

基于电子鼻技术的玫瑰香葡萄贮藏期快速判别

Quick discrimination of storage periods for muscat grape based on electronic nose

陈 辰^{1,2} 鲁晓翔^{1,2} 张 鹏^{3,4} 陈绍慧^{3,4} 李江阔^{3,4}

CHEN Chen^{1,2} LU Xiao-xiang^{1,2} ZHANG Peng^{3,4} CHEN Shao-hui^{3,4} LI Jiang-kuo^{3,4}

(1. 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134; 2. 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134;
3. 国家农产品保鲜工程技术研究中心, 天津 300134; 4. 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384)

(1. College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce Tianjin, Tianjin 300134, China;

2. Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Postharvest

Physiology and Storage of Agricultural Products, Tianjin 300134, China; 4. National Engineering and

Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products, Tianjin 300384, China)

摘要:为了建立基于电子鼻技术的玫瑰香葡萄贮藏期快速、无损判别方法。采用电子鼻 PEN3 系统分别对 10, 0 °C 贮藏不同时间的玫瑰香葡萄进行检测, 分析传感器载荷贡献率, 应用主成分分析、线性判别分析对贮藏期进行区分, 建立贮藏期判别模型, 比较马氏距离法、欧氏距离法、相关性法、判别函数分析法对未知样品贮藏时间的判别效果, 同时测定贮藏期间的果好率、可溶性固形物、总酸、V_C、硬度等指标, 考察品质变化规律。结果表明: 玫瑰香葡萄在贮藏期间品质变化呈现一定规律性, 电子鼻不同的模式识别方法可将不同贮藏期样品有效区分, 应用判别函数分析对未知样品的判别正确率达 95%。因此, 利用电子鼻判别玫瑰香葡萄的贮藏期方法可行。

关键词: 电子鼻; 葡萄; 贮藏期; 主成分分析; 线性判别

Abstract: The aim was to establish a rapid discrimination method of Muscat grape during storage based on the electronic nose technology. Samples of different storage time stored in 10, 0 °C were detected using PEN3 electronic nose system, operating loadings contribution rate analysis of sensors, principal component analysis, linear discriminant analysis to distinguish the storage period, establishing of the discriminant model, and then compared the prediction power of Mahalanobis distance, Euclidean distance, correlation, discriminant function analysis method by unknown samples. At the same time,

the rate of good fruit, soluble solids content, total acid content, V_C content, hardness index were measured to reflect the changes of quality during storage. The results showed that the quality changes of Muscat grape during storage obeyed certain regularity, different pattern recognition method of electronic noses could distinguish different storage periods of samples effectively, application of discriminant function discriminant analysis to predict unknown samples got the highest correct rate, reaching 95%. Therefore, discriminant of Muscat grape storage period using electronic nose is feasible.

Keywords: electronic nose; muscat grape; storage periods; pattern recognition; quick discrimination

中国是葡萄生产、消费大国, 随着市场对高品质葡萄需求的不断扩大及葡萄保鲜技术的迅速发展, 针对葡萄品质、贮藏期等的快速、无损检测已成为果蔬保鲜领域的重要研究课题。玫瑰香葡萄(*Vitis vinifera* L. muscat hamburg)又名麝香葡萄、紫葡萄等, 是中国著名的鲜食、酿酒、制汁兼用的品种, 有浓郁的玫瑰香味, 酸甜可口、含汁量大、营养丰富, 市场占有率较高, 但其果质较软, 采后贮藏过程中极易出现流汁、腐烂、霉变等品质衰变现象^[1]。因此, 建立基于葡萄贮藏期品质的快速判别方法对预测其品质及定价等意义重大。

