

基于理化指标和电子鼻的果园荔枝成熟度识别方法^{*}徐 赛^{1,2} 陆华忠^{1,2} 周志艳^{1,2} 吕恩利^{1,2} 姜焰鸣^{1,2} 王亚娟^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 采用理化指标和电子鼻识别2种方法分别对6个成熟度(p1~p6)的果园荔枝进行识别。理化指标采样数据显示,荔枝果实直径、果核直径和果实净质量均随着果实的成熟而增大。p1—p4阶段,荔枝果皮绿色和黄色不断加深,亮度不断增大。p4—p6阶段,荔枝果皮亮度先增大后减小,颜色迅速变红,黄色成分先增加后减少。提取特征值后,采用主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)、BP神经网络(BPNN)、简单相关分析(SCA)、典型相关分析(CCA)进行数据处理。理化指标识别法结合PCA和LDA对果园荔枝成熟度识别的正确率均为100%,能够较好地识别。但PCA识别结果中p1、p2和p3的距离较近,实际应用中易发生混淆。电子鼻识别法结合PCA和LDA分析均无法较好地识别荔枝成熟度,电子鼻识别法结合BPNN对果园荔枝识别训练集的回判正确率为100%,测试集的识别正确率为92%,识别效果较好。SCA分析结果表明,在荔枝成熟过程中,除色差 L^* 值外,其他各项理化指标均与电子鼻部分传感器的响应信号显著相关。CCA分析结果表明,电子鼻响应信号与理化指标整体相关性显著,电子鼻整体信号与部分理化指标相关性显著。证明了理化指标和电子鼻均能有效地识别水果品质信息变化,并为电子鼻替代理化指标识别法在水果品质信息监测上的应用提供了参考。

关键词: 荔枝 果园 电子鼻 理化指标 成熟度 相关分析

中图分类号: S24; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0226-07

Identification of Litchi's Maturing Stage in Orchard Based on Physicochemical Indexes and Electronic Nose

Xu Sai^{1,2} Lu Huazhong^{1,2} Zhou Zhiyan^{1,2} Lü Enli^{1,2} Jiang Yanming^{1,2} Wang Yajuan^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of using electronic nose substitute for physicochemical indexes to detect the quality information change of fruit, the physicochemical indexes identification method and electronic nose identification method were used for litchi samplings, which were in six different maturing stages (p1, p2, p3, p4, p5 and p6). The physicochemical indexes sampling results showed that fruit diameter, kernel diameter and fruit weight were increased as the fruit matured continuously. During stages of p1—p4, the green and yellow of fruits were continuously deepening, the brightness degree was continuously increasing. During stages of p4—p6, the brightness degree of fruit was increased at first and then decreased, the color was obviously gone red, the yellow was first deepened and then became shallow. After extracting the feature values, the principal component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA), back propagation neural network (BPNN), simple correlation analysis (SCA) and canonical correlation analysis (CCA) were used for data process. Both results of

收稿日期: 2015-09-22 修回日期: 2015-10-19

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31571561)、现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-33-13)和广东省高等学校优秀青年教师培养计划资助项目(Y92014025)

作者简介: 徐赛, 博士生, 主要从事农产品冷链物流技术与装备研究, E-mail: 294504658@qq.com

通讯作者: 吕恩利, 副教授, 主要从事农产品冷链物流技术与装备研究, E-mail: txzzlu@sina.cn

physicochemical indexes identification method combined with PCA and LDA showed that litchi’s maturing stage can be well identified, and both of their accuracies were 100% . But the distance between stages of p1, p2 and p3 were close when using PCA for analysis, which may be confused in practical classification and identification. However, litchi’s maturing stage cannot be identified when using electronic nose combined with PCA or LDA for identification. When using electronic nose combined with BPNN for classification, the accuracies of train set and test set were 100% and 92% , respectively. SCA results showed that physicochemical indexes had significant correlation with electronic nose sensors’ response except L^* value during litchi’s maturing process. CCA results showed that there was significant correlation between the whole physicochemical index set and the whole electronic nose sensors’ response set. Part of physicochemical indexes had significant correlation with the whole electronic nose sensors’ response set. The results proved the feasibility of using physicochemical index identification method and electronic nose identification method for detection of quality information change of fruit. It also provided reference for using electronic nose substitute for physicochemical indexes to detect the quality information change of fruit.

