



刘燕德, 刘良峰, 李雄, 姚迟, 欧阳爱国. 基于高光谱成像结合波段比和改进分水岭分割算法的草莓早期损伤检测[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11): 50-62.
LIU Yande, LIU Liangfeng, LI Xiong, YAO Chi, OUYANG Aiguo. Detection of early damage on strawberries using hyperspectral reflectance imaging combined with band ratio and improved watershed segmentation algorithm[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11): 50-62.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.06

基于高光谱成像结合波段比和改进分水岭分割算法的草莓早期损伤检测

刘燕德 刘良峰 李雄 姚迟 欧阳爱国

(华东交通大学 智能机电装备创新研究院, 南昌 330013)

摘要 为解决成熟草莓在采摘运输过程中存在的早期损伤难以快速检测的问题, 保障草莓的商业价值和食品安全, 本研究提出一种基于高光谱成像技术的新方法, 结合波段比和改进的分水岭分割算法, 实现对草莓早期损伤的无损检测。在 Vis-NIR (480.19~1 015.63 nm)、Vis (480.19~780.0 nm) 和 NIR (780.0~1 015.63 nm) 3 个光谱范围内进行主成分聚类分析, 并通过主成分载荷图选定特征波长。此外生成对应的主成分图像和波段比图像, 并采用改进的分水岭分割算法进行草莓损伤区域的分割。结果表明: 1) 在 Vis-NIR 和 NIR 光谱范围内, 沿 PC1 的方向可以有效区分不同损伤部位的草莓。2) 在波段比图像效果比较中, $Q_{758.64/1015.63}$ 波段比图像在增强损伤对比度方面效果表现最佳, 因此被选为最适合后续分析的波段比。3) 改进的分水岭分割算法相较于传统的分水岭分割算法和改进的大津法, 对损伤区域的分割效果更好, 总体检测准确率达到 95.5%, 表明该方法在检测草莓早期损伤方面具有可靠性和有效性。综上, 通过高光谱成像技术与改进的分水岭分割算法结合对草莓的早期损伤进行快速无损检测具有一定可行性, 为草莓品质保障和食品安全提供了理论和技术支持。

关键词 高光谱成像; 损伤检测; 波段比; 改进的分水岭分割算法; 草莓

中图分类号 O657.3

文章编号 1007-4333(2024)11-0050-13

文献标志码 A

Detection of early damage on strawberries using hyperspectral reflectance imaging combined with band ratio and improved watershed segmentation algorithm

LIU Yande, LIU Liangfeng, LI Xiong, YAO Chi, OUYANG Aiguo

(School of Intelligent Electromechanical Equipment Innovation Research Institute, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract In order to solve the problem of early damage of ripe strawberries during picking and transport, which is difficult to detect quickly, and to safeguard the commercial value and food safety of strawberries, this study proposes a new method based on hyperspectral imaging technology, which combines the band ratio and the improved watershed segmentation algorithm, to realize non-destructive detection of early damage of strawberries. Principal component cluster analysis was conducted across three spectral ranges: Vis-NIR (480.19~1 015.63 nm), Vis (480.19~780.0 nm), and NIR (780.0~1 015.63 nm). Characteristic wavelengths were identified using principal component loading maps. Subsequently, corresponding principal component and band ratio images were generated. The segmentation of strawberry damage

收稿日期: 2024-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760344)

第一作者: 刘燕德(ORCID: 0000-0003-2391-8765), 教授, 主要从事无损智能检测与智能制造研究, E-mail: jxliuyd@163.com

regions was performed using an improved watershed segmentation algorithm. The results indicate that: 1) Strawberries with different damage areas can be effectively differentiated in the Vis-NIR and NIR spectral ranges, along the PC1 direction. 2) Among the band ratio images, the $Q_{758.64/1\ 015.63}$ band ratio image exhibits the best performance in enhancing damage contrast, making it the most suitable for subsequent analysis. 3) The improved watershed segmentation algorithm outperforms the traditional watershed and improved Otsu methods, achieving an overall detection accuracy of 95.5%, demonstrating its reliability and effectiveness in detecting early strawberry damage. In conclusion, the integration of hyperspectral imaging technology with the improved watershed segmentation algorithm is a viable approach for the rapid, nondestructive detection of early strawberry damage, offering theoretical and technical support for ensuring strawberry quality and food safety.

Keywords hyperspectral imaging; damage detection; band ratio; improved watershed segmentation algorithm; strawberry

我国草莓产业发展迅速,种植面积和产量持续扩大。草莓含有丰富的维生素C、维生素K、抗氧化物质以及膳食纤维,对人体免疫系统的增强和整体健康有着积极的影响^[1]。成熟草莓质地变得相对柔软,在采摘和运输过程中容易造成其表面损伤。这些损伤不仅影响草莓的美观,还可能导致细菌滋生,缩短其保鲜期,从而对水果产业造成不小的危害。成熟草莓表面的颜色饱和度高,早期损伤不易被肉眼察觉。传统的人工检测方法在效率和准确性方面都存在一定局限性^[2]。容易受主观判断和人为疲劳的影响,出现漏检和误检等问题,难以满足快速大规模生产的需求。因此,寻找一种能快速准确检测草莓早期损伤的方法至关重要。

目前,有许多先进的果蔬品质无损检测技术已经得到广泛应用^[3],例如:光谱分析技术^[4]、机器视觉技术^[5]、介电性质分析检测技术^[6]、声学特性检测技术^[7]、核磁共振检测技术^[8]、电子鼻技术^[9]等。相比之下,光谱分析主要反映内部成分,而机器视觉对轻微的颜色或形态变化反应不敏感,其他技术如声学和核磁共振则因反应速度慢或成本高而限制了其应用。高光谱成像技术集高光谱分辨率、高空间分辨率图像信息与局部析辨能力于一体^[10],在果蔬和食品质量评估中的应用展现显著的成果。王凡等^[11]利用这项技术检测苹果表面的机械损伤,通过筛选特征波段和构建光谱指数,结合无监督分类算法 ISODATA,突出损伤区域特征,实现 92.50% 的检测正确率。李斌等^[12]则提出一种结合高光谱成像与颜色特征的方法,制备并分析不同程度的碰伤样品,其中 LS-SVM 模型的准确率高达 100%。在肉类产品中,张珏等^[13]应用高光谱成

像技术结合机器学习算法对羊肉的新鲜度进行评估,通过精选关键光谱变量,构建多个预测模型,其中基于二进制粒子群优化算法的模型表现出最高的预测精度。张伏等^[14]聚焦于‘豫安三号’玉米种子,通过标准正态变换和多元散射校正预处理,以及特征波段提取算法 SPA 和 CARS,构建经遗传算法优化的支持向量机模型的准确率达到 100%。段洁利等^[15]利用高光谱成像技术和 BP 神经网络模型检测青香蕉的早期轻微碰撞损伤,达到 95.06% 的识别准确率,并能可视化损伤等级。此外,Liu 等^[16]通过最小噪声分数(MNF)变换和改进的图像分割算法能够准确区分和定位草莓的机械损伤和真菌感染缺陷区域。采用支持向量机(SVM)模型处理光谱数据达到 92.59% 的预测准确度。Fu 等^[17]使用荧光高光谱成像技术和机器学习方法成功检测梨的早期瘀伤,实现了 99.33% 的识别准确率。尽管高光谱成像技术已被广泛应用于食品和水果损伤检测并展现出显著成效,其复杂且耗时的图像采集与分析流程,对于深色类水果其碰伤后颜色变化不明显,增加高光谱成像在损伤识别上的难度,在区分健康与受损组织时的鲁棒性和准确性存在限制,仍然是该技术应用的主要挑战^[18]。分水岭分割算法是基于数学形态学和拓扑理论的图像分割技术,通过将图像中的每个像素的灰度值视为高程信息来定位分水岭和局部极小值,实现有效的图像分割。传统方法在处理边缘区域和精确定位分水岭线时面临挑战。因此,本研究引入双波段比值结合改进的分水岭分割算法,探讨检测草莓早期损伤的可行性,此技术能够快速识别草莓表面早期损伤,为草莓及易损水果的质量控制和食品安全管理提供理论技术支持。

