

电子鼻在竹笋种类识别中的应用

潘雁红^{1,2}, 何秋中³, 叶晓丹^{1,2}, 吴志庄^{1,2}

(1. 国家林业局竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江省竹子高效加工重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 浙江大学 农业与生物技术学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 通过电子鼻技术检测不同竹笋间气味的差异性, 以便初步建立一种可以快速区分竹笋种类的科学方法。以壮绿竹 *Dendrocalamopsis valida*, 绿竹 *Dendrocalamopsis oldhami*, 梁山慈竹 *Sinocalmus affinis*, 马来甜龙竹 *Dendrocalamus aspera*, 芦竹 *Arundo donax*, 撑绿竹 *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*, 硬头黄竹 *Bambusa rigida* 和毛竹 *Phyllostachys edulis* 等 8 种竹笋为实验对象, 采用电子鼻对它们具有特殊气味的挥发性气体进行分析检测, 通过主成分分析法(PCA), 线性判别法(LDA)和分层聚类分析(HCA)对 8 种竹笋样品进行了分析。结果表明: 通过电子鼻技术, 8 种竹笋能准确地被区分, 且各种竹笋气味间存在差异性。通过 Loading 分析表明传感器贡献率较大的是传感器 W5S 和传感器 W1S。电子鼻技术可以应用于不同竹笋种类的区分和鉴别。图 5 表 3 参 15

关键词: 竹笋; 电子鼻; 主成分分析; 线性判别分析

中图分类号: TS207; S644.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2016)03-0495-05

An electronic nose for bamboo shoot identification

PAN Yanhong^{1,2}, HE Qiuzhong³, YE Xiaodan^{1,2}, WU Zhizhuang^{1,2}

(1. China Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of High Efficient Processing of Bamboo of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 3. College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: To establish a method that could determine species of bamboo shoots, an electronic nose system was used in this study to measure odors from bamboo shoots. The electronic nose characterized the odors of eight different species of bamboo shoots. Discriminant models were developed using principal component analysis, linear discriminant analysis, and hierarchical clustering analysis. Then a loading analysis was used to indicate differences in odors according to data processing. Results showed that the bamboo shoots were accurately distinguished from one another with a high degree of discrimination. With the loadings analysis, sensors W5S, W1S had higher contribution rates during testing bamboo shoot samples. These results meant that electronic nose could be used to discriminate species of bamboo shoots. [Ch, 5 fig. 3 tab. 15 ref.]

Key words: bamboo shoots; electronic nose; principal componeent analysis; linear discriminant analysis

竹笋含有蛋白质、氨基酸、脂肪、糖类、钙、磷、铁、胡萝卜素、维生素等成分^[1], 具有清热消痰、开胃健脾、促进消化等作用。近年日本有研究认为竹笋含有可以防癌的多糖物质, 是一种理想的养生保健品^[2]。并非所有竹笋都可食用, 中国竹笋种类约有 500 余种, 可食用的只有 200 多种^[3]。由于竹笋种类繁多, 其种类识别是一大难点。对于很多人, 尤其是不常接触到竹类及竹笋的人们而言, 竹笋种类的判别更是难上加难。传统的分类方法是根据植物形态学及解剖学原理, 从植物的根、地下茎、叶、

收稿日期: 2015-09-10; 修回日期: 2015-11-07

基金项目: 财政部公益性行业科研专项(201004001); 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2012025); 浙江省科学技术计划项目(2014F10047)

作者简介: 潘雁红, 工程师, 从事竹林培育学等研究。E-mail: zhukan2004@163.com。通信作者: 吴志庄, 副研究员, 博士, 从事能源植物与药用植物开发利用等研究。E-mail: wzzcaf@126.com

