

# 基于计算机视觉和嗅觉的菠菜叶绿素含量检测方法研究

黄星奕, 徐海霞, 王顺, 潘思慧, 田潇瑜

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 以叶绿素含量为评价菠菜新鲜度的参考指标, 开发菠菜采后品质无损检测方法。采用计算机视觉和电子鼻分别获取储藏期内菠菜的图像和气味信息。分别提取视觉、嗅觉信息的主成分作为模型的输入, 以叶绿素含量的化学检测值作为模型的输出, 采用误差反向传播神经网络建立菠菜叶绿素的定量预测模型。试验显示, 以视觉信息为输入量的模型测试结果: 训练集和测试集的均方根误差 (RMSE) 分别为 0.1978 mg/g 和 0.2147 mg/g, 相关系数 (R) 分别为 0.8457 和 0.7995。以电子鼻信息为输入量的模型测试结果: 训练、测试集的 RMSE 分别为 0.3119 mg/g 和 0.3032 mg/g, R 分别为 0.7013 和 0.6905。以视觉和嗅觉融合信息为输入量的模型测试结果: 训练、测试集的 RMSE 分别为 0.1759 mg/g 和 0.2121 mg/g, R 分别为 0.8888 和 0.8736, 精度比两个单一技术均有所提高。研究表明, 利用计算机视觉和电子鼻技术预测菠菜叶绿素含量的方法是可行的, 采用融合技术有助于提升模型的预测精度。

**关键词:** 菠菜; 计算机视觉; 电子鼻; 融合技术; 人工神经网络; 叶绿素

文章编号: 1673-9078(2017)5-247-252

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.5.039

## Study on Spinach Chlorophyll Detection Method Using Computer Vision and Artificial Olfactory Sensor

HUANG Xing-yi, XU Hai-xia, WANG Shun, PAN Si-hui, TIAN Xiao-yu

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Developing a rapid and nondestructive detection method for evaluating the quality of post-harvest spinach is essential for spinach producers and retailers. Typically, chlorophyll content was used as a reference index for spinach freshness, and the samples used in this study were stored at 4 °C for 12 d before being assessed by computer vision (for sample images) and electronic nose (for sample odors). Feature variables extracted from image and odor information were analyzed by principal component analysis (PCA) method. A chlorophyll content prediction model was established with back propagation artificial neural network (BPANN). The principal components (PCs) were used as the input parameters for the prediction model, and the chlorophyll content was used as the output. Experiments showed that the optimal prediction model of BPANN based on computer vision was obtained with four PCs. The root-mean-square error (RMSE) was 0.1978 mg/g and 0.2147 mg/g, and the correlation coefficient (R) was 0.8457 and 0.7995 for training and prediction sets, respectively. The results of the prediction model using BPANN based on the electronic nose showed that the RMSE was 0.3119 mg/g and 0.3032 mg/g, and R was 0.7013 and 0.7493 for training and prediction sets, respectively. The results of the BPANN model based on the fusion technique showed that the RMSE was 0.1759 mg/g and 0.2121 mg/g, while R was 0.8888 and 0.8736 for training and prediction sets, respectively. The prediction accuracy of the fusion technique was improved compared with that of either of the single detection methods. Overall, the results showed that it is feasible to predict the chlorophyll content of spinach during storage using computer vision and electronic nose, and the fusion technology is helpful in improving the prediction accuracy.