1 材料与方法

1.1 草莓样品制备及损伤处理

本研究共从辽宁省丹东市购买460个试验样品,每个草莓果径大小均匀,质量在25~30 g左右。将直径为30 mm,质量为30 g小球,放置在距离草莓样品30 cm的位置释放,通过调整草莓的摆放角

度来改变损伤的位置^[19]。制造草莓样品损伤的装置和不同损伤部位的草莓如图1所示。草莓损伤后放置2 h,然后采集全部试验样品的高光谱图像。整个试验样品中,一共制备300个损伤样品,160个样品作为健康样品,并随机选取180个损伤样品和60个健康样品作为训练集,应用于草莓早期损伤的方法检测,其余样本作为测试集。

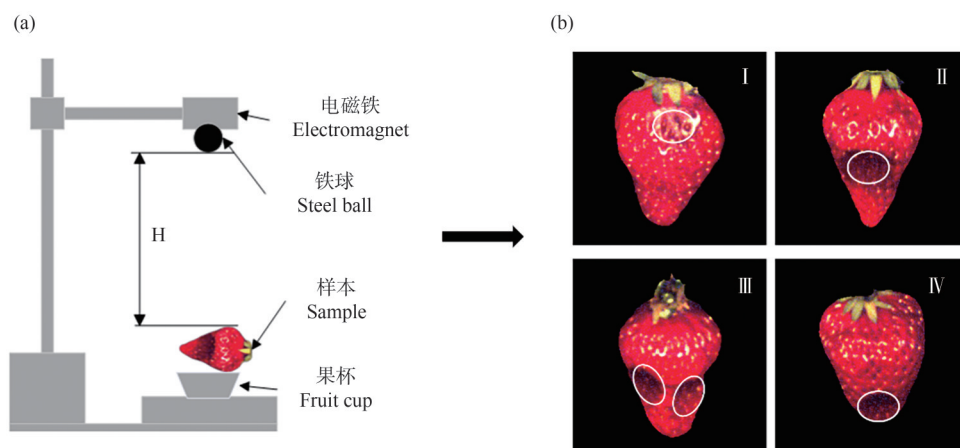


图1 损伤制造装置(a)和不同损伤部位的草莓(b)

Fig. 1 Damage fabrication device and strawberries in different damage areas

1.2 高光谱图像采集

本研究中的高光谱图像是由盖亚(GaiaSorter)高光谱分选仪采集,其结构如图2所示,该系统主要由计算机、成像光谱仪、4个20W卤素、位移平台、步进电机等^[20]。成像光谱仪由CCD摄像机和光谱仪组成。由于图像采集过程容易受到环境光的影响,为消除这种影响,整个成像系统被放置在封闭的空间中。在图像采集前,为防止试验中无关因素的干扰,高光谱系统需要预热0.5 h。设置参数:相机曝光时间为6 ms;光谱分辨率为3.5 nm;位移平台移动速度为2.5 cm/s。

操作步骤:1)将样品放置在位移平台上。2)打开位移平台并点击保存按钮,以收集高光谱数据。3)数据由计算机软件记录下来,最后形成包含图像信息和光谱信息的三维数据立方体。

1.3 图像黑白校准及提取

获取图像数据前,通过Spectral view软件调整系统成像参数,确保采集图像清晰不失真。成像光谱仪中的CCD相机工作时存在暗电流,图像采集在光强度的低波段时有较大的噪声,影响图像清晰度。对采集的图像数据进行黑白校正是处理高光

谱数据前的必要操作。操作步骤为:1)将CCD相机镜头对准白板,点击白板中采集选项采集白板图像 $R_{white}(\lambda)$ 。2)采集黑板图像 $R_{dark}(\lambda)$,由于采集白板图像是镜头已完成调焦,为避免焦距变化则需握住镜头,拧上镜头盖从而采集到黑板图像。校正公式如(1)式所示。

$$I_{xy}(\lambda) = \frac{R_{xy}(\lambda) - R_{dark}(\lambda)}{R_{white}(\lambda) - R_{dark}(\lambda)} \quad (1)$$

式中: $I_{xy}(\lambda)$ 为校正后的图像数据; $R_{xy}(\lambda)$ 为原始图像数据; $R_{white}(\lambda)$ 全白校准的图像数据; $R_{dark}(\lambda)$ 全黑校准的图像数据。

将校正后的高光谱图像导入至ENVI Classic 5.6软件中,以获取所需的草莓图谱相关信息。在ENVI软件中,将草莓受损区域作为感兴趣区域(ROI),以便针对该区域进行光谱数据提取。通过使用ENVI的光谱提取工具,可以从不同损伤部位的区域提取光谱数据,进而对提取的光谱数据进行进一步的分析和处理。

1.4 主成分分析

主成分分析(PCA)是一种广泛用于高光谱图像降维的统计方法^[21]。其基本原理是将高维数据

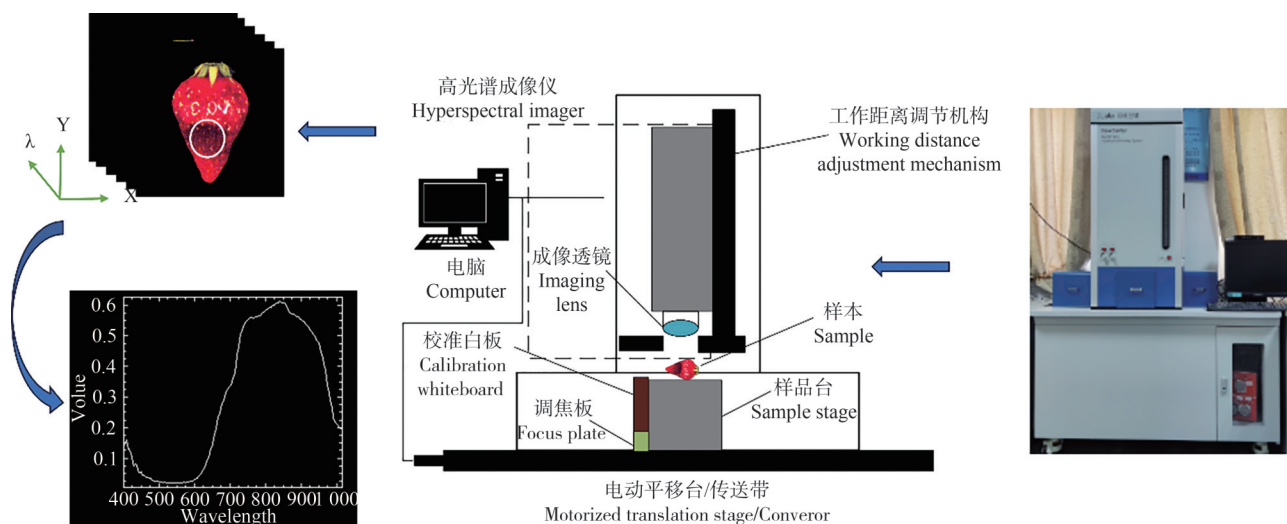


图 2 高光谱成像系统及草莓三维数据获取

Fig. 2 Hyperspectral imaging system and strawberry 3D data acquisition

集投影到低维空间,提取主要信息并压缩数据量。在本研究中,应用PCA方法可以降低高光谱图像数据的维数,减少计算复杂度。具体操作流程为:构建高光谱图像数据矩阵,计算协方差矩阵,求解特征值和特征向量,保留主要成分,实现从高维到低维的转换。PCA预处理有助于提高后续图像处理与特征提取的效率。

