

董文慧, 孙春娃, 丁兴萃, 等. 电子鼻结合顶空 SPME-GC-MS 分析毛竹冬笋的挥发性成分[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(3): 685-691.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.03.030

## 电子鼻结合顶空 SPME-GC-MS 分析毛竹冬笋的挥发性成分

董文慧, 孙春娃, 丁兴萃, 李露双, 章志远

(1. 中国林业科学研究院国家林业局竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江人文园林股份有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 为研究毛竹冬笋的主要挥发性成分, 以自然生长毛竹冬笋(CK)和施肥处理毛竹冬笋(EG)为研究对象, 利用电子鼻结合顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(Headspace solid-phase microextraction-Gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)对其挥发性成分进行检测与分析。通过对毛竹冬笋样品进行 GC-MS 检测、主成分分析(Principal component analysis, PCA)以及线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)可知, 毛竹冬笋的挥发性成分主要是柏木醇、肉豆蔻醛、1,3-二羟基丙酮、5-羟甲基糠醛和 2-羟基-丁酸酮。PCA 和 LDA 主成分贡献率分别为 99.336%、93.719%, 均高于 85.000%, 说明电子鼻传感器的识别效应较高, 并且样品之间的挥发性成分区分效果较好。SPME-GC-MS 分析结果表明, 2 种样品均鉴定出 34 种成分, 均是醇类、醛类、酮类的相对含量较高, 并且 CK 高于 EG, 与由电子鼻检测得出的电阻比结果以及 PCA 和 LDA 分析结果基本吻合。说明, 电子鼻能够区分 CK 和 EG 的挥发性成分。

**关键词:** 电子鼻; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用; 毛竹冬笋; 挥发性成分

**中图分类号:** S759.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)03-0685-07

## Analysis of the volatile components of winter moso bamboo shoots by electronic nose combined with SPME-GC-MS

DONG Wen-hui, SUN Chun-wa, DING Xing-cui, LI Lu-shuang, ZHANG Zhi-yuan

(1. Chinese Academy of Forestry, China National Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, China; 2. Zhejiang Humanities Landscape Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** In order to research the main volatile compounds of winter moso bamboo shoots, electronic nose (E-nose) and solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) were used to detect and analyze the volatile components of two different types of winter moso bamboo shoots from natural growth (CK) and fertilization (EG) treatment. The main volatile components of winter moso bamboo shoots were cefrarolol, myristylaldehyde, 1,3-dihydroxyacetone, 5-hydroxymethylfurfural, and 2-hydroxy-butyrophenone by using GC-MS, principal component analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA). The principal component contributions of PCA and LDA were 99.336% and 93.719%, respectively, suggesting that the electronic nose sensor had a higher recognition effect, and a good separation of volatile

components between samples. The results of SPME-GC-MS analysis showed that 34 components were identified in both samples, the levels of alcohols, aldehydes and ketones were relatively high, and these in CK were higher than those in EG treatment, which were basically consistent with the results of the resistance ratio obtained by electronic nose and the analysis results of PCA and LDA. It can be

收稿日期: 2018-03-28

基金项目: 对发展中国家科技援助项目(KY201502001); 浙江省科技计划项目(2017F10032)

作者简介: 董文慧(1993-), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为竹笋品质和竹林培育研究, (E-mail) dwhyh1993@126.com

通讯作者: 丁兴萃, (E-mail) dxc01@hotmail.com



seen that the electronic nose can distinguish the volatile components in CK and EG.

**Key words:** electronic noses; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); moso bamboo shoot; volatile components

