

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.023

牛肉品质检测中电子鼻参数的优化*

洪雪珍 王 俊

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要:以牛肉为研究对象,采用电子鼻技术考察实验参数——顶空空间、样品质量和顶空生成时间对电子鼻传感器响应信号的影响。选取传感器信号峰值和稳定值进行分析,通过方差分析观察单个传感器以及整个传感器阵列对不同参数的响应情况,同时结合主成分分析、线性判别分析得出较佳顶空空间为500 mL、样品质量为25 g、顶空生成时间为5 min,并应用此参数进行电子鼻对储藏0、3、5、7、10、12、14 d牛肉样品的检测,逐步判别分析正确率为98.57%。

关键词:牛肉 电子鼻 参数优化 方差分析 逐步判别分析

中图分类号: TS251.5⁺2; TP212.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0125-07

Parameters Optimization of Electronic Nose in Detection of Beef Freshness

Hong Xuezheng Wang Jun

(School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The effects of beaker volume, sample weight and headspace-generation time on the response of a PEN2 electronic nose (e-nose) were studied. Both the peak and final stable responding points of sensors were extracted. Principle component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA) and analysis of variance (ANOVA) were employed to analyze the responding of each sensor as well as the whole sensor array, and the optimum parameters (500 mL beaker volume, 25 g sample mass, 5 min headspace-generation time) were acquired for later beef storage time detection. The difference in volatile profiles of beef samples of seven different storage times (0, 3, 5, 7, 10, 12 and 14 d) was confirmed. The stepwise linear discriminant analysis (Step-LDA) results showed that the correct rate was 98.57%.

Key words: Beef Electronic nose Parameters optimization Analysis of variance Stepwise discriminant analysis

引言

电子鼻是由性能彼此重叠的多个化学传感器(简称气体传感器阵列)、数据采集系统和适当模式识别方法所组成的仿生学仪器^[1~3]。工作时,气敏传感器模仿生物的嗅细胞,对气体进行吸附、解吸附等,其识别机制是在阵列中的每个传感器对被测气体都有不同程度的灵敏度,从而整个传感器阵列对不同气体产生不同的信号,最终通过模式识别实现

气体组分分析^[4~6]。

电子鼻对肉类的研究,主要体现在种类区分、新鲜度判定和品质指标预测^[7~12]。目前已有相关研究中,大多通过估算或参考他人文献,进行实验样品量、密封时间等参数的选择^[13~15]。而事实上,电子鼻的传感器响应与样品种类、质量、温度、状态及环境因素都有很大联系^[16];相同对象不同实验参数,或不同对象相同实验参数,都会引起传感器的响应差异,从而影响电子鼻的检测效果。因此,在电子鼻

收稿日期:2012-09-20 修回日期:2012-10-06

*国家自然科学基金资助项目(31071548)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD29B02-4)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100101110133)

作者简介:洪雪珍,博士生,主要从事电子鼻舌应用和相关数据分析研究,E-mail: 10913017@zju.edu.cn

通讯作者:王俊,教授,博士生导师,主要从事农产品品质检测研究,E-mail: jwang@zju.edu.cn

检测前,先进行实验条件参数的优化,是非常必要的。

本文以牛肉为研究对象,考察牛肉顶空空间(即烧杯容积)、样品质量、顶空生成时间对电子鼻传感器响应信号的影响,并利用多种模式识别和统计学方法确立较佳实验参数;在该较佳参数条件下,用电子鼻对牛肉储藏时间进行区分和预测。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

采用牛后腿肉,样品均购于杭州肉联厂。宰杀后立即取样,用保鲜袋密封包装,并用冰块使样品迅速冷却,立即运至实验室。在实验室超净工作台中,用无菌刀将样品切割成小块、混匀,以尽可能地使样品均一。除当天实验所需质量外,其余均用保鲜袋密封于冰箱中,8℃冷藏。

1.2 实验仪器

实验采用德国 Aisense 公司的 PEN2 型便携式电子鼻,主要包括传感器阵列(包含 10 个对不同化合物具有不同选择灵敏性的金属氧化物传感器^[10],编号为 S1~S10)、采样及清洗通道、数据采集系统及计算机。为减轻传感器漂移对数据的影响,采用样品气体接触各传感器时的电导率 G 与基准气体通过时传感器的电导率 G_0 的比值作为电子鼻原始数据。

1.3 实验方法

检测前,从冰箱取适量样品并静置至室温(20℃)。实验采用静态顶空采样方式,把牛肉放置在烧杯内,用保鲜膜将其密封静置一段时间(顶空生成时间),然后用电子鼻的针头刺入保鲜膜,吸收牛肉顶空气体进行反应。电子鼻软件每 1 s 自动记录一次数据。本实验设置采样时间 60 s,清洗时间 50 s。