**Key words:** spinach; computer vision; electronic nose; fusion technology; artificial neural network; chlorophyll

收稿日期: 2016-08-24

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)项目 (BE2015308); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (14KJA550001); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家自然科学基金项目 (31671932); 江苏省第四期“333工程”资助项目 (BRA2015320)

作者简介: 黄星奕 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事食品农产品无损检测技术研究

蔬菜是人们日常膳食中不可缺少的部分，是重要的植物性食品。菠菜是深受人们喜爱的典型绿叶蔬菜，其叶片、嫩茎皆可食用，味美色鲜，含丰富的维生素和矿物质元素，是我国冬春季节供应的主要蔬菜品种之一<sup>[1]</sup>。由于我国蔬菜产业发展缓慢，蔬菜腐烂损耗率高达 30%左右。菠菜采后代谢旺盛，极易失水萎蔫甚至腐烂，菠菜组织内的硝酸盐也会转变为对人体有毒害作用的亚硝酸盐<sup>[2]</sup>。随着人们生活水平的提高，对蔬菜产品品质的要求也越来越高，因此建立一种快速无损检测蔬菜品质的方法尤为重要。

外观和气味常用于蔬菜品质的评判。新鲜菠菜叶片面积大、含水率高，采后代谢旺盛。叶绿素是菠菜的重要营养成分，也是其呈色的主要物质。叶绿素降解导致其从亮绿色变成橄榄绿带些褐色。同时菠菜中产生特殊香气的化学物质也容易分解与挥发。伴随菠菜采后发生衰变，叶绿素易分解、不稳定，因而成为评价菠菜新鲜度品质变化的重要指标<sup>[3]</sup>。随着近年科学技术的发展，蔬菜的品质检测技术，尤其是无损检测技术的应用逐渐凸显其检测优势。其中，计算机视觉技术和电子鼻技术是两种常用的非破坏性检测方法。计算机视觉法成本低、检测速度快，电子鼻法则利用被测物的整体气味信息，客观性强、相关性高，因而成为国内外研究热点。如：计算机视觉技术被应用于苹果、香蕉、葡萄的成熟度检测，电子鼻技术则被应用于番茄、柑橘、甜瓜的新鲜度检测中等等<sup>[4-8]</sup>。但将这两种技术应用于菠菜的新鲜度品质检测中尚未见报道。

本研究尝试采用计算机视觉和电子鼻两种无损检测方法，获取 4℃ 储藏条件下菠菜的图像信息和气味信息，以叶绿素含量的化学检测值为参照，建立神经网络模型对叶绿素含量进行定量预测。同时采用融合技术以提高检测结果的准确度，为储藏期间内菠菜新鲜度的快速无损检测提供可行方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

菠菜样本由当地大田中挖取，选择健康饱满、大小一致、无机械损伤、无烂叶的新鲜整株菠菜，共采集 144 株。放入保鲜袋置于冷箱中带回实验室，于 4℃ 冰箱内储存。

### 1.2 试验装置

试验所用图像采集系统由课题组自行搭建而成，如图 1 所示，由相机、光源、载物台和计算机组成。

其中，所用相机为德国 Allied Vision Technologies (AVT) 公司的千兆网口工业数字相机 Manta G-125C。光源则选取了四条长度为 50 cm 的同款 LED 灯带，两两一组平行放置于载物台两侧，发出的光线在拱形光箱内可形成漫反射，从而使光照均匀性一致，且菠菜边缘几乎无阴影存在。

