

# 基于 zNose™ 电子鼻的芒果腐烂及成熟度检测

浦宏杰<sup>1,2</sup>, 汪迪松<sup>1</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 李臻峰<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122) (2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 本文利用一种快速气相色谱仪 (zNose™ 电子鼻) 对芒果在采后熟化过程中释放的挥发性物质进行了定量的检测及分析, 通过提取不同的挥发性物质峰值来对芒果挥发物成分进行标定, 并建立数学模型对芒果表皮黑斑率和成熟度进行了检测。文中通过对比分析气味、表皮黑斑率、成熟度、可溶性固形物含量以及呼吸速率等实验数据, 发现利用电子鼻检测数据中的峰 4 和峰 5 值能有效地对腐烂程度做出判定, 峰 7 值跟成熟度具有很高的相关性, 而可溶性固形物指标在芒果成熟度判定中贡献度很小。通过在峰 4 峰 5 值与腐烂度之间建立高斯模型, 并利用联合阈值对腐烂进行检测判定, 其检测准确率超过 90%; 在峰 7 值与成熟度之间建立分段指数模型, 可有效地对成熟度做出估计, 其估计均方根误差可控制在 7% 以内。

**关键词:** 电子鼻; 气味检测; 芒果; 腐烂度; 成熟度

文章编号: 1673-9078(2017)3-304-310

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.3.045

## Detection of Rot and Ripeness of Mango with zNose™ Electronic Nose

PU Hong-jie<sup>1,2</sup>, WANG Di-song<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, LI Zhen-feng<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

(2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Mango volatiles released during postharvest ripening were quantitatively measured and analyzed with an ultrafast gas chromatography system (zNose™). The mango volatiles were characterized by extracting the mass spectral peaks of different volatiles and mathematical models were established to measure the blackspot rate of mango skin and degree of ripeness. Odor, skin blackspot rate, degree of ripeness, soluble solid content, respiration rate, and other experimental data were compared and analyzed. The results showed that peaks 4 and 5 from the electronic nose data could effectively determine the degree of rot, peak 7 exhibited a high correlation with the degree of ripeness, and the soluble solid content showed a small contribution to the determination of the degree of ripeness. Gaussian models were constructed between the degree of rot and values of peaks 4 and 5. The rot of mango was determined using established models and the threshold value and accuracy rate of determination was over 90%. A piecewise exponential model was constructed between the degree of ripeness and value of peak 7, an effective estimation on the degree of ripeness was achieved. The root mean square error of the estimation was controlled within 7%.

**Key words:** electronic nose; odor detection; mango; degree of rot; degree of ripeness

芒果是一种全球范围内非常重要的热带及亚热带水果, 在我国也是一种广为种植的经济作物, 年产量超过 100 万 t, 在内销和出口中均具有举足轻重的地位。芒果作为一种典型的呼吸跃变型水果, 一旦进入跃变阶段, 成熟进度就难以控制, 这对于芒果在储存和运输过程中的品质控制提出了严峻的挑战。一般商业采收通常在果实尚处于绿熟阶段的时候进行, 然后在 10~15 °C 环境下储存并运输到各地<sup>[1]</sup>。即使果实采收时果皮呈全绿状态, 在采后的第 5 d 果实的呼吸

收稿日期: 2016-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51508229); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2014023-32); 江苏省食品先进制造装备重点实验室开放课题 (FM-201406)

作者简介: 浦宏杰 (1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事食品无损检测研究

开始跃升, 第 7 d 出现呼吸高峰, 完全成熟后果实迅速软化直至腐败, 品质下降, 因此对成熟度的估计已成为芒果产业的一个重要诉求。与此同时, 严重的采后病变在储藏及运输过程中时常发生, 导致芒果腐烂, 引发损失。因此, 业界急需一种可以监控病变程度以及是否发生腐烂的技术, 用以防止病变的传播扩散。

目前, 采前成熟度估计通常是通过尺寸、球形、坚实度及可溶性固形物等指标来判定。而采后成熟度一般利用呼吸速度、表皮颜色<sup>[2]</sup>及质构特性<sup>[3]</sup>等来评估。由于芒果在采摘后经过一定时间的储存, 期间不同阶段的气味会发生变化, 不仅可以被人所分辨, 而且可以反映其理化特性的变化。电子鼻作为一种新型气味检测工具, 近年来广泛应用于诸如肉类新鲜度检测<sup>[4]</sup>、食醋陈化<sup>[5]</sup>以及果蔬<sup>[6-8]</sup>甚至是鸡蛋<sup>[9]</sup>货架期的气味检测中。特别地, 针对芒果气味的研究, 目前国