1.5 波段比图像

双波段比值方法是根据高光谱图像在2个特定波段的反射强度比值,生成比值图像^[22]。该方法可以增强图像对比度,使目标与背景区分更清晰。波段比图像是通过ENVI Classic 5.6软件生成,使用操作栏中Band Ratios处理工具,选择所需的2个波段执行波段比值计算,之后查看新生成的波段比图像并进一步分析和处理。本研究选择波长758.64和1015.63 nm对应的波段进行比值运算,生成比值图像。其中,758.64 nm波段的图像中草莓呈现白色光亮,可完整显示草莓形态。而1015.63 nm波段的图像中,草莓损伤区域的灰度值较高,损伤区域呈现更深的蓝色。计算两波段的比值,可有效突出和增强草莓损伤区域的对比度。双波段比值方法简化后续分割与识别的操作过程,并可实现损伤检测的快速在线处理。

1.6 改进的分水岭分割算法

本研究采用改进的分水岭算法^[23],引入梯度增强、形态学平滑、大津阈值化等预处理步骤,以及局部极大值标记和Canny边缘检测技术,以优化

边缘区域的分割效果。这些改进使得算法在清晰度和精确度方面表现更佳,同时在边缘提取上更为有效,为后续的图像分析和识别提供更可靠的基础。

2 结果与分析

2.1 草莓样品ROI光谱

图3(a)为训练集所有样本的ROI光谱,ROI为200~300像素不等的椭圆形区域。由图可知,草莓的光谱测量受到多种随机噪声和组织结构的影响,这些噪声使不同组织的光谱在整个范围内出现一定的重叠,为减少噪声和散射对光谱的影响,采用平滑滤波函数(SG)、标准正态变换(SNV)和多元散射校正(MSC)预处理方法对光谱数据进行处理,并比较预处理之后的效果^[24]。图3(b)为采用平滑滤波函数(SG)预处理后的光谱图,显然所有光谱均得到有效校正。草莓的健康组织和不同部位损伤组织的光谱峰值之间各有不同,其原因与草莓的整体形状和组织结构有关。草莓的健康组织ROI选取在茎部与赤道中心的位置区域,可避免草莓在平放时因强光照形成光斑对试验结果造成影响。草莓不同部位(如茎部、赤道中心和尾部)具有不同的形状、厚度和组织结构。这些微小的差异可以导致光在不同部位的传播路径发生变化,引发光学色散现象。使不同波长的光,在不同条件下传播时会以不同的方式产生散射或弯曲。当草莓的果肉细胞被破坏、细胞壁发生破裂时,会释放一

部分水分,而水分含量越多,释放的水分量也会随之增加。另外,水分含量越多,草莓的反射率的峰值通常会变小。这是因为水分的增加会导致光在水分和草莓表面之间的折射和反射发生变化,从而降低了光的反射率。为了实现更好的区分效果,分

别 Vis-NIR(480.19~1 015.63 nm)、Vis(480.19~780.0 nm)和 NIR(780.0~1 015.63 nm)这3个区域进行分析。最终根据不同光谱区域的主成分聚类区分效果,来决定最佳的光谱区域进行后续数据处理。

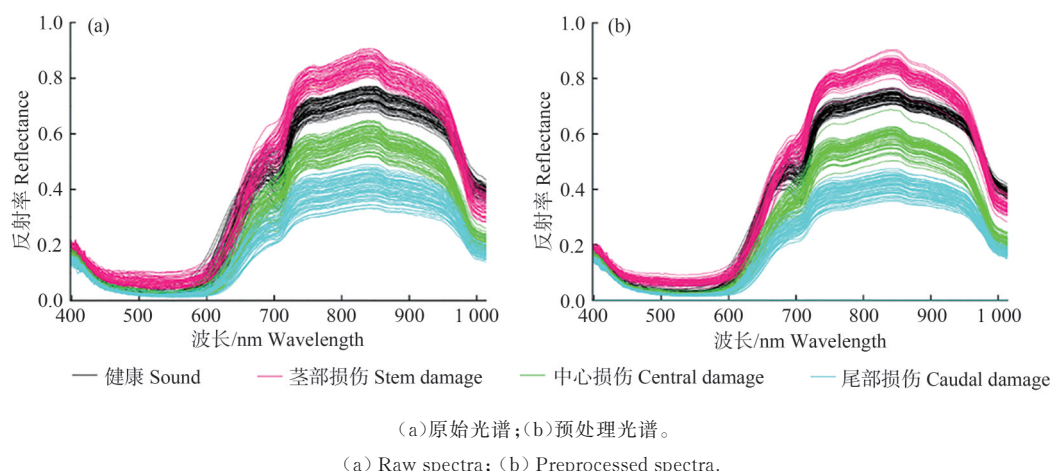


图3 草莓的健康区域和不同损伤区域的光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of sound and different damaged areas of strawberries

2.2 基于不同光谱区域的主成分聚类分析

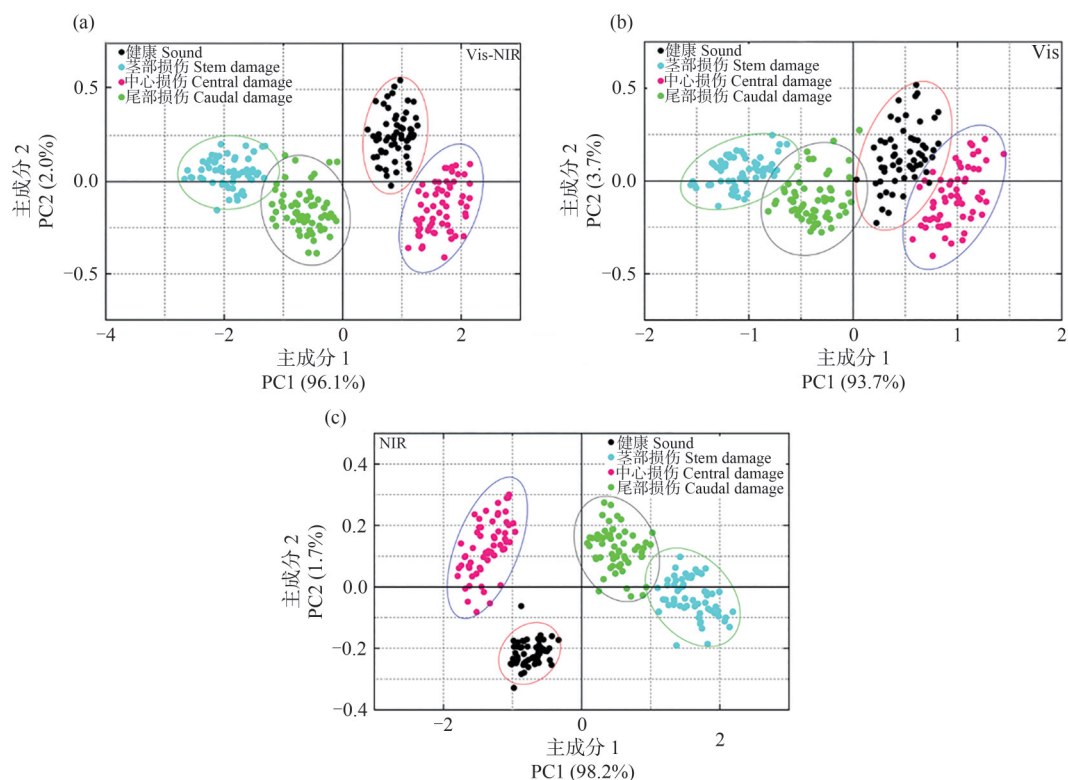
本研究在 Vis-NIR(480.19~1 015.63 nm)、Vis(480.19~780.0 nm)和 NIR(780.0~1 015.63 nm)3个波段范围内,对健康草莓和不同损伤部位草莓的主成分聚类效果进行了比较分析。图4结果显示,在 NIR波段的聚类效果最佳,PC1贡献率达98.2%,样品聚类效果明显。而 Vis-NIR波段的主成分聚类效果次之,PC1的贡献率达96.1%,四类草莓样品在散点图上呈现明显的聚类分布,可沿PC1进行有效划分。Vis波段的聚类效果较差,分类能力不足。由此可知,Vis-NIR和 NIR波段范围内的光谱信息更有利于草莓损伤类型的鉴别。为开发快速、高效的草莓损伤检测方法,本研究拟选择 Vis-NIR和 NIR特征波长范围对应的单波长图像进行分析,而不考虑全波段176幅和66幅的单波长图像,以提高分析效率。确定特征波长图像是建立快速检测系统和优化图像分割方法的关键。