秆、花和果实等组织的外部形态及组织构造来划分种类,但竹类植物不像一般有花植物,每年开花结果,其花期从几十年至百年不等,因此,以花和果形态特征为主要依据对竹子进行分类不易进行^[4]。现有研究^[5-6]将传统的分类方法与现代分子生物学相结合,从基因层面对竹类植物进行划分,这种检测方法费用高、过程繁琐、检测周期长,而且需要训练有素的专业人员操作,不适宜进行推广和普及。虽然目前植物分类研究已经取得较大进展,但是竹类植物种属分类依然是一大难点。近年来,基于具有专一性的气敏传感器阵列和适当的模式识别系统的电子鼻技术得到关注,该技术通过模拟人和动物的嗅觉系统对气味物质进行感知、分析和判断,得到气味物质特征指纹图。它与常规仪器分析比如气相-质谱、液相-色谱、色谱-红外等技术相比,无须前处理,不适用有机溶剂,操作简单,快捷,重复性好,成本低,是一种快速、绿色的仿生无损检测仪器^[7-8],已广泛应用于食品、农业、化工、环境、生物等领域^[9-10]。本研究以壮绿竹 *Dendrocalamopsis valida*, 绿竹 *Dendrocalamopsis oldhami*, 梁山慈竹 *Sinocalmus affinis*, 马来甜龙竹 *Dendrocalamus aspera*, 芦竹 *Arundo donax*, 撑绿竹 *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis grandis*, 硬头黄竹 *Bambusa rigida* 和毛竹 *Phyllostachys edulis* 等 8 种竹笋为研究对象,采用电子鼻技术对 8 种竹笋进行识别和区分,为竹笋种类的识别和竹类植物的分类提供一种新的方法和思路。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验研究的 8 种竹笋,已经过专家的鉴定,其名称、种类、采集产地等详见表 1。

表 1 8 种竹笋信息表

Table 1 Details of 8 different bamboo shoots

编号	种类	属	产地
1	壮绿竹 <i>Dendrocalamopsis valida</i>	绿竹属	中科院西双版纳热带植物园
2	绿竹 <i>Dendrocalamopsis oldhami</i>	绿竹属	福建省建瓯市瓯宁街道竹坑村
3	梁山慈竹 <i>Sinocalmus affinis</i>	牡竹属	四川省宜宾市长宁县古河镇保民村
4	马来甜龙竹 <i>Dendrocalamus aspera</i>	牡竹属	云南省普洱市思茅区南屏镇曼歇坝村
5	芦竹 <i>Arundo donax</i>	芦竹属	福建省建瓯市瓯宁街道竹坑村
6	撑绿竹 <i>Bambusa pervariabilis</i> × <i>Dendrocalamopsis grandis</i>	酸竹属	四川省宜宾市长宁县古河镇保民村
7	硬头黄竹 <i>Bambusa rigida</i>	箬竹属	四川省宜宾市长宁县古河镇保民村
8	毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	刚竹属	浙江省湖州市长兴县小浦镇

1.2 仪器

仪器采用德国 Aairsense 公司生产的 PEN3.5 型便携式电子鼻,设备主要由气路流量控制系统、气体传感器阵列、信号处理系统等 3 种功能器件组成。气体传感器阵列由 10 个不同的金属氧化物传感器组成(表 2),是电子鼻的核心部分^[11]。传感器响应信号为接触到样品挥发物后的电导率 G 与初始电导率 G_0 的比值 G/G_0 。

1.3 方法

分别称取 3 g 竹笋样品,置于 10 mL 带有聚四氟乙烯盖的样品瓶中,于室温下静置 1 h 后测定,实验重复 3 次·组⁻¹。设置程序如下:进样流量:400 mL·min⁻¹;采集时间:60 s;清洗时间:100 s;取 50 s 处稳定状态下的响应值作为分析时间点。

1.4 数据处理

本研究采用的主要分析方法有:主成分分析法(principal component analysis, PCA),线性判别法(linear discriminant analysis, LDA),负荷加载分析法(loadings analysis)和分层聚类分析法(hierarchical clustering analysis, HCA)。PCA 利用降维的思想,把多个指标转化为少数几个综合指标从而降低建模的

表 2 PEN3.5 传感器阵列及其性能

Table 2 Sensor array and its performance

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分,苯类
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化物很灵敏
3	W3C	芳香成分灵敏,胺类
4	W6S	主要对氰化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