内外已有一些相关工作可供参考。唐会周等发现芒果中萜烯类、烃类、醛类、酮类、醇类和酯类等6类香气成分会随着成熟度而变化,且变化趋势各不相同<sup>[10]</sup>。Lebrun等人使用了一种名为e-Nose的电子鼻系统对芒果的成熟度进行了检测,并将其与传统气相色谱仪的结果进行了比较<sup>[11]</sup>。

以上这些研究,主要是基于SPME、GC和GC-MS等方法,这些方法往往耗时较长且准备工作复杂,使得这些研究仅能适用于实验室条件。因此,目前尚没有实际有效的、对芒果成熟度及腐烂进行快速检测的方法。本文使用了一种基于超快速气相色谱分析原理的电子鼻系统,能在1 min内对芒果在采后成熟过程中的气味进行检测并进行分析,目的是研究贮藏或者后熟过程中气味变化规律,以达到检测及控制后熟过程的目的。通过研究时间、成熟度和气味三者之间的关系,建立数学模型来预测腐烂的发生及评价芒果在货架期内的成熟度变化。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

考虑到本文的目的为研究芒果在采后成熟阶段或储藏期内的气味变化,实验中选用了具有较长储藏期的汤米·阿特金斯(Tommy Atkins)芒果。实验芒果样本通过空运方式订购于本地某水果进出口公司,未进行任何催熟处理,首次实验开始于采摘后第4 d,最大可能地保证测量数据的时间跨度和成熟度变化范围。

实验选取果形与品质接近的芒果38个,按照实验方案分为两类:

(1) 第一类包含12个芒果,检测跨度最大为30 d,期间不作破坏性测试,仅参与表面腐烂面积测试、表面黄色比例测试、呼吸率测试及气味检测,各项指标的理论总测试数据样本数为 $12 \times 30$ 个(考虑到某些芒果可能在25个测试日后出现过度腐烂而不堪测试,实际样本数小于理论样本数)。

(2) 第二类包含26个芒果,除以上所述测试外,每两天随机抽取2个芒果进行破坏性的可溶性固形物(Total Soluble Solid, TSS)测试,从而获取理论数据样本数为 $\sum\{26-2(n-1)\}$ 个,及随时间变化的TSS测试数据样本 $2 \times 13$ 个。芒果在测试期间的储存环境为21℃和85%相对湿度的恒温恒湿箱。

### 1.2 电子鼻系统

本文实验中采用一种新型的基于超快速气相色谱分析的电子鼻系统(zNose™ 7100 Fast GC Analyzer,

Electronic Sensor Technology, New Bury Park, CA, USA)进行气味物质检测,如图1所示。该电子鼻系统的传感器阵列由多个声表面波传感器构成,测量时声表面波传感器表面通过半导体冷却,冷凝吸附从气相色谱分离柱解析出的热气流,吸附大分子的量使传感器振荡频率发生变化,通过频率变化值来量化吸附有机物即特定气味物质的浓度。

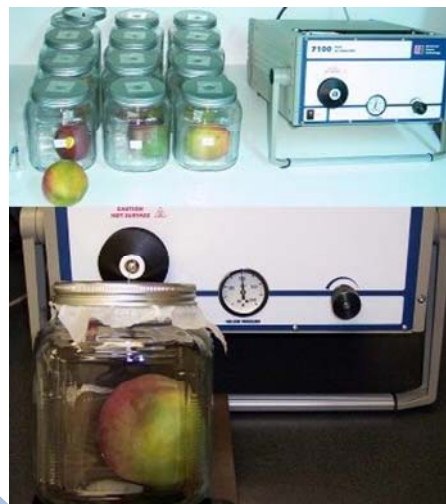


图1 芒果的zNose™电子鼻气味检测实验

Fig.1 Detection of odor of mango with zNose™ electronic nose

为充分测试芒果样本挥发的的气味物质,每次进行测量前,将恒温恒湿箱中的样本取出,置于密封罐中2 h,电子鼻通过针头刺入密封罐,进行取样测量,重复3次测量取均值。电子鼻测试参数设定为传感器表面温度60℃,运载氦气压力 $3.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,单次检测过程耗时1 min。

