

# 杨梅品质的无损检测进展

游力凡, 杨小峰, 孙一叶\*

温州大学, 浙江 温州

收稿日期: 2022年2月16日; 录用日期: 2022年3月23日; 发布日期: 2022年3月31日

## 摘要

我国是杨梅的发源地及主产区, 保证杨梅的食品品质是维护我国形象和消费者权益的重要一环。杨梅具有易损、易腐的特性, 杨梅生产中需保证时效性、克服复杂性和高成本性。因此, 本文对电子鼻检测技术、机器视觉技术、可见/近红外光谱检测技术和高光谱成像检测技术在杨梅生产中的应用进行了概述, 并对比各技术的利弊, 以及讨论了基于机器视觉技术的自动化分级装置的可行性, 为我国杨梅品质的商业化检测提出了新的思路和展望。

## 关键词

杨梅, 品质, 无损检测技术

# Progress on the Non-Destructive Determination of Quality in Bayberry Fruit

Lifan You, Xiaofeng Yang, Yiye Sun\*

Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: Feb. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

China is the birthplace and main producing area of bayberry. Ensuring the quality of bayberry fruit is an important part of maintaining image and consumer rights in China. Because bayberry is fragile and perishable, it is necessary to ensure timeliness, overcome complexity and high cost in bayberry production. Therefore, this work summarizes the application of electronic nose technology, machine vision technology, visible-near-infrared spectral technology and hyper-spectral imaging technology in bayberry fruit production, and their advantages and disadvantages are compared concerning the application cost and detection precision. Besides, the feasibility of au-

\*通讯作者。

tomatic grading device based on machine vision technology is discussed. This work puts forward new ideas and prospects for the detection of quality in Chinese bayberry fruit.

## Keywords

Bayberry Fruit, Quality, Non-Destructive Determination Technology

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

杨梅属木兰纲、杨梅科、杨梅属常绿乔木，其果实富含花青素、糖类和有机酸等，具备十分高的食用和药用价值，是市场上深受消费者喜爱的一种水果，原产于中国浙江余姚，发展至今在浙江、湖南、广东、广西、云南等中国东南部地区分布，品种多样，产量丰富[1] [2]。据浙江省统计局数据(图 1)，截止 2020 年浙江省内的杨梅种植面积高达 88 千公顷，约占省内水果种植面积 28%，产量达 65.5 万吨。近几年来杨梅的种植面积保持稳定，杨梅总产量呈上升趋势，这意味着果蔬从业者的种植技术和科技能力在逐年进步，收获果实的质量日趋新高，国内自销及出口海外的需求和品质要求同样随之提升。但因杨梅易损、易腐的性质，其运输、贮藏及分拣工作繁琐、复杂且要求严苛，导致杨梅在生产生活中存在诸多困难，如必须依托冷链技术、分拣、包装、保存成本高昂等。最关键的诱因之一是当下杨梅的采摘、分拣工作基本依托人工完成，随着杨梅产量及需求的逐步上升人工分拣导致时间成本和人工成本进一步增加，并且高强度的作业易造成误检、漏检的问题。因此对于杨梅的食品品质研究成为学者和相关从业者关注的热点问题。



**Figure 1.** The planting area and output of bayberry in Zhejiang Province from year 2014 to 2020

**图 1.** 2014~2020 年浙江省杨梅种植面积及产量

根据《中华人民共和国林业行业标准——杨梅质量等级》要求，杨梅的品质分级不仅仅由外部品质如果形、果面洁净度、果面伤痕、重量等指标决定，对于内部品质的检测也十分重要，如可溶性固形物、酸度等[3]。对于内部品质指标的检测，现只能以抽检、破坏性方式完成检测，但这势必会破坏杨梅的完整度，影响二次销售。要想要实现大批量的杨梅品质检测，必须要进行自动化在线式品质检测，得益于现代光电传感、微电子技术的发展，机器视觉技术、可见/近红外光谱分析技术、多/高光谱成像技术、电子舌/鼻技术等主要技术逐渐应用于食品、农产品的无损检测中。本文主要针对各项技术在杨梅实际生产应用所具优势和问题展开综述。

