

基于电子鼻与电子舌技术的砂仁产地快速鉴别

郑美娟¹ 王小平¹ 王 璟²

(1. 漳州卫生职业学院药学院, 福建 漳州 363000; 2. 漳州市医院药学部, 福建 漳州 363000)

摘要: [目的] 建立一种基于智能感官技术的砂仁产地快速鉴别方法。[方法] 以广东阳春、福建长泰、海南澄迈、云南西双版纳 4 个产地的砂仁为研究对象, 采用 PEN3 电子鼻和 TS-5000Z 电子舌分别采集其气味与滋味信息, 运用主成分分析 (PCA)、线性判别分析 (LDA) 及传感器载荷分析对不同产地的样品进行识别。[结果] 电子鼻 10 个传感器响应值差异显著, 其中对氮氧化合物敏感的 W5S 响应最强。PCA 和 LDA 均显示 4 个产地砂仁样品在得分图上形成独立簇群, 实现有效区分, 气味强度总体排序为: 广东阳春 > 福建长泰 > 海南澄迈 > 云南西双版纳。电子舌 PCA 分析累计贡献率为 97.14%, 雷达图显示不同产地砂仁在涩味、苦味、甜味、咸味和酸味等滋味维度上差异显著。[结论] 电子鼻与电子舌联用技术可实现不同产地砂仁的快速、客观鉴别。

关键词: 砂仁; 电子鼻; 电子舌; 产地鉴别; 气味; 滋味

Rapid geographical origin identification of *Amomum villosum* using electronic nose and electronic tongue technologies

ZHENG Meijuan¹ WANG Xiaoping¹ WANG Jing²

(1. School of Pharmacy, Zhangzhou Health Vocational College, Zhangzhou, Fujian 363000, China; 2. Department of Pharmacy, Zhangzhou Municipal Hospital of Fujian Province, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

Abstract: [Objective] To develop a rapid method for identifying the geographical origin of *Amomum villosum* based on intelligent sensory technology. [Methods] *Amomum villosum* samples from four origins: Yangchun (Guangdong), Changtai (Fujian), Chengmai (Hainan), and Xishuangbanna (Yunnan), are used as the research materials. A PEN3 electronic nose and a TS-5000Z electronic tongue are employed to collect their aroma and taste profiles, respectively. Principal component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA), and sensor loading analysis are applied to discriminate samples from different origins. [Results] The response values of the 10 electronic nose sensors vary significantly, among which the W5S sensor, sensitive to nitrogen oxides, exhibits the strongest response. Both PCA and LDA results show that the *A. villosum* samples from the four origins form distinct clusters in the score plots. The overall aroma intensities follow the order: Yangchun (Guangdong) > Changtai (Fujian) > Chengmai (Hainan) > Xishuangbanna (Yunnan). The cumulative contribution rate of PCA for the electronic tongue data is 97.14%, and the radar charts reveal significant differences among samples from different origins in taste dimensions, including astringency, bitterness, sweetness, saltiness, and sourness. [Conclusion] The combined use of electronic nose and electronic tongue technologies enables rapid and objective discrimination of *A. villosum* from different geographical origins.

Keywords: *Amomum villosum*; electronic nose; electronic tongue; geographical origin discrimination; aroma; taste

砂仁 (*Amomum villosum* Lour.) 系姜科豆蔻属植物^[1], 南及西南地区, 如广东、云南、福建、海南等省份。现代研究^[4-6]证实, 砂仁富含挥发油、多糖、黄酮类等多种活性成分, 具备抗氧化、抗炎、调节胃肠功能及增强免疫等生物

是重要的药食同源物质^[2]。其干燥成熟果实为应用的核心部位, 市场需求量很大^[3]。在中国, 砂仁主要分布于华

基金项目: 第三批国家级职业教育教师创新团队项目 (编号: 教师函[2023]9号); 漳州市科技局自然科学基金项目 (编号: ZZ2025JH33); 漳州卫生职业学院中药学专业国家级职业教育教师创新团队科研专项课题 (编号: ZWYCX202405)

通信作者: 郑美娟 (1975—), 女, 漳州卫生职业学院副教授, 硕士。E-mail: 793202837@qq.com

收稿日期: 2026-02-04 **改回日期:** 2026-04-27

引用格式: 郑美娟, 王小平, 王璟. 基于电子鼻与电子舌技术的砂仁产地快速鉴别[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 84-91.

Citation: ZHENG Meijuan, WANG Xiaoping, WANG Jing. Rapid geographical origin identification of *Amomum villosum* using electronic nose and electronic tongue technologies[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 84-91.