### 1.3 果皮颜色、腐烂度与成熟度



图2 芒果不同时期表面腐烂度示意图

Fig.2 Degree of rot on mango surface in different stages

对于芒果的病害严重程度,一般用如图2所示之表皮黑斑即黑色损伤在表面的覆盖率来表示<sup>[12]</sup>。实验中用软尺测量并计算芒果表面的弧面面积,由于损伤边界界定的带有一定的主观性且芒果表面并非严格球面,计算结果存在一定的误差,本文中以5%总表面积为步长对表皮黑斑/表面腐烂度进行量化表述。实验中对样本表面损伤的测量上限为80%,若某样本在某次测量中表面腐烂度达到80%即将其舍弃,不对其进

行继续观察检测。

芒果的成熟度可用表皮的颜色指数(Color Index, CI)来进行量化<sup>[13]</sup>, 对于绿和黄两色的芒果品种, 主要以黄色表皮面积占比来对成熟度进行量化; 而对于类似于本实验中采用红、黄和绿三色芒果品种, 颜色指数可以按照如下公式进行转换:

$$CI = Y\% + \frac{1}{2}R\% \quad (1)$$

其中 Y% 为黄色表皮占比面积; R% 为红色表皮占比面积。

### 1.4 可溶性固形物

可溶性固形物(TSS)通常被作为一项用以描述芒果成熟度的客观指标, 由于其具有破坏性的特点, 实验方案中仅针对第 2 类芒果样本进行 TSS 测试, 且每天仅从第 2 类总样本中随机选取 2 个芒果进行测试。测试仪器为爱宕 PAL-1 数显糖度仪(ATAGO, Japan), 测量位置选择为芒果赤道位置均布 4 点, 表皮下 1 cm 取样, 重复测量 4 次取平均。TSS 可通过换算用以表述成熟指数<sup>[14]</sup>:

$$Im = 100 \times TSS / 8 \quad (2)$$

### 1.5 呼吸速率

果蔬在呼吸过程中, 消耗 O<sub>2</sub> 生成 CO<sub>2</sub>, 因而常用 O<sub>2</sub> 的消耗速率或 CO<sub>2</sub> 的生成速率来表示水果的呼吸速率。实验中, 芒果的呼吸速率测定初始条件为大气状态(体积分数: O<sub>2</sub> 为 20.9%; CO<sub>2</sub> 为 0.03%), 在样本放入密封罐 2 h, 气味测试完成后, 从密封罐中抽取 5 mL 气体样本, 用 SRI 8610A 气相色谱仪(SRI Instruments Inc., USA)对气体样本中的 CO<sub>2</sub> 分量进行测量, 传感器温度设置为 55 °C, 压力设置为 482 kPa。呼吸速率可通过以下公式计算获得,

$$r_{CO_2} = \frac{([CO_2]_t - [CO_2]_{t_0})V}{100m(t - t_0)} \quad (3)$$

其中, t<sub>0</sub> 为初始时刻; 等同于刚放入密封罐的时刻; V 为密封罐自由体积; m 为所测芒果样本的质量。

### 1.6 统计分析及建模

考虑到电子鼻获得的气味数据中, 各峰面积值之间存在一定的相关性, 应变变量集中度高且样本数量未达到接近 20 倍于峰的数量, 常用的多元线性回归缺乏稳健性。本文中使用偏最小二乘(Partial Least Squares, PLS)来从各特征峰中选取对腐烂度和成熟度解释能力最强的变量, 并用变量投影重要性指标(Variable Importance in Projection, VIP)来描述。分析通过商业统计分析软件 SAS 9.0 完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各阶段气味图谱

按照实验方案, 实验芒果样本分为两类, 第一类每两天进行除破坏性的 TSS 以外的各项参数测量, 直至表面病害或腐烂面积超过 80%, 另一类在每次随机抽取 2 个芒果样本进行 TSS 测试后逐渐减少。所以第一类样本的气味测试中可提取得到整个实验过程中各阶段的气味图谱, 如图 3 所示为第一类中第 8 号(共 1~12 号)芒果在其中实验中第 1、7、13、19 和 25 d 的气味图谱, 各主要气味成分以峰值形式展现。其中第 25 d 的气味图谱中出现的气味峰个数最多, 主要有 10 个, 其中标号为 a、b 和 c 的 3 个峰仅在后期出现表面严重腐败时出现, 所以本文在气味分析中, 主要以 1 号至 7 号峰为主。