难度，获取主要信息。一般情况下，总贡献率达到 80%以上，即可认为此方法适用^[12]。LDA 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^[13]。它是一种有效的特征抽取方法，能够最大限度地区分不同的样本集，在降低数据空间维数的同时使信息丢失最少^[14]。

运用 SPSS 软件进行样品聚类，分析不同竹笋气味物质的相似度。

2 结果与讨论

2.1 电子鼻对不同竹笋种类的信号响应

图 1 是电子鼻对竹笋气味物质进行检测后获得的 10 个传感器响应值图(图 1A)和雷达图(图 1B)，以毛竹笋为例。从图 1A 可知：随着进样时间的变化，相对电阻率 G/G_0 先快速增加，达到最大值，然后略有降低，最后趋于平稳。图 1 中每一条曲线代表了 1 根传感器，通过观察可以发现每根传感器对竹笋气体挥发物的响应是不同的，在毛竹笋中，响应值最大的是传感器 W5S，其次是传感器 W2W。这表明毛竹笋中所含较浓的气味物质是氮氧化合物及芳香类化合物。

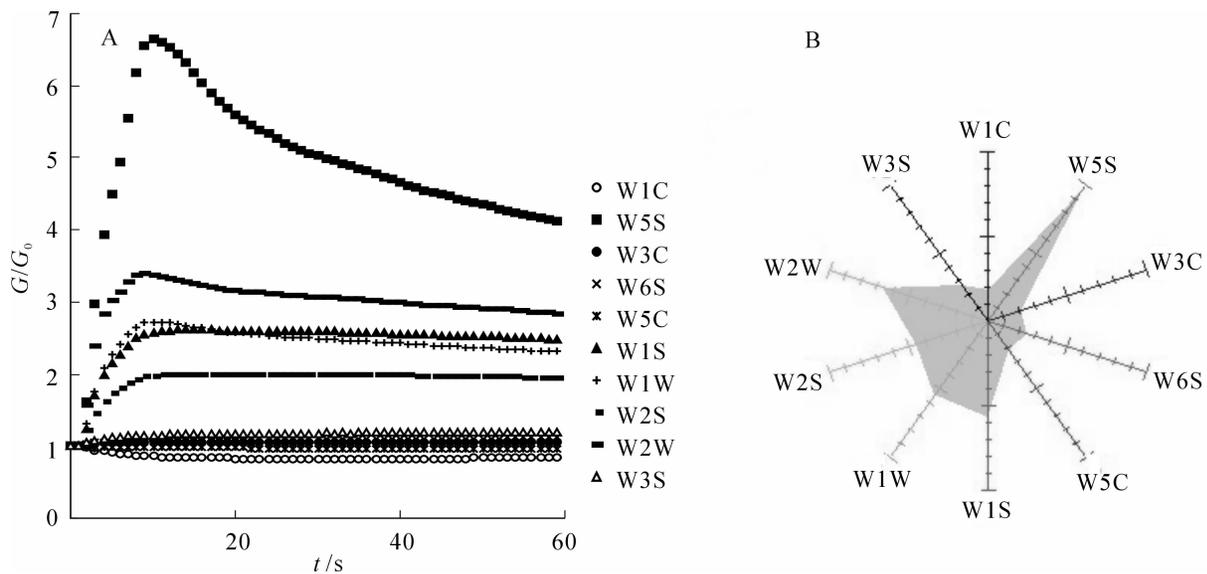


图 1 10 个传感器对毛竹竹笋样品的响应曲线(A)和雷达图(B)

Figure 1 Results of detection of different bamboo shoots

2.2 电子鼻对不同竹笋种类的识别

2.2.1 主成分分析法(PCA)分析结果 图 2 表示对 8 种种类的竹笋的 PCA 分析。由图 2 可以看出：8 种竹笋互不交叉重叠，区分度佳。PCA 分析的 2 个主成分贡献率之和为 97.87%，其中第一主成分贡献率为 72.68%(横坐标, PC1)，第二主成分贡献率为 25.19%(纵坐标, PC2)，表明 PCA 模型在分析中适用。PCA 第一主成分、第二主成分的二维图可以代表原始数据中的总体信息，8 种竹笋能够很好地被区分，说明气味物质差异较大。

