

# 基于电子感官技术结合 GC-MS 分析不同干燥方式下澳洲坚果风味的差异

任二芳<sup>1</sup>, 刘功德<sup>1</sup>, 艾静汶<sup>1</sup>, 牛德宝<sup>2\*</sup>, 罗朝丹<sup>1</sup>, 罗小杰<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西亚热带水果加工工程技术研究中心, 广西南宁 530001)

(2. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

**摘要:** 为科学评价不同干燥方式下澳洲坚果风味的差异, 采用电子舌、电子鼻电子感官技术结合气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 对其风味品质进行分析。结果表明: 不同干燥处理的果仁与新鲜果仁在鲜味、咸味、酸味和苦味上差异显著, 且判别函数分析 (linear discriminant analysis, LDA) 前两主成分的累计贡献率为 96.60%, 可以完全区分不同方式干燥的澳洲坚果仁。电子鼻对不同处理的澳洲坚果仁有明显不同响应, 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 前两主成分的累计贡献率达到 98.79%, 可以很好地区分不同干燥处理的澳洲坚果果仁的挥发性风味物质, 传感器 W1S、W3S 和 W3C 在主成分分析时发挥主要区分作用, GC-MS 作为电子鼻的补充, 共鉴定出 227 种挥发性成分, 烷烃和醛类在种类与含量上占较大优势, 四种不同处理的澳洲坚果仁的烷烃相对含量分别为 26.29%、40.76%、23.64%及 39.46%, 醛类相对含量分别为 29.01%、18.96%、26.03%及 23.87%。可见, 通过电子舌、电子鼻和 GC-MS 相结合的手段, 可以较好地地区分不同干燥方式下的澳洲坚果, 从而为澳洲坚果的采后产地初加工提供理论参考。

**关键词:** 电子舌; 电子鼻; 气相色谱-质谱 (GC-MS); 澳洲坚果仁; 风味

文章编号: 1673-9078(2021)11-304-316

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0167

## Analysis of Flavor Difference of Macadamia Nuts Dried with Different Methods Based on Electronic Sensory Technology Combined with GC-MS

REN Erfang<sup>1</sup>, LIU Gongde<sup>1</sup>, AI Jingwen<sup>1</sup>, NIU Debao<sup>2\*</sup>, LUO Chaodan<sup>1</sup>, LUO Xiaojie<sup>1</sup>

(1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Guangxi Subtropical Fruits Processing Research Center of Engineering Technology, Nanning 530001, China)

(2. College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to evaluate scientifically the differences in the flavor of macadamia nuts dried with different methods, electronic tongue and electronic nose sensory technologies combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to analyze their flavor quality. The results showed that there were significant differences between fresh macadamia nuts and different dried macadamia nuts in umami, salty, sour and bitter tastes, and the cumulative contribution rate of the first two principal components of linear discriminant analysis (LDA) was 96.60%, which could distinguish completely macadamia nuts dried in different ways. The responses of the electronic nose to macadamia nuts processed differently differed significantly. The cumulative contribution rate of the first two principal components in principal component analysis (PCA) reached 98.79%, which could well distinguish the volatile flavor compounds of the macadamia nuts dried by different

引文格式:

任二芳, 刘功德, 艾静汶, 等. 基于电子感官技术结合 GC-MS 分析不同干燥方式下澳洲坚果风味的差异[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 304-316, +84

REN Erfang, LIU Gongde, AI Jingwen, et al. Analysis of flavor difference of macadamia nuts dried with different methods based on electronic sensory technology combined with GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 304-316, +84

收稿日期: 2021-02-19

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA17204058-20); 广西农业科学院基本科研业务专项项目 (桂农科 2021YT143)

作者简介: 任二芳 (1986-), 女, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 2110093871@qq.com

通讯作者: 牛德宝 (1986-), 男, 博士, 助理教授, 研究方向: 食品 (制糖) 绿色加工, E-mail: happyndb@gxu.edu.cn

treatments. The sensors W1S, W3S and W3C played major roles in the principal component analysis. As a supplement to the electronic nose, GC-MS identified a total of 227 volatile components, with alkanes and aldehydes being dominant in types and contents. The relative contents of alkanes in the four different treatments of macadamia nuts were 26.29%, 40.76%, 23.64% and 39.46%, respectively, and the relative contents of aldehydes were 29.01%, 18.96%, 26.03% and 23.87%, respectively. Therefore, the combination of electronic tongue, electronic nose and GC-MS can better distinguish macadamia nuts dried with different methods, thereby providing a theoretical reference for postharvest primary processing of macadamia nuts in growing regions.

**Key words:** electronic tongue; electronic nose; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); macadamia nuts; flavor

澳洲坚果营养丰富, 香脆可口, 其脂肪含量高达80%以上, 主要以不饱和脂肪酸为主<sup>[1,2]</sup>, 此外还富含蛋白质、维生素、矿物质等<sup>[3,4]</sup>, 享有“干果皇后”之称。澳洲坚果原产于澳大利亚昆士兰与新南威尔士的亚热带雨林, 目前我国广东、广西、云南、福建、四川、重庆及贵州均有种植, 其中云南省是我国的主产区<sup>[5]</sup>。截至2016年底, 我国澳洲坚果种植面积超过 $3.15 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 位居世界第一。新鲜的澳洲坚果含水量高达约32%<sup>[6]</sup>, 因此, 干燥是澳洲坚果产品保存和加工的重要环节, 它不仅可以防止果仁氧化变质, 还可以提高澳洲坚果的质量, 延长储藏期<sup>[7]</sup>。随着科技的进步, 澳洲坚果的干燥方式日趋增多, 主要有自然干燥、热风干燥、微波辅助热风干燥、热泵干燥等多种干燥方法, 美国学者Cykler<sup>[8]</sup>提出了采用冷冻热泵干燥系统干燥带壳坚果, 果仁含水率从20%~30%降至1.5%仅用6 h, 不仅缩短了干燥周期, 而且果仁的风味、色泽等指标与常规干燥条件下得到的果仁产品质量并无明显差异; 刁卓超等<sup>[9]</sup>研究了热风干燥过程中澳洲坚果的干燥特性, 结果发现温度对澳洲坚果干燥特性的影响非常显著, 温度越高, 干燥周期越短; F.A.Silva等<sup>[10]</sup>采用热风与微波相结合的方法干燥澳洲坚果, 结果表明: 微波辅以热风干燥能有效减少干燥时间, 并且果仁的过氧化值和不饱和脂肪酸含量与经过传统工艺干燥的产品并无明显差别。国内对澳洲坚果的研究始于自20世纪70年代, 由于各种原因, 澳洲坚果的加工工艺、干燥技术等方面突破较少, 亟需大批科研人员对坚果的干燥进行深入研究, 然而, 目前通过对比不同干燥方式下澳洲坚果风味差异还鲜有报道。