2.3 基于载荷图选择特征波长

基于主成分分析得到的载荷图选择特征波长,是一种简便有效的方法。主成分分析得到的各个主成分的得分是原始变量的线性组合,其组合系数即为主成分对应的载荷值。因此,载荷值较大的波

段对该主成分的贡献较大。通常,在主成分载荷曲线图上,波峰和波谷处对应的波长点具有更明显的贡献度,可以视为该主成分的特征波长。图5为基于 Vis-NIR和 NIR下2个光谱区的主成分分析,选取两者在PC1载荷曲线上的特征波长,并得到 Vis-NIR的11个特征波长(497.25、504.08、510.92、517.78、528.06、541.81、691.44、758.64、837.25、844.45和1 015.63 nm)和 NIR的4个特征波长(783.55、837.25、844.45和1 015.63 nm)。

提取这12个波长对应的单波长图像,图6为进行伪彩色处理以辨析不同组织。结果发现,从837.25、844.45和1 015.63 nm的3幅图像结合可区分出健康和损伤组织。但由于受光照影响,不同组织区域存在灰度分布不均匀的问题,无法有效分割。综上,本研究采用基于主成分分析载荷曲线的特征波长选择方法共确定了12个特征波长。对应波长图像可初步观察不同组织区域,但直接应用存在问题^[25]。后续研究需进一步优化克服光照影响,提高单波长图像的组织分割效果。这验证了特征波长选择的可行性和必要性,也表明单波长图像分割需要进一步提高以实现准确的水果质量检测。

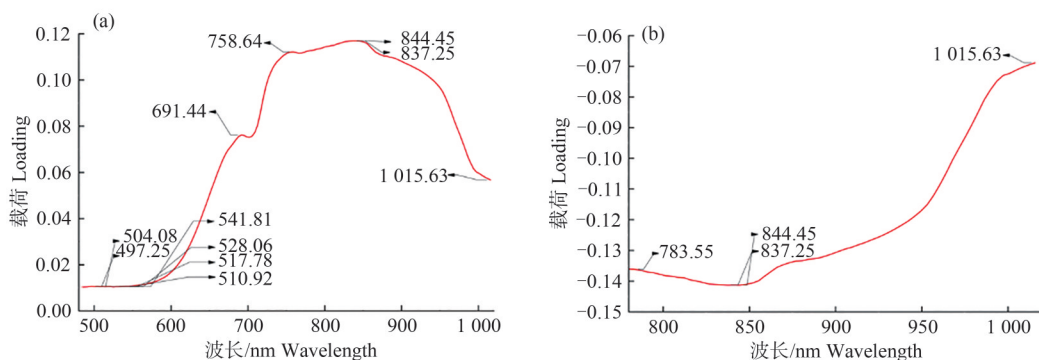


(a)可见光-近红外光谱区域(Vis-NIR);(b)可见光谱区域(Vis);(c)近红外光谱区域(NIR)。

(a) Visible-near-infrared spectral region(Vis-NIR); (b) Visible spectral region(Vis); (c) Near-infrared spectral region(NIR)。

图 4 基于不同光谱区域的 4 种草莓主成分聚类分析结果

Fig. 4 Principal component cluster analysis results of four strawberry species based on different spectral regions



(a)可见光-近红外光谱区域(Vis-NIR);(b)近红外光谱区域(NIR)。

(a) Visible-near-infrared spectral region(Vis-NIR); (b) Near-infrared spectral region(NIR)。

图 5 基于不同光谱区域的 PC1 载荷曲线

Fig. 5 PC1 loading curves based on different spectral regions

2.4 基于不同光谱区域的 PC 图像和波段比图像

主成分分析能够对高维光谱图像数据进行降维,提取最主要的光谱信息成分,减少数据冗余。而波段比运算可以增强感兴趣目标与背景之间的图像对比度,通过选择合适波段比对可以增强目标

区域。因此,将主成分分析与波段比方法结合,可以充分利用各自的优势,有效检测和识别复杂图像中的感兴趣区域,为验证评价这 2 种方法对草莓早期损伤的检测效果,将训练集中的所有损伤草莓样本均匀分成四类。第一类为位于草莓茎部的一个

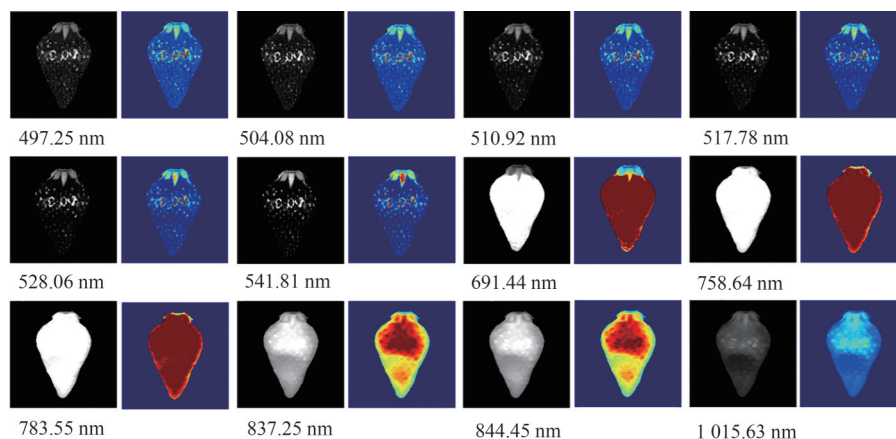


图6 特征单波长图像及对应的伪彩色图像

Fig. 6 Characteristic single-wavelength image and corresponding pseudo-color image