中国现有竹林面积约  $6.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 其中毛竹林占地面积大约 70%。中国年生产鲜竹笋量约  $4.0 \times 10^6 \text{ t}$ , 年出口  $1.0 \times 10^6 \text{ t}$  以上, 并且竹笋生产中主要是毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 笋<sup>[1]</sup>。毛竹竹笋主要有冬笋和春笋, 同时有少量鞭笋。毛竹竹笋味道鲜美, 属于绿色森林蔬菜, 其含有丰富的蛋白质、氨基酸、纤维素和维生素等, 是中国传统的食品之一。冬笋是立秋前后由毛竹的地下茎的侧芽发育而成的笋芽, 是中国传统的食品之一, 因尚未出土, 笋质幼嫩, 味道鲜美、营养价值高, 受到越来越多人的喜爱, 被称为“山珍”。目前关于竹笋的研究主要集中在蛋白质、氨基酸、脂肪、维生素、糖类以及人体所需的大量矿物质元素和微量元素等的方面<sup>[2-5]</sup>。但是对一些微量的次生代谢物质、有机物质研究较少, 他们可能是影响竹笋口感、气味的关键因素。不同培育方式下的竹笋的口感和营养物质会有所差异, 但是目前关于竹笋的挥发性成分的研究较少, 而食品的呈味是各种成分相互作用的结果。相关研究结果表明, 提高果蔬风味品质可以提高果蔬的消费量, 而香气成分是果蔬风味物质的重要组分, 也是吸引消费者的主要因素之一, 如果降低了许多风味物质产生的积极影响, 就会影响消费者的喜好<sup>[6-7]</sup>。生产实践表明, 冬笋除了营养丰富、口感美味之外, 还含有未知的芳香气味。前人用 GC-MS 检测挥发性成分发现, 与其他竹笋相比, 未出土的毛竹笋笋体中含有含量相对较高的一种烃类物质(古巴烯)、一种醇类物质(顺-3-己烯醇)和一种酯类物质(乙酸乙酯), 并且酯类物质的相对含量较高, 酯类物质能产生使人愉快的芳香味<sup>[8-9]</sup>, 顺-3-己烯醇和古巴烯均具有清新香味<sup>[10-11]</sup>, 两者的相互作用是未出土的毛竹笋产生清新味的主要原因之一。据报道毛竹笋原笋笋体的挥发性成分主要是醛类物质和芳香类的碳氢化合物等<sup>[12]</sup>。但是目前关于毛竹冬笋的挥发性成分鲜有报道。

电子鼻作为一种具有模糊评价属性的人工嗅觉电子系统于 20 世纪末期发展起来, 用来检测、识别和分析挥发性成分, 其代表的是挥发性物质的整体信息。与气相色谱-质谱联用仪、顶空固相微萃取等

技术相比, 电子鼻无须前处理, 具有快捷、操作简便、成本低以及很高的灵活性等优势, 广泛应用于食品、环境<sup>[13-15]</sup>等领域。气相色谱-质谱联用(GC-MS)以其分析速度快、灵敏度高、鉴别能力强等优势, 成为分析物质结构、发现新成分的一项既简单又成熟高效的检测技术<sup>[16]</sup>, 是目前食品安全分析领域最重要且主流的技术手段之一<sup>[17-18]</sup>。近年来质谱库的检索功能不断改进完善, GC-MS 可以检测到的未知成分越来越多, 技术应用也越来越普遍。GC-MS 法研究竹笋过程中, 夏勃<sup>[19]</sup>曾应用 GC-MS 分析斑苦竹笋的组成成分, 陆柏益等<sup>[20]</sup>和郑炯等<sup>[21]</sup>采用 GC-MS 对萃取毛竹笋油和腌制麻竹笋挥发性成分开展成分分析。本研究以自然生长(CK)和施肥处理(EG)的 2 种不同处理的毛竹冬笋为研究对象, 通过主成分分析以及线性判别分析探索 2 种处理竹笋风味的差异。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及样品处理

毛竹冬笋试验样地位于浙江省湖州市吴兴区妙西镇。处理组为施氮:磷:钾=1:1:1(质量比)的复合肥料的毛竹冬笋, 记为 EG; 对照组为自然条件下生长的毛竹冬笋, 记为 CK。2018 年 1 月在各试验地进行采样, 每种处理各 10 株, 将采集回来的竹笋洗净去壳, 采用 4 分法切样。