电子舌模拟人体味觉系统对食品进行评价, 是近年来用于分析滋味的新型检测手段<sup>[11-13]</sup>。电子鼻具有模仿人体嗅觉系统的功能, 可对复杂气味进行识别<sup>[14]</sup>。气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)因其灵敏度高、选择性好等优点被广泛应用于挥发性和半挥发性成分的定性定量分析<sup>[15]</sup>, 例如用于研究烘烤咖啡豆<sup>[16]</sup>、苹果醋<sup>[17]</sup>、鲑鱼糜<sup>[18]</sup>等的挥发性化合物。但GC-MS与电子鼻相反, 只可以检测单一物质挥发性组分, 具有一定的局限性<sup>[19]</sup>, 然而电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术

可以从宏观和微观上全面研究食品挥发性风味物质, 是检测食品风味物质的主要检测手段<sup>[20]</sup>。近年来, HS-SPME-GC-MS、电子鼻和电子舌技术常用于分析食品基质化合物的挥发物和滋味, 例如用于质量控制、新鲜分级、存储条件和认证, 还有食物的鉴别, 例如蔬菜、水果、茶和咖啡、牛奶、葡萄酒、鱼和肉<sup>[21]</sup>。Dong等<sup>[16]</sup>采用电子鼻、电子舌及HS-SPME-GC-MS比较评价常温干燥、太阳能干燥、热泵干燥、热风干燥及冷冻干燥方法对烤制咖啡豆的挥发组分和滋味特性的影响, 实验发现热泵干燥在保存酮、酚和酯方面表现优异。PCA与电子鼻、电子舌以及HS-SPME-GC-MS可有效地区分不同干燥后的烘焙咖啡样品。Zhang等<sup>[22]</sup>利用电子鼻、电子舌及SDE-GC-MS对比研究真空冷冻干燥、热风干燥、微波干燥、真空微波干燥方法下金鲳鱼片的挥发性风味成分及潜在机理, 研究表明电子鼻和电子舌能有效鉴别4种样品。SDE-GC-MS鉴定出包括碳氢化合物(39)、醛(15)、酯(10)和醇(9)等86种挥发性风味成分。李婷等<sup>[23]</sup>采用SPME-GC-MS与电子鼻技术分析发酵乳中的挥发性风味物质, 结果表明复配发酵乳均以酸类、醛类、酮类、醇类、酯类、烷烃类及氮类等化合物组成。鲍伟等<sup>[24]</sup>基于电子鼻、电子舌和GC-MS分析饲料中添加金枪鱼蒸煮液对巴马香猪肉气味和滋味的影响, 研究发现喂食金枪鱼蒸煮液可以有效提高巴马香猪肉的气味和滋味。

鉴于此, 为更好地了解不同干燥方式下澳洲坚果风味物质的差异, 本研究以四种干燥方式下(自然晾晒、热泵干燥、热风干燥、超声协同热风干燥)的澳洲坚果为研究对象, 采用电子舌、电子鼻电子感官技术结合GC-MS对其滋味和挥发性组分进行系统比较, 分析不同干燥方式下澳洲坚果风味物质的差异, 从而为澳洲坚果的采后产地初加工提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

澳洲坚果青皮果, 品种为桂热5号, 于2019年10月采于广西扶绥夏果种植有限责任公司; 氯化银、氯

化钾、L(+)-酒石酸等,均为国产分析纯。

## 1.2 仪器与设备

L550 台式低速大容量离心机,湘仪离心机仪器有限公司;电子舌(SA-402B 味觉分析系统),日本 INSENT 公司;PEN3 型电子鼻,德国 AIRSENSE 公司;Pegasus BT 气相色谱高通量飞行时间质谱联用仪,美国 LECO 公司;电子鼻各个传感器的名称及性能描述见表 1。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 样品制备

参照广西扶绥夏果种植有限责任公司的澳洲坚果干燥方式,首先选择无病虫害的澳洲坚果脱青皮,脱青皮后的澳洲坚果进行自然风吹 24.00 h,然后采用表

2 不同方式对澳洲坚果进行干燥,干燥结束澳洲坚果水分含量均降至 3.00%以下。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of electronic nose sensors

阵列信号	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	氨类,对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对硫化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
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

表 2 澳洲坚果的不同干燥方式

Table 2 Different drying methods for Macadamia nuts

干燥处理	干燥方式	具体方法
1	自然晾晒	直接放置到阳光下晾晒 10.00 d
2	热泵干燥	先 38.00 °C 湿度 35.00% 干燥 24.00 h, 再 42.00 °C 湿度 25.00% 干燥 24.00 h, 最后 50.00 °C 湿度 15.00% 干燥 24.00 h
3	热风干燥	先 38.00 °C 干燥 24.00 h, 再 42.00 °C 干燥 24.00 h, 最后 50.00 °C 干燥 24.00 h
4	超声协同热风干燥	先在功率 600 W 水温 35.00 °C 条件下, 超声处理 20.00 min, 再按照热风干燥方式进行干燥

### 1.3.2 澳洲坚果滋味的检测

#### 1.3.2.1 样品前处理

首先将不同方式干燥完成的澳洲坚果去壳,得到的澳洲坚果果仁进行切碎处理,切碎的果仁与 40.00 °C 蒸馏水以 1:5 的比例混合,之后在 4000 r/min 转速下离心 35.00 min,并用 200 目纱布过滤,过滤液冷却后取水相,待检测。

#### 1.3.2.2 电子舌检测条件

实验前,传感器与参比电极需活化至少 24.00 h,鲜味、咸味、酸味、苦味及涩味检测采用两步清洗法,样品测试时间为 30.00 s;甜味检测采用甜味测试法,样品测试时间为 30.00 s,每个样品重复测定 5 次,保留后 3 次的监测数据进行分析。

### 1.3.3 澳洲坚果气味的检测

#### 1.3.3.1 样品前处理

电子鼻检测前样品处理参照姜水<sup>[25]</sup>方法:将每种方式干燥的澳洲坚果去壳,均选用大小基本一致的澳洲坚果果仁 20 颗放入 500.00 mL 烧杯中,密封置于室温环境,顶空时间为 2.50 h。每个样品的密封时间间隔 15.00 min,从而确保每个样品的顶空时间一致。

#### 1.3.3.2 电子鼻检测条件

电子鼻联用吸附热解析装置(EDU)检测,设备

设置:进样间隔时间 1 s,清洗时间 200 s,零点配平时间 5 s,测试时间 100 s;EDU 设置:进样时间 60 s,后进样时间 10 s,解析时间 120 s,注射时间 100 s,清洗时间 120 s,冷却时间 360 s,进样流速 300.00 mL/min。

### 1.3.4 澳洲坚果挥发性风味物质的检测

#### 1.3.4.1 顶空固相微萃取

将不同方式干燥的澳洲坚果去壳,分别取 5.00 g 澳洲坚果果仁置于 20 mL 顶空瓶中,将老化后的 50/30 μm CAR/PDMS/DVB 萃取头插入样品瓶顶空部分,于 60 °C 吸附 30 min,吸附后的萃取头取出后插入气相色谱进样口,于 250 °C 解吸 3 min,同时启动仪器采集数据。

#### 1.3.4.2 气相色谱高通量飞行时间质谱联用仪检测条件

色谱条件:色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);升温程序:温度 40 °C 保持 3 min,以 10 deg/min 升温至 230 °C,保持 5 min;进样口温度为 250 °C;载气:氦气,流速为 1.00 mL/min。

