

基于电子鼻技术的小麦种子活力鉴别

张婷婷¹ 赵宾¹ 杨丽明² 王建华¹ 孙群^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院/北京市作物遗传改良重点实验室,北京 100193;

2. 中国农业大学 理学院,北京 100097)

摘要 为探究准确高效鉴别种子活力的新技术,利用电子鼻系统对未老化(CK)、58 °C热水浴老化(Hot water aging method, HW)和50%甲醇老化(Methanol solution aging method, MS)后的山农27小麦种子进行检测,采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)、线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)及载荷分析(Loadings)对老化处理后不同活力水平的小麦种子进行鉴别研究。试验结果:1)老化处理后不同活力水平的小麦种子在电子鼻传感器上有不同的特征性响应图谱;2)PCA分析无法区分热水浴老化后活力接近的小麦种子;3)LDA分析对热水浴老化和甲醇老化不同活力水平的小麦种子均具有较好的区分效果;4)载荷分析确定了热水浴老化各活力水平小麦种子的差异气味主要来自于无机硫化物(W1W)、小分子氮氧化合物(W5S)和有机硫化物(W2W),短链烷烃(W1S)、醇醚醛酮类气体(W2S)和氢气类(W6S)。甲醇老化各活力水平小麦种子的差异气味主要来自于有机硫化物(W2W)、小分子氮氧化合物(W5S)、短链烷烃(W1S)、醇醚醛酮类气体(W2S)和无机硫化物(W1W)。本研究结果揭示以电子鼻技术作为检测手段,通过对小麦种子挥发性成分的检测结合LDA分析,可以实现对不同活力小麦种子进行快速准确高效地鉴别,再结合Loading分析,可以进一步分析相关的差异性气体成分。

关键词 电子鼻; 小麦种子; 活力; 主成分分析; 线性判别分析; 载荷分析

中图分类号 S5 **文章编号** 1007-4333(2018)09-0123-08 **文献标志码** A

Determination of wheat seeds vigor based on electronic nose

ZHANG Tingting¹, ZHAO Bin¹, YANG Liming², WANG Jianhua¹, SUN Qun^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology/Beijing Key Laboratory of Crop Genetic Improvement,

China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To investigate novel accurate and effective detection technique for the identification of seed vigor, the wheat seeds of Shannong 27, which were treated by 58 °C hot water aging method (HW) and 50% methanol solution aging method (MS), were analyzed by electronic nose (E-nose). And the data were then processed by principal component analysis (PCA), linear discrimination analysis (LDA) and Loadings. The E-nose sensor data showed that the wheat seeds with different vigor after aging treatment had different characteristic maps. The PCA analysis could not distinguish seeds with similar vigor after HW aging. In contrast to the PCA analysis, the LDA analysis could well distinguish seeds with different vigor after the two aging method. The Loadings analysis demonstrated that there were sulfur compounds (W1W), nitrogen oxides (W5S), aromatic compounds (W2W), methane (W1S), alcohols (W2S) and hydrogen (W6S) differences in the odor between the seeds after HW aging. After MS aging, aromatic compounds (W2W), nitrogen oxides (W5S), methane (W1S), alcohols (W2S) and sulfur compounds (W1W) were the main gas compositions in seeds. In conclusion, our research indicated that E-nose technology could be used as a feasible and

收稿日期: 2017-09-18

基金项目: 科技部十三五国家重点研发计划(2018YFD010141); 划公益性行业(农业)科研专项项目(201303002)

第一作者: 张婷婷, 博士研究生, E-mail: ztt_cau@163.com

通讯作者: 孙群, 副教授, 主要从事种子加工检验方面的研究。E-mail: sqcau@126.com

reliable method for the determination of wheat seed vigor by volatile constituent analysis and LDA analysis, and different gas components can be further confirmed by Loadings analysis.