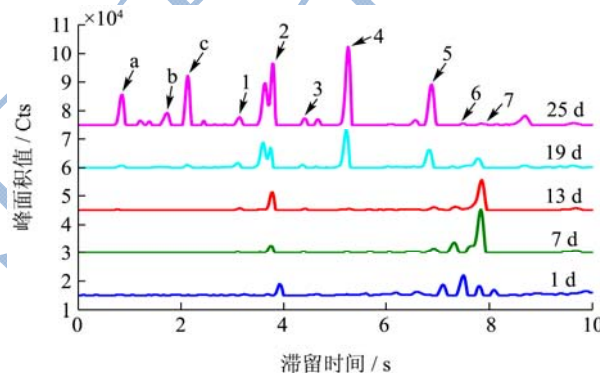


图 3 第一类样本第 8 号芒果在 25 d 内的气味图谱变化  
Fig.3 Spectral changes of mango #8 from the initial samples during 25 d of measurements

### 2.2 表面腐烂度分析

表 1 气味峰特征变量 VIP 值表

Table 1 VIP values of different odor peaks as predictors for rotten and ripeness

特征变量	VIP 值 (腐烂度)	VIP 值 (成熟度)
峰 1	0.92584	0.84204
峰 2	0.89629	0.38572
峰 3	1.19645	0.57527
峰 4	2.17434	1.66287
峰 5	2.22884	1.54290
峰 6	1.48388	1.50759
峰 7	0.10319	2.52839

由于在实验过程中, 同一个芒果样本会在不同时期进行多次测量, 故而在对表面破损率/腐烂度与气味峰面积之间的关系进行建模及检验时, 所涉及的样本数量包括:



(1) 12 个第一类芒果样本在所有表面腐烂度小于 80% 的情况下所进行的测量, 共计数据样本 91 个, 用于建模。

(2) 26 个第二类芒果样本中在进行 TSS 破坏性测试前, 且表面腐烂度小于 80% 的情况下所进行的测量, 共计数据样本 108 个, 用于检验测试。

### 2.2.1 特征选择

为了获取 1 号至 7 号峰之中对腐烂度解释能力最强的特征变量, 此处用 PLS 来对所有峰进行筛选, 如表 1 所示, 为所有 7 个峰的 VIP 值, 从中可知峰 4 和峰 5 的面积作为特征变量描述腐烂度时, 其 VIP 值超过 2.0, 为所有峰面值特征中最高, 表明其对腐烂度具有最高的解释能力。因气味峰面积与表面腐烂度之间并没有良好的线性关系, 故此处并不直接利用 PLS 进行模型参数的获取。

### 2.2.2 预测模型

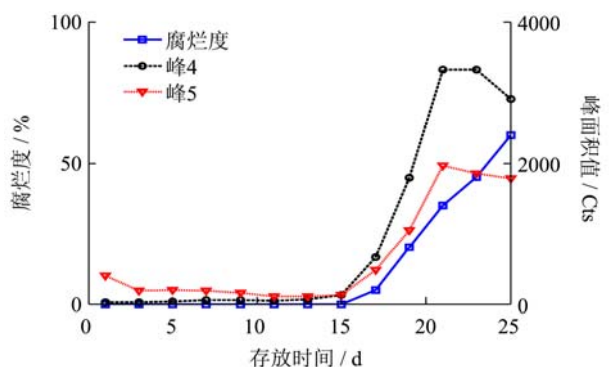


图 4 表面腐烂度指标和峰 4 和峰 5 面积值随存放时间的变化趋势

Fig.4 Variation in degree of rot on surface and values of peaks 4 and 5 over storage time

通过 PLS 选择出峰 4 与峰 5 最适于用来描述表面腐烂度的变化, 图 4 描述第一类样本中第 8 号芒果在整个 25 d 的测量期间, 其表面腐烂度、峰 4 及峰 5 的峰面积值随着时间的变化曲线。从中可以看出, 在 21 d 之前三者保持同样的变化趋势, 21 d 之后虽然表面腐烂度继续增加, 但峰面积值反而都呈现下降趋势,

表 2 高斯模型对峰 4 和峰 5 面积值的拟合参数表

Table 2 Fitting parameters of Gaussian models for peaks 4 and 5

峰号	模型	a	b	c	adj-R <sup>2</sup>	RMSE
峰 4	$f(x) = a \cdot e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2}$	3711	44.47	28.42	0.736	701
峰 5		2124	46.08	30.35	0.7242	392.8

据峰 4 及峰 5 峰面积值的变化趋势, 可用高斯函数来对其进行描述, 表 2 给出两峰的高斯函数模型参数、模型确定系数及均方根差, 图 6 为相应模型曲线及散点数据分布。所有实验样本中用表面腐烂程度来对样本进行分类时, 由于中间段 35% 至 50% 表面腐烂