Key words: Litchi Orchard Electronic nose Physicochemical indexes Maturing stage Correlation analysis

引言

不同成熟度的果园荔枝需要进行不同方式的管理,如:在荔枝生理落果期及时清理地面落果,可减小果园荔枝病虫害的发生率^[1];果园荔枝在不同成熟度易发生的病虫害类型不同,需要有针对性地选择农药进行杀虫^[2];在适合的荔枝成熟度对果园荔枝进行采摘,不仅能保证荔枝的风味,还有利于提高采后荔枝的耐贮运能力^[3]。因此,准确地识别果园荔枝成熟度具有重要意义,可为荔枝果园管理提供科学指导,但目前尚未见相关报道。

理化指标识别法^[4-5]是目前荔枝品质检测的主要方法,通过获取荔枝的物理指标和化学指标,进而对荔枝的品质特征进行综合评判。该方法是一种直观、有效的检测方法,且在水果成熟度检测上已有一定应用^[6-8]。但理化指标识别法操作较繁琐,检测速度较慢,且全程需要检测人员参与,无法满足智能检测的需要。

电子鼻是一种模拟生物嗅觉系统,通过气敏传感器阵列获取被测样本气体挥发物的“指纹”信息,从而对被测目标进行综合评判^[9]。如今,电子鼻在水果的成熟度识别上已有一定研究^[10-14]。电子鼻识别法操作简单、识别速度较快,有效地克服了理化指标识别法的缺点,且电子鼻便携化^[15]、远程可控化^[16]等发展趋势符合果园荔枝成熟度实时监测的需求。但电子鼻是否可以代替理化指标识别法对荔枝品质信息进行检测需进一步探究。

本文对比理化识别法与电子鼻识别法对果园荔枝成熟度进行分类识别的效果,并初步探究电子鼻

预测荔枝理化指标的可行性。获取不同成熟度果园荔枝的理化指标和电子鼻数据后,采用主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)和BP神经网络(BPNN)进行模式识别,采用简单相关分析(SCA)和典型相关分析(CCA)分析荔枝成熟过程中理化指标与电子鼻数据之间的关联,以期为果园水果成熟度监测、水果理化指标检测方面的研究提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验采用的荔枝品种为“尖叶”,均来自华南农业大学校内荔枝果园。于荔枝挂果约 20 d 左右,摘取荔枝果实立即返回实验室进行实验。之后,每 7 d 检测一次,共检测 6 次。每次检测摘取 30 颗无损伤荔枝果实,其中 10 颗用于理化指标采样,剩余 20 颗用于电子鼻采样。本实验共获得 6 个成熟度,标记为 p1、p2、p3、p4、p5、p6,分别为挂果约 20、27、34、41、48、55 d 的荔枝果实。

因此,实验共获得不同成熟度的果园荔枝采样数据 180 个,其中理化指标采样数据 60 个(每次采样 10 颗、采样 6 次),电子鼻采样数据 120 个(每次采样 20 颗、采样 6 次)。

1.2 检测方法

1.2.1 色差值

采用日本美能达 CR-400 型全自动色差仪获取荔枝果实的色差,包括 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值。其中 L^* 值越大则果皮越亮,反之越暗, a^* 值越大则果皮越红,反之越绿, b^* 值越大则果皮越黄,反之越蓝。

在荔枝果实的赤道两面各测 1 次色差,取其平均值作为该荔枝样本的色差值,每个样本重复检测 3 次。

1.2.2 果实大小

采用游标卡尺分别测量荔枝果实赤道位置的最大直径,每个荔枝均重复测量 3 次,取其平均值作为该荔枝的果实大小。

1.2.3 果核大小

采用游标卡尺分别测量荔枝果核赤道位置的最大直径,每个荔枝果核均重复测量 3 次,取其平均值作为该荔枝的果核大小。

1.2.4 果实净质量

荔枝果实净质量采用精度为 0.01 g 的电子天平获取。每个荔枝样本参数均重复测量 3 次,取其平均值作为该荔枝的果实净质量。

1.2.5 电子鼻检测

实验采用 PEN3 电子鼻(AIRSENSE 公司)采集不同成熟度果园荔枝的仿生嗅觉数据。该电子鼻主要由采样及清洗通道、传感器阵列和模式识别子系统构成,其中传感器阵列包含 10 个对不同类型气体挥发物敏感的金属氧化物气敏传感器,使得整个电子鼻系统能够检测不同的气味。电子鼻采样前,每颗荔枝样本均放置于 200 mL 烧杯中,用双层塑料膜密封,静置 0.5 h 后采用电子鼻对其顶空气体进行进样。烧杯使用前均用超声波清洗仪洗净,放置阴凉、无异味的室内环境晾干。