Keywords electronic nose ; wheat seeds; vigor; PCA; LDA; Loadings

小麦是我国最重要的粮食作物之一,其种子在农业生产中是不可取代的生产资料。小麦种子在生理成熟时,活力最高,随后逐步衰老而走向死亡,因此伴随着种子贮藏时间延长,种子活力不可避免的逐渐下降^[1-2]。种子活力检测尤为重要。在种子活力检测中,常采用人工加速老化模拟自然条件下种子老化过程^[3]。人工加速老化主要包括高温高湿老化^[4]、58℃热水浴老化法^[5]和50%甲醇老化法^[6]。而热水浴和甲醇老化与高温高湿老化种子的表现相似,且较高温高湿具有老化时间短和微生物侵染率低等优点,因此,被用来模拟自然老化进行种子活力检测。多年来我国种子活力检测方法如种子幼苗生长测定等,主要依靠种子检验员手工检测,存在测量工作量大、可重复性差、测量周期长和受环境影响大等缺点,无法满足当前种业市场快速发展的需求^[7-8]。因此,建立一套快速、准确和高效鉴定种子活力的检测技术尤为迫切。

电子鼻又叫气味扫描仪,是20世纪90年代发展起来的一种快速检测仪器,它能够感知和识别种子产生的气体。电子鼻具有分析快、稳定性好和无损伤等特点,其已在国内外的食品及农产品检测中得到广泛的应用,如茶叶、饮料、肉类、果蔬和谷物等^[9-17]。近年来,很多学者从谷物的霉变、贮藏年限和品种鉴别等方面进行了研究^[18-22],但对小麦种子

活力的电子鼻技术研究还较少。本研究以小麦种子为试验材料,通过电子鼻系统采集不同活力小麦种子的气味信号,采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)、线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)和载荷分析(loadings)对热水浴老化及甲醇老化处理后不同活力的小麦种子进行鉴别研究,旨在为快速、准确和高效检测小麦种子的活力提供理论参考。

1 材料及方法

1.1 试验仪器及试剂

PEN3 电子鼻系统(德国 AIRSENSE 公司),DK-8D 型电热恒温水槽(上海精宏实验设备有限公司)、甲醇(分析纯,北京化工厂),发芽纸(美国 Anchor 公司,规格 25 cm×38 cm)。试验用水为蒸馏水。

1.2 PEN3 电子鼻系统

试验采用德国 AIRSENSE 公司生产的电子鼻系统(PEN3)。仪器组成主要包含:传感器通道、采样通道、计算机。传感器通道含有 10 个不同的金属氧化物传感器,组成传感器阵列,各传感器的名称及性能描述如下表 1。针对不同的化学成分,传感器会产生不同的响应值。响应信号为传感器接触到样品挥发物后的电导率 G 与传感器在经过标准活性碳过滤气体的电导率 G_0 的比值,用 G/G_0 表示。

表 1 PEN3 电子鼻的传感器性能描述

Table 1 Performance description of sensors for electronic nose PEN3

传感器名称 Sensor name	性能描述 Function description	检测成分 Component	体积分数/(mL/m ³) Volume fraction
W1C	芳香成分	C ₆ H ₅ CH ₃	10
W5S	灵敏度大,对氮氧化物很灵敏	NO ₂	1
W3C	氨水,对芳香成分灵敏	C ₆ H ₆	10
W6S	主要对氢气有选择性	H ₂	100
W5C	烷烃芳香成分	C ₃ H ₈	1
W1S	对甲烷灵敏	CH ₄	100
W1W	对硫化物灵敏	H ₂ S	1
W2S	对醇类、醛酮类灵敏	CO	100
W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏	H ₂ S	1
W3S	对烷烃灵敏	CH ₄	10

1.3 试验步骤

1.3.1 试验材料

试验用的小麦种子(山农27),于2016年购买于山东省淄博市禾丰种业公司,试验时间为2016年11月,原始含水量为10.7%。

1.3.2 人工老化处理

取适量小麦种子,参照Bhattacharyya等^[5]介绍的58±1℃热水浴老化法(Hot water aging method, HW)处理种子10、20、30和40 min,参照徐本美等^[23]介绍的50%甲醇溶液老化法(Methanol solution aging method, MS)处理种子20、40和60 min,处理梯度见表2。老化的种子均平摊于室内晾至原始含水量后进行电子鼻测定及发芽试验。

表2 人工老化处理

Table 2 Gradient of artificial aging treatments

老化组别 Group of aging treatments	人工老化方法 Artificial aging treatments	时间/min Aging time
CK		0
1	热水浴	10
2	热水浴	20
3	热水浴	30
4	热水浴	40
5	甲醇	20
6	甲醇	40
7	甲醇	60

注:热水浴代表58±1℃热水浴老化方法;甲醇代表50%甲醇溶液老化方法。

Note: Hot water means 58±1℃ hot water aging method; Methanol means 50% methanol solution aging method.