果蔬特有的香气是决定其商品价值的重要因素, 同时也是评价质量优劣的重要指标。目前, 研究香气成分的主要手段有电子鼻技术、气相色谱—质谱联用技术(GC—MS)等^[2]。GC—MS可通过气相色谱将挥发性物质分离, 再由质谱进行定量、定性分析, 但检测过程复杂、需对样品预处理、对仪器及操作的要求苛刻, 难以满足大规模应用的需求; 电子鼻技术是基于传感器阵列对不同种类气味的特定响应, 结

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(编号: 2012BAD38B01);
天津市高等学校创新团队培养计划项目(编号: TD12-5049)

作者简介: 陈辰(1989—), 女, 天津商业大学在读硕士研究生。
E-mail: sxdtec_cool@163.com

通讯作者: 鲁晓翔

收稿日期: 2015-05-30

合化学计量学方法进行判别、聚类分析,具有快速、无损、重复性好的特点,广泛用于果蔬新鲜度、成熟度判别、病害检测等^[3-4]。Brezme 等^[5]研究了电子鼻响应信号与粉红女士苹果成熟度、品质之间的关联分析,得到电子鼻信号与苹果品质有较强相关性;Antihus Hernández Gómez 等^[6]应用电子鼻 PEN2 系统对柑橘货架期进行判别,结果发现线性判别分析效果优于主成分分析;马淑凤等^[7]利用电子鼻系统对水蜜桃芳香成分进行检测分析,实现了对不同储藏期水蜜桃样品的检测与区分;宋小青等^[8]在利用电子鼻对“秦美”猕猴桃贮藏期内香气成分进行检测的基础上,采用不同的分析方法建立了评价猕猴桃贮藏期品质的数学模型。近年来,电子鼻技术在果品中的应用主要集中在苹果、柑橘、梨等的货架期、贮藏期香气成分的检测及评价^[9-11],而针对贮藏期间葡萄气味变化的检测及贮藏时间判别却未见报道。本研究设定 0、10℃贮藏玫瑰香葡萄,运用电子鼻 PEN3 系统对葡萄贮藏期的气体成分进行检测,结合理化、感官、营养指标的测定,分析其变化趋势,并利用不同的模式识别方法进行贮藏时间区分,拟建立快速识别模型,得到玫瑰香葡萄贮藏期的快速、准确判别方法,以期对贮藏期葡萄品质的评价提供新的方法和技术依据。

1 材料与方法

1.1 样品处理

玫瑰香葡萄于 2014 年 9 月 17 日采于天津市汉沽区茶淀镇,成熟度约八成,无病虫害、无机械伤,采收当天运回实验室,挑拣去坏果、落粒,预冷 24 h 后分装入厚度 0.02 mm 的葡萄专用膜包装袋内,分别置于(10±1)℃和(0±0.5)℃冷库。10℃贮藏 14 d,每间隔 2 d 取样测定一次;0℃贮藏 56 d,每间隔 8 d 取样测定一次。贮藏期内测定好果率、可溶性固形物(SSC)、总酸(TA)、硬度、V_c等指标。

1.2 仪器设备与主要试剂

便携式电子鼻: PEN3 型,德国 Airsense 公司;
数字手持折光仪: PAL-1 型,日本 Atago 公司;
糖酸测定仪: BRIX-ACIDITY METER GMK-706R 型,韩国 G-WON 公司;
紫外可见分光光度计: TU-1810 型,北京普析通用仪器公司;
质构仪: TA.XT plus 型,英国 Stable Micro Systems 公司;
草酸、乙二醇四乙酸、偏磷酸、钼酸铵: 分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司。

1.3 电子鼻检测方法

将葡萄样品在 20℃左右放置 1 h,随机取 30 g 左右(偏差 0.2 g 以内)置于洁净干燥的 250 mL 烧杯中,封口平衡 10 min 后进行数据采集,测定条件: 自动调零时间 10 s,样品准备时间 5 s,样品测试时间 50 s,样品测定间隔时间 1 s,内部流量 100 mL/min,进样流量 100 mL/min,传感器清洗时间 300 s,每组试验重复测定 10 次。选取传感器响应较平稳的第 42~45 秒的测试数据用于分析处理。