电子鼻的采样参数设置为:采样时间间隔 1 s,传感器自动清洗时间 60 s,传感器归零时间 10 s,分析采样时间 80 s,进样准备时间 5 s,进样流量 300 mL/min。

1.3 特征值的提取

1.3.1 理化指标特征值

采用理化指标对果园荔枝成熟度进行识别时,实验采用不同成熟阶段荔枝果实的色差值(L^* 值、 a^* 值和 b^* 值)、果实大小、果核大小和果实净质量 6 项理化指标作为后续分析的特征值。

果园荔枝各成熟阶段 6 项理化指标变化如表 1 所示。其中果实直径、果核直径和果实净质量均随着果实的成熟而增大。 $p1-p4$ 阶段, L^* 值与 b^* 值逐渐增大, a^* 值逐渐减小,说明荔枝果皮在该成熟期间绿色和黄色不断加深,亮度不断增大。 $p4-p6$ 阶段, L^* 值先减小再增大, a^* 值迅速增大, b^* 值先增大后减小,说明该成熟阶段,荔枝果皮亮度先增大后减小,颜色迅速变红,黄色成分先增加后减少。

1.3.2 电子鼻特征值

PEN3 电子鼻是以传感器输出的信号比值 G/G_0 作为传感器输出值的。其中 G 为传感器接触到样

品挥发物后的电阻量, G_0 为传感器在零气(经过标准活性碳过滤后的气体)中的电阻量。

表 1 荔枝各成熟阶段的理化指标均值
Tab.1 Mean values of litchi's physicochemical indexes at different maturing stages

编号	果实直径 /mm	果核直径 /mm	果实 净质量/g	L^* 值	a^* 值	b^* 值
p1	11.37	3.77	1.39	38.74	-9.50	30.89
p2	20.44	12.47	4.48	44.14	-10.20	33.89
p3	24.99	14.51	7.44	48.54	-14.30	39.39
p4	30.14	15.46	13.21	51.38	-15.65	53.51
p5	32.28	16.85	16.57	46.64	38.36	98.35
p6	35.34	17.18	20.63	51.11	35.87	43.49

图 1 是电子鼻对荔枝气体挥发物的采样结果图, $R1 \sim R10$ 分别代表电子鼻传感器阵列中的 10 个气敏传感器。采样开始时,电子鼻各传感器的输出值均为 1。进样后,随着荔枝气体挥发物在气敏传感器上不断富集,各传感器的响应值逐渐增大,并在 50 s 附近达到最大值,随后趋于稳定状态。本实验选择各传感器响应稳定时的输出值作为电子鼻各传感器的特征值,即选择 75 s 时刻的各传感器响应值进行后续分析。

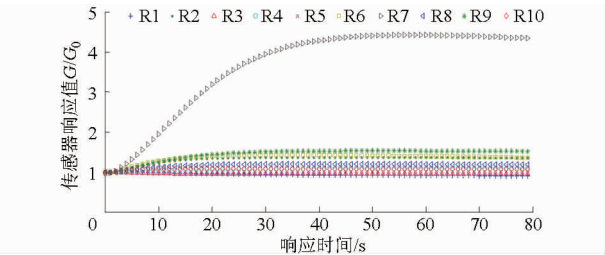


图 1 电子鼻对荔枝气味采样结果
Fig.1 Volatile sampling results of litchi by electronic nose

1.4 模式识别方法

1.4.1 主成分分析

主成分分析(PCA)是一种常用的线性模式识别方法,采用降维的方法使得新变量中的方差分配发生变化,并选择其中占主要方差的一个或者几个成分来代替原变量^[17]。

1.4.2 线性判别分析

线性判别分析(LDA)也是一种运用降维进行模式识别的线性识别方法。LDA 分析法关注的是类别中的分布以及他们之间的相互距离,能从所有传感器中收集数据信息,每一个类别通过一个特殊的向量化变换得到,使得样本内凝聚而样本间疏远^[18]。