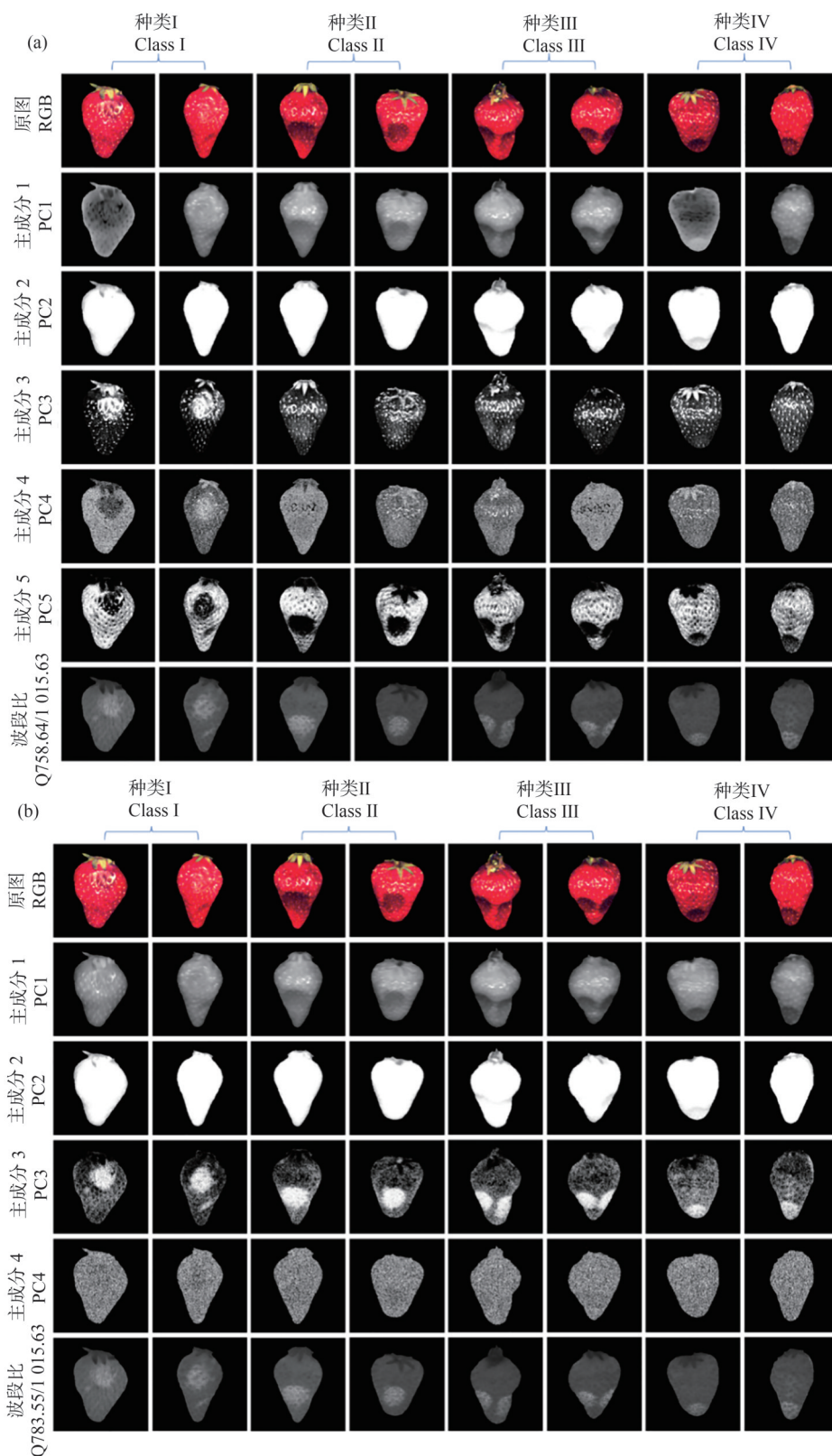
损伤区域;第二类为位于草莓赤道中心附近的一个损伤区域;第三类为位于草莓赤道中心附近的两个损伤区域;第四类为位于草莓尾部的一个损伤区域。图7(a)为基于Vis-NIR波段内11幅单波长图像得到的PC图像和代表性波段比图像 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 。图7(b)为基于NIR波段内的4幅单波长图像得到的PC图像和代表性波段比图像 $Q_{783.55/1\ 015.63}$ 。本研究未给出的其他波段比图像,其图像相较于代表性图的效果均更差。

作为损伤图像对比,图7(a)和(b)的第一行分别展示了两幅各类损伤样本的RGB图像。如茎部损伤的采集图像无法明显区分损伤区域,其原因在于茎部受到强光的影响,成熟草莓的表皮色彩饱和度较高,用肉眼无法快速区分。图7(a)中的PC1至PC4图像虽能完好显示出草莓图像但均无法明显区分出损伤区域。PC5图像的损伤区域区分效果最为明显,但草莓的叶子和表皮中的种子在图像中的灰度等级接近于损伤区域,无法实现良好的区分效果。与上述图像相比, $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像不仅整个图像表面的光照强度分布均匀,而且损伤组织和健康组织的灰度差别大,实现在检测时减少对其他区域误判的几率。图7(b)中,PC1和PC2图像效果无法识别出损伤区域,PC3虽然表面光照均匀,但是样本图像表面存在大量噪声,PC4图像基本上全是噪声。 $Q_{783.55/1\ 015.63}$ 波段比图像效果和上述 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像基本一致,但对于识别4种不同损伤部位的整体准确度而言,

$Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像准确度更高。综上,基于Vis-NIR波段内的 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像最适合草莓早期损伤检测。

2.5 基于多种图像分割方法下草莓损伤的识别应用

本研究采用改进的分水岭分割算法对草莓早期损伤进行检测,将其与传统的分水岭分割算法和改进的大津法对比检测效果。为了更好地评价分割效果,图8中的第一行为两幅各类损伤样本的RGB图像,方便与损伤部位进行对照。第二、三行为以Vis-NIR光谱区域内的特征波长构成的多光谱数据处理后,得到的PC5图像和 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像作为输入展示,在3种方法下对比其分割结果。第四、五行为改进的大津法和改进的分水岭分割算法对PC5图像分割的效果图,相较于改进的大津法分割出损伤区域的效果更佳,但是将草莓叶和表皮中的种子也误认为损伤区域,分割效果并不理想。尝试用改进的大津法处理草莓损伤的波段比图像,但其效果呈现无法准确分割出损伤区域。究其原因在于改进的大津法采用全局阈值,图像灰度分布越简单其效果越好。PC图像灰度变化较为平稳,可用改进的大津法进行阈值分割。而波段比图像存在复杂的局部灰度变化,不适合单一全局阈值,改进的大津法效果较差。第六、七行为传统和改进的分水岭分割算法对 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像分割的效果图,传统的分水岭分割算法其分割结果只能作为初步的图像处理。改进的分水岭分割算法对 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像处理的结果,其采用开闭操作进行过滤预处理。梯度图像重建时,旨在保留目



(a)可见光-近红外光谱区域(Vis-NIR);(b)近红外光谱区域(NIR)。

(a) Visible-near-infrared spectral region(Vis-NIR); (b) Near-infrared spectral region(NIR)。

图 7 基于特征波长的多光谱的 PC 图像和代表性波段比图像

Fig. 7 PC images and representative band ratio images based on multi-spectrum of characteristic wavelengths

标轮廓的关键极值信息,同时消除形态梯度图像中由不规则灰度扰动和噪声引起的局部极值,以及去除一些细小的纹理,从而使损伤区域的分割更加完整清晰。第八行为基于改进的分水岭分割算法实现对损伤区域的边缘检测,绿色边缘代表损伤区域,白色边缘代表草莓整个果形,具有准确的识别

效果。改进的分水岭分割算法加入了局部信息,可以根据图像局部的灰度梯度变化进行分割,更适合处理局部灰度分布复杂的波段比图像。同时 $Q_{758.64/1015.63}$ 波段比图相较于多光谱处理合成PC图像,其操作过程更为简便,满足实现草莓早期损伤快速检测的初衷。