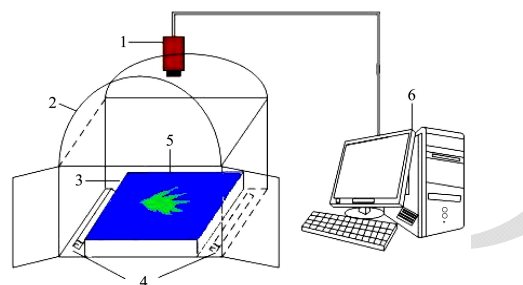


图 1 图像采集系统示意图

Fig.1 the schematic diagram of image acquisition system

注：1，相机；2，光照箱；3，载物台；4，LED 灯；5，菠菜样本；6，计算机。

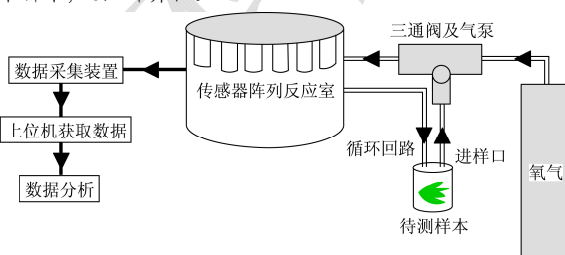


图 2 电子鼻系统结构示意图

Fig.2 The schematic diagram of the electronic nose system

电子鼻系统为本课题组自主研发，如图 2 所示。其传感器阵列包括 12 个费加罗公司的金属氧化物气敏传感器，均匀分布于反应室内的同心圆上。各传感器所敏感的挥发气体类型不同，因而能够识别较为复杂的气体。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 图像信息获取

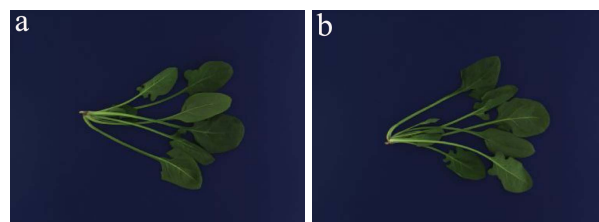


图 3 菠菜图像

Fig.3 Images of spinach

注：a，正面图像；b，反面图像。

预实验结果显示，采用蓝色背景更易于目标图像的分割。为获取全面的菠菜外观信息，将每份菠菜翻转 180° 以获取其正反两面图像，如图 3 所示。试验从

挖取菠菜当天开始,每天随机选取 12 株样本用于完成图像信息的获取,整个试验周期持续 12 d。最终获得所有样本 144 株菠菜的正反面图像,共 288 张。

### 1.3.2 电子鼻数据采集

将每株菠菜样本置于 500 mL 洁净烧杯中,用保鲜膜封口,室温下集气 1 h 后进行电子鼻数据的采集。采集时间间隔为 1 s,每个样本采集 380 个数据,每次测样后通入氧气 1 min 用于传感器还原。所测样本为当天完成图像采集的 12 株菠菜,连续检测 12 d,共 144 份样本。

### 1.3.3 叶绿素含量的测定

采用乙醇提取法测定叶绿素含量。待试验当天的 12 株菠菜样本完成图像采集和气体检测之后,立即进行叶绿素含量的测定。

### 1.4 数据处理方法

原始数据归一化后利用主成分分析方法对多个特征变量进行数据压缩,所得主成分数作为误差反向传播人工神经网络(back propagation artificial neural network, BPNN)的输入参数,分别建立基于图像信息、气味信息及融合信息的叶绿素定量预测BPNN模型。采用含输入层、隐含层和输出层的三层网络结构,选择tansig函数作为模型作用函数;训练过程中学习因子和动量因子分别为0.1和0.7;隐含层节点的数目通过探索法确定,即:建立隐含层节点数依次为5~20的预测模型,以训练集均方根误差(Root Means Square Error of Calibration Set, RMSEC)最小为选择目标,确定最优隐含层节点数。选取均方根误差(RMSE)和相关系数作为模型性能评价指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶绿素随贮藏时间的变化分析