由于电子鼻的传感器响应与样品的质量、温度、状态及环境因素有着很大的联系,本研究先进行参数优化预实验,考察顶空空间、样品质量、顶空生成时间对传感器响应信号的影响,然后利用较佳实验参数进行电子鼻对储藏 0、3、5、7、10、12 和 14 d 牛肉品质的检测。

1.3.1 顶空空间参数的优化

取 4 组烧杯:50、150、250、500 mL,每组 7 个重复,每个烧杯中放 20 g 新鲜牛肉样品,密封 30 min 后进行电子鼻检测。2 d 后重复上述步骤。对以上 8 组共 56 个样品根据顶空空间和储藏时间进行编号:50 mL-0、150 mL-0、250 mL-0、500 mL-0、50 mL-2、150 mL-2、250 mL-2、500 mL-2。

1.3.2 样品质量参数的优化

取新鲜牛肉 1 200 g,分成 4 组:5、10、15、25 g,每组 7 个重复,共 28 个,分别置于 28 个较佳容积的烧杯中,密封 30 min 后进行电子鼻检测。2 d 后重复上述步骤。对以上 8 组共 56 个样品根据质量和储藏时间进行如下编号:5 g-0、10 g-0、15 g-0、25 g-0、5 g-2、10 g-2、15 g-2、25 g-2。

1.3.3 顶空生成时间参数的优化

取适量新鲜牛肉,采用前 2 节所述较佳的烧杯容积和样品质量,根据顶空生成时间分成 4 组:0、5、15、25 min,每组 7 个重复。样品顶空生成后,立即进行电子鼻检测。2 d 后重复上述步骤。对以上 8 组共 56 个样品根据顶空生成时间和储藏时间进行编号如下:0 min-0、5 min-0、15 min-0、25 min-0、0 min-2、5 min-2、15 min-2、25 min-2。

1.3.4 较佳参数条件下的电子鼻检测

采用上述优化的实验参数,对 8℃ 冰箱中储藏 0、3、5、7、10、12、14 d 的牛肉进行电子鼻检测,共 7 d,每天检测 30 个样品。

1.4 分析方法

提取电子鼻第 15 秒(传感器信号差异最大时刻)和第 60 秒(传感器信号稳定时刻)数据作为原始电子鼻数据。采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)、线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)和方差分析(Analysis of variance, ANOVA)对参数优化实验数据进行分析^[17],观察电子鼻在不同参数条件下对牛肉储藏时间区分效果,得出较佳顶空空间、样品质量、顶空生成时间;同时结合马氏距离(Mahalanobis distance, MD)^[18],对不同储藏时间牛肉品质进行区分,并利用逐步判别分析(Stepwise linear discriminant analysis, Step-LDA)^[19]预测牛肉储藏时间。

PCA 和 LDA 由电子鼻自带 WinMuster 软件实现,ANOVA、MD 和 Step-LDA 在 SAS 8.2 上实现。

2 结果与分析

2.1 优化实验参数

2.1.1 顶空空间

图 1 为不同烧杯容积 50、150、250、500 mL,其他条件一致时的电子鼻对新鲜牛肉的响应曲线。如图所示,不同烧杯容积条件下,传感器响应曲线不同:如传感器 S2 稳定时的 G/G_0 值在 250 mL 条件下最大,约为 5.4;传感器 S6 和 S8 在 150 mL 条件下的 G/G_0 值先增大后略减小至稳定值。4 个条件下的传感器响应趋势类似:10 个传感器按平稳后 G/G_0 值从大到小排列顺序皆为 S2、S8、S9、S6、S7、S4/S10 和