### 1.2 试验仪器

电子秤、PEN3.5 型便携式电子鼻购于德国 Airsense 公司; 固相微萃取(SPME)装置购于美国 SUPELCO 公司; Agilent 7890N-5975 气质联用(GC-MS)仪购于美国 Agilent 公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 电子鼻测定 每个样品混合均匀后, 先称量 5 g 放入标记好的锥形瓶中, 用粘纸封口, 密封 30 min 以富集气体, 用于电子鼻试验的检测, 试验每组重复 3 次。室温 ( $20 \pm 5$ ) °C 下, 采用顶空抽样的方法进行气体的收集。前期预试验确定电子鼻的检测从 40 s 左右开始趋于稳定, 因此为了保证数据稳定性, 本试验的检测时间设定为 60 s, 特征



值时间点为 50 s,为了减小上一个样品残留的气味可能会影响到下一个测定的指标,清洗时间设置为 200 s,每测试 1 个样品后,电子鼻会自动清洗,而且在测量下一个样品时,系统会自动提醒进样以及去样操作。在测量时,气体的进样流量为 600 ml/min。电子鼻的气体传感器阵列由 10 个不同的传感器组成(表 1),是电子鼻的重要组成部分,电子鼻通过转化传感器电信号的变化而获取样品中挥发性成分的整体信息。电子鼻自带的 Win-Muster 可以自动记录 10 个传感器每秒的  $G/G_0$  值,其中  $G_0$  代表初始电导率,即传感器经过标准活性炭过滤气体的电导率, $G$  代表传感器接触到样品挥发物后的电导率。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 The performance description of electronic nose sensor

陈列序号	传感器名称	性能描述	各项成分及相对含量 ( $\times 10^{-6}$ )
1	W1C	芳香成分,苯类	甲苯,10
2	W5S	对氮氧化合物很灵敏	二氧化氮,1
3	W3C	氨水,对芳香成分灵敏	苯,1
4	W6S	主要对氢气有选择性	氢气,100
5	W5C	烷烃芳香成分	丙烷,1
6	W1S	对甲烷等短链烷烃灵敏	甲基,100
7	W1W	对无机硫化物灵敏	硫化氢,1
8	W2S	对醇醚醛酮类灵敏	一氧化碳,100
9	W2W	芳香成分,有机硫化物	硫化氢,1
10	W3S	对烷烃灵敏,长链烷烃类	甲基,10

1.3.2 顶空-固相微萃取 向切碎后的竹笋样品中加入液氮并研磨成粉,准确称取 0.29 g 放入 10 ml 的 SPME 专用采用瓶中,加入 2 ml 超纯水,用 100  $\mu\text{m}$  PDMS/DVB 萃取头进行萃取,磁力搅拌速度为 600 r/min,30  $^{\circ}\text{C}$  下顶空萃取 30 min 后取出,快速插入进样口温度为 250  $^{\circ}\text{C}$  的色谱仪进样口中,解吸附 4 min,同时启动仪器采集数据。

1.3.3 GC-MS 色谱条件:载气为氦气(流速 1.0 ml/min),色谱柱为石英毛细管 DB-5 柱(60.00 mm $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ ),进样口温度 250  $^{\circ}\text{C}$ ,进样方式:不分流进样,升温程序:初始温度 40  $^{\circ}\text{C}$ ,随后升到 130  $^{\circ}\text{C}$ (速度 2.5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ),保持 1 min,最终升温到 250  $^{\circ}\text{C}$ (速度 8.0  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ),汽化室温度 250  $^{\circ}\text{C}$ 。

质谱条件:设置温度为 230  $^{\circ}\text{C}$ ,采用 70 eV 的高能电子轰击,电流 200  $\mu\text{A}$ ,接口温度 230  $^{\circ}\text{C}$ ,质量扫描范围  $m/z$  35~95。

检索谱库:NIST library 和 WILEY library 2 个化合物检索质谱数据库。

#### 1.4 数据处理

主成分分析(Principal component analysis, PCA),线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)由电子鼻自带的软件进行分析,采用 Excel 2007 整理试验数据,采用 SPSS 统计分析软件对试验结果进行数据统计和方差分析,绘图采用 Origin9。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子鼻对不同处理毛竹冬笋的挥发性成分分析