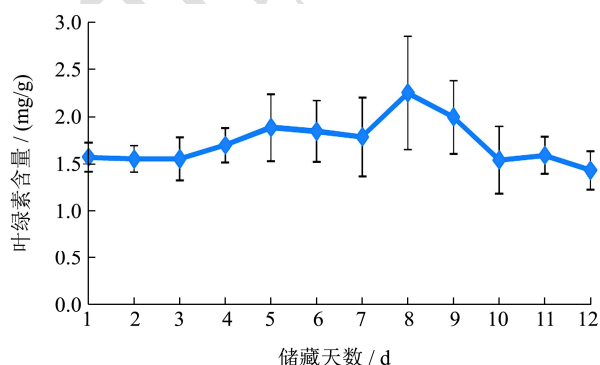


图 4 4 °C 贮藏下菠菜叶绿素含量的变化

Fig.4 Changes in spinach chlorophyll content while stored at 4 °C

图 4 为储藏期内每天 12 株菠菜样本叶绿素含量平均值的变化情况。该图显示菠菜叶绿素含量一直处于波动状态,在第 4 d 有微弱提升,这可能是由于菠菜采后体内酶类物质激活、营养物质再分配的结果。而在第 8 d 样叶绿素含量突然有较大幅度提升,可能是由于这一期间菠菜叶片水分失水率较高,而叶绿素的分解还维持在较低水平,导致单位重量菠菜叶片的叶绿素含量有一定升高。

### 2.2 基于计算机视觉的菠菜叶绿素定量预测

#### 2.2.1 图像分割

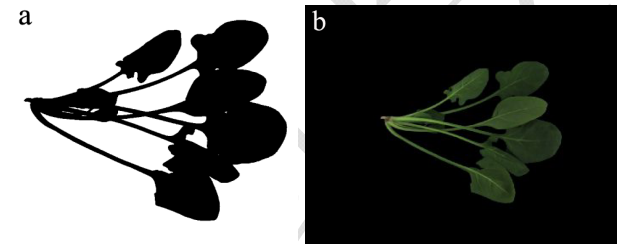


图 5 图像分割

Fig.5 Image segmentation

注: a, 二值图像; b, 分割后彩色图像。

原始图像平滑后,对其 RGB 和 HSV 颜色模型下的各单通道图像采用大津阈值分割。比较各单通道下灰度直方图和分割效果发现,HSV 颜色模型下 H 通道分割完整地保留了菠菜图像,同时避免了过度分割。

#### 2.2.2 图像感兴趣区域提取



图 6 叶片图像分割

Fig.6 Segmentation of leaf blade

注: a, 菠菜 2/3 区域; b, 开运算区域; c, 区域 a 与区域 b 作差; d, 茎秆区域; e, 叶片区域; f, 叶片图像。

由于菠菜在储藏期间, 叶片易发黄皱缩, 因而将叶片作为待提取的感兴趣区域。结合叶片分布特点, 截取整株菠菜后 2/3 区域待处理。因直接开运算去除茎秆区域会导致叶片信息不完整, 提出先分割茎秆区域, 再通过区域相减操作以获取完整叶片的思路。主要操作过程如图 6 所示。图 6a 为整株菠菜后 2/3 区域, 对此区域进行开运算操作, 所得结果如图 6b 所示。由图可见, 叶片左侧的茎秆区域得到去除, 但同时叶尖等纤细部分也被消除, 由此可知直接开运算操作无法获得完整的叶片区域。将图 6a 中的区域与图 6b 中的区域作差, 得到包括茎秆及叶尖部分的区域, 如图 6c 所示。以面积为特征参数筛选出去除叶尖等小物体干扰的茎秆区域, 图 6d 所示即筛选所得的茎秆区域。再将图 6a 与 6d 中的区域作差, 则获得完整的叶片区域, 见图 6e。将图 6e 所示的叶片区域与原始彩色图像相乘所得图 f 即为不含茎秆部分的叶片区域图像。

