

## 基于 HS-GC-MS 和电子感官技术研究不同产地白芍的质量差异

邹涵<sup>1</sup>, 冯玉<sup>1,2,3</sup>, 孙名悦<sup>1</sup>, 赵立新<sup>4</sup>, 牛丽颖<sup>1,2,3\*</sup>

1. 河北中医药大学, 河北 石家庄 050200
2. 河北省中药配方颗粒技术创新中心, 河北 石家庄 050091
3. 中药材品质评价与标准化河北省工程研究中心, 河北 石家庄 050091
4. 河北省药品审评中心, 河北 石家庄 050033

**摘要:** **目的** 比较不同产地白芍 *Paeonia lactiflora* 的色、味、气的差异, 为白芍药材的质量评价提供参考。 **方法** 利用分光测色仪、电子舌、电子鼻测定不同产地白芍的色度、味道、气味信息; 采用顶空气相色谱-质谱法 (headspace gas chromatography-mass spectrometry, HS-GC-MS) 对不同产地白芍的挥发性成分进行鉴定与相对定量, 并对其进行多元统计分析, 寻找不同产地白芍的差异挥发性成分; 对不同产地白芍的差异挥发性成分与电子鼻进行 Pearson 相关分析, 寻找其气味物质基础。 **结果** 安徽亳州白芍粉末  $L^*$  值最高, 山东曹县白芍粉末  $a^*$  值、 $b^*$  值最高, 不同产地白芍粉末色度值存在差异; 通过电子舌可区分不同产地白芍样品, 其味道差异主要体现在丰富性、涩味和咸味; 气味差异主要体现在 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S 传感器, 安徽亳州白芍气味独特, 与浙江临安、山东曹县产地白芍有明显区分。采用 HS-GC-MS 共鉴定出 53 个挥发性成分, 筛选出安徽亳州与浙江临安、安徽亳州与山东曹县、浙江临安与山东曹县白芍样品间的差异挥发性成分分别是 22、29、22 个, 其中 2-甲基丁醛、2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran、糠醛是 3 个产地白芍共有的差异性成分。通过 Pearson 相关分析确定引起不同产地白芍气味差异的 17 个成分。 **结论** 通过色度仪、电子舌、电子鼻技术结合 HS-GC-MS 可较好地区分不同产地白芍, 为不同产地白芍的鉴定和质量评价提供科学依据。

**关键词:** 白芍; 挥发性成分; 色度; 电子鼻; 电子舌; 顶空气相色谱-质谱法

**中图分类号:** R283 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2026)04-1481-11

**DOI:** 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.04.024

## Quality differences of *Paeoniae Radix Alba* from different producing areas based on HS-GC-MS and electronic sensory technology

ZOU Han<sup>1</sup>, FENG Yu<sup>1,2,3</sup>, SUN Mingyue<sup>1</sup>, ZHAO Lixin<sup>4</sup>, NIU Liying<sup>1,2,3</sup>

1. Hebei University of Chinese Medicine, Shijiazhuang 050200, China
2. Hebei Traditional Chinese Medicine Formula Granule Technology Innovate Center, Shijiazhuang 050091, China
3. Quality Evaluation & Standardization Hebei Province Engineering Research Center of Traditional Chinese Medicine, Shijiazhuang 050091, China
4. Hebei Center for Drug Evaluation, Shijiazhuang 050033, China

**Abstract: Objective:** To compare the differences in color, taste and odor of Baishao (*Paeoniae Radix Alba*) from different producing areas, and provide a reference for the quality evaluation of *Paeoniae Radix Alba*. **Methods** The chromaticity, taste and odor of *Paeoniae Radix Alba* from different origins were determined by spectrophotometer; electronic tongue and electronic nose. The volatile components of *Paeoniae Radix Alba* from different origins were identified and relatively quantified by headspace gas chromatography-mass spectrometry (HS-GC-MS), and multivariate statistical analyses were carried out to search for the differential volatile components of *Paeoniae Radix Alba* from different origins; and a Pearson correlation analysis was conducted on the differential volatile components of *Paeoniae Radix Alba* from different origins and the electronic nose to find the basis of its odor substance. **Results** Anhui Bozhou *Paeoniae Radix Alba* powder has the