1.3.3 电子鼻测定

取不同处理的小麦种子,平均分成3个20g的子样品(即3次重复),将这些子样品分别放入160 mL的塑料杯中,并用两层保鲜膜封口密封放置于25±1℃室内2h,待其挥发性的气体充分积累后进行电子鼻直接顶空取样。测定条件:采样时间为1s/组;传感器自清洗时间为100s;传感器归零时间为10s;样品准备时间为5s;进样流量为400 mL/min;分析采样时间为60s。

1.3.4 标准发芽试验

将晾至原始含水量的种子,用1%次氯酸钠消

毒8min后蒸馏水冲洗3次,25℃下进行卷纸发芽试验,即取消毒后的小麦种子50粒整齐摆放于蒸馏水浸润的发芽纸上,盖上另一张蒸馏水浸润的发芽纸,底边摺起5cm,卷成疏松的纸卷,垂直放入有适量蒸馏水的发芽盒内,上部套透明自封袋保湿,3次重复,置于25℃均匀光照下的发芽室内发芽,第8天测发芽率。

发芽率=(第8天正常发芽种子数/供试种子数)×100%

1.3.5 数据处理

采用主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)和载荷分析(Loadings)作为主要区别分析方法(解释程度)。PCA分析法是多元统计中的一种数据挖掘算法,其通过对电子鼻传感器数据进行转换,使数目较少的新变量成为原变量的线性组合,新变量与原变量互不相关却能最大限度地反映原变量的信息。在用PCA进行分析时,可以查看在每个主成分下样品区分的状况^[24-26]。LDA分析法的基本思想是将高维的模式样本投影到最佳鉴别矢量空间,以达到抽取分类信息和压缩特征空间维数的效果,投影后保证模式样本在新的子空间有最大的类间距离和最小的类内距离,即模式在该空间中有最佳的可分离性。在本试验中,LDA分析可以将电子鼻的数据集按照类别进行向量化变换,从而使得样本类内聚集而类间疏远^[27]。Loadings分析法常用于反映因子与各个变量的密切程度,与PCA是相关的,是PCA与相应原指标变量的相关系数。位点坐标表示所在主成分上的比例,相关系数(绝对值)越小,主成分对该变量的代表性也越小,反之越大^[28]。但不同的是,本试验中Loadings算法主要是对传感器进行研究,利用该方法可以确认特定试验样品下各传感器对样品区分的贡献率大小,从而可以考察在这个样品区分过程中哪一类气体起了决定作用。数据分析采用Winmuster软件及SPSS19.0软件。

2 结果与分析

2.1 不同人工老化方法处理小麦种子活力情况

从表3可以看出,58℃热水浴老化和50%甲醇老化的小麦种子活力均随着老化时间的增加而下降。2种人工老化处理的小麦种子各梯度的发芽势,发芽率和简易活力指数均存在显著差异。其中老化组3与4的小麦种子发芽势、发芽率及简易活力指数的数值比较接近。50%甲醇老化小麦种子

60 min 时,种子丧失生活力,发芽势、发芽率及简易活力指数均为 0。

表 3 不同人工老化处理后小麦种子活力情况

Table 3 The vigor of wheat seeds after different artificial aging treatments

组别 Group	发芽率/% Germination percentage
CK	99.3±1.2 a
1	93.3±3.1 b
2	76.0±5.3 c
3	30.7±3.7 d
4	25.3±1.2 e
5	45.3±2.0 b
6	11.3±1.2 c
7	0.0±0.0 d

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

2.2 电子鼻响应信号变化

热水浴老化和甲醇老化小麦种子的电子鼻检测典型响应曲线如图 1 所示。从图 1(a)和 1(b)的响应曲线可以看出,电子鼻采样前,各传感器的初始响应值均为 1。随着电子鼻开始进样,小麦种子挥发