### 2.2.3 图像特征提取

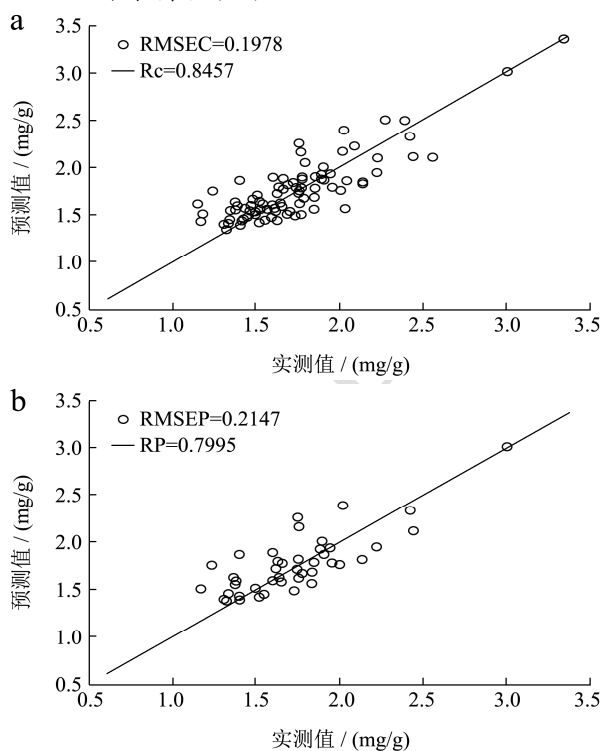


图 7 基于计算机视觉的 BPANN 模型预测结果

Fig.7 Results of the BPANN model based on computer vision

注: a, 训练集结果; b, 测试集结果。

分别从 RGB、HSV 和 Lab 三个颜色模型中提取各单通道图像的灰度平均值和标准偏差, 即  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{H}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\bar{V}$ ,  $\bar{L}$ ,  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $R_{\delta}$ ,  $G_{\delta}$ ,  $B_{\delta}$ ,  $H_{\delta}$ ,  $S_{\delta}$ ,  $V_{\delta}$ ,  $L_{\delta}$ ,  $a_{\delta}$ ,  $b_{\delta}$ , 用于组成描述菠菜叶片颜色信息的特征变量。将向后剔除法作为变量筛选方法<sup>[9]</sup>。在所提

取 18 个特征变量的基础上, 分别对  $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$  值,  $\bar{H}$ 、 $\bar{S}$ 、 $\bar{V}$  值及  $\bar{L}$ 、 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$  值进行加减乘除等多种组合变换, 增加用于筛选的输入变量, 以提取出更加有效的颜色特征变量。利用 SPSS 18.0 中文版“分析”-“回归”-“线性”命令, 采用“向后剔除法”进行多元线性回归分析。向后剔除法是指先建立全模型, 然后选择一个偏回归平方和最小的变量, 作 F 检验, 若无统计学意义则将其剔除, 重复这一过程直到所有自变量都不能剔除为止。在剔除过程中不对自变量进行独立性检验, 与因变量相关程度较高的自变量均会被引入方程中。最终得到 6 个颜色变量用于建模分析, 分别为:  $\bar{H}$ 、 $\bar{H} \times \bar{S}$ 、 $\bar{H} / \bar{S}$ 、 $\bar{S} / \bar{V}$ 、 $g+b$ 、 $b/g$ 。其中,  $g = \bar{G} / (\bar{R} + \bar{G} + \bar{B})$ ,  $b = \bar{B} / (\bar{R} + \bar{G} + \bar{B})$ 。

### 2.2.4 基于计算机视觉的神经网络分析

对于所提取的 6 个颜色特征变量, 按照 1.4 所述方法建立 BPNN 定量预测模型, 按 2:1 划分训练集和预测集数量, 分别为 96 个训练集、48 个测试集。通过优化隐含层节点数发现, 最优隐含层节点数为 12, 此时最佳主成分数为 4, 模型结果如图 7 所示, RMSEC 为 0.1978 mg/g, 相关系数  $R_c$  为 0.8457; 测试集均方根误差 (Root Means Square Error of Prediction set, RMSEP) 为 0.2147 mg/g, 相关系数  $R_p$  为 0.7995。从结果可以看出, 利用计算机视觉结合 BPNN 神经网络可以较好地预测菠菜中的叶绿素含量, 可为菠菜的新鲜度快速检测提供依据。

菠菜属于绿色蔬菜, 其绿色来自叶绿素, 而叶绿素对酸、热、光和氧化等很敏感, 储藏中极易褪色或变色, 失去鲜绿状态<sup>[10]</sup>。因此可以利用计算机视觉技术, 通过分析菠菜储藏期内的图像信息变化, 实现对菠菜叶绿素的预测分析。

