DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251120003
引用格式: 孙怡萱, 孙梅, 杨一, 等. 高光谱成像技术快速识别苹果和橙子的黑斑及损伤区域[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 243–250.
SUN YX, SUN M, YANG Y, *et al*. Rapid identification of dark spots and damage in 2 types of fruits, apples and oranges by hyperspectral imaging technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 243–250. (in Chinese with English abstract).

高光谱成像技术快速识别苹果和橙子的黑斑及损伤区域

孙怡萱[1], 孙 梅[1*], 杨 一[1], 黄 宇[2]

(1. 北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048; 2. 无锡谱视界科技有限公司, 无锡 214142)

摘 要: 目的 快速准确地识别出苹果和橙子两类水果的黑斑区域与损伤区域。**方法** 采用高光谱成像技术快速检测两种水果的黑斑区域与损伤区域: 通过对两类水果在 550~780 nm 波长范围的光谱进行分析; 运用最小噪声分离方法(minimum noise fraction rotation, MNF)分析了苹果和橙子的 7 个特征值灰度图, 减少了数据处理的计算需求以区别; 运用归一化光谱指数(normalized difference spectral index, NDSI)方法, 构建新型两波段光谱指数, 以便更好利用波长包含的信息。**结果** 利用 MNF Rotation 方法发现第 4 特征值灰度图能较好地识别出两种水果的黑斑区域与损伤区域, 而 NDSI 方法中构建 NDSI (723.6, 673.6)和 NDSI (706, 590)两个波长, 再利用灰度密度分割, 利用 2 个波段进行四则运算实现了水果损伤和斑点的快速识别。**结论** 以两种方法均可有效地识别水果损伤与斑点区域, 但 MNF Rotation 方较为复杂, 运算速度较慢, 不适合在工业生产上进行应用, 而 NDSI 算法具有运算效率高、实现简便的优势, 更适合用于水果质量检测的快速在线识别。

关键词: 高光谱成像技术; 黑斑区域; 损伤区域; 归一化光谱指数; 最小噪声分离变换

Rapid identification of dark spots and damage areas in apples and oranges by hyperspectral imaging technology

SUN Yi-Xuan[1], SUN Mei[1*], YANG Yi[1], HUANG Yu[2]

(1. *School of Computer and Artificial Intelligence*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*; 2. *Wuxi Spectrum Vision Technology Co*., *Ltd*., *Wuxi* 214142, *China*)

ABSTRACT: Objective To quickly and accurately identify the black spot areas and damage areas of 2 types of fruits, apples and oranges. **Methods** Hyperspectral imaging technology was employed for the rapid detection of black spots and damage areas on these 2 types of fruits: By analyzing the spectra of apples and oranges in the range of 550–780 nm. The minimum noise fraction rotation (MNF) was applied to analyze the grayscale images of the first

收稿日期: 2025-11-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(32202144)
第一作者: 孙怡萱(2005—), 女, 主要研究方向为食品检测。E-mail: 18811629517@163.com
***通信作者:** 孙梅(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: smcxh123@163.com

7 eigenvalues for both fruits, which reduced computational demands for data processing to facilitate differentiation. The normalized difference spectral index (NDSI) method was utilized to construct novel two-band spectral indices, thereby making better use of the information contained within the wavelengths. **Results** Using the MNF Rotation method, it was found that the grayscale image of the fourth eigenvalue could effectively identify the dark spots and damage areas of the 2 types of fruits. In the NDSI method, two wavelength combinations, NDSI (723.6, 673.6) and NDSI (706, 590), were constructed. Then, through grayscale density slicing and arithmetic operations using the two bands, rapid identification of fruit damage and spots was achieved. **Conclusion** Both methods can effectively identify the damaged and black spot areas of fruits. However, the MNF Rotation method is relatively complex with a slow computing speed, making it unsuitable for industrial applications. In contrast, the NDSI algorithm features high computational efficiency and simple implementation, which renders it more applicable for the rapid online identification in fruit quality inspection.

KEY WORDS: hyperspectral imaging technology; dark spot area; damage area; normalized difference spectral index; minimum noise fraction rotation

0 引 言

随着人们生活水平的提高，对果蔬的品质要求越来越高[1–2]。而水果的外观品质不仅与市场价值相关联，又与消费者喜好、市场选择等密切相关。水果表面黑斑由于病原菌浸染会引起的内部腐烂从而影响消费者的身体健康，水果在运输过程中造成的碰伤和损伤等品质问题也会影响消费倾向。传统的品质化学检测方法是一种对果蔬的破坏性检测技术[3–5]，存在步骤烦琐，费时费力等问题，不利于快速检测。随着成像和光谱技术的快速发展，高光谱成像技术因为融合了传统的成像和光谱技术的优点，可以同时获取被检测物体的空间信息和光谱信息[6–9]，目前国内外许多学者利用高光谱技术对水果的内外部品质特征进行了快速无损检测[10–12]。