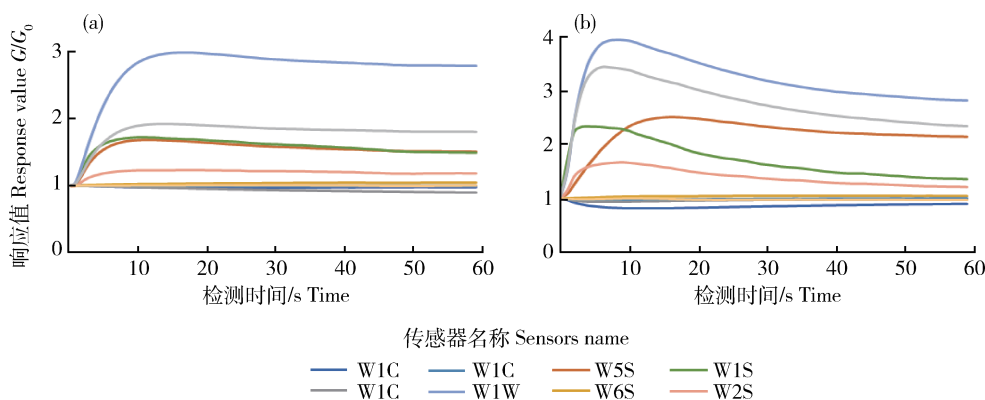


图 1 经热水浴处理(a)和甲醇处理(b)后小麦种子的电子鼻典型响应曲线

Fig. 1 Response curves of sensors to the wheat seeds treated by HW (a) and MS (b)

2.4 LDA 分析

不同活力水平小麦种子的 LDA 分析二维得分如图 3 所示。图 3(a)的第一线性判别因子的贡献率为 84.62%,第二线性判别因子的贡献率为 10.86%,累积贡献率为 95.48%,图 3(b)的第一线

性气体开始在传感器上富集,各传感器响应值开始变化,呈逐渐上升的趋势,并在热水浴老化 20 s 和甲醇老化 10 s 左右达到最大。随后传感器的响应值有所下降,并在 40 s 后趋于稳态。因此,根据各个传感器响应曲线的变化特点,本试验选择 49~51 s 响应值的平均值作为原始数据进行后续分析。

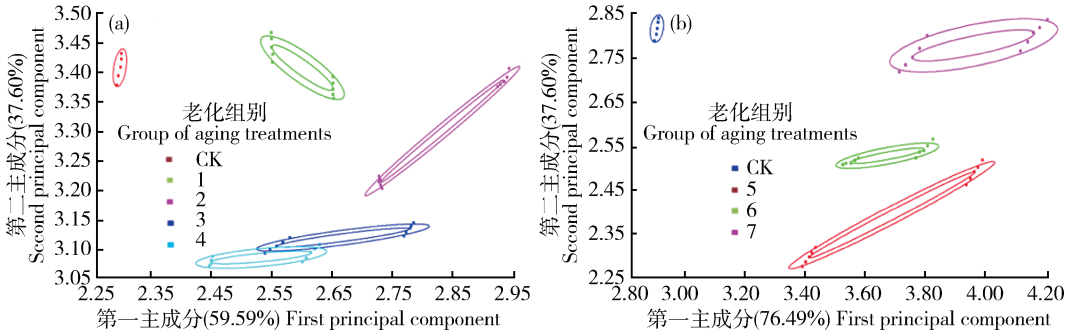
2.3 PCA 分析

热水浴和甲醇老化后不同活力水平的小麦种子的 PCA 分析二维得分如图 2 所示。图 2(a)和 2(b)分别显示了热水浴及甲醇老化不同活力水平小麦种子主成分(PCA)分析二维得分图,图 2(a)的第一主成分贡献率为 59.59%,第二主成分贡献率为 37.60%,累积贡献率为 97.19%,图 2(b)的第一主成分贡献率为 76.49%,第二主成分贡献率为 16.74%,累积贡献率为 93.23%,都基本上涵盖了样本的主要信息特征。由图 2(a)和 2(b)可见,未老化与两种老化方式处理后的小麦种子气味差异主要表现在第一主成分上,而两种老化方式处理后不同活力水平种子之间的气味差异主要表现在第二主成分上,表明不同活力水平小麦种子气味特征各不相同。其中图 2(a)可见,老化组 3 和 4 小麦种子的响应信息重叠,PCA 无法区分开老化组 3 和 4 的小麦种子,仅能够区分开未老化、老化组 1 和 2 的小麦种子。而图 2(b)可见,PCA 可以较好的区分开本试验中甲醇老化各活力水平的小麦种子。