故峰面积值与表面腐烂度之间的关系并不适合用线性模型来描述。

为了明确展示峰面积值与表面腐烂度的关系, 对所有的测试样本数据进行重排, 以表面腐烂度为 x 轴, 对 ±5% 范围内的测试样本峰面积值进行平均处理, 作出均值及标准差曲线, 如图 5 所示。随着芒果表面腐烂程度的增加, 峰 4 和峰 5 的峰面积值逐渐变大, 至 35% 左右达到最大值, 峰 4 面积均值为 4700 Cts, 峰 5 面积均值为 2800 Cts 明显低于峰 4。表面腐烂度超过 35% 以后, 两峰峰面积值均随腐烂程度增加而下降, 至 80% 极限时均降低至 1000 Cts。

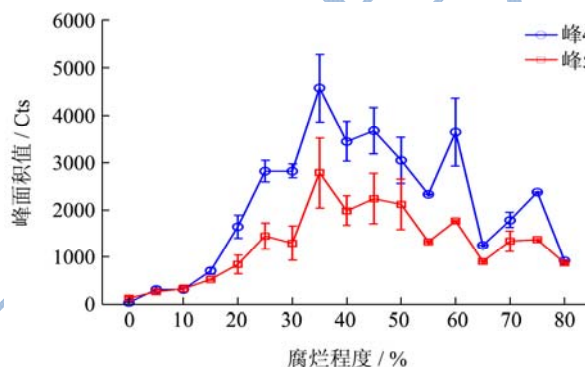


图 5 表面腐烂程度和峰面积值的关系

Fig.5 Relationship between degree of rot on surface and areas of peaks 4 and 5

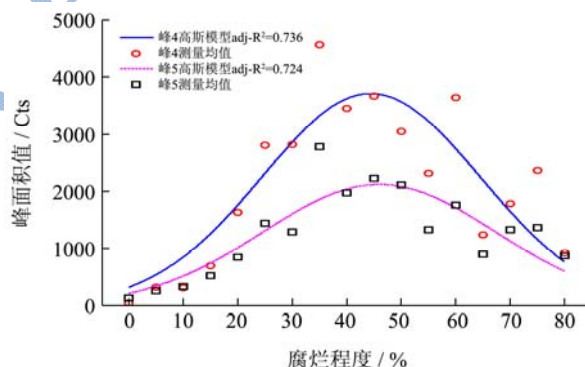


图 6 峰 4 和峰 5 的高斯模型拟合曲线及实验数据均值散点图

Fig.6 Gaussian fitted curve and experimental scatterplot for peaks 4 and 5

程度变化很快, 故在测试时间间隔内变化过于迅速, 导致最终数据中中段的样本数量较少, 其均值可靠性相对两端较低, 标准差较大。表面腐烂程度中段数据量少直接导致了模型确定系数下降, 以及均方根误差偏大。以上因素对高斯模型中的 a 值影响较大, 对 b

和  $c$  的影响相对较小, 影响气味峰 4 和峰 5 的峰面积值大小而不影响其峰值出现的位置。就高斯模型的拟合结果而言, 气味峰 4 会在 44.47% 表面腐烂时出现, 峰面积值为 3711 Cts, 而峰 5 会在 46.08% 表面腐烂时出现, 峰面积值为 2124 Cts。

### 2.2.3 模型检验

鉴于气味峰 4 与峰 5 的峰面积值可用表面腐烂程度的高斯函数表示, 所以并不存在用峰面积值描述表面腐烂程度的函数来对其进行准确估计。但从上述高斯模型参数中可以发现在表面腐烂度 0~80% 区间内, 并不是对称分布, 且表面腐烂属于一项比较严重的品质问题, 在筛选中容忍度很低, 因此, 仍可以通过阈值判定进行检测, 仅利用气味峰 4 或峰 5 的值表征是否出现腐烂。

从第一类样本的测试数据中, 按以下方式定义阈值: 样本首次出现腐烂征兆, 且损伤/腐烂面积覆盖率小于 5%, 提取该次测量样本的峰 4 和峰 5 峰面积值, 分别计算两者的平均值。具体为峰 4 阈值为 333.2 Cts, 峰 5 的阈值为 289.8 Cts。而根据上述高斯模型估计获取的阈值为峰 4 对应 539.3 Cts, 峰 5 对应 340.0 Cts。

用第二类样本的测试数据对峰 4 和峰 5 的阈值进行检验: 如峰 4 超过实验均值阈值 333.2 Cts 且出现可见表面腐烂, 则认为检测正确, 否则便认为是一次错误的检测; 对峰 5 也按照同样的方法进行检测正确率的统计。除实验均值阈值外, 同时以高斯模型估计阈值按照同上标准进行判定检测, 统计判定结果, 并列于表 3 进行比较。