2.1.1 电子鼻对不同处理毛竹冬笋的信号响应 对毛竹冬笋进行电子鼻检测,获得电子鼻的 10 个传感器的响应图(图 1)。图中的每一条曲线分别代表了一个传感器,曲线上的点代表随着检测时间的变化,毛竹冬笋的芳香成分通过传感器时,电阻比会随着时间的变化而变化。电阻比刚开始时比较低,随着时间的增长以及挥发性物质在传感器表面进行富集,传感器的电阻比会不断增大,然后趋于平缓,最后达到一个相对稳定的状态。通过电子鼻传感器对不同类型的毛竹冬笋芳香特征的响应试验,可得出电子鼻对毛竹冬笋的挥发性成分有明显的响应,并且每一个传感器的响应程度各不相同,表明利用电子鼻来初步识别不同类型的冬笋气味品质是有可能的。

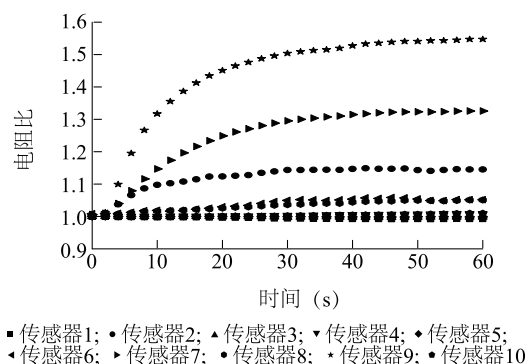


图 1 电子鼻传感器对毛竹冬笋挥发性物质的响应图

Fig.1 The response map of electronic nose sensor on winter moso bamboo shoots volatile compounds

2.1.2 电子鼻对不同处理的冬笋的信号响应及分析 图 2 表示毛竹冬笋挥发性成分经过 10 个传感



器时的电阻比大小。对于不同处理的毛竹冬笋挥发性主要成分来看,传感器 2、6、7、9 响应值变化较为明显,即氮氧化物、甲烷等短链烷烃、无机硫化物、有机硫化物这几类化合物在不同处理的毛竹冬笋之间有明显变化。8 号传感器代表的是醇醚醛酮类,由电子鼻检测的结果是 CK 的响应值略高于 EG 的响应值,由 GC-MS 得出的结果是 2 种处理的醇类、醛类、酮类的挥发性成分的相对含量 CK 均略高于 EG,两种检测方法的结果基本吻合。

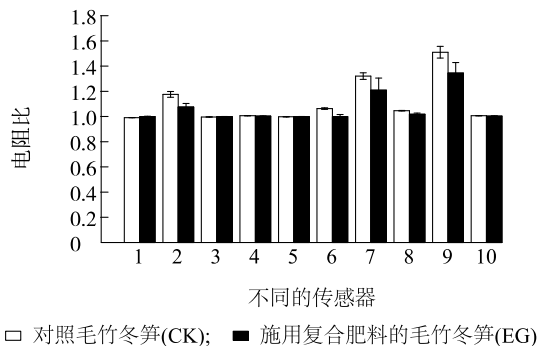
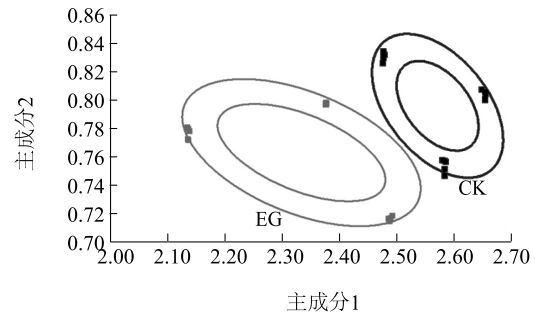


图2 传感器对不同处理的毛竹冬笋响应值变化的分析图

Fig.2 Analysis of sensor responses to winter moso bamboo shoots under different treatments