性判别因子的贡献率为 99.40%,第二线性判别因子的贡献率为 0.42%,累积贡献率为 99.81%,都基本上涵盖了样本的主要信息特征。由图 3(a)、3(b)可见,LDA 与 PCA 分析结果略有不同,LDA 分析后样品组内更集中,而组间更分散。由图 3(a)可

见,不同活力小麦种子的气味差异主要表现在第一线性判别因子上,且 LDA 可以完全区分开不同活力的热水浴老化的小麦种子。图 3(b)可见,未老化与甲醇老化后的小麦种子气味差异主要表现在第一

线性判别因子上,而老化后不同活力水平种子间的气味差异则表现在第二线性判别因子上,且 LDA 也可以完全区分开甲醇老化各活力水平的小麦种子。



不同颜色表示不同老化组别。CK 为未老化处理;1、2、3、4 分别表示 $58 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 热水浴老化处理 10、20、30 和 40 min;5、6、7 分别表示 50% 甲醇老化处理 20、40 和 60 min。同图 3。

Different color indicates different group of aging treatment. CK, the group untreated. 1, 2, 3 and 4 means the group treated by $58 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ hot water aging method about 10, 20, 30 and 40 min, respectively. 5, 6 and 7 means the group treated by 50% methanol solution aging method about 20, 40 and 60min, respectively. The same in Fig. 3.

图 2 经热水浴处理(a)和甲醇处理(b)后不同活力水平小麦种子的 PCA 分析二维得分图
Fig. 2 2-D PCA scores for different vigor of wheat seeds treated by HW (a) and MS (b)

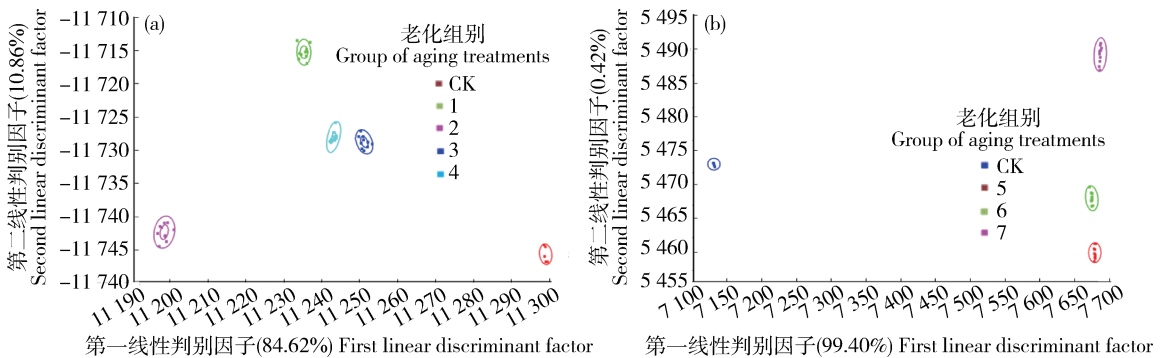


图 3 经热水浴处理(a)和甲醇处理(b)后不同活力水平小麦种子的 LDA 分析二维得分图
Fig. 3 2-D LDA scores for different vigor of wheat seeds treated by HW (a) and MS (b)

2.5 Loadings 分析

图 4 为热水浴及甲醇老化不同活力水平小麦种子的 Loadings 分析,结果显示电子鼻 10 个传感器分别对样品种子的贡献率,可见不同老化处理的小麦种子对应的传感器贡献率差异较大。图 4(a)图可见,W1W 和 W2W 传感器对第一主成分贡献率较大,说明这两个传感器是第一主成分的特征信号。W1S、W2S 和 W6S 对第二主成分贡献率都较大,说明这三个传感器是第二主成分的特征信号。W5S 对第一和第二主成分贡献都较大,为两个主成分共同的特征信号。结合各主成分的贡献率可以得出,