表 3 腐烂度阈值判断检验表

Table 3 Checklist of threshold determination of degree of rot

类型	峰号	阈值/Cts	腐烂样本	未腐误判	峰 4 5 联合误判	未腐样本	腐烂误判	总误判率
实验平均	#4	333.2	14	3(21.43%)	2(14.29%)	94	2(2.13%)	4.85%
	#5	289.8		5(35.71%)			7(7.45%)	
模型估计	#4	539.3		4(28.57%)	2(14.29%)		1(1.06%)	4.85%
	#5	340.0		5(35.71%)		4(4.26%)	9.09%	

由表 3 比较结果可知, 通过对第一类样本实验得到的阈值, 在对第二类样本的各次测量进行判定检验时, 总 14 个出现腐烂的测试样本中, 如使用峰 4 进行判定, 出现 3 次误判为未腐样本, 误判率 21.43%, 如使用峰 5 进行判定, 出现 5 次误判, 误判率 35.71%; 总 94 个未出现腐烂的测试样本中, 如使用峰 4 进行判定, 出现 2 次误判, 误判率 2.13%, 如使用峰 5 进行判定, 出现 7 次误判, 误判率 7.45%。利用峰 4 的总误判率为 4.85%, 利用峰 5 的总误判率为 12.5%, 峰 4 作为判定依据可靠性要远大于峰 5, 但两者都容易将出现腐烂现象的样本误判为未腐烂样本, 原因在于总样本中, 出现表面腐烂的样本远少于未腐烂样本, 样本数量的限制导致了误判率的上升, 利用峰 4 和峰 5 的联合判定(或运算), 能将误判率大大降低。在进行判定模型检验时, 通过高斯模型得到的阈值, 除利用峰 4 面积值作为特征对腐烂样本进行判定时的误判率, 相比于用实验数据作为阈值的误判率稍高, 其他都更准确。分析其原因, 主要是由峰 4 模型在左侧拟合误差较大引起, 可通过增大建模数据进行改进。

- (1) 所有具有可察觉腐烂的测试样本都被移除。
- (2) 峰 4 面积值超过 539.3 Cts 或者峰 5 面积值超过 340.0 Cts 的样本都被移除。

按照以上选取条件, 第一类第二类实验芒果样本的所有测量数据样本剩余总共 165 个可用于成熟度分析。从中随机选取 99 个样本用于建模, 其他样本用于模型检验。由表 1 可知, 所有 7 个峰中峰 7 对成熟度具有最高的解释能力。因气味峰面积与成熟度之间并没有良好的线性关系, 故本文中并不直接利用 PLS 进行模型参数的获取。

### 2.3.2 预测模型

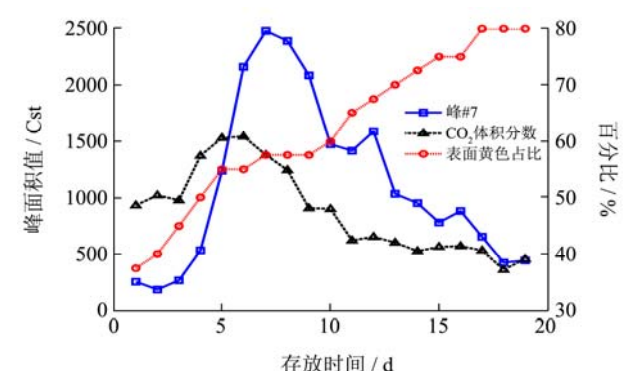


图 7 峰#7、CO<sub>2</sub>呼吸速率与表面黄色占比随存放时间的变化曲线

Fig.7 Variation trends in peak 7, CO<sub>2</sub> respiration rate, and surface yellow ratio along over storage time

## 2.3 成熟度分析

### 2.3.1 样本集特征选择

为了剔除腐烂样本的影响, 以仅对成熟度进行描述, 实验中按如下规则进行样本的选取:

图7描述第一类样本中第8号芒果在整个25d的测量期间,其表面黄色占比、CO<sub>2</sub>呼吸速率和峰7面积值随着存放时间的变化曲线。从图中可以明显看出芒果的成熟过程开始于测量开始第三天,CO<sub>2</sub>呼吸速率快速上升,至第五天到达最高,然后逐步下降。这种先上升后下降的趋势也同样出现在气味峰7的峰面积值上,不同的是峰7的峰值转折点出现较CO<sub>2</sub>呼吸速率峰值落后两天。而用以表征成熟度的表面黄色占比指标,随着存放时间的增加,呈单调上升趋势,对比其他两条曲线可知,在表面黄色占比为55%时,CO<sub>2</sub>呼吸速率达到峰值,黄色占比为57.5%时,峰7面积值达到峰值,以此为界129个为峰7的上升样本,36个为峰7的下降样本,芒果的过熟速度明显比初熟速度更快。