质谱条件:电离方式为 EI 源,发射电流 1 mA,电子能量 70 eV,界面温度 250 °C,离子源温度 200 °C,探测器电压 2000 V。

### 1.4 数据处理

所有数据均使用 Excel 2016 和 OriginPro 2016 处理和绘图, 采用 SPSS 22.0 数据处理软件进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和线性判别分析 (Linear discriminant analysis, LDA), 电子鼻数据分析利用其自带的 Winmuster 软件进行 PCA 分析和载荷分析 (Loading analysis, LOA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于电子舌技术分析不同干燥方式对澳洲坚果果仁滋味的的影响

电子舌通过“味觉信息的转换过程”可将测试样品的电势值转化为味觉值, 电子舌对 4 种处理的澳洲坚果果仁的滋味品质进行分析, 结果见表 3 所示。本实验以干燥前的新鲜澳洲坚果果仁为对照, 由表 3 可见, 在鲜味、甜味方面, 处理 1 的澳洲坚果果仁的味觉值最大, 分别为-0.66、-2.51, 然而其在咸味上味觉值最小为 0.23, 均与其它三种处理方式的澳洲坚果果仁存在显著差异 ( $p<0.05$ ), 同时四种处理的澳洲坚果果仁在酸味和苦味上均存在显著差异 ( $p<0.05$ ), 但在涩味方面, 处理 2 和处理 3 的澳洲坚果果仁味觉值较大, 分别为 0.54、0.52, 均显著高于 ( $p<0.05$ ) 处理 1 和处理 4 的样品。

主成分分析 (principle component analysis, PCA) 是非监督类模式识别中的一种重要的分类方法, 它是通过数据转换和降维, 并对降维后的特征向量进行线性分类, 从而最大程度体现不同样品间的差异<sup>[26]</sup>。判别函数分析 (linear discriminant analysis, LDA) 是统计学上的一种分析方法, 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降低特征空间维数的效果<sup>[27]</sup>。图 1 和图 2 分别为电子舌检测和区分不同干燥方式下澳洲坚果果仁的 PCA 和 LDA 图。在 PCA 图中第 1 主成分和第 2 主成分的贡献率分别达

到 62.79%和 27.10%, 前两主成分的累计贡献率为 89.89%。在用 PCA 进行分析时, 若两主成分的贡献率小于 95.00%, 则表示分析中有干扰成分, 说明该方法在数据分析中不合适<sup>[15]</sup>。而在 LDA 图中第 1 主成分和第 2 主成分的贡献率分别达到 88.60%和 8.00%, 前两主成分的累计贡献率为 96.60%, 高于 PCA 分析。由图 2 可以看出, 四种干燥方式的澳洲坚果仁均落在互不干扰的区域, 区域之间的距离代表了澳洲坚果样品之间的味觉差异, 处理 2 和处理 3 的澳洲坚果间距离较小, 处理 1 与其他三种处理方式的澳洲坚果间距离较大, 说明热泵干燥和热风干燥的澳洲坚果味觉相似度较高, 而自然晾晒与热泵干燥、热风干燥及超声协同热风干燥的澳洲坚果味觉相似度较小。

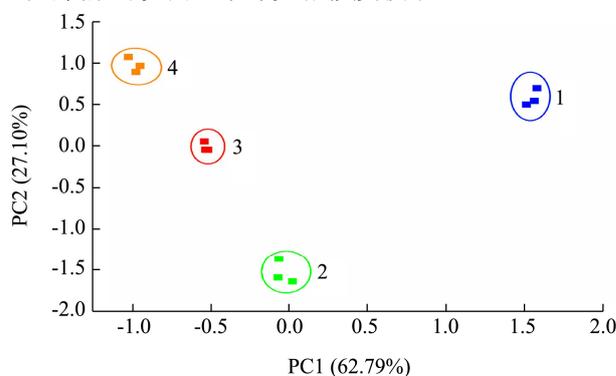


图 1 电子舌的 PCA 分析

Fig.1 PCA analysis of electronic tongue

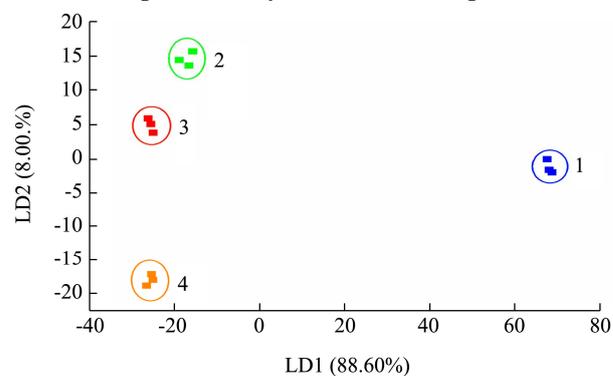


图 2 电子舌的 LDA 分析

Fig.2 LDA analysis of electronic tongue

表 3 电子舌对不同处理澳洲坚果果仁的响应分析

Table 3 Electronic tongue analysis response for macadamia nut kernels with different treatments

不同处理	鲜味	咸味	酸味	苦味	涩味	甜味
1	-0.66±0.04 <sup>a</sup>	0.23±0.02 <sup>d</sup>	2.57±0.01 <sup>c</sup>	-1.34±0.04 <sup>a</sup>	0.39±0.02 <sup>b</sup>	-2.51±0.03 <sup>a</sup>
2	-1.29±0.03 <sup>d</sup>	0.54±0.01 <sup>c</sup>	2.23±0.04 <sup>d</sup>	-1.87±0.03 <sup>b</sup>	0.54±0.04 <sup>a</sup>	-4.46±0.04 <sup>b</sup>
3	-1.09±0.03 <sup>b</sup>	0.72±0.04 <sup>b</sup>	2.93±0.03 <sup>a</sup>	-2.09±0.04 <sup>c</sup>	0.52±0.02 <sup>a</sup>	-4.57±0.03 <sup>c</sup>
4	-1.18±0.02 <sup>c</sup>	0.88±0.04 <sup>a</sup>	2.85±0.04 <sup>b</sup>	-2.28±0.03 <sup>d</sup>	0.21±0.02 <sup>c</sup>	-4.49±0.03 <sup>b</sup>

注: 表中每一列带有不同字母的数据之间差异显著 ( $p<0.05$ ), 带有相同字母的数据之间差异不显著 ( $p>0.05$ ); 下同。

## 2.2 基于电子鼻技术分析不同干燥方式对澳洲坚果果仁气味的的影响

PEN3 型电子鼻共有 10 个金属氧化物传感器, 不同性能的传感器对不同浓度气体敏感程度不同, 这与气味的属性和含量呈正相关<sup>[28,29]</sup>。图 3 为电子鼻传感器对不同方式干燥的澳洲坚果果仁的响应雷达图。由图 3 可见, 10 个传感器对不同干燥方式处理的澳洲坚果果仁均有响应且响应强度各不相同, 其中传感器 W2W (芳香成分, 对有机硫化物灵敏) 的区分能力最强, 其次是 W1W (对无机硫化物灵敏) 和 W1S (对甲基类灵敏), 其中处理 1 和处理 4 的澳洲坚果果仁响应值均高于处理 2 和处理 3 组。可见, 不同干燥方式的澳洲坚果中的芳香成分、有机硫化物、无机硫化物及甲基类等挥发性成分含量区别较明显。