热水浴老化处理的小麦种子气味差异主要来自于无机硫化物(W1W)、小分子氮氧化物(W5S)和有机硫化物(W2W),短链烷烃(W1S)以及少量的醇醚醛酮类气体(W2S)和氢气类(W6S)。而图 4(b)图可见,W2W 和 W5S 对第一主成分贡献率都较大,说明这两个传感器是第一主成分的特征信号。W1S 和 W2S 传感器对第二主成分贡献率较大,说明这两个传感器是第二主成分的特征信号。W1W 对第一和第二主成分贡献都较大,为两个主成分共同的特征信号。结合各主成分的贡献率可以看出,甲醇老化处理的小麦种子气味差异主要来自于有机硫化物

(W2W)、小分子氮氧化物(W5S)、短链烷烃(W1S)、

醇醚醛酮类气体(W2S)和无机硫化物(W1W)。

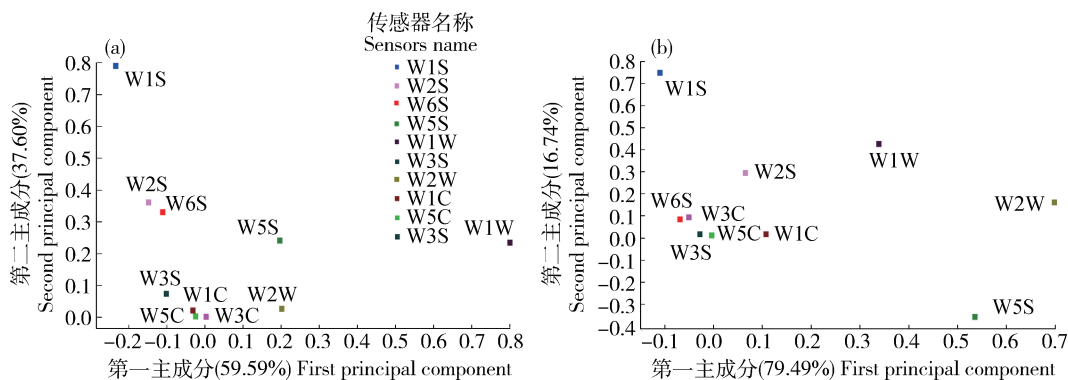


图4 经热水浴处理(a)和甲醇处理(b)后不同活力水平小麦种子的传感器贡献率分析图

Fig. 4 Loading analysis for different vigor of wheat seeds treated by HW (a) and MS (b)

3 结论与讨论

本试验采用电子鼻技术对采用两种不同老化方式处理的山农27小麦种子进行检测,应用主成分分析(PCA)和线性判别分析(LDA)对电子鼻检测的数据进行提取分析,探讨了电子鼻对两种老化方法处理后不同活力小麦种子的鉴别效果,初步确立电子鼻技术对不同活力的小麦种子检测的可行性,得出结论如下:

1) 利用电子鼻系统对热水浴处理后不同活力(发芽率分别为99.3%、93.3%、76.0%、30.7%和25.3%)及甲醇处理后不同活力(发芽率分别为99.3%、45.3%、11.3%和0.0%)的小麦种子进行检测,通过PCA分析发现:在热水浴老化试验中,PCA分析可以区分未老化(发芽率为99.3%)及老化组1(发芽率为93.3%)和老化组2(发芽率为76.0%)的小麦种子,无法区分老化组3(发芽率为30.7%)和老化组4(发芽率为25.3%)的小麦种子。LDA分析表明,LDA可以较好地分开热水浴老化及甲醇老化处理的各活力水平的小麦种子。

2) Loadings分析得出,热水浴处理的小麦种子气味差异主要来自于无机硫化物(W1W)、小分子氮氧化物(W5S)和有机硫化物(W2W),短链烷烃(W1S)以及少量的醇醚醛酮类气体(W2S)和氢气类(W6S)。甲醇老化处理的小麦种子气味差异主要来自于有机硫化物(W2W)、小分子氮氧化物(W5S)、短链烷烃(W1S)、醇醚醛酮类气体(W2S)和无机硫化物(W1W)。

PCA是一种被广泛应用在食品和化学领域的

化学计量方法。电子鼻检测热水浴处理的小麦种子的特征气体变化后进行PCA分析,其中PCA无法区分老化组3和4的小麦种子,结合其活力较接近的特点,推测PCA无法区分活力较接近的热水浴处理的小麦种子。