水果的外观品质常常通过对水果表面的图像进行分析和检测，如表面的瑕疵、病斑、裂纹等[13–16]。FOLCH 等[17]利用高光谱成像技术研究了柑橘的病斑面积，并且根据病斑面积进行了腐败分类，准确率达到 91%，可以为柑橘健康分类提供有效的工具。TAN 等[18]、SANDRA 等[19]利用高光谱成像技术研究了苹果、柿子的瘀伤，准确率均达到 90.00%以上。TANG 等[20]利用高光谱技术对苹果损伤建立模型，分级精度达到 97.33%，验证了高光谱成像技术对于苹果损伤检测中的有效性。YU 等[21]使用高光谱成像技术识别鲜枣裂纹，判别模型精度近 100%，精确量化了裂纹位置、面积，实现鲜枣裂纹特征的快速识别。XUAN 等[22]利用高光谱成像技术研究了桃表面的光谱特征，对桃进行损伤品质指标判断，完成对桃品质指标的准确量化。

多数研究者在利用高光谱成像技术检测果类品质、糖度、酸度等时，往往仅针对单一品种或者某一类水果进行研究，很少有研究者利用多类水果或多品种水果进行研究分析光谱差异及特征响应波段范围，导致现有检测方法通用性较差，难以适配多类水果的联合检测需求。本研究采用最小噪声分离方法(minimum noise fraction rotation, MNF)和归一化差值光谱指数(normalized difference spectral index, NDSI)方法两种方法检测不同水果的黑斑区域及损伤区域，通过这两种方法构建鉴别模型，并用独立样本数据对不同的模型进行验证，以实现水果黑斑、损伤区域快速识别。本研究旨在探索跨水果品种的通用性检测方法，为多类水果外观品质的在线无损检测提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

苹果和橙子购自北京某超市，苹果及橙子的品种没有特殊要求，但是苹果、橙子的黑白斑、损伤是非人为故意形成。果实表面存在的自然黑斑或损伤为非人为因素所致。为尽量控制变量，筛选时已排除内部存在振动损伤等隐性差异的果实，确保所用材料仅表面具有自然斑损。

1.2 仪器与设备

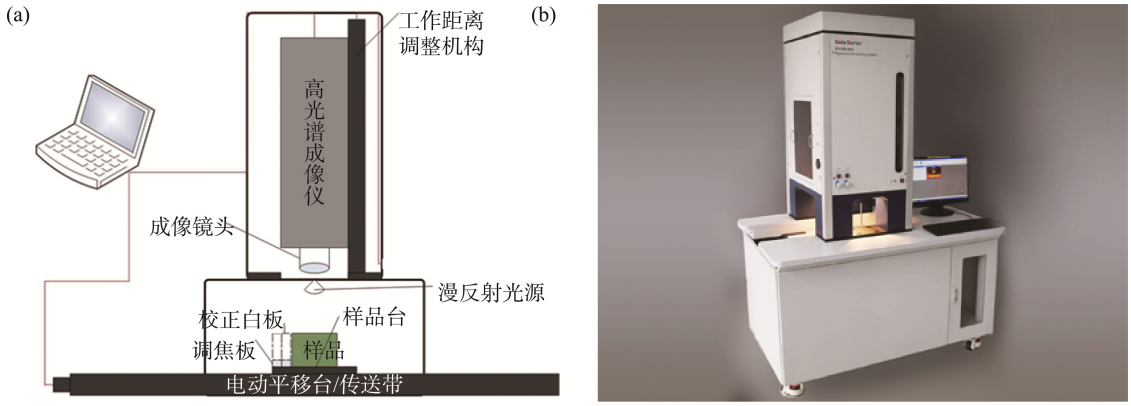
GaiaSorter 高光谱成像系统(无锡谱视界科技有限公司)，主要由高光谱成像仪(V10E)、电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)相机、光源、暗箱、计算机组成(图 1)。本实验所用光谱仪参数设置如下：光谱扫描范围为 400~1000 nm，光谱分辨率为 2.8 nm，采集间隔为 1.9 nm，共计 520 个光谱通道。

1.3 高光谱影像预处理

高光谱影像预处理包括镜像变换[23]、黑白帧校准[24–25]。

1.3.1 镜像变换

高光谱影像的镜像，其成像原理与太阳光、人眼结构有关，是由于光线的反射和漫反射现象形成。图像镜像分水平镜像和垂直镜像，高光谱影像的镜像为水平镜像，其



注: (a) GaiaSorter 高光谱分选仪结构图; (b) GaiaSorter 高光谱分选仪实景图。

图 1　GaiaSorter 高光谱分选仪结构图与实景图

Fig.1　Schematic diagram and photograph of the GaiaSorter hyperspectral sorter

变换公式如下：原图像高度为 f_H，宽度为 f_W，设原始图像的任意点 $P_0(X_0,Y_0)$，沿水平(X 方向)镜像后到新的位置 $P(X,Y)$，水平镜像不改变 Y 坐标。其变换式为公式(1):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & f_W \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