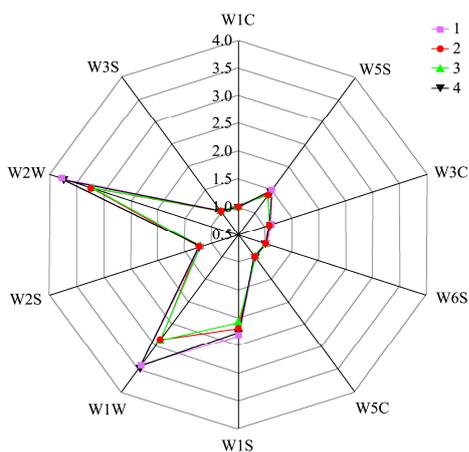


图 3 电子鼻传感器的响应雷达图

Fig.3 Response radar chart of electronic nose sensor

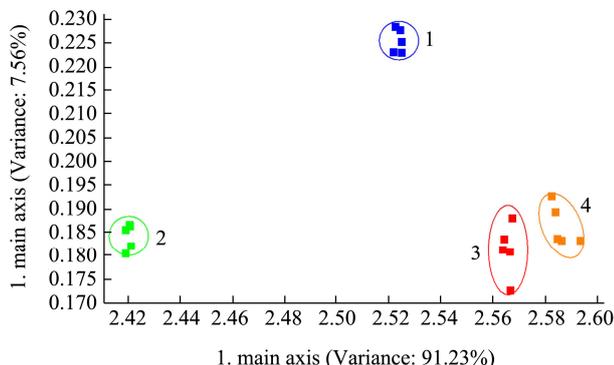


图 4 电子鼻的 PCA 分析

Fig.4 PCA analysis of electronic nose

不同方式干燥的澳洲坚果果仁的电子鼻 PCA 分析图见图 4 所示。从图 4 可以看出, 第一主成分的贡献率为 91.23%, 第二主成分的贡献率为 7.56%, 前两主成分的累计贡献率达到 98.79% 大于 95.00%, 可以有效反映原始数据的绝大部分信息。处理 3 和处理 4

的样品距离较近, 而其分别与处理 1、处理 2 的澳洲坚果果仁距离较远, 存在显著性差异, 说明干燥改变了样品的挥发性风味物质, 导致不同干燥方式的澳洲坚果果仁样品之间的风味特征各不相同, 但四种不同干燥方式的澳洲坚果果仁均分布在各自独立的区域, 说明电子鼻的 PCA 分析结果可以很好地区分不同干燥处理的澳洲坚果果仁的挥发性风味物质。

Loading 分析法与 PCA 分析法相关度较高<sup>[30]</sup>, 常用来检查 PCA 空间中传感器对模型数据分布的影响, 可以判别传感器响应值在识别模式中的重要性<sup>[31]</sup>, 筛选样品区分过程中起主要区分作用的挥发性风味化合物种类<sup>[32]</sup>, 各传感器离原点越远, 其对主成分的贡献越大, 反之越小<sup>[33]</sup>。图 5 为不同方式干燥的澳洲坚果果仁的电子鼻 Loading 分析结果图, 由图 5 可知, 传感器 W1S 对第一主成分贡献率最大, 其次是传感器 W3S, 说明第一主成分主要反映的是甲基类。传感器 W3C 和 W3S 对第二主成分贡献率较大, 说明第二主成分主要反映的是氨基、长链烷烃。由此可见, 传感器 W1S、W3S 和 W3C 的识别、分析能力较强, 在主成分分析时发挥了较大作用, 起到了主要区分作用, 其余七个传感器的识别、分析能力相对较弱, 区分作用不明显。

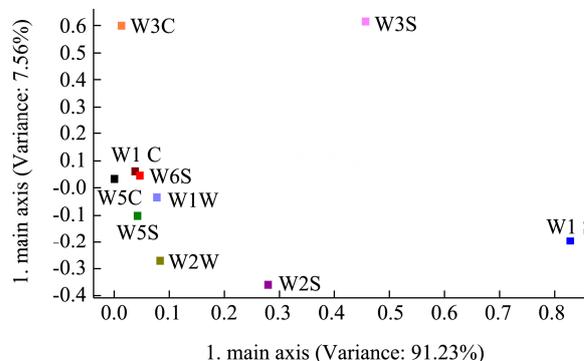


图 5 电子鼻的 Loading 分析

Fig.5 Loading analysis of electronic nose

## 2.3 基于 GC-MS 技术分析不同干燥方式对澳洲坚果果仁挥发性风味物质的影响

采用 SPME-GC-MS 分析不同干燥处理的澳洲坚果果仁的挥发性风味化合物的质谱结果见表 4。由表 4 可知, 4 种澳洲坚果果仁共鉴定出 227 种挥发性成分, 其中四种不同处理的澳洲坚果仁各占 94 种、94 种、110 种、105 种, 共有挥发性风味物质 36 种。澳洲坚果仁的挥发性风味化合物主要是由醇类、酯类、酸类、酮类、醛类、烷烃、烯烃、芳香烃、呋喃、醚及其他物质组成。从化合物的种类和相对含量来看, 烷烃和

醛类是不同干燥处理的澳洲坚果仁的主要挥发性化合物，四种不同处理的澳洲坚果仁的烷烃相对含量分别为 26.29%、40.76%、23.64%及 39.46%，醛类相对含量分别为 29.01%、18.96%、26.03%及 23.87%。

表 4 不同干燥处理的澳洲坚果果仁的挥发性风味化合物

Table 4 Volatile flavor compounds of macadamia nuts with different dry treatments