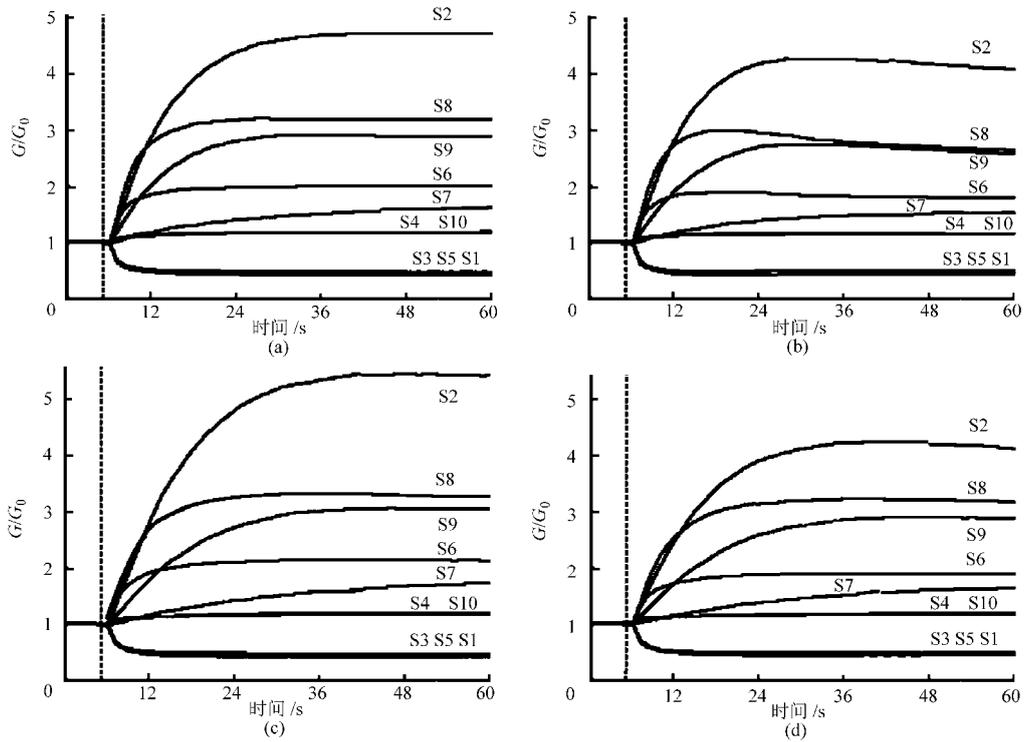


图1 不同烧杯容积条件下电子鼻传感器对新鲜牛肉的响应曲线

Fig. 1 Responding curves of e-nose for fresh beef samples placed in four different sizes of beakers
(a) 50 mL (b) 150 mL (c) 250 mL (d) 500 mL

S3/S5/S1,其中S2、S8、S9、S6和S7的 G/G_0 值随着时间先增大后平稳;S4/S10的 G/G_0 值都为1且都不随时间改变;S3/S5/S1的 G/G_0 值基本相同且都随时间先减小后平稳;除了S2、S6和S8传感器,其他8个传感器在4种烧杯容积条件下的 G/G_0 值基本一致。

对15 s和60 s数据进行ANOVA分析,考察样品顶空空间对每个传感器响应的影响(表1),以及每种顶空条件下电子鼻对样品储藏时间的区分效果(表2)。如表1所示,不管是提取15 s还是60 s数据进行分析,不同烧杯容积对各传感器的响应信号并无显著影响(显著水平 p 均大于0.05);表2表

明,不管是提取15 s还是60 s数据进行分析,电子鼻都能很好区分不同储藏时间的样品($p < 0.0001$),且样品的容积为500 mL时 F 值最大,即500 mL条件下第0天和第2天样品的均值差异较大,从而也更易于区分。这2个结果暗示了单一传感器的局限性以及传感器组合后的优越性。

图2和图3分别为4种烧杯容积条件下电子鼻15 s和60 s数据的PCA及LDA分析。由图2和图3的PCA图可见,容器容积为50 mL时,储藏2 d样品类内离差较大,样品点的分布较离散。以60 s数据的PCA分析为例,容器容积为50 mL时第0天和第2天样品有部分重叠,难以区分;而容器容积

表1 传感器15 s和60 s数据ANOVA分析结果

Tab. 1 Analysis of variance of e-nose responding data at 15 s and 60 s

传感器	顶空空间				样品质量		顶空生成时间	
	15 s F 值	15 s P_r	60 s F 值	60 s P_r	60 s F 值	60 s P_r	60 s F 值	60 s P_r
S1	2.37	0.055	2.05	0.089	2.92	0.056	124.16	<0.0001
S2	0.02	0.99	0.09	0.96	0.31	0.82	25.62	<0.0001
S3	1.23	0.31	1.83	0.16	1.94	0.17	126.21	<0.0001
S4	0.48	0.70	1.70	0.19	2.11	0.123	1.08	0.38
S5	0.58	0.63	0.65	0.58	2.08	0.126	127.87	<0.0001
S6	2.36	0.08	0.82	0.49	0.71	0.56	7.11	0.001
S7	1.81	0.17	0.54	0.66	1.50	0.24	56.50	<0.0001
S8	1.68	0.15	0.37	0.78	3.47	0.03	6.56	0.0017
S9	2.39	0.056	0.54	0.66	9.95	<0.0001	92.22	<0.0001
S10	0.67	0.53	1.23	0.31	0.18	0.91	16.11	<0.0001

表2 传感器对储藏0、2 d 牛肉的 ANOVA 分析结果
Tab.2 Analysis of variance of e-nose responding data on beef stored 0 d and 2 d

实验参数	15 s F 值	15 s P_r	60 s F 值	60 s P_r	
顶空空间/mL	50	26.24	<0.000 1	66.72	<0.000 1
	150	11.18	0.002 1	18.58	<0.000 1
	250	41.22	<0.000 1	84.58	<0.000 1
	500	125.64	<0.000 1	446.64	<0.000 1
样品质量/g	5		14.10	0.025 8	
	10		12.25	0.040 2	
	15		19.13	0.042 8	
	25		116.44	0.001 2	
顶空生成时间 /min	0		353.12	<0.000 1	
	5		28 075.50	<0.000 1	
	15		11 219.60	<0.000 1	
	25		5 818.17	<0.000 1	