1.3.2　黑白帧校正

暗箱中暗电流的存在，不同波段条件下光源强度分布不均匀以及苹果、橙子样本的形状差异等都会导致在光照强度较弱波段采集到的图像包含较大的噪声，故需对采集到的高光谱图像进行黑白帧校正，以消除部分噪声的影响。即在与样本采集相同的系统条件下，首先，扫描标准白色校正板(反射率系数为 R_{white})，得到全白的标定图像 DN_{white}；然后，盖上相机的镜头盖进行图像采集得到全黑的标定图像 DN_{dark}；最后，按照下面校正公式(2)完成图像标定采集得到的原始图像 DN_{raw} 变成校正后的反射率图像 R_{ref}，如公式(2):

$$R_{ref}=\frac{DN_{raw}-DN_{dark}}{DN_{white}-DN_{dark}}\times R_{white} \tag{2}$$

1.4　高光谱影像分析

苹果、橙子的高光谱影像分析方法包括 MNF Rotation 和 NDSI。

1.4.1　最小噪声分离法

MNF[26–28]用于判定图像数据内在的维数(即波段数)，分离数据中的噪声，减少随后处理中的计算需求量。MNF 本质上是两次层叠的主成分变换。第一次变换(基于估计的噪声协方差矩阵)用于分离和重新调节数据中的噪声，这步操作使变换后的噪声数据只有最小的方差且没有波段间的相关。第二步是对噪声白化数据的标准主成分变换。通过 MNF 变换可以判定图像数据的内在维数，隔离数据中的噪声，减少数据处理的计算需求。

1.4.2　光谱指数法

高光谱图像所包含的光谱信息数据量庞大，含有较大的冗余以及非光谱信息。因此选择合理的数据处理方法、寻找最能表征苹果、橙子轻微损伤的特征波长的图像非常重要。光指数将两个或两个以上波段的地物反射率或辐射值进行组合运算，以增强目标的某一特性或细节。本研究选择常用的两波段光谱指数(即 NDSI)[29–32]，其计算方式见公式(3)，通过苹果正常与损伤区域的比值光谱特征分析，构建新型两波段光谱指数，以便更好利用波长包含的信息。

$$NDSI=\frac{band_i-band_j}{band_i+band_j} \tag{3}$$

式中: $band_i$、$band_j$ 为第 i、j 波段的光谱反射率。

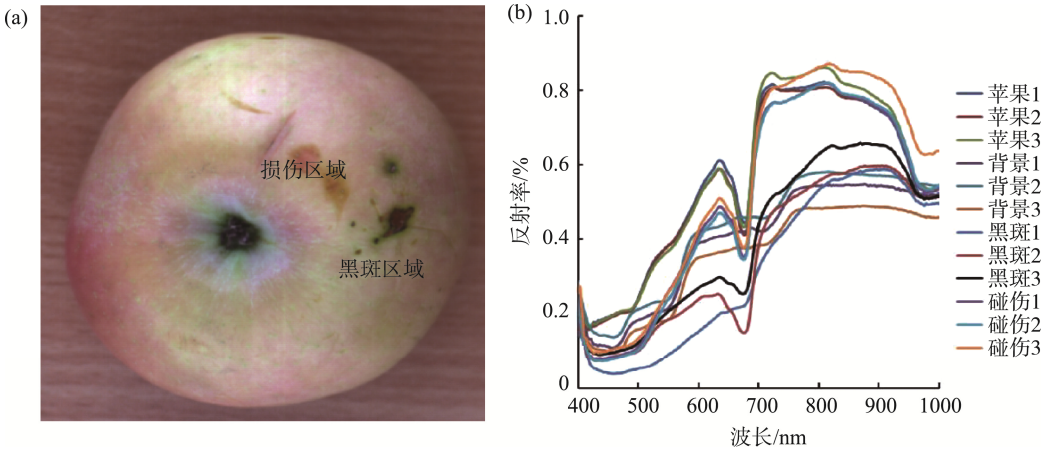
1.5　数据处理

图像采集软件采用四川双利合谱科技有限公司提供的高光谱成像系统采集软件 SpecView 完成。图像处理采用 ENVI5.3 软件进行处理。其中苹果和橙子分别有 50 个，采用随机抽样的方式获取 20 个的光谱反射率作为建模数据，其余对应的光谱反射率作为检验数据。

2　结果与分析

2.1　苹果黑斑区域、损伤区域、正常区域和背景的光谱分析

取苹果黑斑区域、损伤区域、正常区域和作为样品放置台的背景各 4 个不同位置周边 50 个像元，分别获取这 4 个不同位置 50 个像元的光谱反射率，并求取这 50 个像元的反射率均值，如图 2 所示，其中，苹果没有损伤区域的光谱反射率在 500~680 nm 范围内高于损伤区域及黑斑区域的光谱反射率，其物理原因是当苹果受损后细胞破裂并引起组织变化，破碎的细胞渗出细胞液，填充细胞间隙，造成光的散射减少，苹果组织的光学密度降低，吸光度增大，其反射则减小；而在化学上则是由于细胞壁(膜)的破裂，