本试验表明,以电子鼻作为检测手段,通过采集小麦种子的挥发性气体成分结合相应的分析方法(LDA分析和Loadings分析),可以实现对不同老化程度及不同处理的小麦种子进行快速无损地鉴别和区分,弥补了传统种子活力检测的测量工作量大、测量周期长和损耗种子等缺点。但电子鼻系统实际应用于小麦种子活力检测仍存在一些难题。如种子品种、产地及年份的变化可能会使种子气味发生变化,遂常需重复建模,工作量较大。另外,本研究及前人的研究多以人工老化种子为材料,其研究成果应用于自然老化的种子效果并不理想。因此,电子鼻技术实际应用于种子活力检测仍需进一步更精细更深入的研究。

参考文献 References

- [1] Kong L, Huo H, Mao P. Antioxidant response and related gene expression in aged oat seed [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6(158): 158
- [2] Sasaki K, Fukuta Y, Sato T. Mapping of quantitative trait loci controlling seed longevity of rice (*Oryza sativa* L) after various periods of seed storage [J]. *Plant Breeding*, 2010, 124(4): 361-366
- [3] Moncaleano-Escandon, Jonathan, Silva. Germination responses of *Jatropha curcas* L seeds to storage and aging [J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 44(1): 684-690

- [4] Delouche J C, Baskin C C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots [J]. *Seed Science and Technology*, 1973, 1: 427-452
- [5] Bhattacharyya S, Hazra A K, Sen-Mandi S. Accelerated ageing of seeds in hot water: Germination characteristics of aged wheat seeds[J]. *Seed Science & Technology*, 1985, 13: 683-690
- [6] Musgrave M E, Priestley D A, Leopold A C. Methanol stress as a test of seed vigor[J]. *Crop Science*, 1980, 20(5): 626-630
- [7] 宋乐, 王琦, 王纯阳, 宋乐, 王琦, 王纯阳, 林晏清, 余鼎, 徐琢频, 吴跃进. 基于近红外光谱的单粒水稻种子活力快速无损检测[J]. *粮食储藏*, 2015, 44(1): 20-23
Song L, Wang Q, Wang C Y, Lin Y Q, Yu D, Xu Z P, Wu Y J. Qualitative analysis of single rice seed vigor using near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Grain Storage*, 2015, 44(1): 20-23 (in Chinese)
- [8] 李欢欢, 卢伟, 杜昌文, 马菲, 罗慧. 基于光声光谱结合 LS-SVR 的稻种活力快速无损检测方法研究[J]. *中国激光*, 2015(11): 270-279
Li H H, Lu W, Du C W, Ma F, Luo H. Study on rapid and non-destructive detection of rice seed vigor based on photoacoustic spectroscopy combined with LS-SVR [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015(11): 270-279 (in Chinese)
- [9] Peris M, Escudergilabert L. A 21st century technique for food control: Electronic noses[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 638(1): 1-15
- [10] 潘玉成, 宋莉莉, 叶乃兴, 潘玉华. 电子鼻技术及其在茶叶中的应用研究[J]. *食品与机械*, 2016, 2(9): 213-218
Pan Y C, Song L L, Ye N X, Pan Y H. Electronic nose technology and its application on tea[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(9): 213-218 (in Chinese)
- [11] 许灿, 李二虎, 王鲁峰, 范岗, 徐晓云, 潘思轶. 电子鼻检测复合果汁饮料中的脂环酸芽孢杆菌[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(2): 193-200
Xu C, Li E H, Wang L F, Fan G, Xu X Y, Pan S Y. Detection of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spoilage of mixed fruit juice beverage by electronic nose [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(2): 193-200(in Chinese)
- [12] 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 X Z, Wang J. 23 Discrimination of different storage time of pork by electronic nose [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(10): 1376-1380 (in Chinese)
- [13] 王虎玄, 胡仲秋, 龙芳羽, 郭春锋, 袁亚宏, 岳田利. 苹果汁中鲁氏接合酵母早期污染的电子鼻识别研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 209-214
Wang H X, Hu Z Q, Long F Y, Guo C F, Yuan Y H, Yue T L. Research on identification of spoilage in apple juice caused by *Zygosaccharomyces rouxii* at early stage using electronic nose[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 209-214(in Chinese)
- [14] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 吕恩利, 杨径. 基于电子鼻的果园荔枝成熟阶段监测[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 240-246
Xu S, Lu H Z, Zhou Z Y, Lv E L, Yang J. Electronic nose monitoring mature stage of litchi in orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(18): 240-246(in Chinese)
- [15] Balasubramanian S, Panigrahi S, Kottapalli B. Evaluation of an artificial olfactory system for grain quality discrimination [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2007, 40(10): 1815-1825
- [16] Hai Z, Wang J. Detection of adulteration in camellia seed oil and sesame oil using an electronic nose [J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2006, 108(2): 116-124
- [17] Zhou B, Wang J, Qi J. Identification of different wheat seeds by electronic nose[J]. *International Agrophysics*, 2012, 26(4): 413-418
- [18] 殷勇, 郝银凤, 于慧春. 基于多特征融合的电子鼻鉴别玉米霉变程度[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 254-260
Yin Y, Hao Y F, Yu H C. Identification method for different moldy degrees of maize using electronic nose coupled with multi-features fusion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 254-260 (in Chinese)
- [19] 张红梅, 王俊. 电子鼻传感器阵列优化及其在小麦储藏年限检测中的应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 164-167
Zhang H M, Wang J. Optimization of sensor array of electronic nose and its application to detection of storage age of wheat grain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12): 164-167 (in Chinese)
- [20] 杨春兰, 薛大为, 鲍俊宏. 黄山毛峰茶贮藏时间电子鼻检测方法研究[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(4): 676-681
Yang C L, Xue D W, Bao J H. Study on analysis method of storage time of Huangshanmaofeng tea by electronic nose[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2016, 28(4): 676-681 (in Chinese)
- [21] 程绍明, 马杨琿, 周博. 基于电子鼻的番茄种子不同储藏时间的鉴别研究[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(7): 941-945
Cheng S M, Ma Y H, Zhou B. Research on the tomato seeds with different storage time and different blended proportion by using electronic nose[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(7): 941-945(in Chinese)
- [22] 于慧春, 熊作周, 殷勇. 基于电子鼻的水稻品种鉴别研究[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(6): 105-109
Yu H C, Xiong Z Z, Yin Y. The research of rice varieties identification by electronic nose[J]. *Journal of the Chinese*