收稿日期: 2025-10-02

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (20372502D); 国家中医药管理局科技项目 (GZY-KJS-2023-030); 河北省自然科学基金项目 (H2022423335); 河北省中医药管理局科研计划项目 (2025064)

作者信息: 邹涵 (2001—), 女, 硕士, 研究方向为中药分析。Tel: 17367889925 E-mail: YJS20232122@hebcm.edu.cn

\*通信作者: 牛丽颖 (1968—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药分析及药效物质基础研究。

Tel/Fax: (0311)89926548 E-mail: niuliying@hebcm.edu.cn

highest  $L^*$  value, Shandong Caoxian *Paeoniae Radix Alba* powder has the highest  $a^*$  and  $b^*$  values, and the chromaticity value of *Paeoniae Radix Alba* powder from different places of origin varies significantly; the samples of *Paeoniae Radix Alba* from different places of origin can be clearly differentiated by the electronic tongue, and the differences in their flavour are mainly in the richness, astringency and saltiness; the differences in the odor are mainly in the W5S, W1S, W1W, W2S, W2W, W3S sensors, and the odor of the *Paeoniae Radix Alba* from Bozhou, Anhui Province has a unique odor which is clearly different from that of *Paeoniae Radix Alba* from Linan, Zhejiang Province, and Caoxian, Shandong Province. A total of 53 volatile components were identified by HS-GC-MS, and 22, 29 and 22 differential volatile components were screened between the samples of *Paeoniae Radix Alba* from Bozhou, Anhui and Linan, Zhejiang, Bozhou, Anhui and Caoxian, Shandong, and Linan, Zhejiang and Caoxian, Shandong, respectively, with 2-methylbutyraldehyde, 2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran and furfural being the common differential component of *Paeoniae Radix Alba* in the three origins. A total of 17 components that caused differences in the odor of *Paeoniae Radix Alba* from different origins were identified through pearson correlation analysis. **Conclusion** The experiment can better distinguish the *Paeoniae Radix Alba* from different origins through the colourimeter, electronic nose and electronic tongue technology combined with HS-GC-MS, which can provide scientific basis for the identification and quality evaluation of *Paeoniae Radix Alba* from different origins.

**Key words:** *Paeoniae Radix Alba*; volatile components; chromaticity; electronic nose; electronic tongue; HS-GC-MS

白芍为毛茛科植物芍药 *Paeonia lactiflora* Pall. 的干燥根, 入药早期多以芍药记载, 《本草经集注》首次出现白芍一名<sup>[1]</sup>, 具有养血调经、敛阴止汗、柔肝止痛、平抑肝阳的功效, 用于血虚萎黄、月经不调、自汗、盗汗、胁痛、腹痛、四肢挛痛、头痛眩晕<sup>[2]</sup>。白芍主要包含单萜及其苷类、三萜及其苷类、挥发油类、黄酮类、多酚类等化学成分, 具有镇痛、抗炎、抗抑郁、保肝、抗肿瘤及抗高血糖等药理作用<sup>[3]</sup>, 临床应用广泛。白芍分布较广, 主产于安徽、浙江、四川、山东、湖南等地<sup>[4]</sup>, 因白芍产地不同、加工方法不同、炮制方法不同, 导致市场上白芍质量参差不齐<sup>[5]</sup>, 对白芍质量控制多见眼看、鼻闻、口尝等传统方法, 现代研究也多集中在非挥发性成分的鉴定及其含量测定<sup>[6-8]</sup>, 对白芍挥发性成分的研究较少且集中在不同炮制方法的白芍挥发性成分差异<sup>[9-10]</sup>, 未见对不同产地白芍挥发性成分差异的研究。色度仪、电子鼻、电子舌智能感官技术可将颜色、气味、味道数字化, 具有快速、方便、准确、客观等优势。

本研究采用色度仪、电子舌、电子鼻技术联合顶空气相色谱-质谱法 (headspace gas chromatography-mass spectrometry, HS-GC-MS) 对不同产地共 30 批白芍进行色度、味道、气味和挥发性成分的分析, 通过与质谱库比对鉴定白芍的挥发性成分, 寻找不同产地白芍的差异挥发性成分, 并与电子鼻信号相关联, 从而明确其气味产生的物质基础, 以期完善白芍质量评价提供参考。