为500 mL时,不管是提取15 s 还是60 s 的数据进行

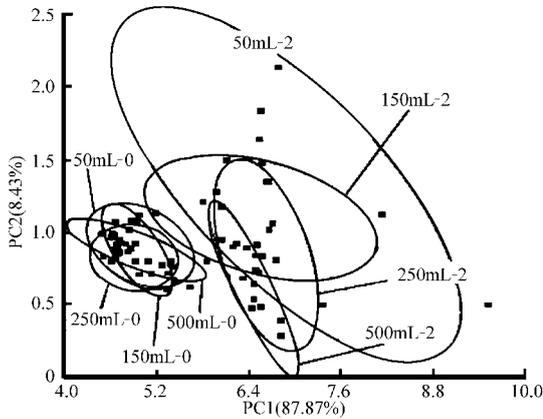


图2 4种烧杯容积条件下电子鼻15 s 数据的PCA及LDA分析图

Fig.2 PCA and LDA results of e-nose responding data at 15 s under four different sizes of beakers

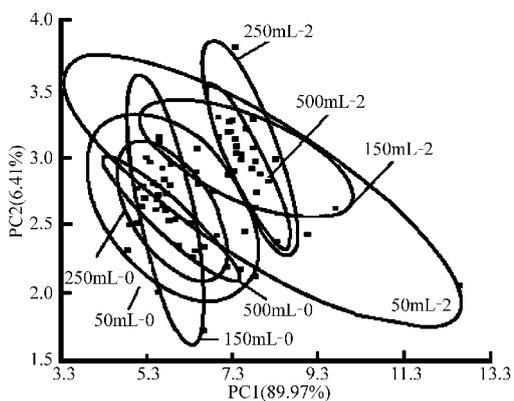


图3 4种烧杯容积条件下电子鼻60 s 数据的PCA及LDA分析图

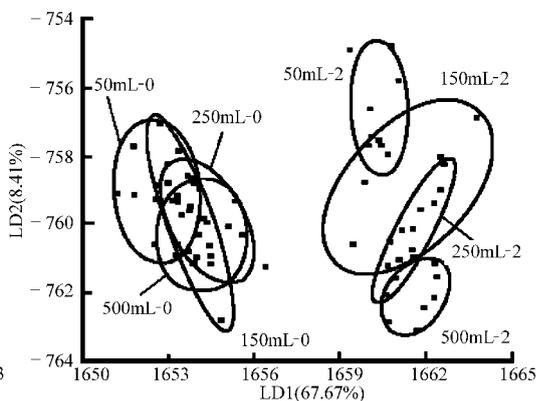
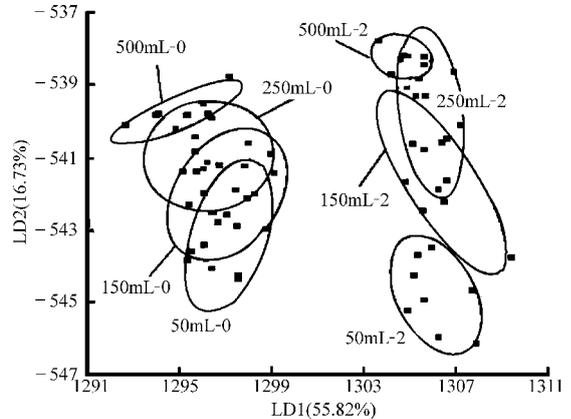
Fig.3 PCA and LDA results of e-nose responding data at 60 s under four different sizes of beakers

2.1.2 样品质量

样品质量(5、10、15、25 g)不同,其他条件相同时电子鼻对新鲜牛肉的响应曲线和趋势与2.1.1节所述烧杯容积不同时响应情况类似,且4个样品质量条件下的传感器响应曲线并无太大差异,此处省略传感器响应图。提取传感器第60秒数据进行ANOVA分析,考察4种样品质量对每个传感器的响

分析,样品点分布都为最为集中,类内离差最小,且第0天和第2天样品能很好区分。由LDA图可见,不管是提取15 s 还是60 s 数据进行分析,4个容积条件下的样品均可按储藏时间(0、2 d)清楚区分开;且密封于50 mL 和150 mL 烧杯中的样品的离散性较大,而500 mL 的样品点比较集中。这个结果与之前ANOVA结果一致,因此正式实验中,选取烧杯容积为500 mL。

从上述结果不难看出,提取电子鼻15 s 和60 s 数据进行多元分析效果差不多。但值得注意的是,表2中4组烧杯条件下,60 s 数据进行ANOVA的 F 值都比相应的15 s 下的 F 值大,这表明60 s 的数据进行分析时因素(储藏时间)的影响更大,即第0天和第2天样品区分更明显,因此后续分析只提取60 s 数据。



应影响(表1),以及每种样品质量条件下电子鼻对样品储藏时间的区分效果(表2)。表1表明,随样品质量的变化,S9的响应信号有极显著的变化($p < 0.000 1$),S8的响应信号有显著变化($p < 0.05$),而其余8个传感器的响应信号无显著变化(p 均大于0.05);表2表明,4种质量下电子鼻都能较好区分不同储藏时间的样品($p < 0.05$),且样品质量为25 g