**2.1.3 不同处理毛竹冬笋的 PCA 和 LDA 分析** 主成分分析是一种利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标,其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息,且所含信息互不重复的分析方法。而线性判别分析是一种能够保证投影后模式样本在新的空间中有最小的类内距离和最大的类间距离,即模式在该空间中有最佳的可分离性的分析方法。由图 3 可知,PCA 分析法能够区分出不同处理的毛竹冬笋。第一主成分和第二主成分的贡献率总和为 99.336%,第一主成分的贡献率为 94.681%,第二主成分的贡献率为 4.655%,因此可以说明这 2 个主成分基本上代表了样品的主要信息。由图 4 可知,判别式 LD1 和判别式 LD2 的贡献率分别为 92.821% 和 0.898%,总贡献率为 93.719%。在一般情况下,2 个主成分的总贡献率之和能够超过 70%~85%,可以初步说明其代表的信息具有全面性<sup>[22]</sup>。PCA 分析中,对照毛竹冬笋(CK)和施用复合肥料的毛竹冬笋(EG)对电子鼻传感器的感应值距离较近,说明二者整体香气成分接近,而在 LDA 分析中,CK 和 EG 对传感器的感应值距离较远,说明不同处理的冬笋整体香气有差异。由此可得出,LDA 和 PCA 分析方法在一

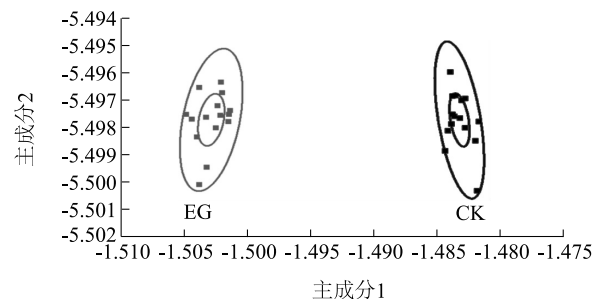
定程度上都可以区分 CK 和 EG,但是 LDA 比 PCA 能更好地区分 CK 和 EG。



CK:对照毛竹冬笋;EG:施用复合肥料的毛竹冬笋。

图3 不同类型的毛竹冬笋 PCA 分析图

Fig.3 PCA analysis of different types of winter moso bamboo shoots



CK:对照毛竹冬笋;EG:施用复合肥料的毛竹冬笋。

图4 不同类型的毛竹冬笋 LDA 分析图

Fig.4 LDA analysis of different types of winter moso bamboo shoots

## 2.2 SPME-GC-MS 检测结果

**2.2.1 检测成分及相对含量** 对不同处理的毛竹冬笋进行 SPME-GC-MS 成分分析,采用峰面积归一化法计算各成分的相对含量,具体结果如表 2 所示。由表 2 可知,检测到的 34 种物质成分中,相对含量高于 5% 的成分有 6 种,分别为柏木醇、肉豆蔻醛、未知物、1,3-二羟基丙酮、5-羟甲基糠醛和 2-羟基-丁酸酮,2 种处理下相对含量均较高的有柏木醇、肉豆蔻醛、1,3-二羟基丙酮、5-羟甲基糠醛和 2-羟基-丁酸酮,推测这 5 种物质为冬笋自身特有成分。其中柏木醇的相对含量均为最高,达到 28% 以上。柏木醇( $C_{15}H_{26}O$ )是首次从雪松中提取出来的天然产物,因此又称雪松醇,其作为一种倍半萜醇,具有较高的沸点,广泛存在于柏科和松科等多种植物的挥发油中,是合成一些香料的必不可少的中间体,具有愉快而温和的杉木芳香<sup>[23-24]</sup>。它因持久的



木香香气,广泛用于各种类型的香水、化妆品中以及卫生用品等<sup>[25]</sup>,并且在毛竹竹秆,尤其是7年生的竹秆中相对含量较高<sup>[26]</sup>,因此推测柏木醇可能是冬笋清香味的主要成分之一。肉豆蔻醛在鲜椒中具有较高的相对含量值,是鲜椒的主要风味物质之一<sup>[27]</sup>,推测其可能是引起毛竹竹笋辛辣味的主要成分之一。糖分是毛竹竹笋甘甜味的主要呈味物质之一,其含量是决定竹笋风味、品质和营养价值的重要参数之一,甜味与葡萄糖、蔗糖、果糖等均有关系<sup>[28]</sup>。1,3-二羟基丙酮是一种最简单的酮糖,属于单糖中的非还原糖,带有甜味,易溶于水<sup>[29-30]</sup>。5-羟甲基糠醛是由含糖物质在加热过程中产生的,普遍存在于含糖量较高的植物和食物中<sup>[31-32]</sup>。苯乙醛和4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮都与食品散发的清香味有关,都是很优质的香料物质,苯乙醛具有浓郁的清香气,天然存在于玫瑰油中;4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮广泛应用于食品、烟草等天然产物中<sup>[33-34]</sup>,这几种酮类物质和醛类物质具有香味和甜味,因此推测它们是毛竹竹笋具有清香味的原因之一。