## 2. 检测方法

杨梅的生产生活中，以快速、简单、低成本的检测方式完成对杨梅品质的分级尤为重要，因此当代学者试图摒弃人工检测方法，探索了更多无损检测方法应用于杨梅的品质检测中。

### 2.1. 电子鼻检测

电子鼻技术(Electronic nose technology)自 90 年代起被学者用于检验果蔬成熟度、新鲜度等品质，其是利用气体传感器阵列识别气味转换为电子响应谱信号的系统，可模拟人类嗅觉感官感受相一致的结果。该设备由气体传感器阵列、信号预处理和模式识别系统三大部分构成，该技术原理即首先，样本得顶空气体由进样泵抽入气体传感器阵列的腔体中，待测气体与传感器发生反应后，由数据采集系统采集相应的化学信号，信号处理系统将该信号转换为电信号由计算机放大并输出。作为核心部件的气体传感器根据原理不同，可分为金属氧化物型、电化学型、导电聚合物型、光离子化型等多类型[4]。尹洁[5]等人对比了多类气体传感器对不同品种杨梅干果的识别，通过 P30/2、P30/1 传感器识别结果经主成分分析和线性判别分析，可较好地地区分炭梅、荸荠种、东魁和早荠四类品种的杨梅干果。说明电子鼻模拟生物嗅觉系统的方式可较好地鉴别杨梅干果品种，但仍鲜有学者使用该技术检测杨梅鲜果的品质。李依依[6]通过电子鼻结合气相色谱质谱联用(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)技术检测杨梅的挥发性成分，每隔 5 天进行一次实验，验证了电子鼻可以有效区分同一贮藏期不同贮藏方式的杨梅，也 GC-MS 可检测出杨梅贮藏期的主要挥发物为醛类、醇类和烯烃类，二者结合能够更准确的分析杨梅贮藏时期的风味品质。这意味着在未来的杨梅检测发展中，电子鼻检测可用于深入验证对杨梅鲜果的鲜度、成熟度品质的定性分析，但因该技术的在数据层面的局限性无法对果品相关品质完成定量分析以及检测果品外部品质。

### 2.2. 机器视觉

机器视觉(Machine vision)即用机器模拟人眼的测量和判断工作，主要由图像采集系统和图像处理系统构成，常见的采集系统分为 CMOS 和 CCD 两种相机，相机拍摄图像后传送至预设的图像处理系统完成图像处理工作，该系统分割待测对象的感兴趣区域，并提取区域内各图像数据信息，例如：像素数、灰度、颜色、物体识别、尺寸等，并用于机器学习完成检测工作。因该技术具有快速、便捷、直观、低成本等优点，在果蔬产品的分级及检测中得到了广泛应用。李思广[7]通过机器视觉拍摄杨梅图像完成预处理、灰度化和图像分割，检测杨梅鲜果的果径、圆度和灰度强度，实现了杨梅三级分类且平均准确率高达 92.7%，单幅图像的处理时间约为 0.45 秒。Hong Zheng [8]等人建立了一种基于分形维数的自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neural-fuzzy Inference System, ANFIS)用于判别杨梅瘀伤，机器视觉获得图像的 RGB 色彩强度作为数据变量，该系统判别健康水果的准确率为 100%，瘀伤水果为 78.57%，总分类率为 90%，验证了机器视觉技术在杨梅外部品质的检测和分类的可行性及可靠性。Jie Feng [9]等人对机器视觉拍摄的 50 个杨梅的图像完成 6 种颜色空间(RGB, LAB, CMY, HIS, I1I2I3, YCbCr)数值转换，应用偏最小

二乘回归(PLSR)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)模型完成对杨梅内部品质的定量分析,可溶性固形物含量(Soluble Solids Content, SSC)的最优回归模型为基于 LAB 颜色空间的 PLSR 模型(相关系数  $R = 0.90$ , 均方根误差  $RMSE = 0.91$ ), pH 值的最优回归模型为基于 CMY、I1I2I3、YCbCr 颜色空间的 PLSR 模型( $R = 0.96$ ,  $RMSE = 0.96$ ), 虽然该实验样本数较少偶然性较大, 但这是机器视觉在杨梅内部品质检测方面的突破。综上所述, 机器视觉不仅仅在水果检测方面被广泛应用, 学者利用该技术在杨梅鲜果的检测中也颇有收获。Jie Feng 的研究成果也证明快速、低成本的机器视觉无损检测技术或有可能在杨梅实际生产生活中完成内部和外部品质的检测, 该技术的引入不仅使分级速度加快并且节约了大量的成本, 但在未来的杨梅检测发展中该技术的准确性和稳定性还有很大的提升空间。