1.4 模式识别方法

(1) 主成分分析(principal component analysis, PCA): 在研究多变量问题时,PCA 方法可以通过降维,得到样品的最佳描述特征,通常,前两个主成分的总贡献率大于 95%,则说明该方法具有可行性^[12]。

(2) 线性判别分析(linear discrimination analysis, LDA): 将原始数据投影到低维的方向,以所采集香气成分响应值的空间分布状态及彼此间的投影距离表现气味变化的速率,是判别函数分析的前提^[13]。PCA 和 LDA 的区别在于,LDA 能够收集传感器所有信息并进行标准正常化转换,更好地解决分类问题;PCA 注重最大的方向的分布。

(3) 载荷分析(loadings analysis): 与 PCA 分析基于相同的算法,每个传感器贡献率系数在载荷图 PCA 坐标系上的位置可以体现其变量解释能力,即对特定气味的分辨力,位于靠近中心位置的传感器贡献率最低,在当前分析中的重要性最差,远离中心的传感器贡献率较高,关闭贡献率低的单个传感器,优化传感器阵列,可以提高判别能力^[14]。

1.5 贮藏期判别方法

将进行模式识别后的样品通过 Winmuster 软件对贮藏天数进行赋值,使其具有描述性特征,建立基于 PCA、LDA 的判别模型。

在不同贮藏期样品中随机抽取 20 个,应用模型预测贮藏时间。系统提供了 4 种预测分析方法,欧氏距离法(euclid distance)、马氏距离法(mahalanobis distance)、相关性法(correlation)、判别函数法(discriminat function analysis, DFA),分别通过测量数据与中心化数据的整体距离、协方差距离、空间位置统计关系、距离分布函数 P 值作为确定相似度的依据,进行预测分析,设定距离分析的最邻近结点算法 KNN 值为 1,DFA 判别因子数为 10。

1.6 其他指标测定方法

- (1) 好果率:按式(1)计算。
- $$\text{好果率} = \frac{\text{总果质量} - \text{腐烂、霉变、落粒质量}}{\text{总果质量}} \times 100\% \quad (1)$$
- (2) 穿刺硬度:采用 TA.XT plus 型质构仪测定。使用 P/2n 针状探头(直径 2 mm),设置配套 Exponent 软件的 macro 规则参数:测前速度 5 mm/s、贯入速度 2 mm/s、测后速度 5 mm/s、最小感知力 5 g、穿刺深度 5 mm、感应力变化阈值 2 g,测定果肉平均硬度。
- (3) SSC、TA:葡萄整果挤汁、两层纱布过滤后分别滴于 PAL-1 数字手持折光仪与 BRIX-ACIDITY METER 糖酸测定仪上,测定 SSC、TA 含量,重复测定 10 次,取平均值。
- (4) V_c含量:钼蓝比色法^[15]。

1.7 数据分析

数据分析采用 SPSS 16.0 软件,图表绘制采用 Excel 2003、Sigma-plot 软件。

2 结果与分析

2.1 不同温度下玫瑰香葡萄贮藏期品质的变化

葡萄 10℃贮藏 0~14 d 及 0℃贮藏 0~56 d 期间的好果率、SSC、TA、硬度、V_c含量的变化情况见表 1。

表 1 不同温度下玫瑰香葡萄贮藏期品质的变化[†]