**2.2.2 不同处理毛竹冬笋挥发性成分归类分析** 通过质谱库检索匹配,不同处理毛竹冬笋样品共鉴定出34种成分,其中醇类8种、醛类3种、酮类5种、烃类3种、酯类4种、酸类4种、酚类1种、吡嗪类4种、呋喃1种、未知物1种。由表3可知,CK和EG的相对含量按多少依次为:醇类>醛类>酮类>烃类>酯类>酸类>酚类。醇类物质的相对含量最高,超过30%,其次是醛类物质,醇类物质有着令人愉快的香味和气味,是影响风味物质的重要化合物<sup>[35-36]</sup>。一般情况下,醛醇类化合物都具有挥发性的香气,其是脂质产生的降解产物,并且一些挥发性醇会产生轻柔的香气<sup>[37]</sup>。苯甲醇可能是影响水煮竹笋的甜味和特征香气的芳香族化合物的成分之一<sup>[12]</sup>。一些醛类物质和酚类物质具有涩味<sup>[38-39]</sup>。2种处理的毛竹冬笋都是醇类物质的相对含量最高,醛类物质的相对含量次之,酚类物质的相对含量最低,并且醇类物质的相对含量是醛类物质的21.5倍,是酚类的214.0倍,说明冬笋中有相对含量较高的醇类物质。2种处理的毛竹冬笋的醇类、醛类、酯类、酸类和酚类的含量均为CK均略高于EG,说明CK的冬笋中含香味的挥发性气体较多。由电子鼻分析结果得出,CK的新鲜冬笋距离原点坐标轴较远,因此其在第一主成分上的贡献率较高,其主要挥发性成分电阻比值相对较高,与GC-MS检测结果基本吻合。

表2 毛竹冬笋成分及相对含量(相对峰面积)

Table 2 The composition and relative content (relative peak area) of moso bamboo shoots

编号	化合物名称	相对含量 (%)	
		CK	EG
1	丙酮酸甲酯	0.72	0.67
2	2-二甲基吡嗪	0.21	0.23
3	丁二醇	0.11	0.13
4	3-呋喃甲醇	0.48	0.49
5	1,3-二羟基丙酮	9.22	9.30
6	4-羟基丁酸乙酰酮	0.32	0.38
7	2,5-二甲基吡嗪	0.63	0.63
8	2,3-二甲基吡嗪	0.39	0.40
9	环戊二酮	0.81	0.81
10	2-羟基-丁酸酮	6.62	6.80
11	2,3,5-二甲基吡嗪	0.45	0.41
12	苯乙醛	0.73	0.68
13	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮	0.71	0.69
14	戊醛-正戊酸	0.31	0.28
15	己酯	0.26	0.27
16	十二烷	0.16	0.18
17	肉豆蔻醛	17.15	16.52
18	2-甲基乙酰乙酸乙酯	0.77	0.78
19	2,3-二氯苯并呋喃	0.53	0.56
20	二十烷	1.21	1.14
21	二十一烷	1.21	1.27
22	5-羟甲基糠醛	9.12	9.08
23	2-甲基环丙烷羧酸	0.12	0.13
24	3,3-二甲基-1,2-丁二醇	0.27	0.33
25	乙酸仲辛酯	0.11	0.10
26	3-羟基-3-甲基戊酸	0.58	0.55
27	草醇	0.61	0.61
28	四氢熏衣草醇	0.16	0.18
29	棕榈酸	0.41	0.39
30	植物甾醇	0.15	0.15
31	柏木醇	29.93	29.35
32	3,4-二甲基苯酚	0.14	0.13
33	未知物	15.20	16.16
34	亚麻醇	0.22	0.23