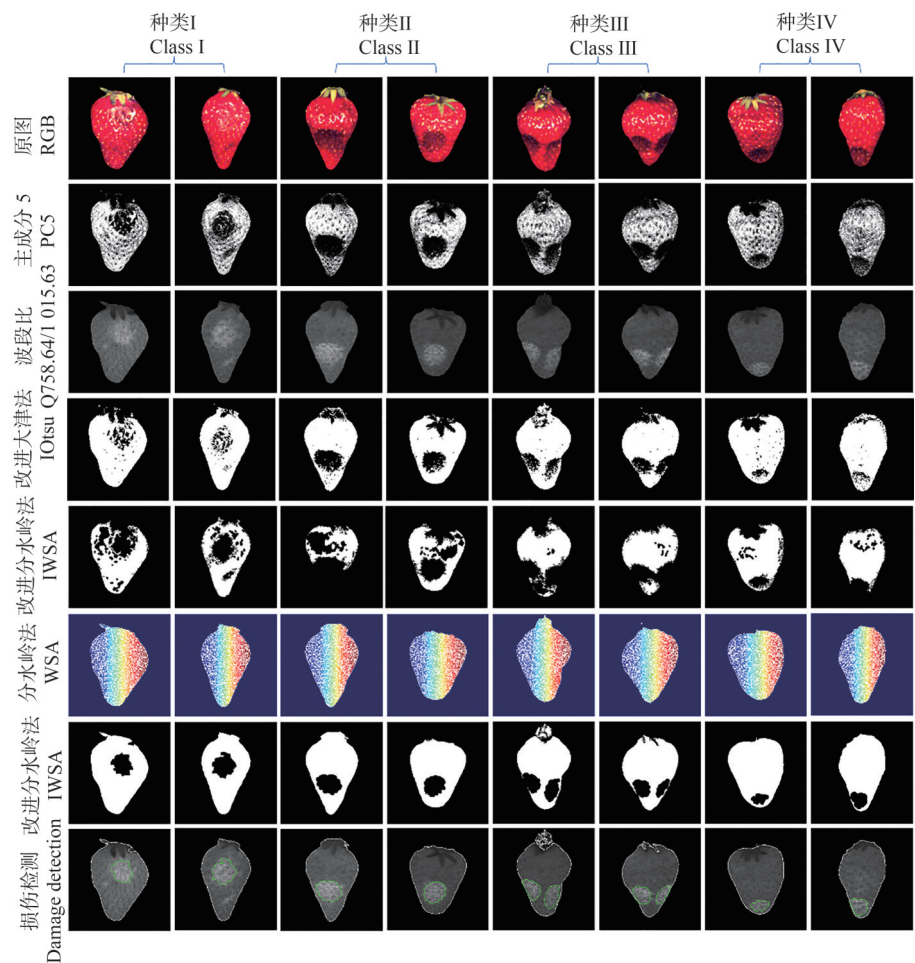


图8 基于不同分割方法的草莓早期损伤分割效果展示

Fig. 8 Demonstration of early damage segmentation of strawberry based on different segmentation methods

2.6 处理流程及结果验证

图9展示了基于 $Q_{758.64/1015.63}$ 波段比图像的草莓早期损伤检测的过程。首先,通过主成分分析(PCA)对四类草莓样本的光谱进行聚类分析。利用Vis-NIR和NIR光谱区域对损伤组织和健康组织进行区分,然后从相应光谱区域的载荷曲线图中挑选得到特征波长。最后基于特征波长的多光谱图像进行PCA处理得到PC图像,与特征波长的波段比图像进行效果比较。从整体效果而言,发现 $Q_{758.64/1015.63}$ 波段比图像最适合检测草莓早期损伤。

其次,采用不同的图像分割方法进行分割比较效果,并对损伤区域进行边缘检测,实现草莓早期损伤检测。

为了评价结合双波段比值和改进分水岭分割算法检测草莓早期损伤的效果,将该结合方法应用于测试集中的所有草莓样本。结果如表1所示,共有10个样本被错误检测,包含3个健康草莓样本被误检,7个损伤草莓的损伤区域识别错误或效果不佳。对健康草莓检测的准确率为97%,不同损伤部位的整体检测准确率为94.2%,对于测试

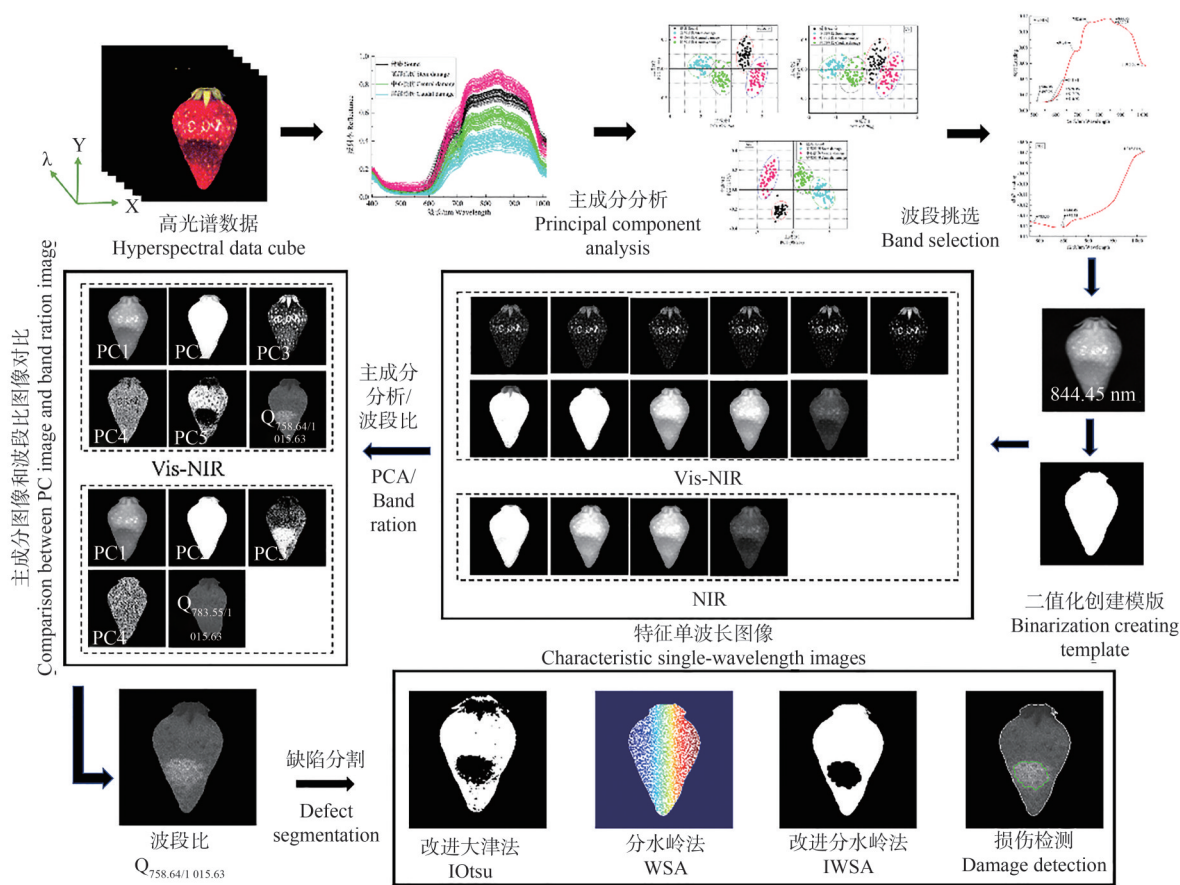


图 9 基于 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像的草莓早期损伤检测流程图

Fig. 9 Flowchart of strawberry early damage detection based on $Q_{758.64/1\ 015.63}$ band ratio image.