Table 1 Quality changes of muscat grapes stored at different temperatures

温度/℃	贮藏时间/d	好果率/%	SSC/°Brix	TA/%	硬度/g	V _C /(10 ⁻² mg·g ⁻¹)
10	0	100.00	18.20±0.00 ^b	0.57±0.02 ^b	20.00±3.53 ^a	2.35±0.10 ^a
	2	99.90	18.30±0.00 ^a	0.61±0.01 ^a	19.67±3.53 ^a	2.13±0.06 ^b
	4	96.54	18.00±0.10 ^c	0.55±0.02 ^c	19.36±2.83 ^c	1.99±0.11 ^b
	6	89.33	17.80±0.00 ^e	0.54±0.01 ^{cd}	19.12±4.16 ^b	1.62±0.05 ^c
	8	87.71	17.90±0.10 ^d	0.53±0.01 ^d	19.06±3.53 ^a	1.05±0.06 ^d
	10	88.65	17.40±0.00 ^f	0.50±0.02 ^e	19.03±2.83 ^c	0.91±0.11 ^e
	12	82.27	16.90±0.00 ^g	0.51±0.02 ^e	18.99±4.16 ^b	0.92±0.05 ^{de}
	14	82.03	16.70±0.00 ^h	0.48±0.01 ^f	18.61±3.53 ^a	0.71±0.16 ^f
0	0	100.00	18.20±0.00 ^a	0.57±0.02 ^c	20.00±3.53 ^a	2.35±0.10 ^a
	8	97.53	18.00±0.10 ^b	0.58±0.02 ^b	19.65±3.25 ^b	2.33±0.02 ^a
	16	89.97	17.70±0.00 ^c	0.56±0.02 ^a	17.84±3.33 ^{bc}	1.57±0.06 ^b
	24	85.47	17.60±0.10 ^c	0.52±0.02 ^c	18.54±2.95 ^{cd}	1.38±0.10 ^c
	32	74.96	16.90±0.00 ^d	0.50±0.01 ^d	18.72±2.93 ^e	0.92±0.06 ^d
	40	72.03	16.70±0.00 ^e	0.50±0.03 ^d	18.72±2.93 ^e	0.91±0.02 ^d
	48	70.33	16.40±0.10 ^f	0.61±0.02 ^a	18.40±3.21 ^{cd}	0.84±0.06 ^e
	56	68.79	16.00±0.00 ^f	0.60±0.01 ^d	17.18±3.72 ^e	0.81±0.10 ^e

[†] 同一组别中同一列出现不同字母表示差异显著(P<0.05)。

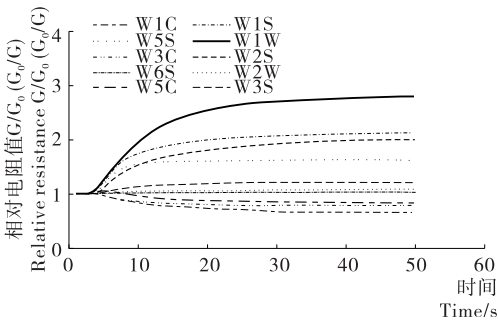
由表 1 可知,贮藏期间两组样品的各项指标呈现整体下降趋势,好果率、硬度、V_C含量变化明显,葡萄为非呼吸跃变型水果,符合贮藏期品质变化的一般规律^[16]。10℃贮藏样品的 SSC、TA 前 2 d 稍有升高,可能与果实采后仍有一定的后熟有关;0℃冷藏样品的 TA 先下降,第 48 天后有所升高,可能与有机酸作为代谢中间产物,贮藏初期有所损失,贮藏达到一定时间后,又有部分物质转化为酸有关;SSC 为生理活动提供能量,而 V_C等物质极不稳定,因而均有所损失;贮藏期间,随着原果胶转化为水溶性果胶、果胶酸等,葡萄的平均硬度有较大变化。

10℃贮藏的葡萄从第 6 天开始出现变化高峰,12 d 后劣变明显;0℃贮藏 8 d 时测定值较 0 d 时有很大区别,说明葡萄品质受温度影响较大,随后变化的拐点为 32 d,到第 56 天时有较多落粒、腐烂果,已丧失商品价值。