化合物种类	序号	化合物	保留时间/min	相对含量/%			
				处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
醇类化合物 (21 种)	1	乙醇	1.61	0.48	0.35	0.23	-
	2	正丁醇	2.67	1.65	2.27	1.16	1.24
	3	3-甲基-3-丁烯-1-醇	3.51	0.26	-	-	-
	4	异戊醇	3.57	3.42	3.51	2.62	2.73
	5	正戊醇	4.09	5.12	-	-	4.79
	6	正己醇	5.85	3.10	-	-	-
	7	1-庚醇	7.67	0.43	-	-	-
	8	4-乙基甲苯	7.82	0.16	-	-	-
	9	2-乙基己醇	8.66	0.30	0.26		0.29
	10	植物醇	19.12	0.06	0.03	0.02	0.02
	11	2,4-戊二醇	8.25	-	0.92	-	-
	12	十一醇	14.10	-	0.04	-	-
	13	叶绿醇	19.75	-	0.04	0.07	
	14	仲丁醇	2.14	-	-	15.72	-
	15	2-乙基-1-丁醇	10.38	-	-	0.08	-
	16	1-壬醇	10.98	-	-	0.09	-
	17	2-丁基辛醇	11.72	-	-	0.05	0.03
	18	1-己炔-3-醇	7.47	-	-	-	0.09
	19	苯甲醇	8.87	-	-	-	0.15
	20	3,7,11-三甲基-2,4-十二烯醇	19.75	-	-	-	0.02
	21	(2Z,4E)-3,7,11-三甲基-2,4-十二烯醇	19.99	-	-	-	0.02
酯类化合物 (20 种)	1	3-甲基丁酸乙酯	5.56	0.02	-	-	-
	2	丙烯酸丁酯	6.33	1.85	1.81	1.47	1.79
	3	戊酸乙酯	6.40	0.52	-	0.50	-
	4	丙酸丁酯	6.54	1.50	1.10	-	1.27
	5	1,4-丁内酯	6.65	0.26	-	-	-
	6	异丁酸丁基酯	7.34	0.14	0.08	0.08	0.09
	7	丁酸丁酯	8.09	0.69	0.82	0.70	0.80
	8	己二酸二乙酯	13.96	0.09	0.14	0.08	0.13
	9	邻苯二甲酸二异丁酯	19.59	0.02	0.02	-	0.01
	10	甲基丙烯酸甲酯	3.21	-	0.05	-	-
	11	乙酸-1-甲氧基-2-丙基酯	5.80	-	0.04	-	-
	12	乙酸乙酯	2.25	-	-	2.21	-
	13	乙酸丙酯	3.26	-	-	0.03	-
	14	乙酸仲丁酯	3.91	-	-	0.09	0.09
	15	异戊酸乙酯	5.57	-	-	0.04	-
	16	乙酸-2-甲基-1-丁醇酯	6.02	-	-	0.18	-
	17	联[二]硒二甲酯	6.11	-	-	0.13	-
	18	正丁基丙酸酯		-	-	1.10	-

续表 4

化合物种类	序号	化合物	保留时间/min	相对含量/%			
				处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
酯类化合物 (20 种)	19	$\gamma$ -丁内酯	6.66	-	-	0.13	-
	20	2-乙酰基乙酸氯乙酯	9.10	-	-	-	0.05
酸类化合物 (3 种)	1	乙酸	2.02	1.93	-	-	1.79
	2	异丁基壬酯草酸	9.25	0.13	-	-	-
	3	4-羟基丁酸	6.67	-	-	-	0.07
酮类化合物 (8 种)	1	3-甲基-4-庚酮	6.87	0.05	0.11	0.07	0.10
	2	甲基庚烯酮	7.92	0.13	0.12	0.11	0.10
	3	六氢假紫罗酮	14.24	0.03	-	0.02	0.01
	4	香叶基丙酮	14.84	0.05	-	0.03	-
	5	二氢-4-甲基-2(3H)-呋喃酮	7.51	0.18	-	-	-
	6	4-甲基苯戊酮	9.53	-	0.02	-	-
	7	1,1-二甲丙-2-乙基己酸酮	10.26	-	-	0.13	-
	8	香叶基丙酮	14.84	-	-	-	0.02
醛类化合物 (14 种)	1	异戊醛	3.05	1.70	1.02	2.62	1.48
	2	正己醛	4.62	15.56	7.36	14.15	14.79
	3	2-己烯醛	5.60	0.11	-	-	-
	4	庚醛	6.44	5.79	5.06	3.35	3.18
	5	苯甲醛	7.59	0.25	0.27	0.33	0.30
	6	正辛醛	8.25	0.83	0.87	0.66	-
	7	2,4,4-三甲基戊烯醛	8.84	0.11	-	-	-
	8	壬醛	9.93	4.62	4.38	3.89	3.32
	9	十二醛	14.35	0.04	-	0.01	-
	10	2-甲基丙烯醛	1.95	-	-	0.81	-
	11	反-2-己烯醛	5.60	-	-	0.11	-
	12	(E)-2-庚烯醛	7.47	-	-	0.10	-
	13	辛醛	8.25	-	-	-	0.63
	14	癸醛	11.52	-	-	-	0.17
烷烃类化合物 (88 种)	1	正己烷	2.11	19.41	20.67	15.72	16.44
	2	1,2-二氯乙烷	2.56	0.05	0.05	0.05	0.04
	3	4-甲基辛烷	4.97	0.03	-	-	0.02
	4	6-甲基十八烷	7.56	0.02	-	-	-
	5	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	8.01	0.55	-	0.70	0.63
	6	癸烷	8.18	0.48	0.49	0.48	0.51
	7	3-甲基己烷	8.35	0.33	-	0.35	-
	8	4,7-二甲基十一烷	8.75	0.17	0.23	-	0.19
	9	1-硝基己烷	8.95	0.07	-	-	-
	10	2,2-二甲基庚烷	9.07	0.10	-	-	-
	11	4-甲基正十烷	9.19	0.21	-	0.12	-
	12	6-乙基-2-甲基癸烷	9.39	0.13	-	-	-
	13	正十六烷	9.52	0.05	-	-	0.01
	14	2,3,3-三甲基戊烷	9.60	0.05	-	-	-
	15	2,6-二甲基癸烷	9.63	0.04	-	-	-

续表 4

化合物种类	序号	化合物	保留时间/min	相对含量/%			
				处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
烷烃类化合物 (88 种)	16	4-甲基壬烷	9.75	0.03	-	0.04	-
	17	十一烷	9.84	0.34	0.44	0.47	0.39
	18	2,3,5,8-四甲基硅烷	10.25	0.09	-	-	-
	19	2,5,6-三甲基辛烷	10.38	0.02	-	-	-
	20	2-甲基十一烷	10.86	0.26	0.14	0.15	-
	21	3-甲基十一烷	10.94	0.30	0.11	0.17	0.11
	22	正十二烷	11.40	1.91	2.22	1.78	1.44
	23	2,6-二甲基十一烷	10.69	0.48	0.10	0.13	0.25
	24	4-甲基十二烷	12.26	0.03	-	-	-
	25	正十六烷	12.47	0.06	-	-	-
	26	正十三烷	12.84	0.43	0.62	0.55	0.42
	27	2-甲基十三烷	13.72	0.06	0.09	-	-
	28	2,6,10-三甲基十二烷	13.87	0.02	-	0.02	-
	29	正十四烷	14.21	0.38	0.32	0.34	0.18
	30	2,6,10,14-四甲基十七烷	14.98	0.11	0.08	-	-
	31	十五烷	15.48	0.03	0.05	0.05	0.03
	32	十九烷	16.69	0.05	0.03	0.02	0.02
	33	丁烷	1.68	-	4.80	-	-
	34	二氯甲烷	1.81	-	6.45	-	15.82
	35	丙基-环丙烷	2.33	-	1.59	-	-
	36	甲基环己烷	3.43	-	0.05	0.06	0.06
	37	3-氯辛烷	4.44	-	0.20	-	-
	38	壬烷	6.41	-	0.29	-	0.23
	39	2,2,8-三甲基癸烷	7.47	-	0.03	-	-
	40	2,2,9-三甲基癸烷	8.01	-	0.71	-	-
	41	2,2,3,4-四甲基戊烷	8.36	-	0.30	-	0.10
	42	P-伞花烃	8.64	-	0.04	0.04	0.04
	43	6-甲基十三烷	9.01	-	0.02	-	-
	44	2,2-二甲基庚烷	9.08	-	0.11	-	-
	45	2,6-二甲基辛烷	9.25	-	0.10	-	0.02
	46	2,3,4-三甲基十烷	9.44	-	0.06	-	-
	47	5-甲基十烷	10.38	-	0.02	-	--
	48	5-乙基十烷	10.50	-	0.02	0.02	0.02
	49	5-甲基十二烷	10.69	-	0.05	-	-
	50	正二十一烷	12.48	-	0.07	-	-
	51	2,4,6-三甲基十烷	13.13	-	0.04	-	-
	52	庚基环己烷	13.52	-	0.02	-	0.03
	53	3-甲基十三烷	13.81	-	0.12	0.09	0.10
	54	2,9-二甲基十烷	13.88	-	0.03	-	-
	55	1,1,2-三氯乙烷	4.27	-	-	0.09	0.25
	56	磺酰基二甲烷	6.74	-	-	0.38	
	57	2,2-二甲基丁烷	7.67	-	-	0.30	