1.4.3 BP 神经网络

BP 神经网络(BPNN)是一种模仿动物神经网络行为特征,进行分布式并行信息处理的非线性算法数学模型。这种网络依靠系统的复杂程度,通过

调整内部大量节点之间的相互连接关系,从而达到信息处理的目的。BP 神经网络由输入层、隐含层和输出层 3 层组成,其核心是通过一边向后传递误差,一边修正误差的方法来不断调节网络参数的权值和阈值,以实现或逼近所希望的输入、输出映射关系^[19]。

1.4.4 简单相关分析

简单相关分析(SCA)是研究变量之间关系紧密程度的一种统计方法,它反映的是当控制其中一种变量的取值后,另一种变量的变异程度,其主要目的是研究变量之间关系的密切程度,其显著特点是变量不分主次,被置于同等的地位^[20]。

1.4.5 典型相关分析

典型相关分析(CCA)是研究 2 组变量之间相关关系的一种多元统计方法。其目的是识别并量化 2 组变量之间的关系,方法是从每组变量原始数据阵的总方差出发,分析构建每组变量的线性组合,从线性组合中找出最相关的综合变量(即典型变量),通过研究典型变量的相关关系,揭示 2 组变量的相关性^[21]。

2 结果与分析

2.1 理化指标对果园荔枝成熟度的识别

2.1.1 PCA 分析

图 2 为理化指标对果园荔枝成熟度识别的 PCA 分析结果。第 1 主成分(PC1)的贡献率为 76.50%,第 2 主成分(PC2)的贡献率为 16.18%,第 1、2 主成分的总贡献率为 92.68%。由图可知,各成熟度的荔枝样本数据点均无重叠现象,能够被区分,分类识别的正确率为 100%。但成熟度 p1、p2 和 p3 之间样本数据点距离较近,在实际应用中易发生混淆。p3 之后各成熟度荔枝样本数据点距离较大,区分效果较好。

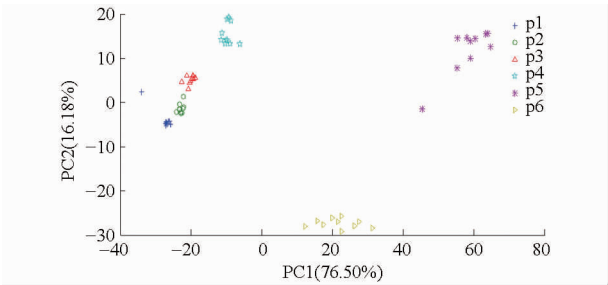


图 2 理化指标对果园荔枝成熟度识别的 PCA 分析
Fig.2 Physicochemical indexes for litchi's maturing status detection based on PCA

2.1.2 LDA 分析

图 3 为理化指标对果园荔枝成熟度识别的 LDA 分析结果。第 1 线性判别因子(LD1)的贡献率为 61.97%,第 2 线性判别因子(LD2)的贡献率为 25.45%,第 1、2 线性判别因子的总贡献率为

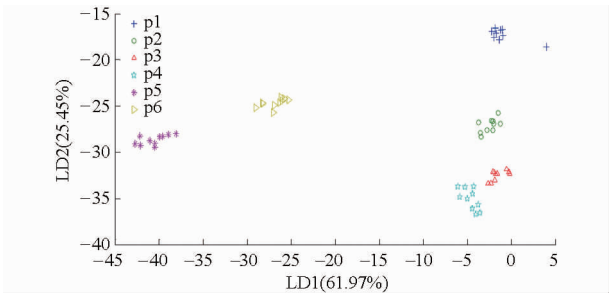


图 3 理化指标对果园荔枝成熟度识别的 LDA 分析
Fig.3 Physicochemical indexes for litchi's maturing status detection based on LDA

87.42%。各成熟度的荔枝均能被较好地地区分,分类识别的正确率为 100%。

2.2 电子鼻对果园荔枝成熟度的识别

2.2.1 PCA 分析

图 4 为电子鼻对果园荔枝成熟度识别的 PCA 分析结果。第 1 主成分(PC1)的贡献率为 95.73%,第 2 主成分(PC2)的贡献率为 2.95%,第 1、2 主成分的总贡献率为 98.68%。各成熟度荔枝的样本数据点均存在重叠现象,采用电子鼻结合 PCA 分析无法较好地进行分类识别。