2.2 传感器特征响应及载荷分析

电子鼻 PEN3 系统配备 10 个金属氧化物传感器阵列,分别对不同种类气体成分有针对性地识别,对玫瑰香葡萄气味的响应情况见图 1。

由图 2 可知,第一主成分与第二主成分的总贡献率达 97.11%。综合图 1、2 发现,对玫瑰香葡萄气味响应贡献率最大的为传感器 W1W,其除了对硫化物敏感之外,对多种萜烯类物质也非常敏感,而构成葡萄主体香气的物质大多为萜烯类成分^[18]。传感器 W1S、W2S、W5S、W3S 也有相对较明显的响应,其中,W1S、W5S 灵敏度高、范围广,W2S 对醇类物质灵敏性高。其他传感器 G/G₀值绝对值较小,在载荷 PCA 图中分布集中,贡献率低。



G/G_0 (G_0/G) 为传感器接触到挥发性物质后的电阻值 G 与接触标准活性炭过滤的零气的电阻值 G_0 的比值; G/G_0 (G_0/G) 值与 1 的距离表示吸入气体的浓度,与 1 越接近,浓度越小^[17]

图 1 传感器相对电阻特征及敏感性

Figure 1 Characteristic of sensor resistance values and sensibility

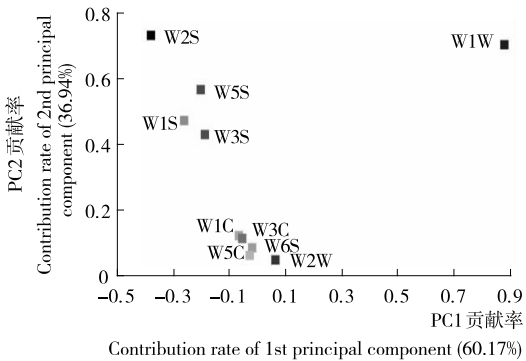
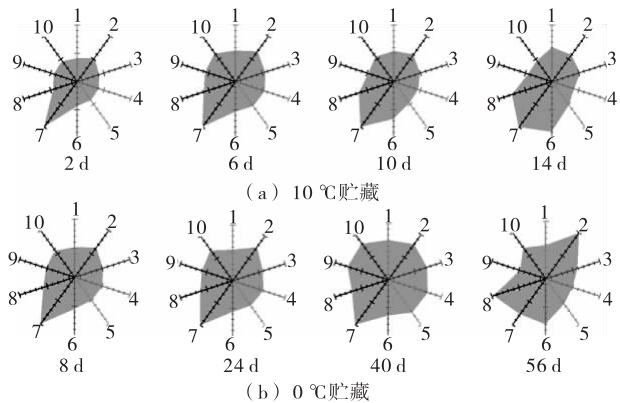


图 2 传感器载荷 PCA 分析

Figure 2 PCA analysis of sensor-loadings

2.3 不同贮藏期的电子鼻特征蛛网图

蛛网图可体现电子鼻传感器检测挥发物质的实时特征。由图 3 可知,0℃贮藏期内气味种类和吸附量变化较 10℃贮藏时的变化明显,总体变化规律为各传感器气味吸附水平平均化,图形向圆周扩散,代表主要特征香气的 7 号传感器即 W1W 在 10℃贮藏期间变化不大,但 0℃组随着贮藏时间的延长,其 G/G_0 明显降低,表明特征香气有较大损失;此外,贮藏后期,6 号 W1S、8 号 W2S 传感器 G/G_0 均有所增大,可能与品质劣变产生的杂质气体有关。因此,应用蛛网图可以实现电子鼻系统不同传感器同一时刻吸附情况的实时比较,方便直观,同时,不同贮藏期平衡时的图形可大致反映气味变化的规律性。



1~10. 分别对应 W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S 10 个传感器的相对 G/G_0 值