表 1 健康和不同损伤区域草莓的分割效能评估

Table 1 Segmentation efficacy assessment of strawberries in healthy and different injury regions

类别 Type	总数 Total	误判数 Number of miscarriages of justice	准确率/% Accuracy rate
健康 Sound	100	3	97
种类I Class I	30	1	96.7
种类II Class II	30	0	100
种类III Class III	30	2	93.3
种类IV Class IV	30	4	86.7
总体 Overall	220	10	95.5

集的总体准确率为 95.5%，检测草莓早期损伤具有良好的效果。因此，基于高光谱成像结合双波段比值和改进分水岭分割算法检测草莓早期损伤是可行。在对四类不同损伤部位的识别结果中，分割后的损伤区域存在略大于实际损伤区域，其主要原因在于损伤区域边缘的组织，受光照不均匀的影响导致该结果的

发生。然而，应用于水果在线自动检测中，这种情况并不影响整体的检测效果。

3 讨论

草莓因其丰富的营养价值和独特的口感而深受人们喜爱，然而，其在生长和储存过程中容易受

到病害和物理损伤,影响果品品质和市场价值。因此,开发一种快速、环保、无损的草莓检测技术具有重要意义,近年来,高光谱技术已被广泛应用于果蔬的病害检测、成熟度评估和品质控制中。孟庆龙等^[26]使用多元散射校正和主成分分析处理光谱数据的方法,通过建立 SKNN 和 Fisher 模型,试验中样本的正确识别率达到 93.3%,误判率较低。方益明等^[27]采集 400~1 000 nm 波段内香梨高光谱图像,并利用统计分析在 863 nm 建立掩模图像。通过主成分分析降维与比值处理,增强了损伤区域与背景之间的光谱差异,最终通过 Otsu 自适应阈值分割与形态学运算准确识别表面损伤。此外,赵明富等^[28]通过高光谱相机捕捉马铃薯的多种缺陷状态,并通过主成分分析及图像处理技术提取关键特征,实现高识别率。Li 等^[29]在柑橘早期腐烂检测中的研究方法相类似,其通过选定关键波长和改进的图像处理方法在样本分类上实现了 96.6% 的准确率。本研究采用改进的分水岭分割算法,对于草莓损伤检测尤为重要,因为草莓的表面特征多样且容易与损伤混淆,常规算法如改进大津法也难以区分表面种子或叶子与实际的损伤,导致识别精度不高,而本研究使用的改进分水岭算法则有效避免这一问题,通过调整算法以强化损伤区域与健康组织之间的对比度,使得损伤区域的识别更为准确,检测准确率达到 95.5%,表明这一方法在提高草莓损伤检测效率和准确性方面的可行性和有效性。通过对比前者的研究结果,本研究在检测水果缺陷方面的总体准确度与其他学者的结果差别不大,但是在草莓尾部损伤的检测中,由于其特殊的形态和损伤特征,当前算法的效果较差,表明在波段比方法增强对比度和算法检测方面的适用性仍有提升空间。未来工作将探索先进的光谱处理和图像分析技术,以增强系统的鲁棒性,并针对草莓不同部位的损伤提供更精准的检测。这些改进将有助于提升草莓损伤检测的准确性,为农产品品质控制提供更有效的技术支持。

4 结 论

本研究表明高光谱成像结合波段比值和改进的分水岭分割算法对草莓早期损伤检测的可行性。通过划分为 Vis-NIR(480.19~1 015.63 nm)、

Vis(480.19~780.0 nm)和 NIR(780.0~1 015.63 nm)这 3 个光谱区域进行对比分析,发现 Vis-NIR 和 NIR 光谱区域内不同部位损伤的草莓具有明显的聚类效应,可以有效识别区分出草莓早期损伤。根据对应的载荷曲线图挑选的特征波长,选择出 11 个 Vis-NIR 光谱区的特征波长和 4 个 NIR 光谱区的特征波长。对其融合形成多光谱图像进行 PCA 处理,对比 PC 图像和波段比图像的损伤区域显示效果。对四类损伤的整体展示效果而言,发现 $Q_{758.64/1\ 015.63}$ 波段比图像最适合草莓早期损伤的检测。采用改进的大津法、分水岭分割算法和改进的分水岭分割算法对草莓损伤区域进行分割。从分割结果对比可看出,改进的大津法存在对草莓叶及其他区域误分割的情况,综合比较下改进的分水岭分割算法在损伤区域的准确识别和分割效果都更胜一筹。采用本研究提出的方法对测试集的样本进行检测的总体准确率为 95.5%。因此,本研究提出的方法具有对草莓早期损伤进行在线自动检测的潜力,为高光谱成像技术在水果损伤检测领域的应用提供了理论依据。

参考文献 References

- [1] 何娟,肖祥飞,郑美娟. 草莓营养品质的鉴定分析[J]. 食品安全导刊, 2023(9):88-91
He J, Xiao X F, Zheng M J. Identification and analysis of nutritional quality in strawberry[J]. *China Food Safety Magazine*, 2023(9):88-91 (in Chinese)
- [2] 李笑敏,唐芳,卢晨,季赛君,陈伯清,吴欣欣. 草莓果实损伤特性研究[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(20):29-33
Li X M, Tang F, Lu C, Ji S J, Chen B Q, Wu X X. Study on damage characteristics of strawberry fruit [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2023, 29(20):29-33(in Chinese)
- [3] 刘妍,周新奇,俞晓峰,李永强,韩双来. 无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2020, 46(1):27-37
Liu Y, Zhou X Q, Yu X F, Li Y Q, Han S L. Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality [J]. *Journal of Zhejiang University : Agriculture and Life Sciences*, 2020, 46(1):27-37(in Chinese)
- [4] 李龙,彭彦昆,李永玉. 苹果内外品质在线无损检测分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9):267-275
Li L, Peng Y K, Li Y Y. Design and experiment on grading system for online non-destructive detection of internal and external quality of apple [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(9):267-275(in Chinese)
- [5] 龚中良,杨张鹏,梁力,蔡宇,游江辉. 基于机器视觉的柑橘表面缺陷检测[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7):236-239
Gong Z L, Yang Z P, Liang L, Cai Y, You J H. Machine vision-based