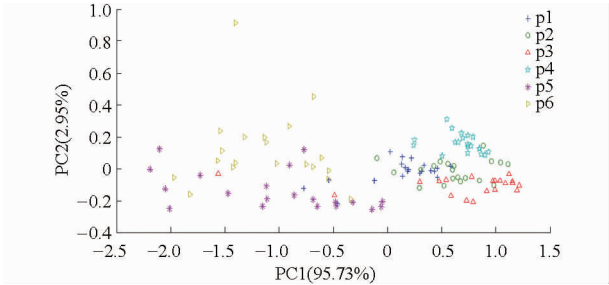


图 4 电子鼻对果园荔枝成熟度识别的 PCA 分析
Fig.4 Electronic nose for litchi's maturing status detection based on PCA

2.2.2 LDA 分析

图 5 为电子鼻对果园荔枝成熟度识别的 LDA 分析结果。第 1 主成分的贡献率为 49.08%,第 2 主成分的贡献率为 39.46%,第 1、2 主成分的总贡献率为 88.54%。成熟度 p1、p2、p4 荔枝样本数据点之间无重叠,可以较好地进行分类识别。p3 和 p5

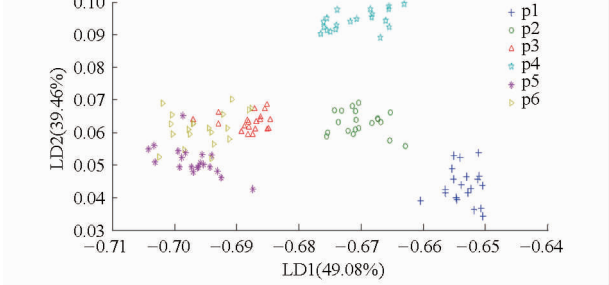


图 5 电子鼻对果园荔枝成熟度识别的 LDA 分析
Fig.5 Electronic nose for litchi's maturing status detection based on LDA

的荔枝样本数据点均与 p6 的荔枝样本数据点有重叠部分,采用电子鼻结合 LDA 分析也无法较好地对果园荔枝成熟度进行区分。

2.2.3 BPNN 分析

由于电子鼻结合 2 种线性分类识别方法 PCA 和 LDA 对果园荔枝成熟度的识别效果均不佳,因此,本文采用非线性识别方法 BPNN 对果园荔枝成熟度电子鼻采样数据进行进一步分类识别。实验共包含 6 个荔枝成熟度,每个成熟度采样 20 个荔枝样本。从各成熟度中随机选择 15 个荔枝样本作为训练集,剩下 5 个荔枝样本作为测试集。得到训练集样本数为 90 个,测试集样本数为 30 个。输入层节点数为 10 个,输出层节点数为 6 个,在分类过程中设置期望输出为(1,0,0,0,0,0)、(0,1,0,0,0,0)、(0,0,1,0,0,0)、(0,0,0,1,0,0)、(0,0,0,0,1,0)、(0,0,0,0,0,1),分别代表 p1 ~ p6 共 6 个荔枝成熟度。经过反复实验,设定隐含层节点数为 21 个,学习因子和动态因子分别为 0.045 和 0.9,最大训练次数为 25 000 次。采用训练样本集对上述网络模型训练后,BPNN 模型对果园荔枝成熟度(p1 ~ p6)测试集的正确识别样本个数分别为 5、5、5、5、3、5 个。模型对训练的回判正确率为 100%,对测试集的识别率为 92%。

2.3 电子鼻数据与理化指标之间的关联

根据理化指标识别和电子鼻识别 2 种识别方法对果园荔枝成熟度的分类识别结果可知,2 种识别方法都能够有效地对果园荔枝成熟度进行识别。但理化指标识别法仅结合线性识别方法 (PCA 和 LDA)便能较好地对荔枝成熟度进行识别,而电子鼻识别法结合线性识别方法 (PCA 和 LDA)对荔枝成熟的识别效果不佳,结合非线性识别法 BPNN 才能较好地对荔枝成熟进行识别。因此,理化指标识别法对荔枝成熟度的识别效果要优于电子鼻识别法,理化指标在水果品质检测中仍发挥着重要作用。

为克服理化指标识别法操作繁琐、效率低、非智能等缺点,同时最大限度保留理化指标识别法识别效果佳的优点。本实验采用 SCA 和 CCA 2 种分析方法探究了电子鼻数据与理化指标之间的关联,为基于电子鼻技术预测水果理化指标提供参考。