CK:对照毛竹冬笋;EG:施用复合肥料的毛竹冬笋。



表 3 不同处理冬笋挥发性成分归类分析

Table 3 Classification and analysis of volatile compounds of moso bamboo shoots under different treatments

物质		CK	EG
醇类	种类	8	8
	含量(%)	31.91	31.46
醛类	种类	3	3
	含量(%)	27.00	26.28
酮类	种类	5	5
	含量(%)	17.68	17.98
烃类	种类	3	3
	含量(%)	2.58	2.59
酯类	种类	4	4
	含量(%)	1.86	1.82
酸类	种类	4	4
	含量(%)	1.42	1.35
酚类	种类	1	1
	含量(%)	0.14	0.13
其它	种类	6	6
	含量(%)	17.41	18.39

### 3 结 论

本次试验利用了电子鼻和 SPME-GC-MS 对不同处理的毛竹冬笋进行成分分析。由 SPME-GC-MS 分析结果表明,毛竹冬笋的风味物质是由柏木醇、肉豆蔻醛、1,3-二羟基丙酮、5-羟甲基糠醛和 2-羟基-丁酸酮。由 SPME-GC-MS 得出,2 种处理的毛竹冬笋的挥发性成分主要是醇类、醛类,CK 均高于 EG,与电子鼻检测结果一致。PCA 和 LDA 分析结果均表明 CK 和 EG 之间有所不同,但是 LDA 对 CK 与 EG 的分离效果相对较好,说明通过电子鼻以及 LDA 分析可以区分 CK 和 EG 2 种处理的毛竹冬笋。

#### 参考文献:

- [1] 关永忠. 毛竹现代培育技术及成效研究[J]. 林业勘察设计, 2011 (1): 99-102.
- [2] NIPMALA C, SHARMA M L. A comparative study of nutrient components of freshly harvested, fermented and canned bamboo shoots of *Dendrocalamus giganteus* Munro[J]. World Bamboo & Rattan, 2009, 37(3): 63-90.
- [3] PARK E J, JHON D Y. Effects of bamboo shoot consumption on lipid profiles and bowel function in healthy young women[J]. Nu-

trition, 2009, 25(7): 723-728.

- [4] 罗晓莉. 不同处理对竹笋采后木质化及品质的影响[D]. 重庆:西南大学, 2007.
- [5] 杨秀艳,傅懋毅,杨校生,等. 麻竹杂交子代竹笋营养成分变异分析[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(1): 101-106.
- [6] CRISOSTO C H, GAPNER D, CRISOSTO G M, et al. Increasing 'Blackamber' plum (*Prunus salicina* Lindell) consumer acceptance[J]. Postharvest Biology & Technology, 2004, 34(3): 237-244.
- [7] TIEMAN D, ZHU G, JR R M, et al. A chemical genetic roadmap to improved tomato flavor[J]. Science, 2017, 355(6323): 391.
- [8] 崔逢欣,丁兴萃,李露双,等. 毛竹笋呈味物质种类、含量与辛辣味强度的关系[J]. 林业科学研究, 2017(6): 1041-1049.
- [9] 邓 璿,李志建,刘长虹,等. 顶空固相微萃取-气质联用分析酵母发酵面团挥发性风味物质[J]. 食品科技, 2015 (11): 124-130.
- [10] 孙慕芳,郭桂义,张 洁. 蒸青绿茶和炒青信阳毛尖绿茶香气品质的 GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 151-155.
- [11] 游小清,王华夫,杨亚军. 福鼎大白茶在各引种地的香型及香气品质表现[J]. 中国茶叶, 1993(5): 6-7.
- [12] NAKANISHI K, TAMURA H, SUGISAWA H. Volatile components in boiled and raw bamboo shoots (*Phyllostachys pubescens*) [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 1996, 43(3): 259-266.
- [13] WOJNOWSKI W, MAJCHRZAK T, DYMERSKI T, et al. Electronic noses; powerful tools in meat quality assessment[J]. Meat Science, 2017, 131: 119-131.
- [14] BABY R E, CABEZAS M, RECA E N W D. Electronic nose: a useful tool for monitoring environmental contamination[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2000, 69(3): 214-218.
- [15] 王储炎,熊国远,贾敬敏,等. 利用电子鼻检测不同香辛料熬制的卤汤[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 136-140.
- [16] 张艳华. 气相色谱的联用技术[J]. 光谱实验室, 2013(6): 2836-2840.
- [17] 韩晔华,张艳芬,刘虎威. 色谱质谱技术在食品安全分析检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(4): 1578-1586.
- [18] MASTOVSKA K, LEHOTAY S J. Rapid sample preparation method for LC-MS/MS or GC-MS analysis of acrylamide in various food matrices[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2006, 54(19): 7001.
- [19] 夏 勃. 斑苦竹笋(*Arundinaria oleosa*)营养成分和化学成分分析[D]. 南京林业大学, 2006.
- [20] 陆柏益,鲍建峰,山 琳,等. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取毛竹笋油的工艺及产品成分[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 312-316.
- [21] 郑 炯,宋家芯,陈光静,等. 顶空-固相微萃取-气质联用法分析腌制麻竹笋挥发性成分[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 193-196.
- [22] 田怀香,孙宗宇. 电子鼻在金华火腿香精识别中的应用[J]. 中国调味品, 2008, 33(11): 61-64.
- [23] 郭文生,卢在镐,郭长武,等. 柏木醇与酚类化合物包合现象的