2.2.2 线性判别法(LDA)分析结果 图 3 为不同竹笋的 LDA 分析。由图 3 可见：通过 LDA 分析，竹笋个类集中性好且没有交叉重叠，被很好地区分，LD1 和 LD2 的贡献率分别为 63.96%和 26.81%，总贡献率为 90.77%，区分度虽没有 PCA 大，但 LDA 图对样本可以更好地进行分类，揭示竹笋间挥发物差异的远近程度，芦竹、毛竹聚集在一起，说明这 2 种竹笋气味成分相比于其他竹笋较为接近。

2.2.3 电子鼻不同传感器贡献率分析 利用 Loadings 分析可以帮助区分当前模式下传感器的相对重要性。若传感器在模式识别中区分作用较小，则负载参数接近 0，从而可以忽略该传感器；若该传感器在识别中区分作用较大，可以确认为识别传感器。响应值则越偏离于 0。图 4 表明：传感器 W5S, W1S 在当前条件下起的作用最大，传感器 W2S, W1W, W2W 的作用次之，W1C, W3C, W6S, W5C 和 W3S 负载因子均接近于 0，作用最小。Loadings 分析表明，起主要区分作用的是传感器 W5S, W1S。

2.2.4 不同种类竹笋差异的分层聚类分析 表 3 为 8 种竹笋间的平方欧式距离，图 5 为其聚类分析的树

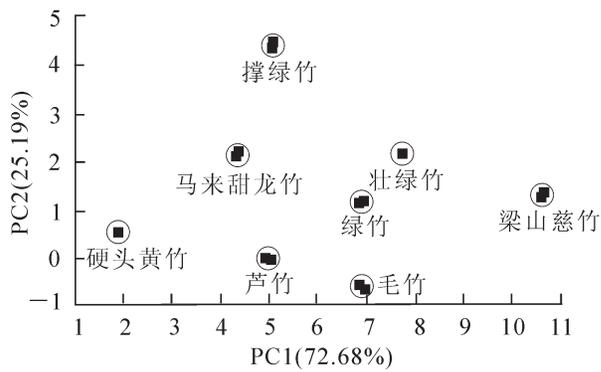


图2 电子鼻对不同种类竹笋的PCA分析

Figure 2 PCA analysis of different bamboo shoots

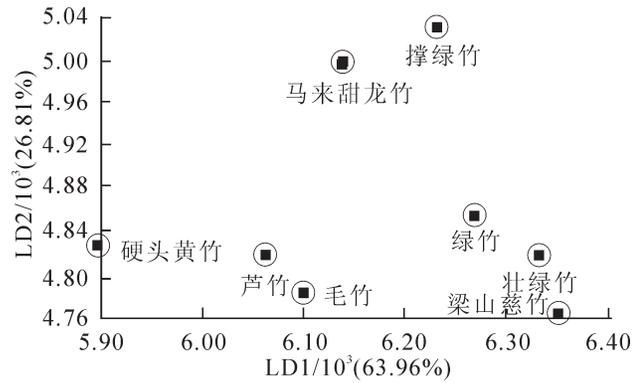


图3 电子鼻对不同种类竹笋的LDA分析

Figure 3 LDA analysis of different bamboo shoots

状图。由表3可知：8种竹笋间的欧式距离各不相同，欧式距离越大，说明差异性越大^[15]，也就是表示每种竹笋间气味的差异性越大。从表3中可看出：硬头黄竹与其他竹笋间的平方欧式距离是最大的，表示硬头黄竹与其他7种竹笋间的差异性最大，其次是梁山慈竹。绿竹、壮绿竹、芦竹、毛竹之间的平方欧式距离较小，说明他们之间气味较为相似。从图5可直观地观察到这8种竹笋间的差异。