- detection of surface defects on citrus[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(7):236-239(in Chinese)
- [6] 耿晗,蔡聘,刘斌. 基于介电特性的苹果内部品质预测方法研究[J]. 农机化研究,2019,41(10):186-191
- Geng H, Cai C, Liu B. Prediction of apple internal quality based on dielectric properties [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(10):186-191 (in Chinese)
- [7] 左杰文,彭彦昆,李永玉,邹文龙,赵鑫龙,孙晨. 基于声学特性的西瓜糖度检测与分级系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(S1):316-323
- Zuo J W, Peng Y K, Li Y Y, Zou W L, Zhao X L, Sun C. Study on detection and grading system of watermelon sugar content based on acoustic characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(S1):316-323 (in Chinese)
- [8] Bizzani M, William Menezes Flores D, Bueno Moraes T, Alberto Colnago L, David Ferreira M, Helena Fillet Spoto M. Non-invasive detection of internal flesh breakdown in intact palmer mangoes using time-domain nuclear magnetic resonance relaxometry [J]. *Microchemical Journal*, 2020, 158: 105208
- [9] 徐赛,陆华忠,王亚娟,周志艳,姜焰鸣,吕恩利. 基于电子鼻与物理特征融合的猕猴桃贮藏时间识别方法[J]. 食品科技,2016,41(3):292-297
- Xu S, Lu H Z, Wang Y J, Zhou Z Y, Jiang Y M, Lü E L. Storage time identification of kiwi fruit based on electronic nose and physical characteristic combination [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41 (3):292-297 (in Chinese)
- [10] 申亚其,李松林,何杰,闫祖龙,李春林,黄玉萍. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的研究进展[J]. 林业机械与木工设备,2021,49(3):4-9
- Shen Y Q, Li S L, He J, Yan Z L, Li C L, Huang Y P. Research progress of hyperspectral image technology in fruit nondestructive testing [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2021, 49(3):4-9 (in Chinese)
- [11] 王凡,孟翔宇,陈龙跃,段丹丹,钱亚军. 基于高光谱成像的苹果损伤检测方法研究[J]. 广东农业科学,2023,50(7):57-63
- Wang F, Meng X Y, Chen L Y, Duan D D, Qian Y J. Research on apple damage detection based on hyperspectral imaging [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, 50(7):57-63 (in Chinese)
- [12] 李斌,韩昭洋,王秋,孙赵祥,刘燕德. 基于高光谱成像技术的枇杷碰伤等级检测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2023,43(6):1792-1799
- Li B, Han Z Y, Wang Q, Sun Z X, Liu Y D. Research on bruise level detection of loquat based on hyperspectral imaging technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(6):1792-1799(in Chinese)
- [13] 张珏,田海清,王珂,张丽娜,于洋. 基于高光谱成像技术的羊肉新鲜度预测[J]. 中国农业大学学报,2020,25(5):94-103
- Zhang J, Tian H Q, Wang K, Zhang L N, Yu Y. Nondestructive detection of lamb freshness based on hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25 (5) : 94-103 (in Chinese)
- [14] 张伏,禹煌,熊瑛,张方圆,王新月,吕庆丰,武一戈,张亚坤,付三玲. 热损伤玉米种子的高光谱无损检测[J]. 光谱学与光谱分析,2024,44(4):1165-1170
- Zhang F, Yu H, Xiong Y, Zhang F Y, Wang X Y, Lü Q F, Wu Y G, Zhang Y K, Fu S L. Hyperspectral non-destructive detection of heat-damaged maize seeds[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(4):1165-1170 (in Chinese)
- [15] 段洁利,张汉尧,付函,赖力潜,袁浩天,何俊宇,杨洲. 基于高光谱成像技术的青香蕉碰撞损伤检测[J]. 农业工程学报,2023,39(7):176-184
- Duan J L, Zhang H Y, Fu H, Lai L Q, Yuan H T, He J Y, Yang Z. Collision damage detection of green bananas using hyperspectral imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(7):176-184 (in Chinese)
- [16] Liu Q, Sun K, Peng J, Xing M K, Pan L Q, Tu K. Identification of bruise and fungi contamination in strawberries using hyperspectral imaging technology and multivariate analysis [J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(5): 1518-1527
- [17] Fu X P, Wang M Y. Detection of early bruises on pears using fluorescence hyperspectral imaging technique [J]. *Food Analytical Methods*, 2022, 15(1): 115-123
- [18] 刘勃,张亚亚,黄金,赵利民. 水果图像处理技术应用及其展望[J]. 青海师范大学学报,2022,38(4):36-44
- Liu Q, Zhang Y Y, Huang J, Zhao L M. Applications and prospects of fruit image processing technology [J]. *Journal of Qinghai Normal University*, 2022, 38(4):36-44 (in Chinese)
- [19] Yin H, Li B, Liu Y D, Zhang F, Su C T, Ou-Yang A G. Detection of early bruises on loquat using hyperspectral imaging technology coupled with band ratio and improved Otsu method[J]. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 283: 121775
- [20] 欧阳爱国,刘昊辰,成龙,姜小刚,李雄,胡宣. 高光谱图像特征结合光谱特征用于毛桃碰伤时间分类[J]. 光谱学与光谱分析,2021,41(8):2598-2603
- Ouyang A G, Liu H C, Cheng L, Jiang X G, Li X, Hu X. Hyperspectral image features combined with spectral features used to classify the bruising time of peach [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(8):2598-2603 (in Chinese)
- [21] 吴温博,金文标. 基于主成分分析的高光谱图像降维[J]. 内蒙古科技与经济,2018(22):66-67
- Wu W B, Jin W B. Dimension reduction of hyperspectral images based on principal component analysis[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2018(22):66-67(in Chinese)
- [22] Tian X, Zhang C, Li J B, Fan S X, Yang Y, Huang W Q. Detection of early decay on citrus using LW-NIR hyperspectral reflectance imaging coupled with two-band ratio and improved watershed segmentation algorithm[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130077
- [23] Li J B, Luo W, Wang Z L, Fan S X. Early detection of decay on apples using hyperspectral reflectance imaging combining both principal component analysis and improved watershed segmentation method [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 149: 235-246
- [24] 卢娜,韩平,王纪华. 基于高光谱成像技术的草莓硬度预测[J]. 软件导刊,2018,17(3):180-182
- Lu N, Han P, Wang J H. Prediction on firmness of strawberry based on hyperspectral imaging [J]. *Software Guide* 2018, 17 (3) : 180-182 (in Chinese)
- [25] Tian X, Zhang C, Li J B, Fan S X, Yang Y, Huang W Q. Detection of early decay on citrus using LW-NIR hyperspectral reflectance imaging coupled with two-band ratio and improved watershed segmentation algorithm[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130077
- [26] 孟庆龙,冯树南,谭涛,满婷,尚静. 猕猴桃挤压损伤高光谱快速检测研究[J]. 包装工程,2022,43(15):114-119
- Meng Q L, Feng S N, Tan T, Man T, Shang J. Rapid detection for pressed damage of kiwifruit based on hyperspectral imaging technology [J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(15):114-119 (in Chinese)
- [27] 方益明,杨帆,李晓勤. 库尔勒香梨表面损伤的高光谱图像检测方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(14):141017
- Fang Y M, Yang F, Li X Q. Detection of damage on the surface of Korla fragrant pear using hyperspectral images [J]. *Laser & Optoelectronics*

Progress, 2020, 57(14):141017 (in Chinese)

- [28] 赵明富,刘自迪,邹雪,吴亮,张峰,龙洁. 基于高光谱成像技术对马铃薯外部缺陷的识别[J]. *激光杂志*, 2016, 37(3):20-24

Zhao M F, Liu Z D, Zou X, Wu L, Zhang F, Long J. Detection of defects on potatoes by hyperspectral imaging technology [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(3):20-24 (in Chinese)

- [29] Li J B, Luo W, Han L H, Cai Z L, Guo Z M. Two-wavelength image detection of early decayed oranges by coupling spectral classification with image processing[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 111: 104642

责任编辑:秦梅



第一作者简介:刘燕德,博士,博士生导师。现任华东交通大学首席教授,华东交通大学首批天佑学者,第三批国家“万人计划”科技领军人才,国家与地方联合工程研究中心主任,科技部重点领域创新团队负责人,江西省优势科技创新团队负责人,机械工程带头人和学科盟主。主要从事研发我国首台完全自主知识产权的水果光电分选装备,实现了我国水果内部品质分选装备从无到有的突破,打破了国外产品的市场垄断,实现了我国高档果品内外品质分选装备从无到有的突破,产生显著经济和社会效益。获江西省科技进步一等奖、江西省自然科学二等奖、江西省技术发明奖二等、中国仪器仪表学会科技进步一等奖及教育部科技成果奖等省部级以上奖8项,主持完成科技部科技支撑计划项目3项,主持在研和完成国家自然科学基金6项,主持在研和完成省级项目20余项,发表论文200篇,其中SCI/EI收录140余篇,主编著作5部;获得国家发明专利20项,实用新型专利17项,软件著作权登记20项,培养学生获国家奖学金10余人次。