注: (a)苹果红-绿-蓝彩色图像(red-green-blue color image, RGB), (b)光谱反射率。

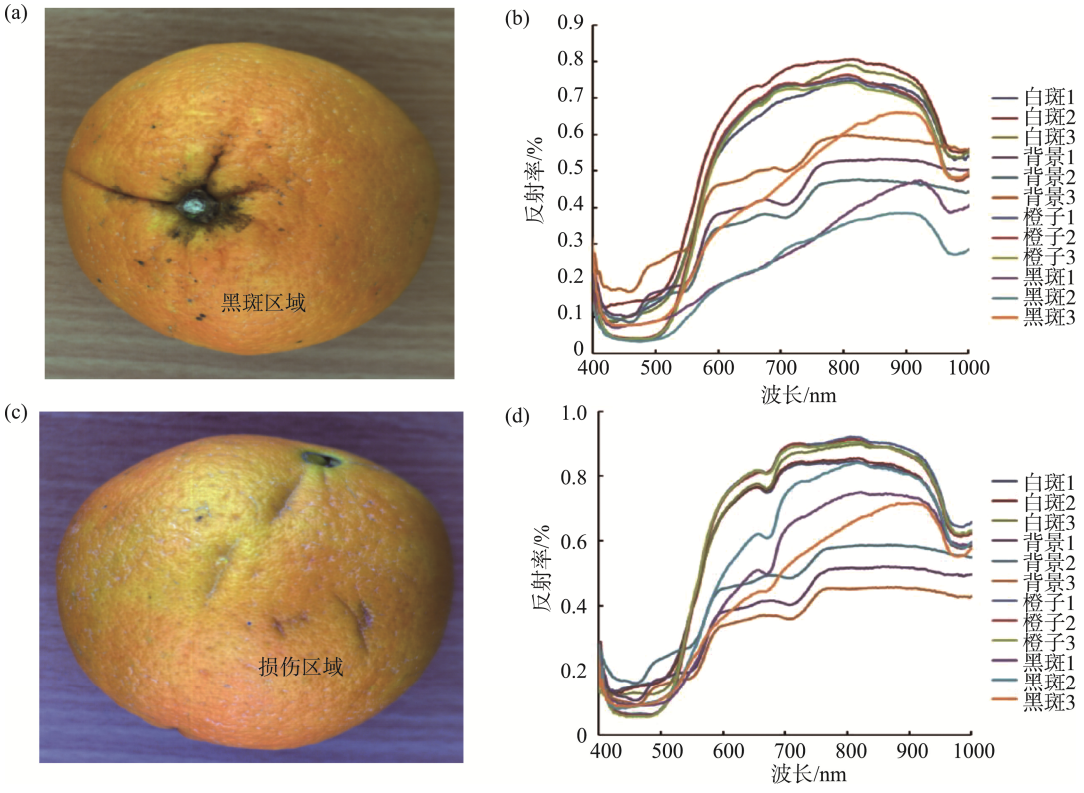
图 2 苹果黑斑区域、损伤区域、正常区域和背景的光谱反射率

Fig.2 Spectral reflectance of apple dark spot areas, bruises areas, normal areas and background

苹果呼吸强度增加, 导致其中一些酶的活性增强, 发生一系列化学变化, 外观上表现为受损部位发生褐变, 从而导致其可见光区域光谱反射率降低在 550~700 nm 范围内, 苹果黑斑区域的光谱反射率较低, 这是因为黑色物体的吸收较强, 其反射则相对较弱; 在 580~700 nm 范围内, 苹果黑斑区域、损伤区域、正常区域的光谱存在较为显著的波峰波谷, 在 630 nm 左右处有一个反射峰与苹果的颜色有关, 在 680 nm 左右处有一个吸收峰, 这主要由苹果表面叶绿素的吸收引起的。在 550~680 nm 范围内, 损伤区域的光谱反射率高于苹果黑斑区域和正常区域之间, 因此可以尝试通过构建光谱指数和阈值分割方法快速识别出苹果黑斑区域和损伤区域。

2.2 橙子黑斑区域、正常区域、背景的光谱分析

以橙子的正面和侧面为例, 取橙子黑斑区域、白斑区域、正常区域和背景各 4 个不同位置周边 50 个像元, 分别获取这 4 个不同位置 50 个像元的光谱反射率, 并求取这 50 个像元的反射率均值, 如图 3 所示。从图 3 中可知,



注: (a), (b)分别为橙子正面 RGB、光谱反射率, (c), (d)分别为橙子侧面 RGB、光谱反射率。

图 3 橙子黑斑区域、正常区域、背景的光谱反射率

Fig.3 Spectral reflectance of orange dark spot areas, bruises areas, normal areas and background