- Cereal and Oils Association*, 2012, 27(6): 105-109 (in Chinese)
- [23] 徐本美, 顾增辉. 用甲醇进行人工老化种子实验[J]. 种子, 1985(5): 14-15
 Xu B M, Gu Z H. Experiments of artificial aging seeds with methanol[J]. *Seed*, 1985(5): 14-15 (in Chinese)
- [24] Yu H, Wang J, Xiao H, Liu M. Quality grade identification of green tea using the eigenvalues of PCA based on the E-nose signals[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2009, 140(2): 378-382
- [25] Dutta R, Kashwan K M, Hines E L, Gardner J W. Electronic nose based tea quality standardization[J]. *Neural Networks the Official Journal of the International Neural Network Society*, 2003, 16(6): 847-853
- [26] Labreche S, Bazzo S, Cade S. Shelf life determination by electronic nose: application to milk[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2005, 106(1): 199-206
- [27] Sahoolizadeh A H, Heidari B Z, Dehghani C H. A new face recognition method using PCA, LDA and neural network[J]. *Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technolog*, 2011(4): 7
- [28] 刘明, 潘磊庆, 屠康, 刘鹏. 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 M, Pan L Q, Tu K, Liu P. Determination of egg freshness during shelf life with electronic nose[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 317-321(in Chinese)
- [29] 张婷婷, 孙群, 杨磊, 王建华. 基于电子鼻传感器阵列优化的甜玉米种子活力检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 275-281
 Zhang T T, Sun Q, Yang L, Yang L M, Wang J H. Vigor detection of sweet corn seeds by optimal sensor array based on electronic nose[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 275-281 (in Chinese)
- [30] 赵婧. 电子鼻在种子生活力检测和品种鉴别中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015
 Zhao J. Application study of electronic nose in seed viability testing and varieties discrimination[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2015(in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