活性。受气候、土壤等生态因素影响,不同产地砂仁在品质与风味上存在显著差异^[7-9]。

目前,砂仁的产地鉴别与品质评价多依赖于气相色谱-质谱联用(GC-MS)^[10-11]和超高效液相色谱-串联质谱法(UPLC-MS/MS)^[12]等分析技术。这些方法虽可实现对特定化学成分的精准鉴定,但样品前处理复杂、检测周期长、设备及维护成本较高,难以满足食品工业化生产中对于原料的快速筛查与实时监控需求。相比之下,传统感官评价方法虽然操作简便,但受评价人员主观影响大,重现性不足,且无法对风味的细微差别进行客观量化。

近年来,电子鼻与电子舌作为模拟生物嗅觉与味觉的智能传感技术,以其快速、无损、操作简便、可整体表征样品风味轮廓等优势,被广泛应用于食品^[13-15]、中药材^[16-17]及调味品^[18-19]的产地溯源与风味分析中,也有研究^[20-21]初步尝试将其用于砂仁品质与风味评价。然而,目前相关研究多侧重于单一感官维度的检测,未能实现气味与滋味信息的有效融合,难以系统表征砂仁的整体风味属性。研究拟选取广东阳春、福建长泰、海南澄迈、云南西双版纳4个代表性产地的砂仁为研究对象,采用电子鼻和电子舌技术,结合多元统计分析方法,系统分析其香气与滋味的特征差异,以期建立一种基于智能感官技术的砂仁产地快速鉴别与风味品质评价方法,为砂仁的产地溯源、调味品及功能性食品开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选取广东、福建、海南及云南4大主产区的成熟砂仁果实为样品,经漳州卫生职业学院王小平教授鉴定均为阳春砂(*Amomum villosum* Lour.),样品具体信息见表1。

氯化钾、酒石酸、氢氧化钾、乙醇、盐酸等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子鼻系统(包含10个金属氧化物半导体传感器的阵列,见表2):PEN3型,德国Airsense公司;

电子舌系统(各传感器检测指标见表3):TS-5000Z型,日本Insent公司;

电子天平:BSA3202S-CW型,德国Sartorius公司;

高速万能粉碎机:FW-100型,北京市永光明医疗仪器有限公司;

离心机:TDL-40B型,上海楚柏实验室设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 样品经除杂清洗后,参照《中国药典》(2025年版)对含挥发性成分药材的干燥要求,综合考虑干燥效率与挥发性成分保留的平衡,选择50℃恒温干燥至水分含量≤15%,干燥后的样品经粉碎机处理,过60目标准筛,收集粉末后置于棕色密封瓶中,于4℃避光冷藏保存,备用。

表1 砂仁样品信息

Table 1 Information of *A. villosum* samples

商品/产地名称	植物学名	产地详情
广东阳春砂仁	阳春砂(<i>Amomum villosum</i> Lour.)	广东省阳春市春城街道蟠龙村金花坑
福建长泰砂仁	阳春砂(<i>Amomum villosum</i> Lour.)	福建省漳州市长泰区陈巷镇吴田村
海南澄迈砂仁	海南砂(<i>Amomum longiligulare</i> T. L. Wu)	海南省澄迈县仁兴镇美跃村
云南西双版纳砂仁	绿壳砂(<i>Amomum villosum</i> Lour. var. <i>xanthioides</i> T. L. Wu et Senjen)	云南省西双版纳傣族自治州勐腊县易武乡曼腊村

表2 电子鼻传感器阵列详细信息

Table 2 Detailed information for electronic nose sensor array

传感器名称	主要敏感物质类别	具体描述/工作原理
W1C	芳香成分、苯类	对芳香族化合物灵敏,如甲苯、二甲苯
W5S	氮氧化物	对氮氧化物(如NO ₂)具有很高的灵敏性
W3C	氨、芳香成分	对氨、胺类化合物及芳香成分灵敏
W6S	氢气	对氢气具有选择性
W5C	烷烃、芳香成分	对烷烃、非极性化合物(如丙烷、丁烷)及部分芳香成分灵敏
W1S	短链烷烃	对甲烷等短链烷烃灵敏
W1W	无机硫化物	对硫化氢、硫醇等无机硫化物灵敏
W2S	醇醚醛酮类	对醇类、部分芳香族化合物和极性分子(如乙醇、丙酮)灵敏
W2W	芳香成分、有机硫化物	对芳香族化合物和有机硫化物(如甲硫醇)灵敏
W3S	长链烷烃	对甲烷等烷烃灵敏,但对长链烷烃选择性更高

表 3 电子舌可识别味觉指标

Table 3 Taste profiles recognized by electronic tongue sensors

传感器名称	基本味(相对值)	回味(CPA)值
鲜味传感器(AEE)	鲜味(如氨基酸等物质引起)	鲜味丰富度(可持续感知的鲜味)
咸味传感器(CTO)	咸味(如食盐等无机盐引起)	无
酸味传感器(CAO)	酸味(如醋酸、柠檬酸等引起)	无
苦味传感器(C00)	苦味(低浓度下被感知为丰富性)	苦味回味(如咖啡等食品苦味)
涩味传感器(AE1)	涩味(低浓度下被感知为刺激性回味)	涩味回味(如红酒等呈现的涩味)
甜味传感器(GL1)	甜味(糖或糖醇产生的甜味)	无

1.3.2 溶液配制 电子舌测定所需溶液于使用前新鲜配制,具体如下:

(1) 电子舌参比溶液:将 30 mmol/L KCl 溶液与 0.3 mmol/L 酒石酸溶液等体积混合配制。

(2) 负极清洗液:将 100 mmol/L HCl 溶液与无水乙醇按体积比 7:3 混合配制。

(3) 正极清洗液:将含有 10 mmol/L KOH 与 100 mmol/L KCl 的混合溶液,与无水乙醇按体积比 7:3 混合配制。

1.3.3 电子鼻分析 精密称取各产地砂仁粉末 0.1 g,置于 100 mL 洁净烧杯中,双层封口膜密封,(25±1)℃静置平衡 10 min,随后采用直接顶空吸气法进行测定。