实验以 $Y_1 \sim Y_6$ 分别代表果实大小、果核大小、果实净质量、色差 L^* 值、色差 a^* 值、色差 b^* 值 6 项理化指标,R1 ~ R10 分别代表电子鼻传感器阵列中的 10 个气敏传感器。为使电子鼻信号数据阵列与理化指标数据阵列样本数一致,从各成熟阶段的电子鼻采样数据中随机选择 10 个样本用于后续分析,得到理化指标数据阵列样本数和电子鼻数据阵列样本数均为 60 个。

2.3.1 简单相关分析

实验采用 SCA 探究荔枝成熟过程中各理化指标与电子鼻各传感器响应信号之间的关联,各传感器响应信号与各项理化指标之间的皮尔逊相关系数 r 如表 2 所示。

皮尔逊相关系数 r 的定义域为 $[-1, 1]$ 。正值表示正相关,负值表示负相关。 $|r|$ 越接近 1,线性相关越显著,越接近 0,线性相关程度越低。通常, $0 \leq |r| < 1$ 时表示相关不显著, $0.4 \leq |r| < 0.7$ 时表示显著相关, $0.7 \leq |r| \leq 1$ 时表示极为显著相关^[22]。因此,荔枝成熟过程中,传感器 R3、R7 的响应信号与果实大小 Y_1 显著相关;传感器 R1、R2、R9 的响应信号与果核大小 Y_2 显著相关;传感器 R7 的响应信号与果实净质量 Y_3 显著相关;各传感器响应信号与色差 L^* 值 Y_4 的相关性均不显著;传感器 R3、R5、R9 和 R10 的响应信号与色差 a^* 值 Y_5 显著相关,传感器 R7 的响应信号与色差 a^* 值 Y_5 相关性极为显著;传感器 R3、R5 和 R6 的响应信号与色差 b^* 值 Y_6 显著相关。SCA 分析结果证明了,在荔枝成熟过程中,除色差 L^* 值外,其他各项理化指标均与电子鼻部分传感器的响应信号显著相关。

表 2 各传感器响应信号与各项理化指标之间的皮尔逊相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficients between each sensor's response and each physicochemical index										
指标	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
Y_1	0.287 6	-0.237 8	0.403 6	0.121 2	0.306 6	0.089 3	0.515 3	0.159 3	-0.021 3	-0.053 8
Y_2	0.592 4	-0.621 0	0.387 0	0.042 4	0.236 5	0.048 6	0.013 9	0.057 7	-0.471 2	0.193 5
Y_3	0.109 6	0.005 0	0.359 3	0.101 9	0.294 7	0.057 0	0.691 0	0.154 0	0.216 0	-0.165 0
Y_4	0.362 4	-0.395 5	0.206 4	0.245 5	0.072 5	0.330 4	0.157 5	0.342 2	-0.347 2	0.284 3
Y_5	-0.141 9	0.191 8	0.495 4	0.025 5	0.567 0	-0.213 4	0.883 4	-0.059 2	0.596 1	-0.657 4
Y_6	0.129 8	-0.079 9	0.407 3	-0.135 3	0.401 7	-0.309 3	0.483 9	-0.294 2	0.282 4	-0.336 0

2.3.2 典型相关分析

SCA 只能分析各理化指标与各电子鼻传感器之

间单独的向量关系,为探究荔枝成熟过程中理化指标和电子鼻信号整体之间的相关性,实验采用 CCA

进行进一步分析。

根据荔枝成熟过程理化指标和电子鼻信号整体 CCA 结果得出,第 1 典型相关系数为 0.983 2 ($a = 1.5 \times 10^{-53}$),第 2 典型相关系数为 0.945 5 ($a = 4.472\ 55 \times 10^{-25}$),第 3 典型相关系数为 0.838 8 ($a = 1.868\ 3 \times 10^{-11}$),第 4 典型相关系数为 0.754 1 ($a = 7.325\ 9 \times 10^{-5}$),第 5 典型相关系数为 0.430 4 ($a = 0.434\ 9$),第 6 典型相关系数为 0.169 9 ($a = 0.895\ 5$)。其中, a 为显著性分析系数,当 $a < 0.2$ 时