将所有数据按照表面黄色占比以2.5%为步长进行重排,以其均值及标准差进行曲线描述,见图8。由于数据点的分布具有明显的二段性,故此处对欠熟段和过熟段分别用指数函数进行建模,具体模型参数

见表4。从分段模型可以推断,对大样本统计而言,峰7的峰值应该出现在成熟度62.4%左右,峰值平均在1460 Cts左右,这为芒果的气味成熟度评价提供一个良好的参考。然而,此处欠熟段模型的确定系数明显高于过熟段模型,欠熟段数据样本数量3倍于过熟段是造成此差异的主要因素。

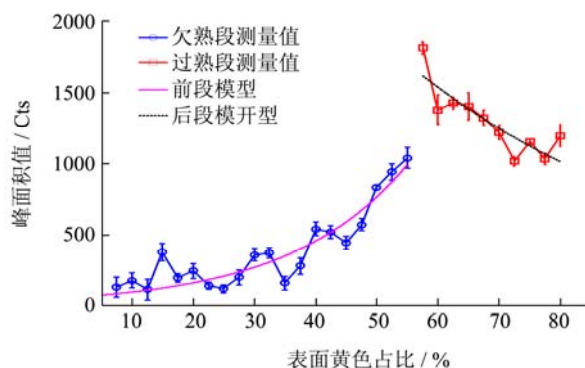


图8 成熟度与峰#7峰面积值的关系曲线及分段模型描述

Fig.8 Relationship between degree of ripeness and peak 7, and piecewise model

表4 分段模型参数及模型精度

Table 4 Model parameters and precision of piecewise model

区域	模型	a	b	Adj-R <sup>2</sup>	RMSE
欠熟段	$f(x)=a \cdot e^{bx}$	55.77	0.05236	0.8524	107.5
过熟段		5336	-0.02076	0.7029	126.1

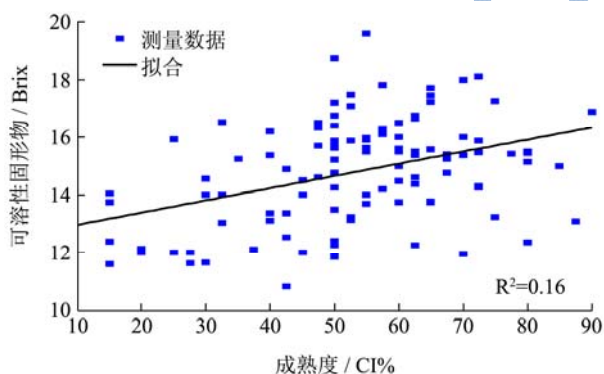


图9 芒果成熟度与可溶性固形物含量的关系

Fig.9 Relationship between degree of ripeness and total soluble solid content of mango

TSS作为一种常用的检验水果成熟度的指标,此处也用于对芒果成熟度进行分析,将进行TSS测量获得的样本与以CI值进行表征的成熟度进行线性拟合(如图9),其确定系数仅为0.16,表明两者之间相关性很差,对芒果的成熟度表征,不宜使用TSS来进行。由于测量样本的TSS值普遍高于10 Brix,此现象可能对结果稍有影响,此两者间相关性较低的情况可能会因芒果品种不同而出现不同。

2.3.3 模型检验

以上分析中对于峰7峰值位置的估计,使得利用气味峰7进行成熟度估计成为可能。依然采用分段函数的形式来描述估计模型为:

$$\begin{cases} CI = [1.91 \cdot \ln(p_7) - 7.68]\% & CI \leq 62.4\% \\ CI = [311 - 36.24 \cdot \ln(p_7)]\% & CI > 62.4\% \end{cases}$$