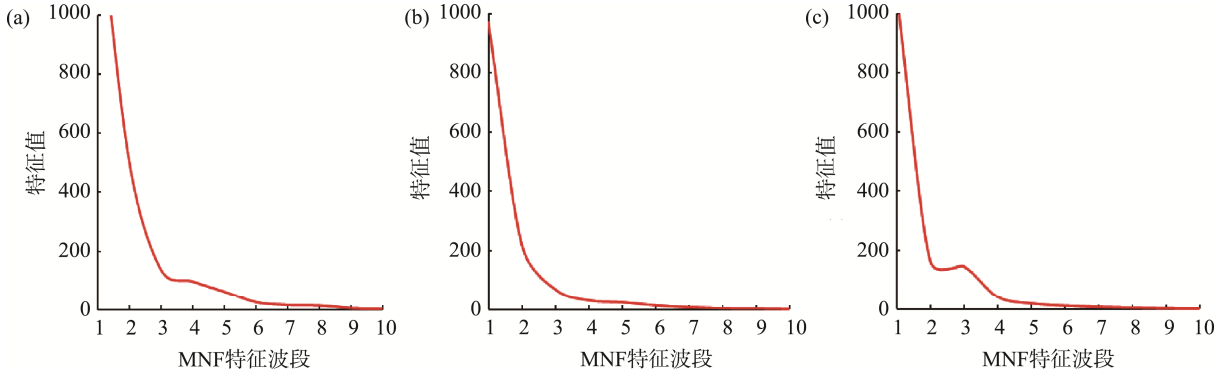
橙子在 400~500 nm 波段的光谱反射值先下降后保持平稳的趋势，这个波段的反射值比较低在，500~650 nm波段反射值表现为上升态势，在 730~850 nm 波段反射值大体保持不变，在 850~980 nm 波段反射值呈现下降趋势。500~650 nm 波段反射率呈现上升趋势与其橙子的表皮颜色为橘黄色有关，在 670 nm 和 980 nm 附近有两个吸收峰，670 nm 附近可能为叶绿素的吸收，970 nm 附近处为水的 O-H 二级吸收倍频。由于背景与橙子所含化学物质不一样，其光谱表现也不一样，因此可以在此区域快速地识别橙子。无论从橙子的正面光谱还是侧面光谱来看，在 530~1000 nm 范围内，橙子黑斑区域的光谱反射率均低于橙子的白斑区域和正常区域。在 400~1000 nm 范围内，白斑区域和正常区域在蓝光波段差异明显。

2.3　苹果和橙子的最小噪声分离变换

经过镜像变换、黑白帧校准的苹果、橙子高光谱图像进行 MNF 变换(图 4)，分别得到以有效信息为主的波段和以噪声为主的波段，并且按照信噪比从大到小的顺序排列。原始数据的主要信息都集中在前面特征值大的波段，后面特征值小的波段主要以噪声为主。特征值接近于 0 的多数是噪声，最好选择特征值高的波段。图 4 给出了每个 MNF 波段相应的特征值，以及每个 MNF 波段包含的数据方差的累积百分比，由图 4 可以看出，除前 7 个 MNF 波段对应的特征值大于 2 外，其他 MNF 波段对应的特征值接近为 0，且前 7 个 MNF 成分累积百分比超过 95%(即经过 MNF 变化之后的前 7 个成分图像包含了苹果、橙子样本高光谱图像大量的有效信息)。因此，本研究选取前 7 个 MNF 成分图像进行分析研究苹果、橙子正常区域与黑斑、损伤区域的差别。

2.3.1　基于 MNF 的苹果的黑斑、损伤区域识别

图 5 列举了苹果原图(高光谱 RGB 彩色合成)、前 7 个 MNF 波段的灰度图。从 MNF 波段的灰度图来看，第 1 个 MNF 灰度图能较好地区分背景和苹果，然而苹果的部分黑斑也会识别为背景；第 2 个 MNF 灰度图能较好地识别出苹果的黑斑；第 3 个 MNF 灰度图虽能识别出苹果的黑斑，但是苹果的其他区域有一部分也会被识别为黑斑；第 4 个 MNF 灰度图较亮的部分为苹果的黑斑和苹果损伤区域，识别效果较好；第 5 个 MNF 灰度图较亮的部分为苹果的苹果损伤区域；第 6 个 MNF 灰度图只能识别部分苹果损伤区域和部分黑斑区域；第 7 个 MNF 灰度图只能识别部分黑斑区域。因此可根据 MNF1、MNF4 和 MNF6 快速识别苹果的损伤区域和黑斑区域。



注：(a)苹果；(b)正面橙子；(c)侧面橙子。

图 4　苹果、橙子高光谱图像进行 MNF 图

Fig.4　MNF images of hyperspectral images of apples and oranges

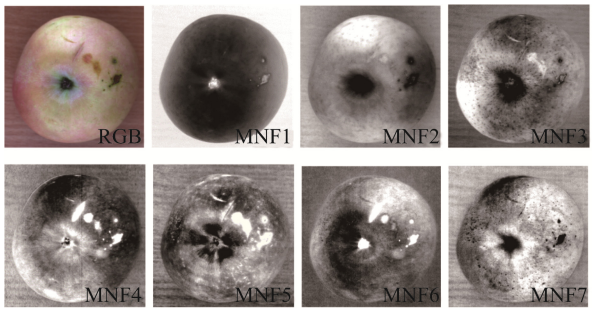


图 5　苹果 RGB 原图及前 7 个 MNF 特征值灰度图

Fig.5　RGB original image of the apple and grayscale images of the first 7 MNF eigenvalues

2.3.2　基于 MNF 的橙子的黑斑、损伤区域识别

图 6 列举了橙子正面、侧面原图(高光谱 RGB 彩色合成)、前 7 个 MNF 波段灰度图。从正面橙子的 MNF 波段灰度图来看，第 1 个 MNF 灰度图能较好地区分背景、橙子黑斑，然而，背景和橙子黑斑则无法相互区分；第 2、3 个 MNF 灰度图亮度部分为黑斑，但是无斑点橙子也会被错误地识别为黑斑；第 4 个 MNF 灰度图能较好地识别出橙子的黑斑和白斑，即较亮的部分为橙子的黑斑、白斑，识别效果较好；第 5~7 个 MNF 灰度图则无法正确识别出黑斑、白斑区域。因此可根据 MNF1、MNF2 和 MNF4 快速识别橙子的黑斑区域。