### 2.3. 可见/近红外光谱

可见/近红外光谱技术(Visible-Near Infrared Spectroscopy, Vis-NIRS)通过发出可见 - 近红外光源照射样本, 这是一种介于可见光和中红外光之间的电磁波(780~2526 nm)如图 2, 其基本原理该谱区含氢基团的倍频与合频吸收信息且包含了有机物质的组成和分子结构的信息, 不同的含氢基团有不同的能级, 照射样本后的光携带信息被检测器分析, 所表现的可见/近红外光谱图中的吸收波长有明显差别, 通过图谱中吸收峰的位置和强度即可确定组分含量和进行定性、定量分析。在农产品/食品领域, 该技术已被学者广泛应用与水果、大米、小麦等农作物的内部品质检测[10] [11]。Yuan [12]等基于 Vis-NIRS 便携式仪器测得的杨梅光谱信息通过结合竞争性加权算法连续筛选变量, 构建的一系列 PLS 模型进行融合, 较好地拟合了样本内部的可溶性固形物含量, 预测集  $R = 0.85$ ,  $RMSEP = 0.78$ , 相比于常规 PLS 模型, 预测误差降低了 7%。Xie [13]等通过台式傅里叶变换近红外光谱仪(FT-NIR)检测并定量分析杨梅汁中的葡萄糖、果糖和蔗糖含量, 通过二阶导数处理光谱数据对于蔗糖含量的定量效果最佳, 其模型  $R = 0.9931$ , 这也证明了 NIRS 技术具有定量检测杨梅微量成分的能力。因水果找大部分组分的主要光谱相应均在近红外范围内, 且可见/近红外光谱技术的谱图信息含量更丰富, 故在果蔬检测方面具有比电子鼻及机器视觉技术更高的稳定性和准确性; 另一方面, 杨梅属无表皮特征水果, 内部组分的光谱响应可更好地表现在表面光谱, 因此可见/近红外光谱在无损检测的性能方面更加优于电子鼻技术和机器视觉技术的。但在实际生产生活中, 该技术的检测成本及维护成本高于机器视觉技术, 这为该技术的推广提出了新的难题; 并且, 该技术无法检测杨梅鲜果外部品质, 如: 重量、尺寸、成熟度等, 如何平衡成本与内外部品质的综合性、稳定性、准确性开发或将成为未来杨梅品质检测领域的热点问题。