仪器校准:每次试验前,电子鼻传感器阵列均须在洁净空气中预热老化至少 30 min,并进行基线校准;定期使用已知浓度的挥发性有机物标准气体验证传感器响应的稳定性与一致性。

测定参数设置:传感器归零时间 5 s,样品准备时间 5 s,进样流量 400 mL/min,采样分析时间 80 s。

每个样品平行测定 4 次,剔除首次测定数据以消除系统初始不稳定性的影响,取后 3 次稳定响应值进行后续分析。根据预试验结果,选取采样周期中信号稳定的第 70~72 s 时的传感器响应平均值作为特征值,用于主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)等多元统计分析。

1.3.4 电子舌分析 经预试验(测试质量浓度 0.1, 0.5, 1.0 g/100 mL)确定最佳测试质量浓度为 1.0 g/100 mL。精密称取各产地砂仁粉末 1.0 g,加入 100 mL 超纯水,超声提取 2 次,每次 10 min,合并提取液,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液作为待测液。电子舌测试流程包括传感器活化、清洗、平衡、样品检测及后清洗,每个样品循环测定 4 次,舍弃首次数据以消除传感器记忆效应,取后续 3 次稳定结果的平均值作为该样品的响应值进行分析。所有味觉数据均以 30 mmol/L KCl 溶液与 0.3 mmol/L 酒石酸溶液等体积混合配制为基准,计算相对响应值。

1.4 数据处理

电子鼻与电子舌原始数据分别经其配套软件(WinMuster 与 TS-5000Z Analysis Suite)采集与导出。采

用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),差异显著水平设置为 $P<0.05$ 。多元统计分析包括 PCA 与 LDA,并利用 Origin 2022 软件进行图形化展示。传感器贡献率分析、载荷分析等均在上述软件环境下完成。

2 结果与分析

2.1 基于电子鼻的不同产地砂仁香气差异分析

2.1.1 传感器响应特征分析 由图 1 可知,对不同产地砂仁样品进行测试时,所有传感器在整个过程中均产生响应,其中 W5S 和 W1W 传感器在整个测试中的响应最为明显,其响应值显著高于其他传感器;W2W 传感器次之,W5C、W2S 及 W1C 传感器也有明显响应。相比之下,W3C、W6S、W1S、W3S 传感器的响应值变化很小,数值均接近 1。测试结果显示,虽然砂仁样品主要响应的传感器类型一致,但不同产地的样品在传感器的响应强度和响应比例上存在明显差异。

为明确不同产地砂仁的传感器响应特征,对每个样本的传感器响应平均值进行了统计比较,结果见表 4。其中,对响应最为强烈的 W5S、W5C、W1W、W2S、W2W 传感器的比较结果显示,其平均响应强度总体上呈现:广东阳春>福建长泰>海南澄迈>云南西双版纳。

由图 2 可知,各产地砂仁样品在 W5S 与 W1W 轴向上均呈现显著延伸,反映出二者在整体响应中的主导作用,但轮廓形状与面积存在梯度性分化。其中,广东阳春砂仁轮廓最广、整体外凸,表明响应强度最高且较为均衡;福建长泰砂仁形态相近但整体收敛,强度次之;海南澄迈和云南西双版纳砂仁轮廓紧凑、面积最小,二者形态高度相似,表明响应较弱且香气特征接近。该梯度变化与上述传感器响应值的趋势(广东阳春>福建长泰>海南澄迈≈云南西双版纳)相互印证,进一步揭示了不同产地砂仁香气特征的系统性差异。

2.1.2 PCA 与 LDA 由图 3 可知,第一主成分(PC1)贡献率为 99.69%,第二主成分(PC2)贡献率为 0.20%,累计贡献率达 99.89%。4 个产地的砂仁样品在 PCA 得分图上分布分散,且各自形成独立簇群,无重叠现象,说明不同产