图 3 不同贮藏期的电子鼻响应蛛网图

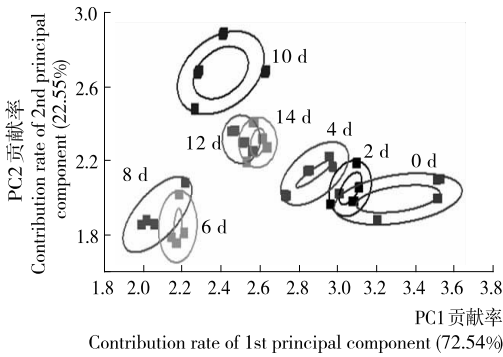
Figure 3 Spider chart of different storage periods responded by electronic nose

2.4 玫瑰香葡萄贮藏期的 PCA 分析

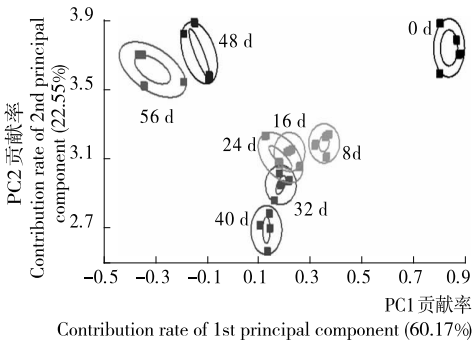
采用 PCA 方法对电子鼻传感器响应值进行分析,可以得到不同贮藏期葡萄香气品质的最佳描述,从而进行区分。由图 4 可知,10℃下不同贮藏时间葡萄的第一主成分(PC1)、第二主成分(PC2)贡献率分别为 72.54%、25.55%,0℃下 PC1、PC2 贡献率分别为 60.17%、36.94%;10,0℃下的总贡献率分别为 98.09%、97.13%,均超过了 95%,说明可以代表样品的全部信息特征。由图 4 还可知,10℃下贮藏的 0,2,4 d 有连续性交叉,说明气味成分变化不大,贮藏 6 d 和 8 d 部分重合成为一个独立的区域,10 d 无交叉,12 d 和 14 d 较大范围重合成一个区域,且区分明显;0℃贮藏时,0 d 与其他时间区别较大,16,24,32 d 三者区分不大,贮藏到 48,56 d 时变化明显。结果表明,随着贮藏期的延长,葡萄果实的挥发性气体成分变化显著,其变化高峰、变化程度等的规律与理化、营养、感官指标变化结果相一致;0℃冷藏中期气味区分不大,这与温度对气味挥发的影响及电子鼻的灵敏性有关。

2.5 玫瑰香葡萄贮藏期的 LDA 分析

用 LDA 法分析不同贮藏温度下玫瑰香葡萄的贮藏期,结果见图 5。



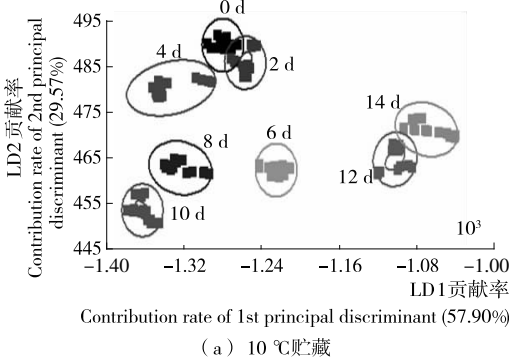
(a) 10℃贮藏



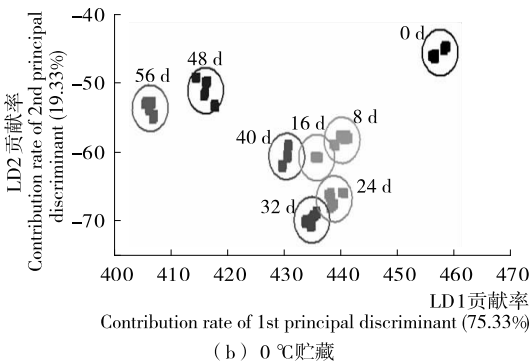
(b) 0℃贮藏

图 4 不同温度下玫瑰香葡萄贮藏期电子鼻 PCA 分析

Figure 4 PCA analysis of electronic nose for Muscat grapes at different storage temperatures