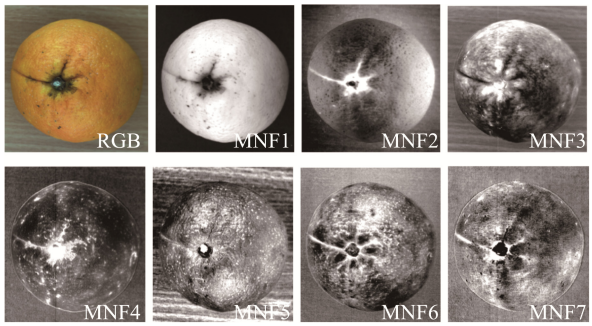


图 6 橙子正面 RGB 原图及前 7 个 MNF 特征值灰度图

Fig.6 RGB original image of the orange front side and grayscale images of the first 7 MNF eigenvalues

如图 7，从侧面橙子的前 7 个 MNF 波段的灰度图来看，第 1 个 MNF 灰度图能较好地区分背景、橙子；第 2、3 个 MNF 灰度图识别效果并不如意，黑白斑、背景等均未能识别出来；第 4 个 MNF 灰度图虽然能识别出橙子黑斑，但是也错误地把部分无斑点橙子识别为黑斑；第 5 个 MNF 灰度图能较好地识别出橙子黑白斑、损伤区域，但是部分背景会错误地识别为黑白斑。第 6、7 个 MNF 灰度图则无法正确识别出黑斑、白斑、损伤区域。因此可根据 MNF1、MNF4 和 MNF5 快速识别橙子的黑斑、白斑、损伤区域。

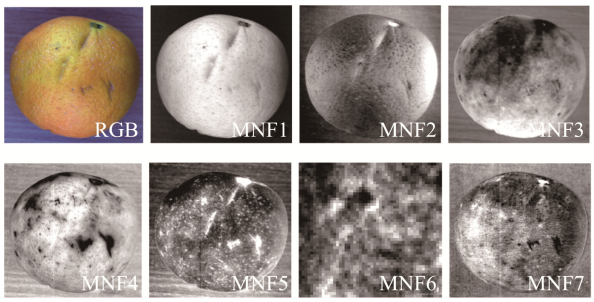


图 7 橙子侧面 RGB 原图及前 7 个 MNF 特征值灰度图

Fig.7 Original RGB image of the side of the orange and the grayscale images of the first 7 MNF feature values

2.4 基于光谱指数、阈值分割的苹果斑点、损伤区域快速识别

根据图 2 苹果黑斑区域、损伤区域、正常区域和背景的光谱反射率变化规律，构建归一化光谱指数 NDSI (723.6, 673.6)去除背景并掩膜，最后利用灰度密度分割，用红色代表苹果斑点、损伤区域，绿色代表损伤附近区域，如图 8 所示。从图 8 中可知，利用光谱指数、阈值分割的方法能快速、且较为准确地识别出苹果的斑点、损伤区域。

2.5 基于光谱指数、阈值分割的橙子斑点、损伤区域快速识别

根据图 3 橙子黑白斑区域、损伤区域、正常区域和背景的光谱反射率变化规律，构建光谱指数 NDSI (706, 590)去除背景并掩膜 MNF5，最后利用灰度密度分割，用红色代表橙子斑点、损伤区域，黄色代表轻微损伤或者微小的橙子斑点，如图 9 所示。从图 9 中可知，无论是橙子的正面

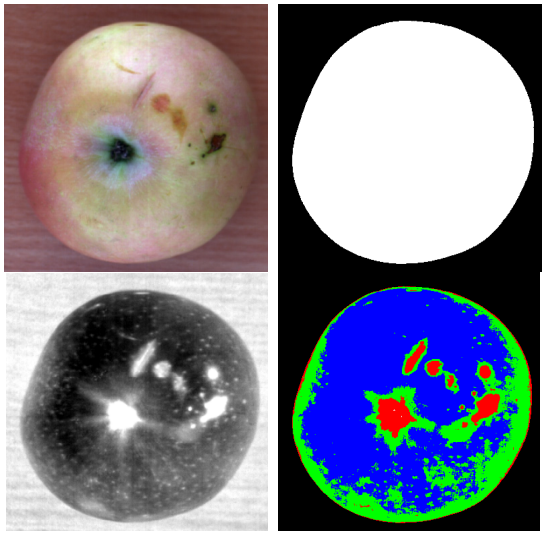


图 8 基于光谱指数、阈值分割的苹果斑点、损伤区域快速识别

Fig.8 Rapid identification of apple spots and damage areas based on spectral index and threshold segmentation