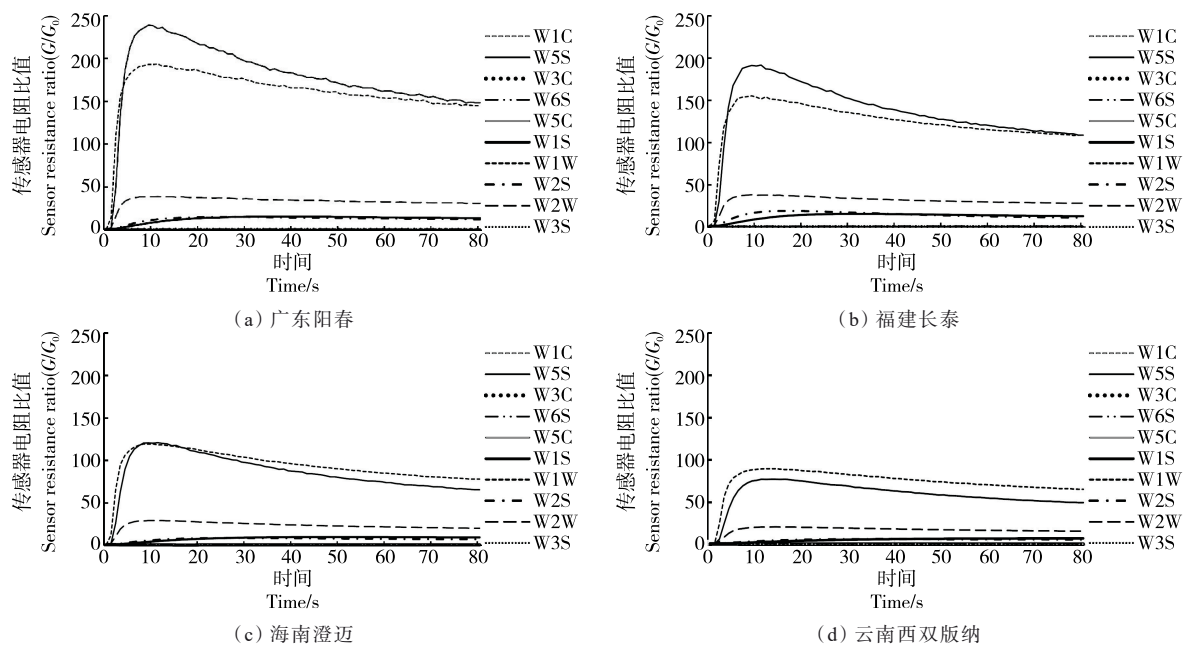


图1 不同产地砂仁样品电子鼻测试图谱

Figure 1 Electronic nose test spectra of *A. villosum* samples from different origins

表4 不同产地砂仁粉末电子鼻传感器响应平均值(70~72 s)

产地	W1C	W5S	W3C	W6S	W5C	W1S	W1W	W2S	W2W	W3S
广东阳春	0.201 1	152.729 0	0.481 9	1.095 0	0.551 1	15.078 1	147.290 8	13.203 4	32.497 6	1.267 3
福建长泰	0.236 5	98.560 8	0.528 5	1.112 5	0.601 8	12.293 3	101.761 1	10.402 5	26.046 2	1.306 9
海南澄迈	0.278 7	72.986 0	0.581 7	1.122 2	0.650 0	10.264 0	87.240 8	7.784 8	21.622 4	1.270 6
云南西双版纳	0.345 2	45.741 2	0.649 2	1.108 8	0.712 7	6.967 1	61.893 7	6.302 9	14.761 2	1.273 6

地砂仁各自有独特的香气成分^[22]。其中,广东阳春砂仁与其他3个产地的距离最远,区分度最高;福建长泰与海南澄迈砂仁在图上距离相对较近,气味有一定相似性;云南西双版纳砂仁气味强度最弱。图4显示,4个产地砂仁样品被完全区分开,无任何重叠,第一判别函数贡献率为91.97%,第二判别函数贡献率为6.72%,累计贡献率达98.69%。

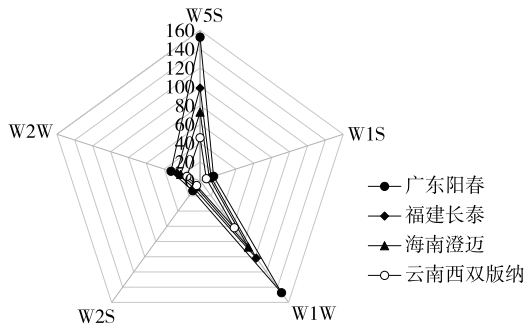


图2 不同产地砂仁的主要响应传感器响应雷达图

Figure 2 Radar chart of main sensor responses for *A. villosum* from different origins

由表5可知,广东阳春与云南西双版纳的相似度最高(相关系数0.982),福建长泰与海南澄迈的相似度最低(相关系数0.645),表明两者香气差异最大,是产地间最易区分的组合。该结果与PCA得分图中广东阳春与云南西双版纳空间位置较近、福建长泰与海南澄迈虽较近但仍可区分的表现一致,从量化角度印证了不同产地砂仁香气特征的梯度差异与可区分性。

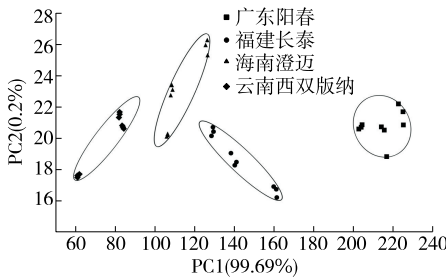


图3 不同产地砂仁(粉末)的PCA主成分分析图

Figure 3 PCA plot of *A. villosum* (powder) from different origins

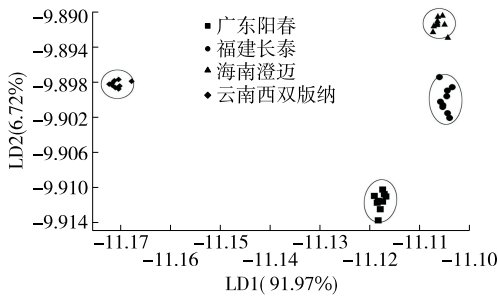


图 4 不同产地砂仁(粉末)的LDA线性判别分析
Figure 4 LDA of *A. villosum* (powder) from different origins

表 5 不同产地砂仁样品相关系数矩阵
Table 5 Correlation matrix of *A. villosum* samples from different origins

产地	广东阳春	福建长泰	海南澄迈	云南西双版纳
广东阳春	1.000			
福建长泰	0.913	1.000		
海南澄迈	0.971	0.645	1.000	
云南西双版纳	0.982	0.892	0.794	1.000