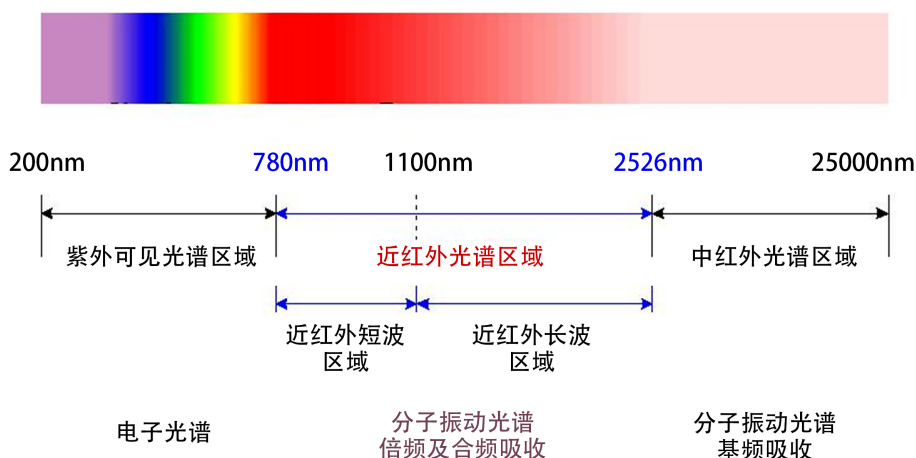


Figure 2. The distributions of different frequency from UV to middle NIR

图 2. 紫外到中红外光谱分布区间



## 2.4. 多/高光谱成像检测

多/高光谱图像技术(Multi/Hyper-spectral imaging technology)融合了光谱学、机器视觉、计算机图像学等多学科优点, 具有更高的光谱分辨率和波段范围, 且该范围内所包含的每一波段都有相应波长的光谱图像, 可同时捕获检测对象的空间信息和光谱信息, 具有“图谱合一”的特点充分地反映物体信息[14]。图 3, 多/高光谱图像数据由特定波长范围内的一系列波长下对应的光学图像组成三维图像数据块, 其中二维平面为图像信息, 第三维代表波长信息, 图像中每一像素都附带其空间位置信息及一条连续完整的反射光谱曲线, 即每一像素都可用于该空间位置处物质内部的化学组分信息。Siedliska [15]等人分别用灰霉菌和炭疽菌接种两种不同品种草莓果实, 与未接种草莓作对照, 利用高光谱成像检测技术通过反向传播神经网络(BNN)模型分类真菌种类, 准确率高达 97%。因高光谱成像检测技术的所需成本高昂且需大功率光源能量易损伤水果, 因此该技术在杨梅检测的成果并不多。王晨冬[16]采用高光谱图像对杨梅内部的糖度及酸度完成定量分析, 糖度最优建模  $R = 0.75$ ,  $RMSE = 1.399$ , 酸度模型  $R = 0.66$ ,  $RMSE = 0.1329$ , 并进行了杨梅品质光谱图像检测的低成本化研究, 即降低光谱分辨率结合 RGB 彩色图像及光谱信息转换的光谱反射率图像, 完成杨梅糖度及酸度的定量分析, 并验证了当特征波段光谱分辨率降低为 32 nm 后的检测方案是可行的。高光谱成像检测技术的光谱分辨率在  $10^{-2} \lambda$  数量级范围, 这意味着光谱数据和图像数据所包含的庞大信息量将数据采集、处理和存储难度进一步提升, 但是其检测的高准确率使该技术在水果试验性探索中被较多应用[14]。在杨梅的分级中使用该技术首先要考虑试验所需高能光源如何降低杨梅灼伤且能量又足够表征样本内部品质信息, 其次需解决低成本、高抗干扰性的技术应用优化问题。此时, 借助于滤波片式的多光谱成像技术被提及, 主要是设置特定波段的高通滤波片使光信息进入普通相机进行灰度成像, 从而形成一个多谱段的光谱图像数据库, 目前这一思想已经在苹果等大种果蔬中展开应用, 杨梅鲜果的检测应用较少。