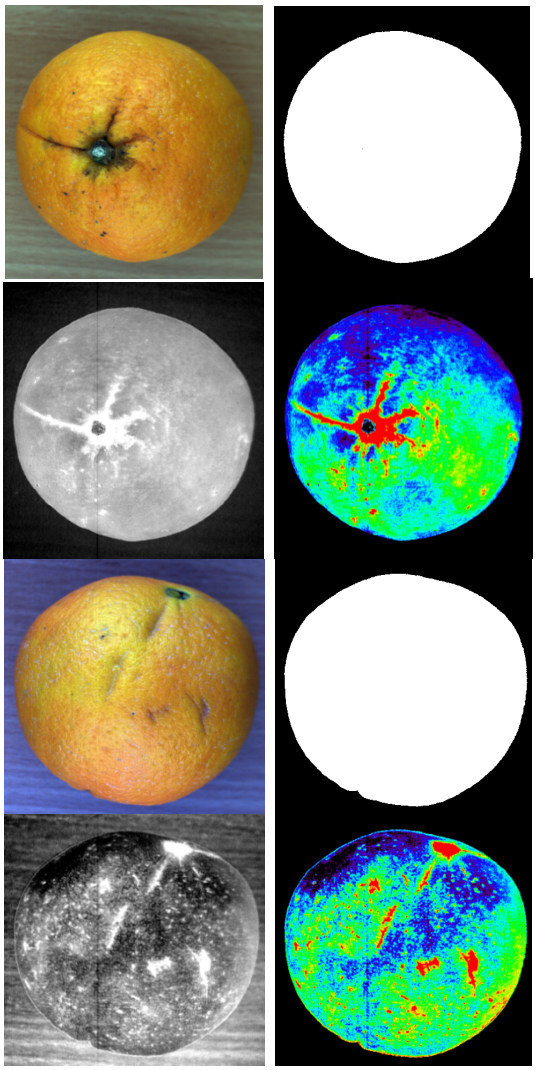


图 9 基于光谱指数、阈值分割的橙子斑点、损伤区域快速识别

Fig.9 Rapid identification of orange spots and damage areas based on spectral index and threshold segmentation

或者侧面，利用光谱指数、阈值分割的方法均能快速、较为准确地识别出其斑点和损伤区域。

3　结论

高光谱成像技术应用于水果斑点及损伤区域的快速识别已体现出其“图谱合一”的优越性。水果损伤和水果表皮的斑点颜色虽然能用肉眼识别，但是在工业生产，仅靠人力去挑选无损伤、无斑点的水果，既费时费力费财。利用成像高光谱技术，获取不同水果的光谱反射率，查找出其损伤、斑点的特征波段，利用特征波段构建光谱指数从而实现水果损伤、斑点区域的快速有效地识别，并达到自动化挑选优质水果的目的。本研究结果表明，运用高光谱成像技术，运用最小噪声分离、光谱指数等方法等，均可有效地识别水果损伤与斑点区域，但最小噪声分离方法较为复杂，运算速度较慢，不适合在工业生产上进行应用，而光谱指数算法简单，仅利用 2 个波段进行四则运算即可实现水果损伤和斑点的快速识别。

参考文献

[1] 薛建新, 张淑娟, 张晶晶. 基于高光谱成像技术的沙金杏成熟度判别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 300–307.
XUE JX, ZHANG SJ, ZHANG JJ. Ripeness classification of Shajin apricot using hyperspectral imaging technique [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 300–307.

[2] 曹晓峰, 任惠如, 李幸芝, 等. 高光谱技术结合特征波长/光谱指数对冬枣成熟度可视化判别[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2175–2182.
CAO XF, REN HR, LI XZ, *et al*. Discrimination of winter jujube's maturity using hyperspectral technique combined with characteristic wavelength and spectral indices [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2175–2182.

[3] MANCINI M, MAZZONI L, QADERI R, *et al*. Prediction of soluble solids content by means of NIR spectroscopy and relation with botrytis cinerea tolerance in strawberry cultivars [J]. Horticulturae, 2023, 9(1): 91.

[4] HODA G, SALAH E, OSAMA E, *et al*. Using RGB imaging, optimized three-band spectral indices, and a decision tree model to assess orange fruit quality [J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1588.

[5] MAGED M, MUHAMMAD M, ALJAZI A. Prediction of date fruit quality attributes during cold storage based on their electrical properties using artificial neural networks models [J]. Foods, 2022, 11(11): 1666.

[6] ADRIA N, JUN S, RAKHWE K, *et al*. Nondestructive detection of adulterated wolfberry (*Lycium Chinense*) fruits based on hyperspectral imaging technology [J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(4): e14293.

[7] MARINSAN RS, FERNANDEZNOCALES J, CEBRIANTARANCON C, *et al*. Monitorization of varietal aroma composition dynamics during ripening in intact *Vitis vinifera* L. tempranillo blanco berries by hyperspectral imaging [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(5): 2616–2627.

[8] LU HQ, LEE YR, LIU RD, *et al*. The research of spectral reconstruction for large aperture static imaging spectrometer [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2018, 42: 1229–1235.

[9] ZHANG LP, LUO FL. Review on graph learning for dimensionality reduction of hyperspectral image [J]. Geo-spatial Information Science, 2020, 23(1): 98–106.