综上,不同产地砂仁在电子鼻传感器响应上具有显著差异,能够被有效区分。广东阳春砂仁在气味特征上最为独特,福建长泰与海南澄迈砂仁气味具有一定相似性,而云南西双版纳砂仁香气强度相对较弱。

2.1.3 传感器载荷分析 电子鼻传感器载荷散点图(图5)显示,不同传感器对区分不同产地砂仁香气特征的贡献差异显著,第一主成分(PC1)的方差贡献率达99.69%,可反映样品嗅觉的整体信息^[23]。传感器W5S在PC1上表现出极高的正载荷(约0.78),结合表2可知其对氮氧化合物敏感,表明氮氧化合物是驱动砂仁产地香气差异的关键化学标记物。W2W、W1S、W2S等传感器在PC1上均表现出正向但较低的载荷,结合其敏感特性(分别对芳香成分/有机硫化物、短链烷烃、醇醚醛酮类敏感),说明这类传感器对香气差异有一定贡献,但其区分能力明显弱于W5S。此外,传感器W1W在第二主成分(PC2,

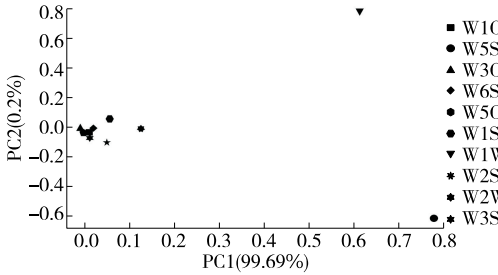


图 5 不同产地砂仁(粉末)的电子鼻传感器载荷散点图
Figure 5 Scatter plot of electronic nose sensor loading for *A. villosum* (powder) from different origins

方差贡献率0.20%)上载荷较高,但其反映的无机硫化物信息在整体香气中所占权重极低,实际差别价值有限。其余传感器(如W1C、W3C、W6S、W3S、W5C等)载荷趋近于零,表明它们对当前产地香气差异的贡献可忽略。

综上,砂仁产地香气特征的差异主要由传感器W5S所响应的氮氧化合物,并协同受到W2W、W1S、W2S所对应的芳香类、烷烃类及醇醚醛酮类等挥发性成分影响。其中,W5S的判别贡献最为关键,是用于砂仁产地区分与品质监控的首选传感指标。

2.2 基于电子舌的不同产地砂仁滋味差异分析

2.2.1 味觉指标特征分析 预试验以人工唾液(参比溶液)为基准,当砂仁样品质量浓度为1 g/100 mL时,电子舌所测得的各项味觉指标变化最完整,其苦味、涩味、鲜味等均达到最大值,且与低质量浓度(0.1,0.5 g/100 mL)之间的差异显著。该质量浓度下的信号强度适宜,能准确反映砂仁的味觉特征,同时避免信号失真,故确定为后续电子舌分析的“合适浓度”。

由表6与图6可知,不同产地砂仁的味觉特征存在显著差异。在苦涩味方面,海南澄迈与云南西双版纳砂仁的苦味(分别为5.41和5.50)和涩味(分别为2.63和2.55)值最高,苦涩感最强;广东阳春砂仁呈现“高苦(4.71)低涩(0.18)”特征;福建长泰砂仁则为“高涩(1.17)低苦(3.50)”,其苦味回味(0.36)在四者中最低。在酸甜特征方面,广东阳春砂仁甜味最为突出(7.89)且酸感最弱(-24.03),福建长泰砂仁酸感最强(-22.95)且甜味较高(7.61),海南澄迈与云南西双版纳砂仁的酸甜指标较为接

表 6 不同产地砂仁电子舌味觉指标响应值(1 g/100 mL)[†]
Table 6 Response values of electronic tongue taste indicators for *A. villosum* from different origins (1 g/100 mL)

产地	酸味	苦味	涩味	鲜味	丰富性	咸味	甜味	苦味回味	涩味回味
广东阳春	-24.03	4.71	0.18	10.31	0.76	-8.51	7.89	0.86	0.70
福建长泰	-22.95	3.50	1.17	10.10	0.64	-7.49	7.61	0.36	0.67
海南澄迈	-23.17	5.41	2.63	10.12	0.76	-7.99	7.03	0.71	0.77
云南西双版纳	-23.50	5.50	2.55	10.30	0.61	-8.71	7.31	0.78	0.78

[†] 所有数据均是以人工唾液(参比溶液)为标准的相对输出值。

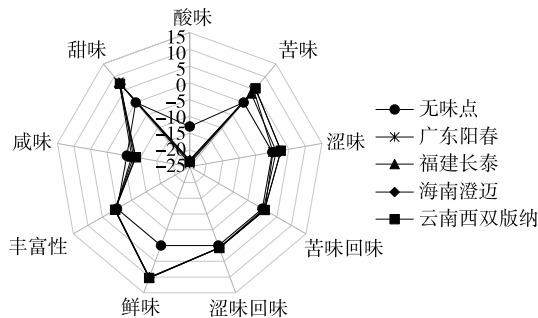


图6 以RefSol参比溶液为基准的砂仁的味觉指标雷达图
Figure 6 Taste radar chart of *A. villosum* based on RefSol reference solution