(a) 10℃贮藏



(b) 0℃贮藏

图 5 不同温度下玫瑰香葡萄贮藏期电子鼻 LDA 分析

Figure 5 LDA analysis of electronic nose for Muscat grapes at different storage temperatures

由图 5 可知,10℃下不同贮藏时间葡萄气味的第一判别式(LD1)、第二判别式(LD2)贡献率分别为 57.90%、29.57%,总贡献率为 87.47%;0℃下的 LD1、LD2 贡献率分别为 75.33%、19.33%,总贡献率为 94.66%。两个温度的

不同贮藏时间的分析结果区别明显,10℃下贮藏的前 4 d 距离较近(距离越大表明变化越快、越明显),6 d 后有急剧变化;0℃下贮藏 0 d 距离最远,其次为 48 d 和 56 d 所成区域,中期较为集中,变化较匀速。0℃贮藏样品的 LDA 分析比 10℃贮藏的效果好,与其测定间隔长、变化显著有关。因此,LDA 方法可以从气味的角度区分不同贮藏时间的葡萄样品,但区分效果需要进一步提高,同时,LDA 处理是进行贮藏时间判别分析的前提,是建立判别模型的基础。

2.6 玫瑰香葡萄贮藏期的预测

将不同温度贮藏的样品检测结果按照贮藏天数赋值,建立判别模型;同时,随机选取 20 个未参与建模的不同贮藏时间的样品测量结果,应用模型对其进行预测。分别采用欧氏距离法、马氏距离法、相关性法、判别函数法(DFA)预测贮藏 12 d 样品的贮藏天数,结果见图 6。可见,在用于分析的42~45 s,4 种方法预测值指示线重合在纵坐标 12 d 上,与真实值相同,预测成功。

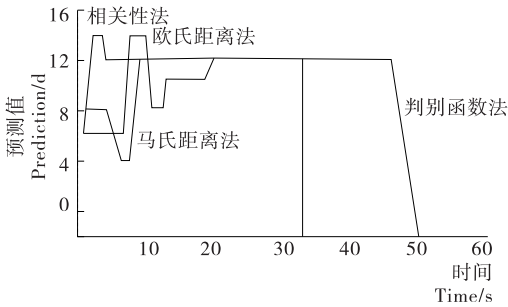


图 6 不同判别方法的预测结果示例

Figure 6 Typical example of forecasting by different discriminant methods

以同样方法完成 20 个样品的判别,结果见表 2。

表 2 未知样品判别结果

Table 2 Discrimination results of unknown samples

预测方法	样品数	正确个数	错误个数	正确率/%
欧氏距离法	20	18	2	90
马氏距离法	20	18	2	90
相关性法	20	16	5	80
判别函数法	20	19	1	95

由表 2 可知,DFA 方法的预测正确率最高,达到 95%,只有一个判别错误;欧氏距离、马氏距离法效果次之,相关性分析正确率最低。DFA 方法较其他方法优势在于判别依据不仅仅是一维或多维距离,而是根据由模式向量及其权重建立的判别函数进行决策,避免了变量的错误夸大或忽略,提高了判别能力,但其准确性对 LDA 分析有较大依赖性^[19]。

3 结论

玫瑰香葡萄在 10,0℃下贮藏,其挥发性气体成分随贮藏时间的延长发生了明显变化,同时,好果率、果肉平均硬度、可溶性固形物、总酸、V_c含量等品质指标也发生相应的变化。利用电子鼻 PEN3 系统进行传感器载荷分析表明,贡献率最大的为传感器 W1W,对萜烯类气体成分敏感,其次为 W1S、W2S、W5S 等,主要传感器相对电阻值随贮藏时间体现一定变化规律。应用 PCA 方法分析样品电子鼻测定结果,