- 研究[J]. 高等学校化学学报, 1991(4):545-547.
- [24] 张 岩,曲凡志,赵余庆. 柏木醇的药理作用研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2014,31(7):584-588.
- [25] 李秋庭,曾 辉,黎贵卿,等. 气相色谱内标法测定柏木醇含量[J]. 林业实用技术, 2013(5):64-66.
- [26] 刘志明,任海青,蒋乃翔. 基于 GC-MS 联用技术的毛竹挥发性次生代谢产物分析[J]. 经济林研究, 2011, 29(4):81-84.
- [27] 贾洪锋. 发酵辣椒中风味物质的研究[D]. 重庆:重庆西南大学, 2007.
- [28] 林海萍,周淑红,沈振民. 集约经营对毛竹笋品质的影响[J]. 江苏林业科技, 2004, 31(2):9-11.
- [29] ZELIKIN AN,PUTNAM D. Poly (carbonate-acetal)s from the dimer form of dihydroxyacetone [J]. *Macromolecules*, 2005, 38(13):5532-5537.
- [30] ZHU Y,YOUSSEF D,PORTE C, et al. Study of the solubility and the metastable zone of 1,3-dihydroxyacetone for the drowning-out process[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 257(3):370-377.
- [31] 张玉玉,张 兴,章慧莺,等. 3 种单糖模拟体系中 5-羟甲基糠醛的形成动力学分析[J]. 食品科学, 2014, 35(17):41-47.
- [32] 赵 玲,周臣清,朱婉清,等. 5-羟甲基糠醛的生物安全性和生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(11):372-377.
- [33] 校大伟,成春雷,张 金,等. 苯乙醛合成研究进展[J]. 化学试剂, 2008, 30(12):899-902.
- [34] 王鹏霄. 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮高产菌株的选育及发酵条件优化[D]. 北京:北京工商大学, 2010.
- [35] STEINHAUS M,SINUCO D,POLSTER J, et al. Characterization of the key aroma compounds in pink guava (*Psidium guajava* L.) by means of aroma re-engineering experiments and omission tests. [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 57(7):2882.
- [36] SPEIRS J,LEE E,HOLT K, et al. Genetic manipulation of alcohol dehydrogenase levels in ripening tomato fruit affects the balance of some flavor aldehydes and alcohols[J]. *Plant Physiology*, 1998, 117(3):1047.
- [37] 刘大群,华 颖. 基于电子鼻与 SPME-GC-MS 法分析不同脱水方式下萧山萝卜干中的挥发性风味物质[J]. 现代食品科技, 2014(2):279-284.
- [38] JING GUO,TIANLI YUE,YAHONG YUAN, et al. Chemometric classification of apple juice according to variety and geographical origin based on polyphenolic profiles[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61:6949-6963.
- [39] 陈锦永,靳路真,程大伟,等. 水果涩味研究进展[J]. 果树学报, 2016,33(12):1556-1566.

(责任编辑:陈海霞)