近。咸味强度呈现梯度差异,依次为福建长泰(−7.49)>海南澄迈(−7.99)>广东阳春(−8.51)≈云南西双版纳(−8.71)。各产地砂仁的鲜味(10.10~10.31)与丰富性(0.61~0.76)差异较小。表明不同产地砂仁的味觉特征在苦涩、酸甜与咸味等指标上具有明显差异,可作为区分其产地来源的关键味觉维度。其中,苦味、涩味、甜味和酸味的组合模式具有产地特异性,而鲜味和丰富性在不同产地间差异不显著。

2.2.2 滋味指标的PCA分析 由图7可知:第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的累计贡献率达97.14%(PC1为67.13%,PC2为30.01%)。4个产地的砂仁样品在主成分空间中分布分散且无重叠,表明电子舌可有效区分不同产地的砂仁。结合表7可知:涩味(载荷0.790 150)、苦味(载荷0.540 256)对PC1的正向贡献最大,甜味(载荷−0.134 296)呈负向贡献,酸味(载荷0.077 836)亦具有一定区分作用。说明电子舌可有效区分不同产地砂仁,且涩味、苦味、甜味和酸味是影响其味觉特征差异的关键指标。

2.2.3 数据重现性分析 为排除首次循环可能存在的干扰,每个砂仁样品均进行4次循环检测,并取后3次循环响应值的均值作为最终分析数据。由图8可知,酸味、苦味、涩味、鲜味、丰富性、咸味、甜味等各味觉指标的响应

表7 味觉指标贡献率表

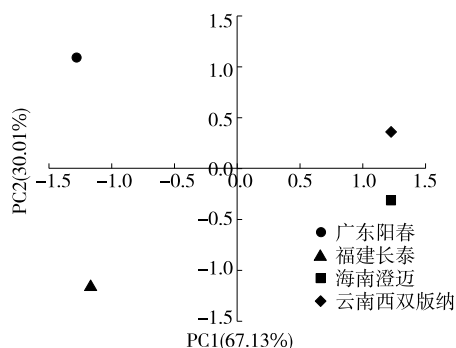
Table 7 Contribution rates of taste indicators

味觉指标	PC1	PC2
酸味	0.077 836	−0.479 564
苦味	0.540 256	0.535 091
涩味	0.790 150	−0.377 265
苦味回味	0.051 281	0.212 735
鲜味	0.035 845	0.017 361
丰富性	−0.005 692	0.108 822
咸味	−0.015 153	0.030 777
甜味	−0.134 296	−0.513 196
特征值	−0.235 618	0.140 181
贡献率	1.660 071	0.742 052

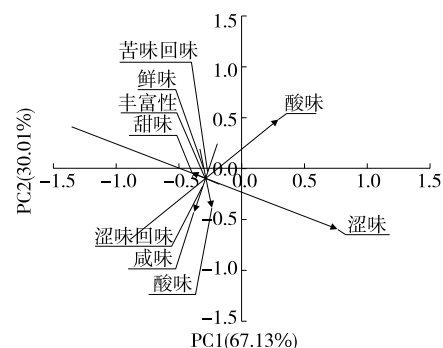
值,在后3次检测循环中变化幅度小、走势平稳。如“鲜味”的响应曲线近乎水平,“苦味”与“甜味”的波动也较首次循环显著降低。表明在去除首次循环后,电子舌检测信号具有良好的稳定性和重现性。

2.3 电子鼻与电子舌数据融合分析

对电子鼻与电子舌进行了特征级数据融合,将电子鼻在第70~72 s的10个传感器平均响应值与电子舌9项味觉指标合并,构建包含19个特征变量的数据集。经标准化(Z-Score)处理后,对融合数据进行主成分分析(PCA),结果显示其前两个主成分累计方差贡献率为99.12%,与单独使用电子鼻数据(99.89%)相近,但融合数据在判别结构上表现更优:同一产地砂仁样品的离散度显著降低,不同产地砂仁类别中心的距离明显增大,电子舌的味觉信息有效补充了电子鼻的气味信息,二者在信息层面具有协同增强效应,提升了风味的整体表征能力和判别稳健性。载荷分析进一步显示,PC1上电子鼻传感器W5S(氮氧化物响应,载荷0.315)和电子舌涩味指标(载荷0.284)贡献突出;PC2上W1W传感器(无机硫化物响应,载荷0.308)与苦味指标(载荷0.281)也起重要作用。



(a) 不同产地砂仁的PCA得分图



(b) 滋味指标的PCA载荷图

图7 不同产地砂仁的PCA主成分分析图

Figure 7 PCA plot of *A. villosum* from different origins

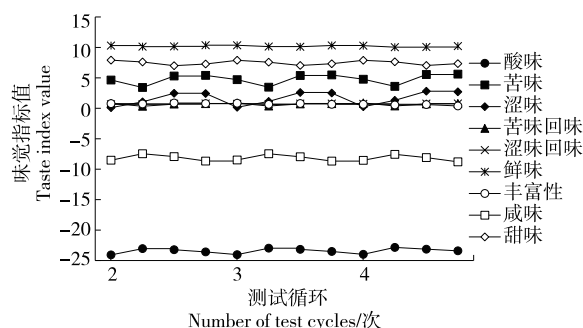


图 8 不同产地砂仁样品后 3 次循环折线图

Figure 8 Line chart of the last three cycles for *A. villosum* samples from different origins