表示相关性极为显著, $0.2 \leq a < 0.5$ 时表示相关性显著, $a \geq 0.5$ 时表示相关性不显著。因此,荔枝成熟过程中理化指标和电子鼻信号的第 1~5 典型相关变量显著相关。

表 3 为各理化指标对电子鼻传感器整体信号的典型相关系数 λ 。由表 3 可知荔枝成熟过程中电子鼻信号与色差 a^* 值 Y_5 、果实净质量 Y_3 和果实大小 Y_1 3 项理化指标变化相关性显著 ($|\lambda| > 0.4$),与其他几种理化指标相关性较差。

表 3 各理化指标与电子鼻整体信号的典型相关系数

Tab.3 Canonical correlation coefficients between each physicochemical index and whole electronic responses						
相关向量编号	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	-0.315 0	0.200 6	-0.518 5	-0.042 0	-0.702 8	-0.281 0
2	-0.195 8	0.314 8	-0.409 3	0.166 5	-0.815 7	-0.318 2
3	-0.468 7	0.037 7	-0.646 9	-0.194 4	-0.755 5	-0.346 8
4	-0.479 3	0.028 8	-0.650 4	-0.182 9	-0.782 0	-0.381 6
5	-0.471 9	0.032 4	-0.657 6	-0.179 1	-0.773 7	-0.304 2
6	-0.469 2	0.039 6	-0.645 4	-0.190 1	-0.773 7	-0.351 1

3 结论

(1) 实验采用理化指标和电子鼻 2 种方法对果园荔枝成熟度进行识别。理化指标(包括色差 L^* 值、色差 a^* 值、色差 b^* 值、果实大小、果核大小和果实净质量 6 项理化指标)采样数据显示,果实直径、果核直径和果实净质量均随着果实的成熟而增大。p1—p4 阶段,荔枝果皮绿色和黄色不断加深,亮度不断增大。p4—p6 阶段,荔枝果皮亮度先增大后减小,颜色迅速变红,黄色成分先增加后减少。

(2) 理化指标对果园荔枝成熟度的识别效果优于电子鼻识别。理化指标识别法结合 PCA 和 LDA 分析均能较好地对果园荔枝成熟度进行识别,识别正确率为 100%。电子鼻识别法结合 PCA 和 LDA 分析均无法较好地对果园荔枝成熟度进行识别,电子鼻识别法结合 BPNN 对果园荔枝识别训练集的回判正确率为 100%,测试集的识别正确率为 92%。电子鼻识别法结合 BPNN 能够较好地识别果园荔枝

成熟度,是因为非线性识别方法 BPNN 相对线性识别方法 PCA 和 LDA 更适合解决果园荔枝成熟度识别这类非线性识别问题。

(3) SCA 分析结果表明,在荔枝成熟过程中,除色差 L^* 值外,其他各项理化指标均与电子鼻部分传感器的响应信号显著相关。传感器 R3、R7 的响应信号与果实大小 Y_1 显著相关;传感器 R1、R2、R9 的响应信号与果核大小 Y_2 显著相关;传感器 R7 的响应信号与果实净质量 Y_3 显著相关;传感器 R3、R5、R9 和 R10 的响应信号与色差 a^* 值 Y_5 显著相关,传感器 R7 的响应信号与色差 a^* 值 Y_5 相关性极为显著;传感器 R3、R5 和 R6 的响应信号与色差 b^* 值 Y_6 显著相关。CCA 分析结果表明,荔枝成熟过程中电子鼻响应信号和理化指标的第 1~5 典型相关变量显著相关。荔枝成熟过程中电子鼻信号与色差 a^* 值 Y_5 、果实净质量 Y_3 和果实大小 Y_1 相关性显著,与其他几种理化指标相关性较差。

参 考 文 献

1 张荣,邓振权,刘爱媛,等. 荔枝叶面,花穗和果实上真菌消长动态[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 159-162.
Zhang Rong,Deng Zhenquan,Liu Aiyuan,et al. Dynamic changes of fungi on the leaves, flower clusters and fruits in litchi[J]. Journal of South China Agricultural University, 2012, 33(2): 159-162. (in Chinese)

2 吴燕珠,陈荣章. 闽南荔枝病虫害的防治难点及解决办法[J]. 柑桔与亚热带果树信息, 2003, 19(10):41-42.

3 黄锡琨,宋春华,李雪岑. 荔枝果实采收成熟度的探讨[J]. 中国南方果树, 1996, 25(2): 38.