续表 4

化合物种类	序号	化合物	保留时间/min	相对含量/%			
				处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
烷烃类化合物 (88 种)	58	1,2-二甲基环戊烷	7.68	-	-	0.33	0.33
	59	正壬烷	8.49	-	-	0.02	-
	60	2-甲基-6-乙基辛烷	8.75	-	-	0.20	-
	61	2,2-二甲基二十烷	9.05	-	-	0.02	-
	62	2,2,6-三甲基辛烷	9.25	-	-	0.11	-
	63	2,2,4,4,6,8,8-七甲基壬烷	9.39	-	-	0.24	-
	64	4,8-二甲基十一烷	9.44	-	-	0.07	-
	65	2,5-二甲基庚烷	9.79	-	-	0.02	-
	66	1-乙基-2-庚基环丙烷	11.27	-	-	0.02	-
	67	3-乙基庚烷	11.60	-	-	0.16	-
	68	十七烷	13.30	-	-	0.02	-
	69	正辛基环己烷	13.51	-	-	0.03	-
	70	2,6,10-三甲基十三烷	14.98	-	-	0.23	-
	71	1,1-二乙氧基乙烷	3.44	-	-	0.05	-
	72	2,3,4-三甲基正己烷	5.73	-	-	-	0.67
	73	2,2,7,7-四甲基辛烷	7.47	-	-	-	0.09
	74	2,2,3-三甲基-5-乙基庚烷	8.55	-	-	-	0.11
	75	2,2,5-三甲基己烷	8.85	-	-	-	0.07
	76	2,2,11,11-四甲基十二烷	9.05	-	-	-	0.02
	77	2,2,3-三甲基己烷	9.08	-	-	-	0.14
	78	2,7,10-三甲基十二烷	9.19	-	-	-	0.10
	79	3,5-二甲基十二烷	9.39	-	-	-	0.09
	80	3,3-二甲基戊烷	9.44	-	-	-	0.06
	81	2,6,7-三甲基癸烷	9.60	-	-	-	0.18
	82	3,5-二甲基辛烷	9.64	-	-	-	0.04
	83	3,7-二甲基癸烷	10.17	-	-	-	0.02
	84	2,3-二甲基癸烷	10.70	-	-	-	0.05
	85	正二十烷	12.48	-	-	-	0.04
86	5-甲基十三烷	13.50	-	-	-	0.05	
87	3-甲基十二烷	13.72	-	-	-	0.03	
88	3-甲基十五烷	16.34	-	-	-	0.02	
烯烃类化合物 (27 种)	1	4-甲基-1-戊烯	2.33	1.07	-	-	-
	2	1-辛烯	4.45	0.24	-	0.13	-
	3	四氯乙烯	4.71	1.27	0.69	1.28	1.19
	4	苯乙烯	6.27	1.13	-	-	0.86
	5	2-蒎烯	7.03	0.15	0.13	0.14	0.15
	6	$\beta$ -蒎烯	7.84	0.10	-	-	-
	7	柠檬烯	8.71	0.12	0.12	0.13	0.11
	8	长叶烯	14.51	0.01	-	-	-
	9	十五烯	15.39	0.04	-	-	-
	10	十七烯	16.61	0.03	-	-	-
	11	新植二烯	19.32	0.06	0.02	0.02	0.02

续表 4

化合物种类	序号	化合物	保留时间/min	相对含量/%			
				处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
烯烃类化合物 (27 种)	12	3-氯辛烷	4.44	-	0.20	-	-
	13	4-甲基-1-十一烯	9.60	-	0.07	-	-
	14	3,4,5-三甲基-1-己烯	10.06	-	0.49	-	-
	15	5-十二烯, (E)-	11.28	-	0.03	-	-
	16	六氯-1,3-丁二烯	11.62	-	0.04	-	-
	17	3-十四烯(Z)-	15.39	-	0.03	-	-
	18	3,7,11,15-四甲基-2-十六烯	19.24	-	0.06	-	-
	19	2,4,6-三甲基苯乙烯	11.38	-	-	0.22	-
	20	1-十四烯	12.74	-	-	0.04	0.02
	21	1-十二烯	14.10	-	-	0.02	-
	22	1-十六烯	15.39	-	-	0.02	-
	23	异戊二烯	1.72	-	-	-	2.91
	24	3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯	8.37	-	-	-	0.14
	25	2,6-二甲基-3-庚烯	9.40	-	-	-	0.10
	26	5-甲基-2-己烯	10.06	-	-	-	0.25
	27	1-十一烯	12.74	-	-	-	0.03
	芳香烃类化合物 (28 种)	1	苯	2.64	1.65	2.27	1.37
2		甲苯	4.06	5.12	4.16	3.64	4.79
3		乙苯	5.71	0.67	0.73	0.61	0.67
4		对二甲苯	5.88	3.10	2.39	3.00	2.05
5		邻二甲苯	6.28	1.11	0.99	-	-
6		1-乙基-4-甲基苯	7.52	0.05	-	-	-
7		1,2,3-三甲苯	8.11	0.78	0.93	0.82	0.92
8		4-乙基甲苯	8.58	0.02	0.20	0.10	0.09
9		M-异丙基甲苯	8.64	0.05	-	-	-
10		$\alpha$ ,3-二氯甲苯	10.26	0.21	-	-	-
11		并苯	11.34	0.29	-	-	-
12		2-甲基萘	12.96	0.10	-	-	-
13		2-乙烯基萘	14.09	0.08	0.04	0.03	-
14		2,3,6-三甲基萘	16.03	0.02	-	0.01	-
15		丙基萘	7.40	-	0.08	0.03	0.09
16		5-异丙基间二甲苯	9.03	-	0.15	0.18	0.01
17		2,6-二氯甲苯	10.27	-	0.60	0.13	-
18	1-甲基-4-(1-甲基-2-丙烯基)苯	11.38	-	0.24	-	-	
19	1-甲基萘	12.98	-	0.06	-	-	
20	1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	13.71	-	0.09	-	-	
21	2,3,5-三甲基萘	16.04	-	0.02	-	-	
22	1-甲基-1-癸基萘	19.99	-	0.04	-	-	
23	邻乙基甲苯	7.83	-	-	0.10	0.09	
24	偏三甲苯	8.58	-	-	0.02	-	
25	1,2,3,5-四甲基萘	10.71	-	-	0.06	-	
26	1,1,5-三甲基-1,2-二氢萘	13.71	-	-	0.05	-	