表3 8种竹笋间的平方欧式距离

Table 3 Squared euclidean distance of different bamboo shoots

种类	平方 Euclidean 距离							
	壮绿竹	绿竹	梁山慈竹	马来甜龙竹	芦竹	撑绿竹	硬头黄竹	毛竹
壮绿竹	0.000	2.039	7.867	11.889	8.775	8.585	28.187	7.482
绿竹	2.039	0.000	13.033	6.831	2.578	7.264	43.086	2.426
梁山慈竹	7.867	13.033	0.000	37.464	25.123	31.742	12.712	19.042
马来甜龙竹	11.889	6.831	37.464	0.000	4.174	2.944	75.073	8.240
芦竹	8.775	2.578	25.123	4.174	0.000	9.436	66.153	1.087
撑绿竹	8.585	7.264	31.742	2.944	9.436	0.000	58.194	13.645
硬头黄竹	28.187	43.086	12.712	75.073	66.153	58.194	0.000	58.435
毛竹	7.482	2.426	19.042	8.240	1.087	13.645	58.435	0.000

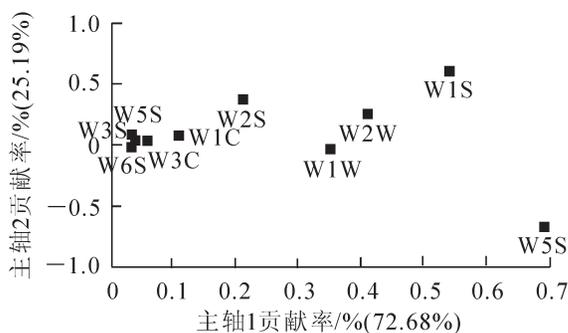


图4 电子鼻对不同种类竹笋的Loadings分析

Figure 4 Loadings analysis of different bamboo shoots

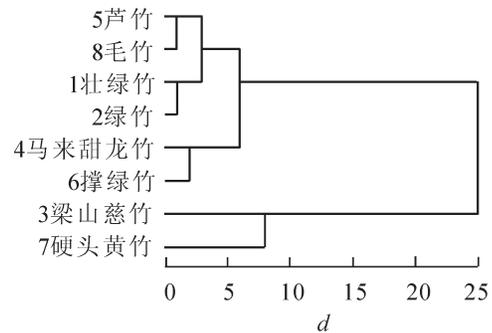


图5 8类竹笋的分层聚类分析

Figure 5 Hierarchical cluster analysis of different bamboo shoots

3 总结

从以上实验结果可知，电子鼻可以通过测定不同种类竹笋气味来获得相应的特征指纹数据，确定气体挥发物之间差异性，并且能够鉴别竹笋种类。该方法简单快捷，操作成本低，数据具有实时性，可靠性，且不同于气质需要将气体进行分离，能实现混合气体分析。今后可通过电子鼻检测与其他仿生技术联用，比如电子舌、电子眼等，更加全面地对竹笋进行监测分析，或者创建相关地指纹数据库，为竹笋的检测和合理加工利用提供依据。