时 F 值最大,即 25 g 条件下第 0 天和第 2 天样品的均值差异较大,从而也更易于区分。

图 4 为提取第 60 秒电子鼻数据进行 PCA 和 LDA 分析结果。由 PCA 图可见,除了 5 g 样品第 0 天和第 2 天数据有部分重叠外,其他 3 个样品质量

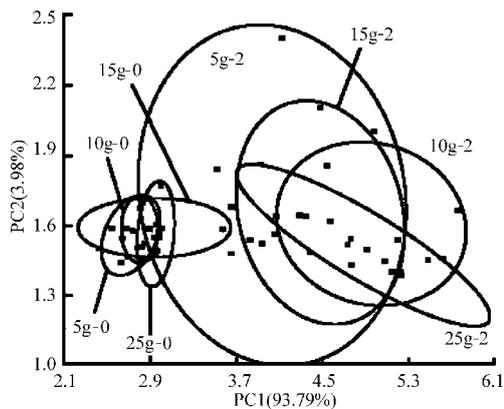


图 4 4 种样品质量条件下电子鼻 60 s 数据的 PCA 及 LDA 分析图

Fig. 4 PCA and LDA results e-nose responding data at 60 s under four different weights

2.1.3 顶空生成时间

顶空生成时间(0、5、15、25 min)不同,其他条件一致时电子鼻对新鲜牛肉的响应曲线和趋势与上 2 节所述响应情况类似,此处省略传感器响应图。提取第 60 秒数据进行 ANOVA 分析,考察 4 种顶空生成时间对每个传感器的响应影响(表 1),以及每种顶空生成时间条件下,电子鼻对样品储藏时间的区分效果(表 2)。表 1 表明,除了 S4 的响应信号无显著的变化($p > 0.05$),其余 9 个传感器的响应信号均随顶空时间不同而有极显著变化($p < 0.0001$);表 2 表明顶空生成时间为 5 min 的样品取得了最大的 F 值,即 5 min 条件下储藏 0 d 和 2 d 样品区分最明显。

图 5 为提取第 60 秒电子鼻数据进行 PCA 和 LDA 分析的结果。PCA 分析图表明,第 0 天样品随密封时间的不同,样品的数据点分布相差不多,并且都比较集中。而储藏 2 d 的样品,随密封时间的延长,数据点的分布有较大差异。顶空生成时间较短的样品,其数据点的分布较为集中;顶空生成时间较

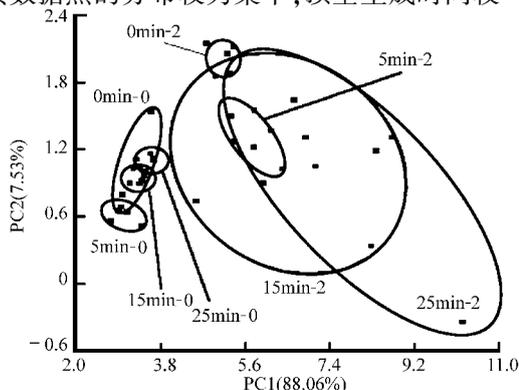
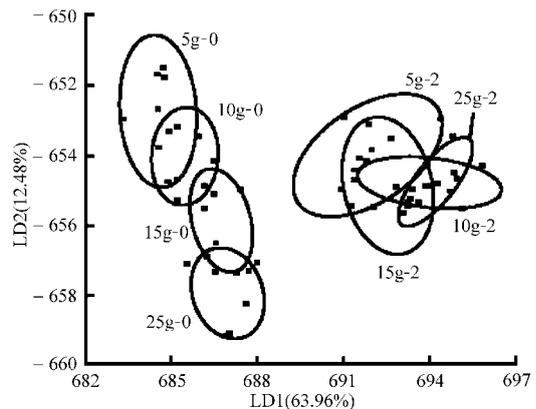


图 5 4 种顶空生成时间条件下电子鼻 60 s 数据的 PCA 及 LDA 分析图

Fig. 5 PCA and LDA results of e-nose responding data at 60 s under four different headspace generation time

条件下不同储藏时间样品都可区分开;LDA 图中数据较 PCA 集中,且 4 组数据的第 0 天和第 2 天样品均能很好区分。从分离效果上看,样品质量不同效果相差不多,鉴于 ANOVA 结果,正式实验中,取样品质量为 25 g 进行电子鼻检测。