4 曹颖. 鲜食荔枝品质评价研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2013.
Cao Ying. Research on quality of fresh litchi[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2013. (in Chinese)

5 杨松夏,吕恩利,陆华忠,等. 不同保鲜运输方式对荔枝果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014,30(10): 225-232.
Yang Songxia, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Effect of different fresh-keeping transportation modes on quality of litchi fruit[J].

Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 225 – 232. (in Chinese)

6 Tadesse T, Hewett E W, Nichols M A, et al. Changes in physicochemical attributes of sweet pepper cv. Domino during fruit growth and development[J]. Scientia Horticulturae, 2002, 93(2): 91 – 103.

7 兰海鹏,唐玉荣,王伟,等. 自然生长状态下库文勒香梨采摘期评价方法研究[J]. 中国农机化学报,2014,35(4):165 – 168, 190.

Lan Haipeng, Tang Yurong, Wang Wei, et al. Research on evaluation methodology of Korla pear maturity based on physicochemical index[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(4): 165 – 168, 190. (in Chinese)

8 Meléndez E, Ortiz M C, Sarabia L A, et al. Modelling phenolic and technological maturities of grapes by means of the multivariate relation between organoleptic and physicochemical properties[J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 761: 53 – 61.

9 Roy R B, Tudu B, Shaw L, et al. Instrumental testing of tea by combining the responses of electronic nose and tongue[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 356 – 363.

10 Zakaria A, Shakaff A Y M, Masnan M J, et al. Improved maturity and ripeness classifications of *Magnifera indica* cv. *harumanis* mangoes through sensor fusion of an electronic nose and acoustic sensor[J]. Sensors, 2012, 12(5): 6023 – 6048.

11 Lebrun M, Plotto A, Goodner K, et al. Discrimination of mango fruit maturity by volatiles using the electronic nose and gas chromatography[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(1): 122 – 131.

12 Sanaeifar A, Mohtasebi S S, Ghasemi-Varnamkhasti M, et al. Development and application of a new low cost electronic nose for the ripeness monitoring of banana using computational techniques (PCA, LDA, SIMCA, and SVM)[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2014, 32(6): 538 – 548.

13 Pathange L P, Mallikarjunan P, Marini R P, et al. Non-destructive evaluation of apple maturity using an electronic nose system [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 1018 – 1023.

14 Young H, Rossiter K, Wang M, et al. Characterization of Royal Gala apple aroma using electronic nose technology potential maturity indicator[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(12): 5173 – 5177.

15 李宇骁,张顺平. 基于 STC89C516RD + 单片机的手持式电子鼻的设计[J]. 电子技术设计与应用, 2011(12): 34 – 37.

Li Yuxiao, Zhang Shunping. Development of a hand-held electronic nose based on STC89C516RD + MCU[J]. Electronics Design & Application, 2011(12): 34 – 37. (in Chinese)

16 陈新伟,王俊,沈睿谦. 基于 GPRS 的远程检测无线电子鼻系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 238 – 245.

Chen Xinwei, Wang Jun, Shen Ruiqian. Wireless electronic nose based on GPRS and its application on mangos[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 238 – 245. (in Chinese)

17 Sahoolizadeh A H, Heidari B Z, Dehghani C H. A new face recognition method using PCA, LDA and neural network[J]. International Journal of Computer Science and Engineering, 2008, 2(4): 218 – 223.

18 Zhang H, Wang J. Detection of age and insect damage incurred by wheat, with an electronic nose[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 489 – 495.

19 Zhang L, Tian F, Liu S, et al. Chaos based neural network optimization for concentration estimation of indoor air contaminants by an electronic nose[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 189: 161 – 167.

20 Sysoev V V, Button B K, Wepsiec K, et al. Toward the nanoscopic “electronic nose”: hydrogen vs carbon monoxide discrimination with an array of individual metal oxide nano-and mesowire sensors[J]. Nano Letters, 2006, 6(8): 1584 – 1588.

21 Aleixandre M, Santos J P, Sayago I, et al. A wireless and portable electronic nose to differentiate musts of different ripeness degree and grape varieties[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8429 – 8443.

22 任亚婷. 基于仿生嗅觉的杏仁饼变质鉴别方法的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.

Ren Yating. Identification of almond cake deterioration based on computer olfactory[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013. (in Chinese)