分析研究与验证。

3 结束语

利用高光谱技术对单粒番茄种子活力的检测及分级进行了研究。采用 SPA 特征波长提取方法提取得到与种子活力相关的 10 个特征波长,并利用该波长下的图像特征值对种子活力进行预判,有 8 个特征波长下判断的正确率达到 85% 以上,表明用 SPA 的方法提取番茄种子活力特征波长是可行的。基于统计学选取特征波长图像特征值的阈值,试验结果表明,当 713 nm 特征波长下的图像中番茄种子的面积平均值、圆形度平均值及灰度平均值的阈值分别选取为 51.6 像素、0.96 和 92 时,活力分级结果最高,其校正集和验证集的分类正确率分别为 93.75% 和 90.48%,表明利用该波长下图像的特征值可以有效地区分有活力种子与无活力种子。本研究结果为基于图谱特征的番茄种子活力快速无损分级设备的开发奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 李会合. 蔬菜品质的研究进展[J]. 北方园艺, 2006(4): 55-56.
LI Huihe. Research progress of tomato quality [J]. Northern Horticulture, 2006(4): 55-56. (in Chinese)
- 刘毓侠, 王铁固. 种子活力研究进展[J]. 玉米科学, 2012, 20(4): 90-94.
LIU Yuxia, WANG Tiegou. Research progress of seed vigor [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(4): 90-94. (in Chinese)
- HAMPTON J G, TeKRONY D M. Handbook of vigour test methods [M]. Zurich. Switzerland: International Seed Testing Association, 1995: 70-80.
- 陈蕾太, 孙爱清, 杨敏, 等. 基于小麦种子发芽逆境抗逆指数的种子活力评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2968-2974.
CHEN Leitai, SUN Aiqing, YANG Min, et al. Seed vigor evaluation based on adversity resistance index of wheat seed germination under stress conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2968-2974. (in Chinese)
- 郑文寅, 姚大年, 张文明. 大豆种子活力评定指标的研究[J]. 种子, 2007, 26(12): 70-73.
ZHENG Wenyin, YAO Dalian, ZHANG Wenming. Study on seed vigor indexes of soybean [J]. Seed, 2007, 26(12): 70-73. (in Chinese)
- 智慧, 陈洪斌, 凌莉. 加速老化法测定谷子种子活力的研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(3): 68-73.
ZHI Hui, CHEN Hongbin, LING Li. Studies on accelerated aging seed vigor test for foxtail millet [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(3): 68-73. (in Chinese)
- ZHANG Wenchang, MEI Jiangping, DING Yabin. Design and development of a high speed sorting system based on machine vision guiding [J]. Physics Procedia, 2012, 335(3): 1955-1965.
- 陈兵旗, 孙旭东, 韩旭, 等. 基于机器视觉的水稻种子精选技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 168-173.
CHEN Bingqi, SUN Xudong, HAN Xu, et al. Rice seeds selection based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese

- Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 168 – 173. (in Chinese)
- 9 彭江南,谢宗铭,杨丽明,等. 基于 Seed Identification 软件的棉籽机器视觉快速精选[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 147 – 152. PENG Jiangnan, XIE Zongming, YANG Liming, et al. Quickly selection for cotton seed based on Seed Identification software [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 147 – 152. (in Chinese)
- 10 DELL' A A. Red-green-blue (RGB) color density as a non-destructive marker in sorting deteriorated lentil seeds [J]. Seed Science and Technology, 2006, 34(3): 609 – 619.
- 11 PEIRIS K H S, PUMOHREY M O, DONG Y H, et al. Near-infrared spectroscopic method for identification of fusarium head blight damage and prediction of deoxynivalenol in single wheat kernels [J]. Cereal Chemistry, 2010, 87(6): 511 – 517.
- 12 吕程序,姜训鹏,张银桥,等. 基于变量选择的小麦粗蛋白含量近红外光谱检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 340 – 346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s052&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.052. LÜ Chengxu, JIANG Xunpeng, ZHANG Yinqiao, et al. Variable selection based near infrared spectroscopic quantitative analysis on wheat crude protein content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 340 – 346. (in Chinese)
- 13 耿立格,宋春风,王丽娜,等. 近红外光谱无损测定大豆种子生活力方法研究[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(6): 1208 – 1212. GENG Lige, SONG Chunfeng, WANG Lina, et al. Non-destructive determination of soybean seed viability by near-Infrared spectroscopy [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(6): 1208 – 1212. (in Chinese)
- 14 孙俊,路心资,张晓东,等. 基于高光谱图像的红豆品种 GA – PNN 神经网络鉴别[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 215 – 221. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160628&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.028. SUN Jun, LU Xinzi, ZHANG Xiaodong, et al. Identification of red bean variety with proahilistic GA – PNN based on hyperspectral imaging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 215 – 221. (in Chinese)
- 15 许思,赵光武,邓飞,等. 基于高光谱的水稻种子活力无损分级检测[J]. 种子, 2016, 35(4): 34 – 40. XU Si, ZHAO Guangwu, DENG Fei, et al. Research on detection technology of rice seed vigour based on hyperspectral [J]. Seed, 2016, 35(4): 34 – 40. (in Chinese)
- 16 PENG Y K, WU J H. Hyperspectral scattering profiles for prediction of beef tenderness [C]. ASABE Annual International Meeting, 2008: 080004.
- 17 吴建虎,彭彦昆,高晓东,等. 基于 VIS/NIR 高光谱散射特征预测牛肉的嫩度[J]. 食品安全质量检测学报, 2009, 1(1): 20 – 26. WU Jianhu, PENG Yankun, GAO Xiaodong, et al. Prediction of beef tenderness using VIS/NIR hyperspectral scattering characteristics [J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2009, 1(1): 20 – 26. (in Chinese)
- 18 刘天玲,苏琪雅,孙群,等. 基于 NIR 分析和模式识别技术的玉米种子识别系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 33 – 36. LIU Tianling, SU Qiya, SUN Qun, et al. Recognition of corn ceeds based on pattern recognition and near infrared spectroscopy technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 32(6): 33 – 36. (in Chinese)
- 19 洪添胜,乔军,赵祚喜,等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151 – 155. HONG Tiansheng, QIAO Jun, ZHAO Zuoxi, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 151 – 155. (in Chinese)
- 20 姜泳水,唐金辉,陈学佺. 二值图像中物体几何主轴的提取方法[J]. 计算机工程, 2005, 31(18): 56 – 58. JIANG Yongshui, TANG Jinhui, CHEN Xuequan. Extracting method of geometrical principal axis for object from bi-tone image [J]. Computer Engineering, 2005, 31(18): 56 – 58. (in Chinese)
- 21 李俊峰. 双边滤波算法的快速实现及其在图像处理的应用[D]. 广州:南方医科大学, 2013. LI Junfeng. Fast implementation of bilateral filter with application in image processing [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2013. (in Chinese)
- 22 陈兵旗. 机器视觉技术及应用实例详解[M]. 北京:化学工业出版社, 2014: 16 – 17.
- 23 王耀革,王玉海,朱长青,等. 基于灰度形态学的高分辨率遥感影像预处理[J]. 测绘学院学报, 2004, 21(2): 108 – 110. WANG Yaoge, WANG Yuhai, ZHU Changqing, et al. The preprocessing of high-resolution remote sensing image on grey morphology [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2004, 21(2): 108 – 110. (in Chinese)
- 24 BRADSKI G, KAEHLER A. 学习 OpenCV(中文版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2009: 259 – 263.
- 25 陈兵旗,孙明. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 197 – 198.
- 26 李青,彭彦昆. 基于机器视觉的猪胴体背膘厚度在线检测技术[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 256 – 261. LI Qing, PENG Yankun. Pork backfat thickness on-line detection methods using machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 256 – 261. (in Chinese)