## 2.3 基于电子鼻的菠菜叶绿素的定量预测

### 2.3.1 电子鼻传感器阵列优化

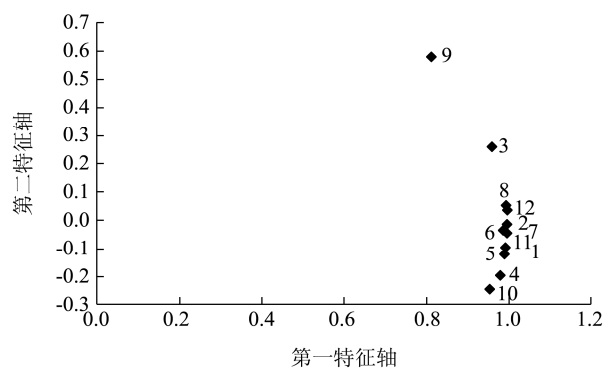


图 8 因子载荷分析图

Fig.8 Factor loading analysis

因子载荷分析作为一种常用的变量分类方法, 将

电子鼻的各个传感器当成变量来对其进行分类,为传感器的优化提供了依据<sup>[11]</sup>。因子载荷分析图如图8所示。传感器9和3对模式识别有较高贡献率,而传感器4和10在第1特征轴方向上有较高贡献率,但在第2特征轴方向,贡献率相比较低。传感器8、12、2、7和传感器11、6,以及传感器1、5分别具有相近的负载因子,因而去掉原阵列中的在第2特征轴方向的贡献率略低的传感器12、2、7、6及5,由传感器9、3、8、11、1、4、10组成新的阵列用于进一步检测分析。

### 2.3.2 基于电子鼻的神经网络分析

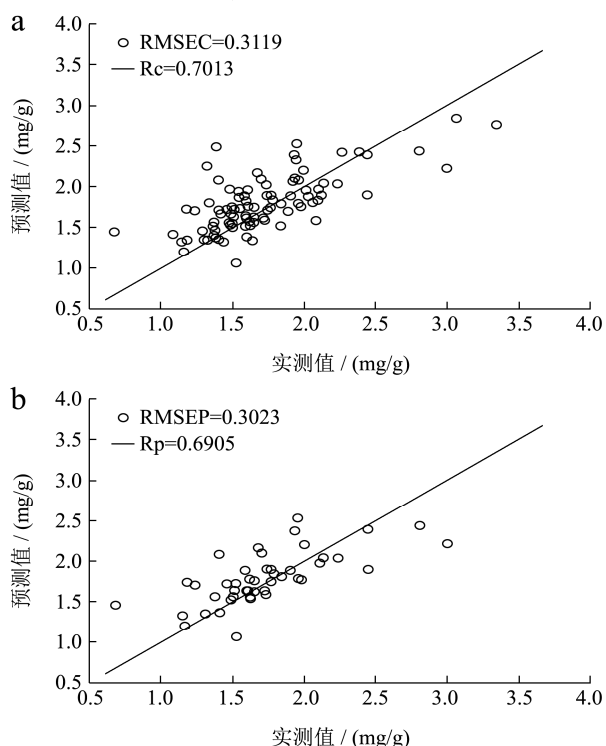


图9 基于电子鼻的BPANN模型预测结果

Fig.9 Results of the BPANN model based on E-nose

注: a, 训练集结果; b, 测试集结果。

将优化后7根传感器响应信号的稳定值,即最后50次采样所得响应值的平均值作为特征值。按1.4所述方法建立BPNN模型,训练集和测试集的选择方法同2.1.4。结果显示,最优隐含层节点数为13,此时最佳主成分数为4。模型结果如图9所示, RMSEC为0.3119 mg/g,  $R_c$ 为0.7013; RMSEP为0.3023 mg/g,  $R_p$ 为0.6905。