这表明气味信息融合并非简单叠加,而是从不同感官维度提取了互补的判别特征,从而更全面、更具区分力地表征砂仁的风味属性,为基于风味的产地鉴别提供了更可靠的数据基础。

3 结论

研究通过联用电子鼻与电子舌技术,系统分析了广东阳春、福建长泰、海南澄迈和云南西双版纳 4 个产地砂仁的风味特征,结果显示电子鼻主成分分析和线性判别分析的累计贡献率分别高达 99.89% 和 98.69%,可清晰区分各产地砂仁,其中广东阳春砂仁的气味独特性最强,WS5 传感器是区分不同产地砂仁气味特征的最关键传感器,表明砂仁“气芳香浓烈”的品质特征可能与样品中含氮化合物挥发性成分密切相关;电子舌主成分分析累计贡献率达 97.14%,揭示不同产地砂仁在涩味、苦味、甜味、酸味和咸味等维度的显著差异,其中涩味和苦味为主要区分指标,系统量化了砂仁的完整味觉图谱。

该研究在前人研究基础上实现了三方面深化:①从单一技术分析走向多维信息融合,通过系统联用电子鼻与电子舌技术,实现了砂仁香气与滋味的同步客观评价;②从感官模糊描述走向数据精准量化,借助电子舌将酸、甜、苦、涩、咸等基本味觉指标数字化,提升了评价的客观性与可比性;③从产地判别现象走向风味形成机制探索,基于传感器贡献率分析结果,初步推测出影响砂仁道地性特征的关键差异成分类别。然而,此推断仍需通过气相色谱—质谱联用(GC-MS)等化学成分分析技术进行验证,后续将进一步实证传感器响应信号与具体化学成分之间的关联,建立“传感器—化学成分—感官属性”的精准模型;扩大样本范围,结合气候、土壤等生态因子,深化风味地域性成因解析,为食品风味品质控制、产地溯源与产品开发提供理论和技术支撑。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 2025 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2025: 272.

Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of China: volume I[S]. 2025 ed. Beijing: China Medical Science Press, 2025: 272.

- [2] 康志敏, 耿宁宁, 何梦影, 等. 砂仁多糖对小麦淀粉理化性质及消化特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 19-24, 110.
KANG Z M, GENG N N, HE M Y, et al. Effects of *Amomum villosum* polysaccharide on physicochemical and *in vitro* digestibility properties of wheat starch[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 19-24, 110.
- [3] 李惠, 宋龙, 吴靳荣, 等. 砂仁药材及其混伪品的性状及显微鉴别研究[J]. 时珍国医国药, 2026, 37(5): 876-880.
LI H, SONG L, WU J R, et al. Study on macroscopic and microscopic identification of *Amomi fructus* and its adulterants [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2026, 37 (5): 876-880.
- [4] 谢海生, 张媛鑫, 王连睿, 等. 砂仁的化学成分、药理作用、质量控制现状及其质量标志物的预测分析[J]. 世界中医药, 2025, 20(2): 336-343.
XIE H S, ZHANG Y X, WANG L R, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects, current status of quality control, and predictive analysis of quality markers of *amomi fructus*[J]. World Chinese Medicine, 2025, 20(2): 336-343.
- [5] 杜真聪, 王天义, 王晶瑒, 等. 砂仁挥发油对溃疡性结肠炎小鼠 NLRP3 炎症小体活化的抑制作用研究[J/OL]. 中药材. (2026-05-06) [2026-06-16]. <https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2026.04.029>.
DU Z C, WANG T Y, WANG J R, et al. Inhibitory effect of volatile oil from *Amomum villosum* on NLRP3 inflammasome activation in mice with ulcerative colitis[J/OL]. Journal of Chinese Medicinal Materials. (2026-05-06) [2026-06-16]. <https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2026.04.029>.
- [6] 张玉梅, 王凤娇, 康乐, 等. 砂仁治疗消化系统疾病的化学成分—药理作用—药性—功能主治的关联性研究[J/OL]. 中华中医药学刊. (2026-03-31) [2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1546.R.20260331.0918.002>.
ZHANG Y M, WANG F J, KANG L, et al. A study on the correlation between chemical constituents, pharmacological action, medicinal property, and functional indications of *Amomum villosum* in the treatment of digestive system diseases [J/OL]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine. (2026-03-31) [2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1546.R.20260331.0918.002>.
- [7] 刘晓梅, 黄玉珍, 伍小华. 不同产地及来源砂仁的质量评价初步分析[J]. 实验室检测, 2025, 3(22): 220-222.
LIU X M, HUANG Y Z, WU X H. Preliminary analysis on quality evaluation of *Amomi fructus* from different origins and sources[J]. Laboratory Testing, 2025, 3(22): 220-222.
- [8] 陈啸天, 肖雪, 钱沉鱼, 等. 全二维气相色谱—四级杆飞行时间质谱对不同产地砂仁挥发油成分的分析[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 142-148.
CHEN X T, XIAO X, QIAN C Y, et al. Analysis of volatile oil