4 参考文献

- [1] NONGDAM P, TIKENDRA L. The nutritional facts of bamboo shoots and their usage as important traditional foods of northeast India [J]. *Int Schol Res Not*, 2014, **2014**: 1 – 17. doi: 10.1155 /2014/679073.
- [2] CHONGTHAM N, BISHT M S, HAORONGBAM S. Nutritional properties of bamboo shoots: potential and prospects for utilization as health food [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2011, **10**(3): 153 – 169. doi:10.1111/j.1541-4337.2011.00147.
- [3] CHOUDHURY D, SAHU J K, SHARMA G D. Bamboo shoot: microbiology, biochemistry and technology of fermentation-a review [J]. *Indian J Trad Knowl*, 2012, **11**(2): 242 – 249.
- [4] 林新春, 方伟. 竹亚科分类学研究进展[J]. 竹子研究汇刊, 2005, **24**(1): 1 – 5.
LIN Xinchun, FANG Wei. Advances in the research of Bambuseae taxonomy [J]. *J Bamboo Res*, 2005, **24**(1): 1 – 5.
- [5] 杨光耀, 赵奇僧. 苦竹类植物 RAPD 分析及其系统意义[J]. 江西农业大学学报, 2000, **22**(4): 551 – 553.
YANG Guangyao, ZHAO Qiseng. Phylogenetic relationships among five pleioblastus species (Bambusoideae) from China and Japan based on random amplified polymorphic DNA [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2000, **22**(4): 551 – 553.
- [6] 李秀兰, 林汝顺, 冯学琳, 等. 中国部分丛生竹类染色体数目报道[J]. 植物分类学报, 2001, **39**(5): 433 – 442.
LI Xiulan, LIN Rushun, FENG Xuelin, et al. Chromosome numbers of some caespitose bamboos native in or introduced to China [J]. *Acta Phytotax Sin*, 2001, **39**(5): 433 – 442.
- [7] 邹小波, 赵杰文. 电子鼻快速检测谷物霉变的研究[J]. 农业工程学报, 2004, **20**(4): 121 – 124.
ZOU Xiaobo, ZHAO Jiewen. Rapid identification of moldy corn by electronic nose [J]. *Trans CSAE*, 2004, **20**(4): 121 – 124.
- [8] 冯莉, 常爱霞, 郭丛涛, 等. 电子鼻检测烤后烟叶挥发性组分的方法研究[J]. 中国烟草科学, 2014, **35**(4): 92 – 98.
FENG Li, CHANG Aixia, GUO Congtao, et al. Study on the method of using electronic nose to detect the volatile components in cured leaves [J]. *Chin Tobac Sci*, 2014, **35**(4): 92 – 98.
- [9] 蒋德云, 孔晓玲, 李宝筏, 等. 电子鼻在储粮害虫检测中的应用研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, **32**(2): 254 – 257.
JIANG Deyun, KONG Xiaoling, LI baofa, et al. Research and application of electronic nose for testing stored-grain insects [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2005, **32**(2): 254 – 257.
- [10] 邹小波, 赵杰文, 潘胤飞, 等. 基于遗传 RBF 网络的电子鼻对苹果质量的评定[J]. 农业机械学报, 2005, **36**(1): 61 – 64.
ZOU Xiaobo, ZHAO Jiewen, PAN Yinfei, et al. Quality evaluation of apples using electronic nose based on GA-RBF network [J]. *Trans Chin Socr Agric Mach*, 2005, **36**(1): 61 – 64.
- [11] 丁玉勇. 基于电子鼻和多种模式识别算法的不同种食用香辛料的鉴别[J]. 食品科学, 2013, **34**(16): 274 – 278.
DING Yuyong. Identification of different food grade spices by use of electronic nose and a variety of pattern recognition algorithms [J]. *Food Sci*, 2013, **34**(16): 274 – 278.
- [12] YU Huichun, WANG Jun, XU Yadan. Identification of adulterated milk using electronic nose [J]. *Sens Mat*, 2007, **19**(5): 275 – 285.
- [13] 张继军, 马登武, 王琳. 基于改进 HMM 的模拟电路早期故障识别和诊断[J]. 计算机工程与应用, 2014, **50**(3): 261 – 264.
ZHANG Jijun, MA Dengwu, WANG Lin. Recognition and diagnosis of incipient faults in analog circuit using improved HMM [J]. *Comp Eng Appl*, 2014, **50**(3): 261 – 264.
- [14] LIN Hui, YAN Yonghong, ZHAO Ting, et al. Rapid discrimination of apiaceae plants by electronic nose coupled with multivariate statistical analyses [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2013, **84**: 1 – 4.
- [15] 丁媛, 郑平安, 缪芳芳, 等. 电子鼻在 8 种贝类气味差异研究中的应用[J]. 食品科学, 2013, **34**(22): 353 – 355.
DING Yuan, ZHENG Pingan, MIAO Fangfang, et al. Odor discrimination of eight shellfishes using an electronic nose [J]. *Food Sci*, 2013, **34**(22): 353 – 355.