叶菜类蔬菜中含有的使叶菜含有特殊芳香气味的物质大多不稳定,储藏中易分解挥发,导致蔬菜特有香气丧失甚至产生异味<sup>[12,13]</sup>。利用电子鼻技术,获取菠菜储藏期内的气味信息,将气味信息与菠菜品质相关联,间接对叶绿素含量进行预测分析。模型结果显

示,电子鼻技术预测菠菜叶绿素含量是可行的,但效果较计算机视觉略差。

### 2.4 基于融合技术的菠菜叶绿素的定量预测

信息融合技术是指将不同传感器的信息合并成综合信息,以得到高品质的有用信息,实现对被感知对象更精确的描述<sup>[14]</sup>。

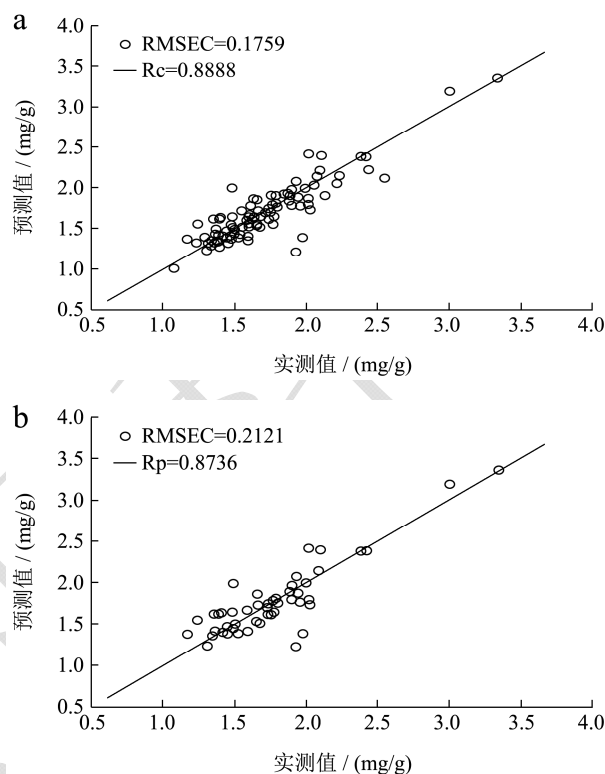


图10 基于融合技术的BPANN模型预测结果

Fig.10 Results of the BPANN model based on fusion technology

注: a, 训练集结果; b, 测试集结果。

将提取的图像特征变量和电子鼻特征变量进行联合,利用MATLAB软件中的mapminma函数将原始数据归一化到[-1,1],使用与2.1.4相同的建模方法建立叶绿素定量预测模型。模型结果见图10,当隐含层数为19且主成分数为6时,建模效果最佳,此时RMSEC为0.1759 mg/g,  $R_c$ 为0.8888; RMSEP为0.2121 mg/g,  $R_p$ 为0.8736。

从表1可看出,相较于单一传感技术,融合方法的使用有利于模型性能提升。因为菠菜采后的品质变化是多方面的。菠菜采后萎蔫褪色甚至腐烂,同时赋予菠菜特殊芳香气味的物质较不稳定,在储藏中极易分解挥发。通过融合技术将菠菜储藏期间的外观变化和气味变化信息综合利用,从而更加准确地预测叶绿素的含量。

表 1 三种模型的性能比较

Table 1 A comparison of the performance of the three models

模型	训练集		测试集	
	均方根误差/(mg/g)	相关系数 $R_c$	均方根误差/(mg/g)	相关系数 $R_p$
计算机视觉模型	0.1978	0.8457	0.2147	0.7995
电子鼻模型	0.3119	0.7013	0.3023	0.6905
信息融合模型	0.1759	0.8888	0.2121	0.8736