[10] SHAO YY, WANG KL, XUAN GT, *et al*. Soluble solids content monitoring for shelf-life assessment of table grapes coated with chitosan using hyperspectral imaging [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 115: 103725.

[11] YUAN RR, LIU GS, HE JG, *et al*. Classification of Lingwu long jujube internal bruise over time based on visible near-infrared hyperspectral imaging combined with partial least squares-discriminant analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106043.

[12] 高升, 徐建华. 高光谱成像的红提总酸与硬度的预测及其分布可视化[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 327–336.
GAO S, XU JH. Hyperspectral imaging for prediction and distribution visualization of total acidity and hardness of red globe grapes [J]. Food Science, 2023, 44(2): 327–336.

[13] 赵杰文, 刘剑华, 陈全胜, 等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 106–109.
ZHAO JW, LIU JH, CHEN QS, *et al*. Detecting subtle bruises on fruits with hyperspectral imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 106–109.

[14] TALLADA JG, NAGATA M, KOBAYASHI T. Bruise detection using NIR hyperspectral imaging for strawberry (*Fragaria×ananassa* Duch.) [J]. Environment Control in Biology, 2006, 44(2): 133–142.

[15] 孟庆龙, 张艳, 尚静. 基于高光谱成像技术无损检测苹果表面缺陷[J]. 食品工业, 2019, 40(3): 131–134.
MENG QL, ZHANG Y, SHANG J. Nondestructive detection of defect on apples using hyperspectral imaging technology [J]. The Food Industry, 2019, 40(3): 131–134.

[16] 孟庆龙, 张艳, 尚静. 基于高光谱成像和模式识别的无损检测苹果表面损伤[J]. 光电子•激光, 2019, 30(3): 266–271.
MENG QL, ZHANG Y, SHANG J. Nondestructive detection of bruises on apples using hyperspectral imaging technology combined with pattern recognition [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2019, 30(3): 266–271.

[17] FOLCH FA, PRATS MJM, CUBERO S, *et al*. VIS/NIR hyperspectral imaging and N-way PLS-DA models for detection of decay lesions in citrus fruits [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2016, 156: 241–248.

[18] TAN WY, SUN LJ, YANG F, *et al*. Study on bruising degree classification of apples using hyperspectral imaging and GS-SVM [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 154: 581–592.

[19] SANDRA M, ALEJANDRO RO, NURIA A, *et al*. Detection of invisible damages in 'rojo brillante' persimmon fruit at different stages using

hyperspectral imaging and chemometrics [J]. Foods, 2021, 10(9): 2170.

[20] TANG Y, GAO S, ZHUANG J, *et al*. Apple bruise grading using piecewise nonlinear curve fitting for hyperspectral imaging data [J]. IEEE Access, 2020, 8: 147494–147506.

[21] YU K, ZHAO Y, LIU Z, *et al*. Application of visible and near-infrared hyperspectral imaging for detection of defective features in loquat [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(10): 3077–3087.

[22] XUAN G, GAO C, SHAO Y. Spectral and image analysis of hyperspectral data for internal and external quality assessment of peach fruit [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 272: 121016.

[23] 赛恒吉雅. 数字图像镜像变换方法的实现[J]. 信息科技, 2010, 18(2): 142–143.
SAI HJY. Implementation of digital image mirror transformation method [J]. Information Technology, 2010, 18(2): 142–143.

[24] 张东彦. 基于高光谱成像技术的作物叶绿素信息诊断机理及方法研究[M]. 杭州: 浙江大学, 2012.
ZHANG DY. Research on the mechanism and methods of crop chlorophyll information diagnosis based on hyperspectral imaging technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[25] LIU JG, WU CS, ZHANG B, *et al.* Spectral reflectance retrival of image data by imaging spectrometer PHI [J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(4): 290–294.

[26] NUMATA I, ROBERTS DA, CHADWICK OA, *et al.* Evaluation of hyperspectral data for pasture estimate in the Brazilian amazonusing field and imaging spectrometers [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 1569–1583.

[27] PETROPOULOS GP, ARVANITIS K, SIGRIMIS N. Hyperion hyperspectral imagery analysis combined with machine learning classifier for land use/cover mapping [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 3800–3809.

[28] WANG JJ, ZHANG Y, BUSSINK C. Unsupervised multiple end member spectral mixture analysis based detection of opium poppy fields from an EO-1 hyperion image in Helmand, Afghanistan [J]. Science of the Total Environment, 2014, 476: 1–6.

[29] ZHANG DY, ZHAO JL, HUANG LS, *et al.* Development and application of normalized spectral index based on hyperspectral imagery classification [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 586–594.

[30] 姚霞, 刘小军, 王薇, 等. 基于减量精细采样法估算小麦叶片氮积累量的最佳归一化光谱指数[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3175–3182.
YAO X, LIU XJ, WANG W, *et al.* Optimum normalized spectral index for estimating leaf nitrogen accumulation in wheat based on reduced precise sampling strategy [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3175–3182.

[31] GUO QD, PU RL, LI JL, *et al.* A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(19): 5430–5445.

[32] INOUE Y, PEÑUELAS J, MIYATA A, *et al.* Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO_2 flux measurements in rice [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 156–172.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)