续表 4

化合物种类	序号	化合物	保留时间/min	相对含量/%			
				处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
芳香烃类化合物 (28 种)	27	间二甲苯	6.29	-	-	-	0.86
	28	萘	11.35	-	-	-	0.13
呋喃 (3 种)	1	2-戊基呋喃	8.02	0.55	0.71	0.70	0.63
	2	3-甲基呋喃	2.20	-	-	4.29	-
	3	2-丁基四氢呋喃	9.09	-	-	0.07	0.09
醚 (6 种)	1	二甲基硫醚	1.76	2.02	-	-	-
	2	二丁醚	6.08	0.89	0.72	0.68	0.93
	3	叔丁基 2-乙基乙基醚	8.85	-	-	0.07	-
	4	6-乙烯基乙醚	10.70	-	-	0.06	-
	5	丙二醇甲醚	2.79	-	-	0.40	-
	6	正-午基醚	7.01	-	-	-	0.02
其他 (9 种)	1	3-甲腈, 2-甲基吡咯	7.58	0.25	-	-	-
	2	二甲基硫	1.76	-	6.40	1.56	-
	3	4,7-二甲基-3-甲氧基-1H-异吲哚	14.39	-	0.38	0.25	0.42
	4	二烯烟碱	15.63	-	1.14	-	-
	5	烯丙基脲	3.05	-	-	1.65	-
	6	1-亚乙基-1H-茚	12.97	-	-	0.13	0.05
	7	二甲基砷	6.73	-	-	-	0.58
	8	o-癸基羟胺	10.87	-	-	-	0.13
	9	2,2-二甲基-1,3-二氢化茚	11.38	-	-	-	0.17

注:“-”表示未检出, 相对含量<0.01%未列入表中。

由表 4 可知, 烷烃类化合物共检出 88 种, 在不同处理的澳洲坚果仁的挥发性成分中种类最多, 占比 38.77%, 相对含量也较高。此结果与不同方式干燥的澳洲坚果果仁的电子鼻 Loading 分析结果图一致, 传感器 W3S 代表的是长链烷烃, 其在第一主成分及第二主成分贡献率均较大。

醛类化合物在澳洲坚果仁的主要挥发性化合物中相对含量较高, 它们也是澳洲坚果仁的主要香气成分, 其中不同处理的澳洲坚果仁的正己醛相对含量均较高, 分别为 15.56%、7.36%、14.15%及 14.79%, 其次是庚醛、壬醛, 正己醛具有青香、叶香味, 庚醛具有青草香, 壬醛具有玫瑰花香。静玮等<sup>[34]</sup>同样研究发现醛类是澳洲坚果重要的焙烤香气成分, 其中 4 种高级脂肪族醛类 (C6~C9) 在醛类中占 23.30%, 这些饱和醛在低浓度时具有愉快的芳香气味。

### 3 结论

3.1 本实验采用电子感官技术结合 GC-MS 分析不同干燥方式 (自然晾晒、热泵干燥、热风干燥、超声协同热风干燥) 对澳洲坚果风味物质的影响。电子舌结果显示在鲜味、咸味、酸味、苦味上, 不同干燥处理

的与新鲜的澳洲坚果仁差异显著, 且 LDA 分析的前两主成分的累计贡献率为 96.60%, 可以完全区分不同方式干燥的澳洲坚果仁。电子鼻结合 PCA 及 LOA 分析结果显示电子鼻对不同处理的澳洲坚果仁有明显响应, PCA 分析的前两主成分的累计贡献率达到 98.79%, 可以很好地区分不同干燥处理的澳洲坚果果仁的挥发性风味物质, 传感器 W1S、W3S 和 W3C 的识别、分析能力较强, 在主成分分析时发挥主要区分作用。此外, GC-MS 作为电子鼻的补充, 共鉴定出 227 种挥发性成分, 主要由醇类、酯类、酸类、酮类、醛类、烷烃、烯烃、芳香烃、呋喃、醚及其他物质组成, 其中, 烷烃和醛类在种类与含量上占较大优势, 且四种不同处理的澳洲坚果仁的烷烃相对含量分别为 26.29%、40.76%、23.64%及 39.46%, 醛类相对含量分别为 29.01%、18.96%、26.03%及 23.87%。不同处理的澳洲坚果仁共有的挥发性风味物质有 36 种, 这与电子鼻的 PCA 及 LOA 分析结果一致, PCA 分析可以较好区分且长链烷烃在第一、二主成分分析上贡献率较大。