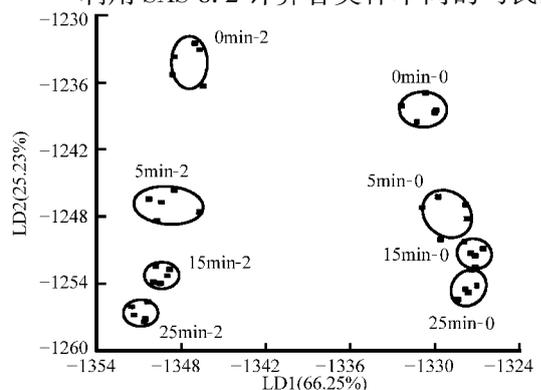
长的样品,其数据点的分布较为离散。其原因可能是新鲜的样品在顶空生成的时间内,样品的品质变化不大,故顶空生成时间不同的样品之间的气味差别并不大。而储藏 2 d 后的样品,由于挥发物发生变化,在顶空生成的时间内,样品的气味变化较大,故顶空时间越长,样品的数据点分布越为离散。从分离效果上看,无论是 PCA 还是 LDA,在不同的顶空生成时间条件下,第 0 天与第 2 天的样品均能较好地区分开,且 LDA 的样品数据点的分布均较为集中。鉴于 ANOVA 结果,因此,在正式实验中,采用的顶空生成时间为 5 min。

2.2 电子鼻检测

2.2.1 马氏距离

采用以上优化的实验参数(500 mL 烧杯、25 g 样品质量、5 min 顶空生成时间)对储藏 0、3、5、7、10、12 和 14 d 的牛肉进行电子鼻检测。根据前面参数优化实验结果,提取第 60 秒数据进行分析。

利用 SAS 8.2 计算各类样本间的马氏距离,结



果如表3所示,随着储藏时间的延长,样品与新鲜样品间的马氏距离增大,如储藏14 d的样品与储藏0 d的样品,马氏距离为1 738,而储藏3 d的样品与储藏0 d的样品的马氏距离为10.349。同时可以看

出,储藏时间为0、3、5 d的样品之间的马氏距离均比较小,而这3类样本与其他样品之间的马氏距离较大,说明在储藏5 d后,样品的质量有一明显的跃变。

表3 不同储藏时间样品间马氏距离矩阵

Tab.3 Mahalanobis distance between beef samples with different storage time

储藏时间/d	储藏时间/d						
	0	3	5	7	10	12	14
0	0	10.349	15.932	238.313	478.966	845.071	1 738
3	10.349	0	6.698	178.025	419.541	762.201	1 657
5	15.932	6.699	0	160.818	381.723	691.476	1 530
7	238.313	178.025	160.818	0	116.097	260.280	1 033
10	478.966	419.541	381.723	116.097	0	103.348	1 014
12	845.071	762.201	691.476	260.280	103.348	0	688.137
14	1 738	1 657	1 530	1 033	1 014	688.137	0

2.2.2 PCA 和 LDA 分析

对上述储藏7 d、重复30共210个样品进行PCA和LDA分析,如图6所示,图中D-0~D-14表示储藏0~14 d。

PCA图中,储藏期为0、3、5 d的样品,数据点相互重叠不能区分,说明样品在储藏的前5 d内变化不大,这与马氏分析所得的结果类似。而这些样品与其他新鲜度的样品却能较好地地区分,说明此后样

品在品质上有一跃变过程。同时,储藏时间为7、10、12 d的样品都有部分重叠;储藏时间为14 d的样品可以与其他样品明显区分。

LDA分析与前面结论一样,2个时间数据的分析结果差不多。除了储藏时间为0、3、5 d的样品,数据点有部分重叠,不能很好区分外,其他样品均能很好区分。相比较PCA,此处LDA分析效果更好。

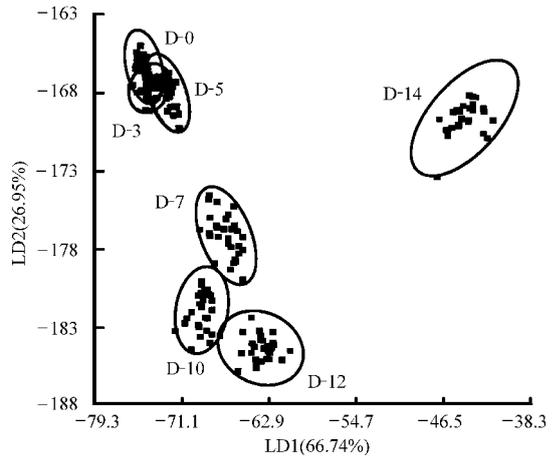
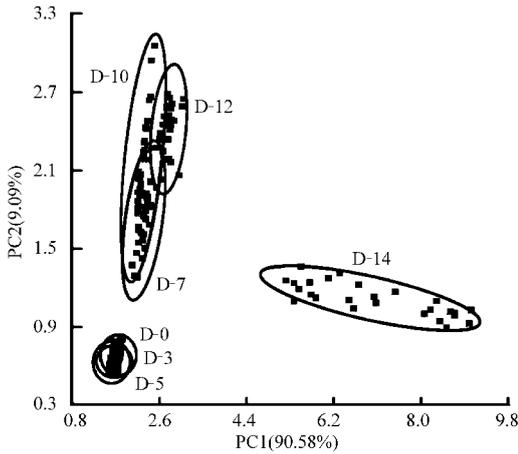