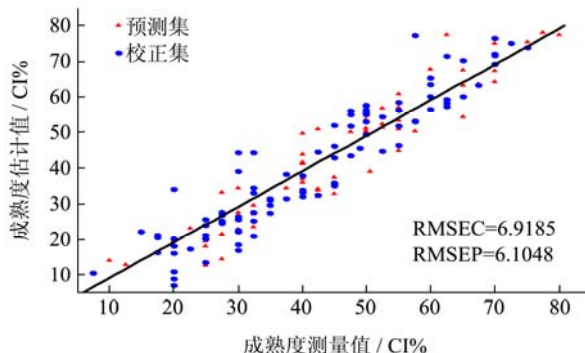


图10 气味峰7成熟度估计检验

Fig.10 Validation of ability of peak 7 to estimate degree of ripeness

用建模以外余下66个数据样本进行模型验证,如图10所示,以上分段函数模型可很好地用以描述气味峰7与成熟度CI值之间的关系,对随机产生的预测集与校正集,估计的均方根误差分别为6.1048和6.9185,



相较于 *CI* 本身 2.5% 的分辨率, 完全在可接受范围内。

### 3 结论

本文采用了一种能够快速定量检测气味的电子鼻对芒果采后熟化过程中的气味进行检测及分析, 从而判定是否有腐烂出现及对芒果的成熟度作出预测。经分析实验数据发现电子鼻的检测数据中, 峰 4 和峰 5 能有效地对腐烂做出判定, 而峰 7 跟成熟度具有很高的相关性, 但可溶性固形物指标与芒果成熟度相关性很小。通过进一步分析, 在峰 4 峰 5 与腐烂度之间建立了高斯模型, 并利用联合阈值判定对腐烂进行检测, 准确率超过 90%; 在峰 7 与成熟度之间建立了分段指数模型, 可有效地对成熟度做出估计, 估计均方根误差能控制在 7% 以内。

### 参考文献

- [1] Snowden, A L. Post-harvest diseases and disorders of fruits and vegetables: general introduction and fruits [M]. London: CRC Press, 2010
- [2] Lalel H J, Z Singh, S C Tan. Aroma volatiles production during fruit ripening of 'Kensington Pride' mango [J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 27(3): 323-336
- [3] Yashoda H M, T N Prabha, R N Tharanathan. Mango ripening: changes in cell wall constituents in relation to textural softening [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(5): 713-721
- [4] 洪雪珍, 韦真博, 海铮, 等. 基于电子鼻和神经网络的牛肉新鲜度的检测[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 279-285  
HONG Xue-zhen, WEI Zhen-bo, HAI Zheng, et al. Application of electronic nose and neural network in beef freshness detection [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 279-285
- [5] 乔艳霞, 李志西, 靳玉红, 等. 食醋陈化期电子鼻的监测研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 298-305  
QIAO Yan-xia, LI Zhi-xi, JIN Yu-hong, et al. Monitoring the vinegar aging based on electronic nose [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(7): 298-305
- [6] 陈辰, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 电子鼻结合 GC-MS 检测玫瑰香葡萄贮后货架期内挥发性物质的变化[J]. 现代食品科技, 2015, 10: 51  
CHEN Chen, LU Xiao-xiang, ZHANG Peng, et al. Determination of shelf quality after storage of muscat grape by electronic nose combined with GS-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 10: 51
- [7] 惠国华, 厉鹏, 吴玉玲, 等. 基于电子鼻系统的水果腐败过程表征方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 264-268  
HUI Guo-hua, LI Peng, WU Yu-ling, et al. Characterization method of fruit decay procedure using electronic nose system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 264-268
- [8] 周亦斌, 王俊. 基于电子鼻的番茄成熟度及贮藏时间评价的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 113-117  
ZHOU Yi-bin, WANG Jun. Evaluation of maturity and shelf life of tomato using an electronic nose [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(4): 113-117
- [9] 刘明, 潘磊庆, 屠康, 等. 电子鼻检测鸡蛋货架期新鲜度变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 317-321  
LIU Ming, PAN Lei-qing, TU Kang, et al. Determination of egg freshness during shelf life with electronic nose [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 317-321
- [10] 唐会周, 明建, 程月皎, 等. 成熟度对芒果果实挥发物的影响[J]. 食品科学, 2010, 16: 247-252  
TANG Hui-zhou, MING Jian, CHENG Yue-jiao, et al. Effect of degree of maturity on the volatile composition of mango fruits [J]. Food Science, 2010, 16: 247-252
- [11] Lebrun M, A Plotto, K Goodner, 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] Kobiler I, Y Shalom, I Roth, et al. Effect of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid on the incidence of side and stem end rots in mango fruits [J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 23(1): 23-32
- [13] Shorter A, D Joyce. Effect of partial pressure infiltration of calcium into 'Kensington' mango fruit [J]. Animal Production Science, 1998, 38(3): 287-294
- [14] Jha S, S Chopra, A Kingsly. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(1): 22-26