3.2 综上所述, 电子舌和电子鼻分别分析了不同干燥处理的澳洲坚果仁的滋味和挥发性气味, GC-MS 则解

释了电子鼻的差异分析,三者互为辅助,可以较好区分不同干燥方法的澳洲坚果,从而为澳洲坚果的产地初加工提供理论依据和技术参考。

### 参考文献

- [1] Sinanoglou V J, Kokkotou K, Fotakis C, et al. Monitoring the quality of  $\gamma$ -irradiated macadamia nuts based on lipid profile analysis and chemometrics. Traceability models of irradiated samples [J]. *Food Research International*, 2014, 60: 38-47
- [2] Navarro S, Rodrigues C. Macadamia oil extraction methods and uses for the defatted meal byproduct [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 54: 148-154
- [3] 黄克昌,郭刚军,邹建云.澳洲坚果果仁干燥 Page 模型的建立及品质变化[J].*食品科技*,2017,42(5):68-72  
HUANG Kechang, GUO Gangjun, ZOU Jianyun. Establishment of hot air drying page model and quality change for macadamia kernels [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(5): 68-72
- [4] 刘锦宜,张翔,黄雪松.澳洲坚果仁的化学组成与其主要部分的利用[J].*中国食物与营养*,2018,1:45-49  
LIU Jinyi, ZHANG Xiang, HUANG Xuesong. Chemical composition of macadamia nuts and utilization of its main components [J]. *Food and Nutrition in China*, 2018, 1: 45-49
- [5] 杨盛芳.盈江澳洲坚果种植情况[J].*云南林业*,2009,6:45  
YANG Shengfang. Yingjiang macadamia planting situation [J]. *Yunnan Forestry*, 2009, 6: 45
- [6] 王云阳.澳洲坚果射频干燥技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012  
WANG Yunyang. Study on radio frequency drying protocol of macadamia nuts [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012
- [7] IL Domínguez, Azuara E, Vernon-Carter E J, et al. Thermodynamic analysis of the effect of water activity on the stability of macadamia nut [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 81(3): 566-571
- [8] Cykler J F. Drying high moisture wet-in-shell macadamia nuts with low temperature dehydrated air [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1996, 12(2): 223-227
- [9] 刁卓超,杨薇,李建欢,等.澳洲坚果热风干燥特性研究[J].*食品与机械*,2010,26(6):44-46,78  
DIAO Zhuochao, YANG Wei, LI Jianhuan, et al. Study on characteristics of macadamia nut by hot air drying in different temperature [J]. *Food & Machinery*, 2010, 26(6): 44-46, 78
- [10] Silva F A, Marsaioli A, Maximo G J, et al. Microwave assisted drying of macadamia nuts [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 550-558
- [11] 牛海霞.电子舌在现代食品科学技术中的应用[J].*食品科技*, 2007(8):26-30  
NIU Haixia. The application of electronic tongue in modern food science and technology [J]. *Food Science and Technology*, 2007 (8): 26-30
- [12] 宋泽,徐晓东,许锐,等.不同部位牛肉炖煮风味特征分析[J].*食品科学*,2019,40(4):206-214  
SONG Ze, XU Xiaodong, XU Rui, et al. Analysis of flavor characteristics of stewed beef from different carcass parts [J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 206-214
- [13] Wei Z, Wang J, Liao W. Technique potential for classification of honey by electronic tongue [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 94(3-4): 260-266
- [14] Shi H, Zhang M, Adhikari B. Advances of electronic nose and its application in fresh foods: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(16): 2700-2710
- [15] Shi L K, Zhang D D, Liu Y L. Survey of polycyclic aromatic hydrocarbons of vegetable oils and oilseeds by GC-MS in China [J]. *Food Additives & Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2016, 33(4): 603-611
- [16] Dong W, Hu R, Long Y, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 723-731
- [17] Chung N, Jo Y, Joe M H, et al. Rice vinegars of different origins: discriminative characteristics based on solid - phase microextraction and gas chromatography with mass spectrometry, an electronic nose, electronic tongue and sensory evaluation [J]. *Journal of the Institute of Brewing*, 2017, 123(1): 159-166
- [18] Zhou X, Chong Y, Ding Y, et al. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, e-nose and sensory evaluation [J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 205-213
- [19] 邝格灵,王新宇,李树,等.基于电子鼻与气相色谱-质谱联用区分不同陈酿期恒顺香醋风味物质的差异性[J].*食品科学*, 2020,41(12):228-233  
KUANG Geling, WANG Xinyu, LI Shu, et al. Analysis on the differences of Hengshun vinegar at different aging times based on electronic nose and GC-MS [J]. *Food Science*, 2020, 41(12): 228-233

- [20] Cheng H, Qin Z H, Guo X F, et al. Geographical origin identification of propolis using GC-MS and electronic nose combined with principal component analysis [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 813-822
- [21] Rosa A, F Leone, F Cheli, et al. Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source food authentication and quality assessment-a review [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 210: 62-75
- [22] Zhang J, Cao J, Pei Z, et al. Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: a comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS [J]. Food Research International, 2019, 123: 217-225
- [23] 李婷,田佳乐,刘洋,等.基于固相微萃取-气相色谱-质谱与电子鼻技术分析发酵乳中的挥发性风味物质[J].食品与发酵工业,2020,46(10):233-241  
LI Ting, TIAN Jiale, LIU Yang, et al. Analysis of volatile flavor compounds in fermented milk by SPME-GC-MS and electronic nose technology [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 233-241
- [24] 鲍伟,刘雅婷,王小凤,等.基于电子鼻、电子舌和 GC-MS 分析饲料中添加金枪鱼蒸液对巴马香猪肉肉气和滋味的影响[J].食品工业科技,2019,40(23):229-234  
BAO Wei, LIU Yating, WANG Xiaofeng, et al. Electronic nose, electronic tongue and GC-MS for odor and taste analysis of Bama pork with dietary tuna cooking liquid supplement [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 229-234
- [25] 姜水.基于电子鼻技术的山核桃内部品质快速无损检测方法的研究[D].杭州:浙江大学,2017  
JIANG Shui. Nondestructive detection of Chinese pecans (*Carya cathayensis*) internal quality based on electronic nose [D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2017
- [26] 樊艳,李浩丽,郝怡宁.基于电子舌与 SPME-GC-MS 技术的腐乳风味物质的检测[J].食品科学,2020,41(10):222-229  
FAN Yan, LI Haoli, HAO Yining. Analysis of characteristic flavor compounds of fermented bean curd using electronic tongue and solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2020, 41(10): 222-229
- [27] 高利萍,王俊,崔绍庆.不同成熟度草莓鲜榨果汁的电子鼻和电子舌检测[J].浙江大学学报农业与生命科学版,2012, 38(6):715-724  
GAO Liping, WANG Jun, CUI Shaoqing. Evaluation of fresh juice of strawberries at different degrees of ripeness using electronic nose and electronic tongue [J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sec.) 2012, 38(6): 715-724
- [28] Li Q, Shi X H, Zhao Q, et al. Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume) [J]. Food Chemistry, 2016, 201: 80-86
- [29] 邹光宇,王万章,王淼森,等.电子鼻/舌融合技术的信阳毛尖茶品质检测[J].食品科学,2019,40(10):279-284  
ZOU Guangyu, WANG Wanzhang, WANG Miaosen, et al. Quality detection of Xinyang Maojian tea using electronic nose and electronic tongue [J]. Food Science, 2019, 40(10): 279-284
- [30] 周围,王波,刘倩倩,等.基于电子鼻和 GC-MS 对不同品种玫瑰"活体"香气的研究[J].香料香精化妆品,2017,2:1-6,72  
ZHOU Wei, WANG Bo, LIU Qianqian, et al. Study on aroma constituents of different cultivars of "Living" rose by electronic nose and GC-MS [J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2017, 2: 1-6, 72
- [31] 朱丹实,吕佳煜,赵丽红,等.基于电子鼻技术研究保鲜方法对鲜切菠萝贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2015,36(12): 324-327,336  
ZHU Danshi, LYU Jiayu, ZHAO Lihong, et al. Effect of preservation methods on quality of fresh-cut pineapple using electronic nose technique during storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(12): 324-327, 336
- [32] 赵泽伟,丁筑红,许培振,等.基于 SPME-GC-MS 和电子鼻分析方法分析薏仁饮料贮藏过程风味化合物变化[J].食品科学,2018,39(14):276-281  
ZHAO Zewei, DING Zhuhong, XU Peizhen, et al. Change of flavor compounds in coix seed beverage during storage analyzed by SPME-GC-MS and electronic nose [J]. Food Science, 2018, 39(14): 276-281
- [33] 潘冰燕,鲁晓翔,张鹏,等.GC-MS 结合电子鼻分析 1-MCP 处理对线椒低温贮藏期挥发性物质的影响[J].食品科学,2016, 37(2):238-243  
PAN Bingyan, LU Xiaoxiang, ZHANG Peng, et al. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) pretreatment on the volatile components of chili peppers during low-temperature storage analyzed by gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose [J]. Food Science, 2016, 37(2): 238-243

(下转第 84 页)