图6 不同储藏时间的牛肉的PCA和LDA分析

Fig.6 PCA and LDA results of beef samples with different storage time

2.2.3 逐步判别分析

对上述210个样品的第60秒数据进行逐步判别分析,所属类为样品实际所属的储藏时间,预测类为判别分析算法建立的模型预测的样品所属储藏时间,结果如表4所示,除了2个第3天样本被误分到第5天,一个第5天样本为误分到第0天,其他样本都分类正确,正确率为98.57%。可见误判例主要出现在前5 d样品。这与前面分析方法所得结论类似,即储藏期为0、3、5 d的样品之间差别不大。总的来说,利用判别分析,电子鼻可以将不同新鲜度的

表4 不同储藏时间牛肉样品的逐步判别分析结果

Tab.4 Stepwise linear discriminant analysis of beef samples with different storage time

所属类/d	预测类/d						
	0	3	5	7	10	12	14
0	30	0	0	0	0	0	0
3	0	28	2	0	0	0	0
5	1	0	29	0	0	0	0
7	0	0	0	30	0	0	0
10	0	0	0	0	30	0	0
12	0	0	0	0	0	30	0
14	0	0	0	0	0	0	30

牛肉样品区分开,效果较为理想。

3 结论

(1)利用方差分析、主成分分析和判别分析考察牛肉顶空空间、样品质量和顶空生成时间对电子鼻传感器响应信号的影响,结果表明随样品顶空空间的增大,单个传感器的响应并无显著变化($p > 0.05$),但顶空空间对电子鼻的检测效果有较大影响,顶空空间为500 mL时效果明显优于其他方案;随样品量的增大,传感器的响应并无显著变化($p > 0.05$),但样品质量对电子鼻的检测效果有较大影响,质量为25 g时效果明显优于其他方案;样品的顶空生成时间对单个传感器的响应有一定的影响,但对于电子鼻的检测效果影响并不大,鉴于电子鼻用作快速检测,故采用顶空生成时间5 min为正式实验中所采用的样品顶空生成时间。

(2)利用上述较佳实验参数(顶空空间500 mL、样品质量25 g、顶空生成时间5 min)进行电子鼻对不同储藏时间牛肉的检测,计算马氏距离,发现储藏时间为0、3、5 d的样品之间的马氏距离均比较小,而这3类样本与其他样品之间的马氏距离较大,说明在储藏5 d后,样品的质量有一明显的跃变。同时对电子鼻采集的数据进行PCA与LDA分析,分析结果表明储藏0~5 d的样品较难区分,但其他样品可以区分。尤其是LDA法,可以将储藏7、10、12、14 d的4类样品明显区分,效果优于PCA。

(3)提取第60秒数据进行逐步判别分析,结果表明,电子鼻对样品有较好的定性判别能力,正确率高达98.57%。误判样品主要出现在储藏时间为0、3、5 d的3类样品,再次说明这3类样品之间的气味差别较小,较难区分。

参 考 文 献

- 海铮,王俊. 电子鼻信号特征提取与传感器优化的研究[J]. 传感技术学报,2006,19(3):606~610.
Hai Zheng, Wang Jun. Studies on signal feature extraction and sensor optimization of an electronic nose [J]. Journal of Transduction Technology, 2006, 19(3):606~610. (in Chinese)
- 于慧春,王俊,张红梅,等. 龙井茶叶品质的电子鼻检测方法[J]. 农业机械学报,2007,38(7):103~106.
Yu Huichun, Wang Jun, Zhang Hongmei, et al. Measurement of the longjing tea quality by using an electronic nose [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 103~106. (in Chinese)
- 王俊,胡桂仙,于勇,等. 电子鼻与电子舌在食品检测中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(2):292~295.
Wang Jun, Hu Guixian, Yu Yong, et al. Research and application of electronic nose and electronic tongue in food inspection [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 292~295. (in Chinese)
- Persaud K, Dodd G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose [J]. Nature, 1982: 299~352.
- Gardner J W, Bartlett P N. A brief history of electronic nose [J]. Sensors and Actuators B, 1994, 18(19): 211~220.
- 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 Leiqing, Tu Kang, et al. Determination of egg freshness during shelf life with electronic nose [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(4):317~321. (in Chinese)
- Sullivan M G, Byrne D V, Jensen M T. A comparison of warmed-over flavour in pork by sensory analysis, GC/MS and the electronic nose [J]. Meat Science, 2003, 65(3): 1125~1138.
- Gram L, Ravn L, Rasch M, et al. Food spoilage-interactions between food spoilage bacteria [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 78(1~2): 79~97.
- Zhang Zhe, Tong Jin, Chen Donghui, et al. Electronic nose with an air sensor matrix for detecting beef freshness [J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(1):67~73.
- Hong Xuezen, Wang Jun, Hai Zheng. Discrimination and prediction of multiple beef freshness indexes based on electronic nose [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 161(1):381~389.
- Hansen T, Petersen M A, Byrne D V. Sensory based quality control utilizing an electronic nose and GC-MS analyses to predict end-product quality from raw materials [J]. Meat Science, 2005, 69(4): 621~634.
- 洪雪珍,王俊. 基于逐步判别分析和BP神经网络的电子鼻猪肉储藏时间预测[J]. 传感技术学报,2010,23(10):1376~1380.
Hong Xuezen, Wang Jun. Discrimination of different storage time of pork by electronic nose [J]. Journal of Transduction Technology, 2010, 23(10):1376~1380. (in Chinese)
- 石志标,佟月英,陈东辉,等. 牛肉新鲜度的电子鼻检测技术[J]. 农业机械学报,2009,40(11):184~188.
Shi Zhibiao, Tong Yueying, Chen Donghui, et al. Identification of beef freshness with electronic nose [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):184~188. (in Chinese)
- Wang Danfeng, Wang Xichang, Liu Taiang, et al. Prediction of total viable counts on chilled pork using an electronic nose combined with support vector machine [J]. Meat Science, 2012, 90(2): 373~377.