- components in *Amomum villosum* from different producing areas by full two-dimensional gas chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. *China Condiment*, 2021, 46(2): 142-148.
- [9] 班梦梦, 范紫颖, 张丹雁, 等. 不同产地阳春砂挥发油标志性差异成分分析[J]. *中药材*, 2022, 45(1): 137-143.
- BAN M M, FAN Z Y, ZHANG D Y, et al. Analysis of symbolic difference components of volatile oils from *Amomum villosum* fruits with different producing areas[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2022, 45(1): 137-143.
- [10] 陈树东, 邓婕, 陈智安, 等. 气相色谱—质谱联用法比较分析不同产地砂仁挥发油成分[J]. *上海中医药杂志*, 2022, 56(8): 96-101.
- CHEN S D, DENG J, CHEN Z A, et al. Comparative analysis of essential oil components of *Amomi fructus* from different origins by gas chromatography mass spectrometry[J]. *Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 56(8): 96-101.
- [11] 李娜, 高孟娇, 伍燕. GCMS分析黔产砂仁精油可挥发性成分[J]. *广州化工*, 2024, 52(11): 63-66.
- LI N, GAO M J, WU Y. Analysis on volatile components of essential oil from *Amomum longiligulare* grown in Guizhou by GCMS[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(11): 63-66.
- [12] 陈昊文, 周春霞, 陈金, 等. QuEChERS结合超高效液相色谱—串联质谱法测定砂仁中4种黄曲霉毒素[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(12): 286-294.
- CHEN H W, ZHOU C X, CHEN J, et al. Identification of four aflatoxins in *Fructus amomi* using QuEChERS combined with ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(12): 286-294.
- [13] 邓梦青, 袁扬, 赵恬, 等. 电子鼻和电子舌技术在五倍子蜂蜜风味识别中的应用[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(9): 270-278.
- DENG M Q, YUAN Y, ZHAO T, et al. Application of electronic nose and electronic tongue technology in flavor identification of *Rhus chinensis* honey[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(9): 270-278.
- [14] 李建军, 董倩倩, 赵一, 等. 基于电子鼻和电子舌技术对不同金银花酒的鉴别分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(11): 308-312.
- LI J J, DONG Q Q, ZHAO Y, et al. Identification and analysis of different honeysuckle wines using electronic nose and tongue technology[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(11): 308-312.
- [15] 张擎, 杨晓婧, 金鑫宁, 等. 基于电子鼻和电子舌与1D-CNN-LSTM模型的花椒产地快速溯源检测[J]. *传感技术学报*, 2024, 37(5): 904-912.
- ZHANG Q, YANG X J, JIN X N, et al. Rapid origin traceability detection of *Zanthoxylum bungeanum* based on electronic nose and electronic tongue with 1D-CNN-LSTM model[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2024, 37(5): 904-912.
- [16] 姜涵, 尚超凡, 卢琪, 等. 基于电子鼻和电子舌辨识侧柏叶炒炭程度[J]. *中成药*, 2025, 47(7): 2 178-2 184.
- JIANG H, SHANG C F, LU Q, et al. Identification of carbonization by stir-frying degree of *Platycladi cacumen* based on electronic nose and electronic tongue[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2025, 47(7): 2 178-2 184.
- [17] 李建军, 常筱沛, 马静潇, 等. 电子眼、电子鼻和电子舌鉴别不同品种、不同产地生地黄[J]. *中成药*, 2022, 44(11): 3 549-3 554.
- LI J J, CHANG X P, MA J X, et al. Discrimination of different cultivars and habitats of raw *Rehmannia glutinosa* with electronic eye, electronic nose and electronic tongue[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2022, 44(11): 3 549-3 554.
- [18] 林丹, 胡金祥, 何蓓蓓, 等. 电子鼻和电子舌数据融合在鱼香调味汁风味识别中的应用[J]. *中国调味品*, 2021, 46(9): 145-150.
- LIN D, HU J X, HE B B, et al. Application of data fusion of electronic nose and electronic tongue in flavor recognition of fish-flavor sauce[J]. *China Condiment*, 2021, 46(9): 145-150.
- [19] 葛艳争, 孙晓雪, 安永强, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱、感官、电子鼻分析不同贮藏时间辣椒油风味成分[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 12-21.
- GE Y Z, SUN X X, AN Y Q, et al. Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 12-21.
- [20] ZHANG P P, GUI X J, FAN X H, et al. Quality identification of *Amomi fructus* using E-nose, HS-GC-IMS, and intelligent data fusion methods[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2025, 13: 1544743.
- [21] 何梦影, 张康逸, 康志敏. 不同脱苦处理对砂仁风味品质的影响研究[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(5): 91-97.
- HE M Y, ZHANG K Y, KANG Z M. Study on effect of different debittering treatments on the flavor quality of *Amomum villosum*[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(5): 91-97.
- [22] 王子燕, 王博诗, 王一帆, 等. 基于电子鼻技术和GC-MS对不同产地乌药的鉴别和挥发油成分分析[J]. *中南药学*, 2024, 22(12): 3 181-3 186.
- WANG Z Y, WANG B S, WANG Y F, et al. Identification of volatile oil composition of Wuyao from different origins based on electronic nose technology and GC-MS[J]. *Central South Pharmacy*, 2024, 22(12): 3 181-3 186.
- [23] 郑琦, 田文慧, 岳玲, 等. 基于电子鼻和电子舌的电子束辐照对浓香型白酒的催陈效果[J]. *食品与机械*, 2025, 41(5): 36-41.
- ZHENG Q, TIAN W H, YUE L, et al. Aging acceleration effect of electron beam irradiation on Luzhou-flavor Baijiu using electronic nose and electronic tongue[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(5): 36-41.