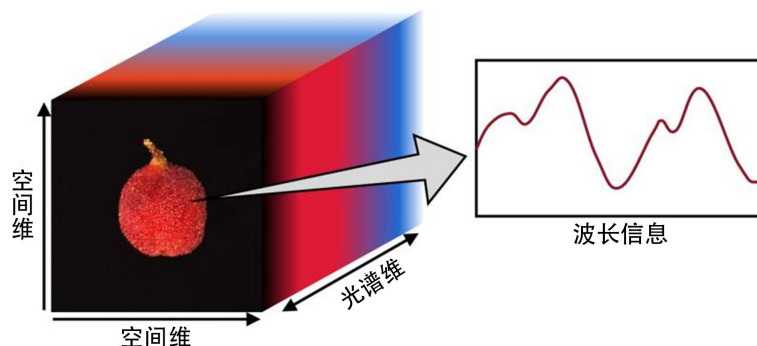


Figure 3. Multi/Hyperspectral image data cube  
图 3. 多/高光谱图像立方体数据块示意图

## 3. 检测系统

伴随着“农业 4.0”时代, 简单的人工检测或无损检测速度已逐渐无法满足生产者或消费者的需求, 为更快速、更便捷地完成杨梅的生产、分级, 自动化分级设备成为必然的选择。王宇杰[17]设计了基于机器视觉的苹果分级系统, 该系统由 DSP + ARM 控制器、工业相机、传输带、光源等组成, 根据苹果的尺寸完成三级分级自动化处理, 其准确率与人工准确率吻合度高达 96.8%, 可推广实现。自动化分级系统在果蔬的生产生活中凸显优势, 在避免人工长期检测造成误差的前提下, 降低了运营成本、提高了分级效率, 是未来生产市场不可或缺的热点。如图 4, 李思广[7]设计了基于机器视觉的杨梅自动检测分级系统, 该系统由光照室(0.4 m × 0.3 m × 0.5 m)、计算机视觉系统及分级装置组成, 光照室内壁黑色, 两侧各

安装白炽灯光源,顶部安装一台分辨率  $640 \times 480$  的 CCD 相机拍摄  $0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$  的彩色图像,由搭载 Linux 操作系统及 Matlab10.0 视觉软件的上位机完成图像处理。该系统可完成以果径、圆度和颜色深度为指标的杨梅分级工作,但未给出详细的分级装置设计方案。这也表明由于杨梅的易损性、易腐性等特性导致在杨梅品质检测领域仅提出了自动化系统的概念,极少学者完成杨梅检测系统的搭建工作,且李思广提出的系统在检测技术、检测指标和分级装置上还有更大的优化空间,这也将是未来学者可以深入研究的方向。

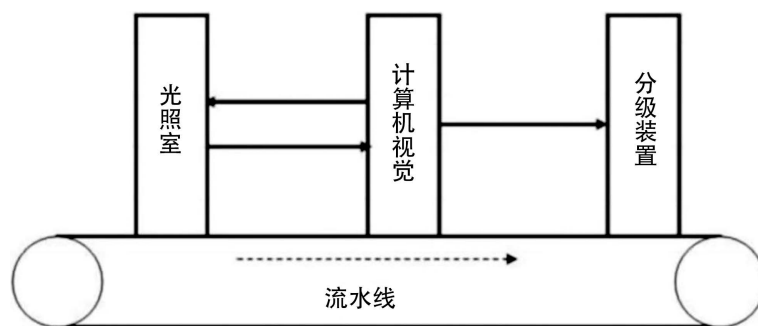


Figure 4. Schematic diagram of detection and classification system  
图 4. 检测分级系统示意图

#### 4. 发展前景

杨梅的品质检测指标与大部分水果品质指标相似,外部品质指标包括大小、颜色、重量等,内部指标包括糖度、酸度、含水量等,传统的人工检测仅仅凭借主观意识完成杨梅的简单分级,由杨梅的外部特性如颜色深浅、肉粒损伤等方法完成判断,往往无法满足消费者对于杨梅内部品质的需求。无损检测在果蔬分级中的成功为杨梅品质检测提供了新的思路,电子鼻检测技术、机器视觉技术、可见/近红外光谱检测技术以及多/高光谱成像技术被更多的应用。结合广大学者研究成果和杨梅市场实际需求,机器视觉技术无疑是当下杨梅检测市场最适宜应用的无损检测技术,其具备快速、便捷、低成本的特性,并且已验证杨梅的品质检测中该技术可用于探索杨梅内部及外部品质的综合检测。电子鼻检测技术则仅适于完成鲜度、成熟度等指标的品质分类,并且其准确率在众多无损检测技术中最低。电子鼻检测技术与可见/近红外光谱技术则都无法完成对杨梅鲜果外部品质的检测,但可见/近红外光谱技术由于其对杨梅内部组分的高识别率,可稳定、高效、准确地检测杨梅的糖度、酸度等内部品质。在杨梅实际生产生活中,该技术与多/高光谱成像技术一样存在实践成本过高的问题,不适用于应用于杨梅的生产线中,但对于便携式或优化的可见/近红外光谱检测技术与多/高光谱成像技术的开发或将成为未来杨梅检测市场的热点,低成本化的研究将稳定性高、准确率高的无损检测技术引入杨梅检测市场,杨梅市场的前景也将越来越广阔。