前两个主成分总贡献率分别达 98.09%,97.10%,表明不同时间样品聚类特征明显,贮藏期间气味变化与贮藏时间长短有较强相关性,可以作为判别贮藏期的手段。LDA 方法可以将不同贮藏时间的样品有效区分,第一、二判别式总贡献率分别为 87.47%,94.66%,对 0℃样品的区分效果优于 10℃的,气味变化快慢程度与品质变化有类似规律。利用未知样品对贮藏时间判别模型的验证结果表明,判别函数法判别正确率最高,达 95%,优于其他方法。因而,电子鼻可有效区分玫瑰香葡萄的贮藏期,并同时适用于 0℃和 10℃贮藏样品。今后尚需要进一步论证建立判别模型的方法,提高判别准确度和大量样本检测的适用性。

参考文献

1 张福庆,李巍,田卫东,等. 玫瑰香葡萄品种特性与汉沽产地分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2007(5):39~42.

2 冯青. 电子鼻系统在水果贮藏中的应用[J]. 产业与科技论坛,2012(12):78.

3 Amy Loutfi, Silvia Coradeschi, Ganesh Kumar Mani, et al. Electronic noses for food quality[J]. Journal of Food Engineering, 2015,144:103~111.

4 王伟,柴春祥,鲁晓翔,等. 无损检测技术在虾鲜度评定中的应用[J]. 食品与机械,2013,29(4):233~236.

5 Brezmes J, Llobet E, Vilanova X, et al. Fruit ripeness monitoring using an electronic nose[J]. Sensors and Actuators B, 2000, 69(3): 223~229.

6 Antihus Hernández Gómez, Wang Jun, Hu Gui-xian, et al. Discrimination of storage shelf-life for mandarin by electronic nose technique[J]. Food Science and Technology, 2007,40(4):681~689.

7 马淑凤,王周平,丁占生,等. 应用电子鼻技术对水蜜桃储藏期内品质变化的研究[J]. 食品与生物技术学报,2010,29(3):390~394.

8 宋小青,任亚梅,张艳宜,等. 电子鼻对低温贮藏猕猴桃品质的预测[J]. 食品科学,2014,35(20):230~235.

9 Hui Guo-hua, Jin Jiao-jiao, Deng Shang-gui, et al. Winter jujube (Zizyphus jujuba Mill.) quality forecasting method based on electronic nose [J]. Food Chemistry, 2015,170(1):484~491.

10 朱娜,潘磊庆,鄢慧颖,等. 基于电子鼻检测‘霞晖 5 号’桃果实实的冷害[J]. 食品科学,2014, 35(4):95~100.

11 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.

12 费雅君,白雪,康小红. LDA 优化电子鼻传感器阵列的研究[J]. 食品与机械,2012,28(1):97~100.

13 张鹏,李江阔,陈绍慧. 气质联用和电子鼻对 1-MCP 不同处理时期苹果检测分析[J]. 食品与发酵工业,2014,40(9):144~151.

14 赵梦田,杜佳苏,黄洁,等. 基于电子鼻的库尔勒香梨品质区分方法研究[J]. 中国食品学报,2014,14(3):225~228.

15 李军. 钼蓝比色法测定还原型维生素 C[J]. 食品科学,2000,21(8):42~45.

16 李志文,张平,王罡,等. 1-MCP 处理对乍娜葡萄常温货架期保鲜效果的研究[J]. 保鲜与加工,2012,12(3):6~10.

17 胡桂仙,王俊,王小驷. 电子鼻无损检测柑橘成熟度的实验研究[J]. 食品与发酵工业,2005,31(8):57~61.

18 周建梅. 鲜食葡萄香气物质的组成和代谢调控[D]. 泰安:山东农业大学,2013.

19 Ravikumar B, Eisman G. Weak minimization of DFA-an algorithm and applications[J]. Theoretical Computer Science, 2004, 328(29):113~133.