- juice and correlations with sugar content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5): 289~292. (in Chinese)
- 12 Guo Wenchuan, Zhu Xinhua, Yue Rong, et al. Dielectric properties of fuji apples from 10 to 4 500 MHz during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 35(6):884~890.
- 13 刘韬, 田洪祥, 郭文勇, 等. 主成分分析在某型柴油机光谱数据分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 779~782.
- Liu Tao, Tian Hongxiang, Guo Wenyong, et al. Application of pca to diesel engine oil spectrometric analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3):779~782. (in Chinese)
- 14 王晓丹, 王积勤. 支持向量机训练和实现算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(13):75~78,175.
- Wang Xiaodan, Wang Jiqin. A survey on support vector machines training and testing algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(13): 75~78,175. (in Chinese)
- 15 Mahadevan S, Shah S L. Fault detection and diagnosis in process data using one-class support vector machines[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(10):1 627~1 639.
- 16 Chia K, Abdul R H, Abdul R R. Neural network and principal component regression in non-destructive soluble solids content assessment: a comparison[J]. Journal of Zhejiang University—Science B, 2012, 13(2):145~151.
- 17 Burges C J. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2):121~167.
- 18 张红梅. 基于随机子空间 PCA-SVM 集成的实时入侵检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12):2 680~2 684.
- Zhang Hongmei. Real-time intrusion detection system base on random subspace PCA-SVM ensemble[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12):2 680~2 684. (in Chinese)
- 19 杨昊谕, 于海业, 刘煦, 等. 叶绿素荧光 PCA-SVM 分析的黄瓜病虫害诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 3 018~3 021.
- Yang Haoyu, Yu Haiye, Liu Xu, et al. Diagnosis of cucumber diseases and insect pests by fluorescence spectroscopy technology based on PCA-SVM[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(11): 3 018~3 021. (in Chinese)
- 20 刘旭, 陈华才, 刘太昂, 等. PCA-SVR 联用算法在近红外光谱分析烟草成分中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12):2 460~2 463.
- Liu Xu, Chen Huacai, Liu Taiang, et al. Application of PCA-SVR to NIR prediction model for tobacco chemical composition[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(12): 2 460~2 463. (in Chinese)
- 21 侯振雨, 蔡文生, 邵学广, 等. 主成分分析-支持向量回归建模方法及应用研究[J]. 分析化学, 2006, 34(5):617~620.
- Hou Zhenyu, Cai Wensheng, Shao Xueguang, et al. Principal component analysis-support vector regression and its application in near infrared spectral analysis[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2006, 34(5): 617~620. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 131 页)

- 15 Balasubramanian S, Panigrahi S, Logue C M, et al. Independent component analysis-processed electronic nose data for predicting Salmonella typhimurium populations in contaminated beef[J]. Food Control, 2008, 19(3): 236~246.
- 16 张军, 李小昱, 王为, 等. 电子鼻检测鲢鱼新鲜度的试验参数优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):129~132, 142.
- Zhang Jun, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Optimization of experiment parameters for using electronic nose to evaluate freshness of silver carp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 129~132, 142. (in Chinese)
- 17 Yu Huichun, Wang Jun, Xiao Hong, et al. Quality grade identification of green tea using the eigenvalues of PCA based on the E-nose signals[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 140(2):378~382.
- 18 Shak N K, Gemperline P J. Combination of the mahalanobis distance and residual variance pattern-recognition techniques for classification of near-infrared reflectance spectra[J]. Analytical Chemistry, 1990, 62(5): 465~470.
- 19 Gall G Le, Puaud M, Colquhoun I J. Discrimination between orange juice and pulp wash by H-1 nuclear magnetic resonance spectroscopy: identification of marker compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 580~588.