### 3 结论

本研究尝试采用计算机视觉和电子鼻两种传感技术对 4 °C 恒温冷藏条件下储藏期为 12 d 的菠菜的叶绿素含量进行预测。利用 BP 人工神经网络分别建立了基于计算机视觉、电子鼻和融合技术的菠菜叶绿素预测模型,其中计算机视觉技术的检测效果略优于电子鼻技术,而融合模型与单一技术所建模型相比,其 RMSEC 分别降低了 0.0219 mg/g 和 0.1360 mg/g,  $R_c$  则分别提高了 0.0431 和 0.1875, 检测结果更加准确。结果表明,利用计算机视觉、电子鼻以及融合技术检测储藏期内菠菜的叶绿素含量变化是可行的,且基于融合技术的预测模型性能更优。

### 参考文献

- [1] 姚远,崔彦玲,陈海丽,等.菠菜种质资源形态性状的多样性分析[J].上海农业学报,2016,32(1):76-79  
YAO Yuan, CUI Yan-ling, CHEN Hai-li, et al. Diversity analysis of morphological traits of spinach germplasm resources [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2016, 32(1): 76-79
- [2] Lee Ji Hye, An Duck Soon, Song Jae Min, et al. An adaptively controlled modified atmosphere container system for fresh produce [J]. Biosystems Engineering, 2016, 148: 11-17
- [3] 巩玉芬.不同温度贮藏对鲜切蔬菜品质变化的影响及其货架期预测模型的建立[D].天津:天津商业大学,2014  
GONG Yu-Fen. Effect of temperature on the quality characters of fresh-cut vegetables and the predictive model construction of the shelf-life [D]. Tianjin: Tianjin University of commerce, 2014
- [4] K Vijayarekha. Machine vision application for food quality: a review [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012, 4(24): 5453-5458
- [5] Juliana Freitas Santos Gomes, Fabiana Rodrigues Leta. Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review [J]. Eur. Food Res. Technol., 2012, 235: 989-1000
- [6] A Gongal, S Amatya, M Karkee, et al. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 8-19
- [7] Amy Loutfi, Silvia Coradeschi, Ganesh Kumar Mani, et al. Electronic noses for food quality: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144(144): 103-111
- [8] Manuela Baietto, Alphas D. Wilson. Electronic-nose applications for fruit identification, ripeness and quality grading [J]. Sensors, 2015, 15(1): 899-931
- [9] García-Nieto P J, García-Gonzalo E, Alonso Fernández J R, et al. Using evolutionary multivariate adaptive regression splines approach to evaluate the eutrophication in the Pozón de la Dolores lake (northern Spain) [J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 136-151
- [10] 陈蔚辉,罗婉芝.不同烹饪方法对菠菜营养品质的影响[J].食品科技,2011,36(12):80-82  
CHEN Wei-hui, LUO Wan-zhi. Effects of different cooking methods on nutrition of spinach [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(12): 80-82
- [11] Senthilkumar Thirupathi, Jayas Digvir S, White Noel D G, et al. Detection of fungal infection and ochratoxin A contamination in stored barley using near-infrared hyperspectral imaging [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 162-173
- [12] QIN Yu-hong, HUANG Bao-yong, ZHANG Jing-ru, et al. Analytical method for 44 pesticide residues in spinach using multi-plug-filtration cleanup based on multiwalled carbon nanotubes with liquid chromatography and tandem mass spectrometry detection [J]. Journal of Separation Science, 2016, 39(9): 1757-1765
- [13] 王萌蕾,陈复生,杨宏顺,等.加工和贮藏对果蔬营养成分变化及抗氧化活性影响的研究进展[J].现代食品科技,2013, 29(3):692-697  
WANG Meng-lei, CHEN Fu-sheng, YANG Hong-shun, et al. Progress in research on effect of different processing and storage methods for changes of nutritious and antioxidant activities [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(3): 692-697
- [14] Eva Borrás, Joan Ferré, Montserrat Mestres, et al. Data fusion

methodologies for food and beverage authentication and quality assessment A review [J]. Analytica Chimica Acta,

2015, 891: 1-14

现代食品科技