#### 5. 总结

我国作为果业大国,水果种植面积和产量近年来一直稳居世界第一,且作为杨梅的发源地和主产区,无论是对于国内自销或是出口国外,杨梅内外品质的保障都是被关注的重点。本文结合杨梅市场及检测技术应用进行了概述和总结。电子鼻检测技术可通过分析杨梅散发的气味分类杨梅不同的品种;可见/近红外光谱检测技术能稳定、可靠检测杨梅的内部品质,但同电子鼻检测技术无法完成外部品质的检测;机器视觉可有效地识别杨梅外部品质如果径、颜色深度、瘀伤等特征,并且在 SSC、pH 值等内部品质的检测也有所突破,但其准确率有待提高;高光谱成像检测技术可以稳定、可靠地完成杨梅内外部品质的

检测,但其成本高昂、条件苛刻以及无法应用在杨梅的实际生产线中仍是难题;因此机器视觉在现有条件下无疑是一种可行的方案,以该技术搭载分级装置应用于杨梅的生产生活中具实用性、经济性,随着技术的成熟,若融合可见/近红外光谱检测技术相信杨梅的分级策略会越来越成熟,前景越来越广阔。

## 参考文献

- [1] 林媚,平新亮,等.东魁与荸荠种杨梅品质指标的比较[J].浙江农业科学,2020,61(1):62-64.
- [2] 方波,武峥,等.杨梅果实生物活性物质研究进展[J].南方农业,2018,12(28):29-34.
- [3] 浙江省林业科学研究院.LY/T1747-2009.杨梅质量等级[S].杭州:国家林业局,2009.
- [4] 漆明星,孙明.电子鼻的发展与应用综述[C]//中国畜牧兽医学会.中国畜牧兽医学会信息技术分会第十二届学术研讨会论文集:2017年卷.河南:中国畜牧兽医学会,2017:24-28.
- [5] 尹洁,朱丽云,等.四个品种杨梅干果风味的电子鼻分析[J].中国南方果树,2016,45(3):31-34.
- [6] 李依依,张鹏,等.精准相温结合mMA对杨梅挥发性成分的影响[J].包装工程,2020,41(11):8-16.
- [7] 李思广.基于计算机视觉的杨梅自动检测分级[J].农机化研究,2018,9(9):204-207.
- [8] Zheng, H., Jiang, B. and Lu, H.F. (2020) An Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Detection of Bruises on Chinese Bayberry (*Myricarubra*) Based on Fractal Dimension and RGB Intensity Color. *Journal of Food Engineering*, **401**, 663-667. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.031>
- [9] Feng, J., Jiang, L.L., Zhang, J.L., et al. (2020) Nondestructive Determination of Soluble Solids Content and pH in Red Bayberry (*Myricarubra*) Based on Color Space. *Journal of Food Science and Technology*, **57**, 4541-4550. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04493-4>
- [10] 徐惠荣.基于可见/近红外光谱的水果糖度检测模型优化及应用研究[D]:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2010.
- [11] 孙通.梨可溶性固形物和酸度的可见/近红外光谱静态和在线检测研究[D]:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2011.
- [12] Yuan, L.M., Mao, F., Huang, G.Z., et al. (2020) Models Fused with Successive CARS-PLS for Measurement of the Soluble Solids Content of Chinese Bayberry by vis-NIRS Technology. *Postharvest Biology and Technology*, **169**, Article ID: 111308. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111308>
- [13] Xie, L.J., Ye, X.Q., Liu, D.H., et al. (2009) Quantification of Glucose, Fructose and Sucrose in Bayberry Juice by NIR and PLS. *Food Chemistry*, **114**, 1135-1140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.076>
- [14] 申亚其,李松林,等.高光谱图像技术在水果品质无损检测种的研究进展[J].林业机械与木工设备,2021,49(3):4-9.
- [15] Baranowski, A.S.P. and Zubik, M. (2018) Detection of Fungal Infections in Strawberry Fruit by VNIR SWIR Hyperspectral Imaging. *Postharvest Biology and Technology*, **139**, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.01.018>
- [16] 王晨冬.基于光谱图像的杨梅品质检测机理及仪器研究[D]:[硕士学位论文].杭州:杭州电子科技大学,2021.
- [17] 王宇杰.基于机器视觉的水果分级系统设计[J].包装工程,2021,42(3):235-239.