## 1 仪器与材料

### 1.1 仪器

YS6010 型台式分光测色仪 (广东三恩时智能

科技有限公司); SA402B 型电子舌系统 (日本 Insent 公司); PEN3 型电子鼻系统 (德国 AIRSENSE 公司); TQ8050NX 型气相色谱-质谱联用系统 (日本岛津公司); BSA224S-CW 型电子分析天平 (北京赛多利斯有限公司); KQ-250 型超声波清洗器 (江苏昆山市超声仪器有限公司); TDZ5-WS 型低速离心机 (湖南湘仪实验仪器开发有限公司); 纯化水来自 UPR-II-20L 净水系统 (四川纯技术公司)。

### 1.2 材料

白芍药材来自安徽亳州、浙江临安、山东曹县 3 个产区共 30 批, 均由神威药业有限公司提供。经石家庄市中医院郑倩主任中药师鉴定为毛茛科植物芍药 *P. lactiflora* Pall. 的干燥根, 且符合《中国药典》2025 年版 (以下简称《中国药典》) 白芍项下的性状、鉴别与浸出物标准。用于后续样品测定的白芍粉末样品粒度为粉碎后过 50 目筛。所有样品均放置在中药材品质评价与标准化河北省工程研究中心干燥保存, 不同产地的白芍样品信息见表 1。

## 2 方法

### 2.1 色度的测定

分光测色仪开机后首先对仪器进行黑白校正, 取适量白芍粉末于密封袋中, 用样品固定夹将白芍粉末样品对准反射测量口贴紧, 按下测量键测定样品, 记录白芍样品粉末色度值  $L^*$  (明亮值)、 $a^*$  (红绿色值)、 $b^*$  (黄蓝色值), 并计算总色度值 ( $E_{ab}^*$ ) [ $E_{ab}^* = (L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ] <sup>[11]</sup>。

### 2.2 味道的测定

精密称取白芍供试品粉末 2 g, 置于 100 mL 锥形瓶中, 加入 100 mL 纯净水, 超声提取 30 min 后, 3 000 r/min 离心 10 min, 取上清液进行测定。

表1 不同产地白芍样品信息

Table 1 Information on samples of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

编号	产地	批号
S1	安徽亳州	23080601
S2	安徽亳州	23080602
S3	安徽亳州	23080603
S4	安徽亳州	23080604
S5	安徽亳州	23080605
S6	安徽亳州	23080606
S7	安徽亳州	23080607
S8	安徽亳州	23080608
S9	安徽亳州	23080609
S10	安徽亳州	23080610
S11	安徽亳州	23080611
S12	浙江临安	23080701
S13	浙江临安	23080702
S14	浙江临安	23080703
S15	浙江临安	23080704
S16	浙江临安	23080705
S17	浙江临安	23080706
S18	浙江临安	23080707
S19	浙江临安	23080708
S20	浙江临安	23080709
S21	浙江临安	23080710
S22	山东曹县	23080801
S23	山东曹县	23080802
S24	山东曹县	23080803
S25	山东曹县	23080804
S26	山东曹县	23080805
S27	山东曹县	23080806
S28	山东曹县	23080807
S29	山东曹县	23080808
S30	山东曹县	23080809

2.3 气味的测定

精密称取白芍样品粉末 2 g, 置于 20 mL 钳口顶空瓶中, 压盖密封, 进样方式: 顶空进样; 样品孵化温度 45 °C; 加热时间 5 min; 振荡 2 min。采样间隔 1s, 洗针 300s, 零点调整 10s, 测试 300s, 进样体积流量 300 mL/min。每批白芍称量 2 份, 平行测定 2 次, 取平均值进行数据分析。电子鼻传感器信息见表 2。

表2 电子鼻传感性能描述

Table 2 Description of electronic nose sensing performance

传感器名称	传感器响应特性
W1C	对芳香成分灵敏 (苯类)
W5S	对氮氧化合物灵敏 (氮氧化合物)
W3C	对氨水、芳香成分灵敏 (胺类)
W6S	对氢气有选择性 (氢化物)
W5C	对烷烃芳香类成分灵敏
W1S	对甲烷等短链烷烃类灵敏
W1W	对硫化物灵敏 (无机硫化物类)
W2S	对醇、醚、醛、酮类灵敏
W2W	对芳香成分和有机硫化物灵敏
W3S	对烷烃灵敏 (长链烷烃)

2.4 不同产地白芍的挥发性成分测定

2.4.1 样品制备 精密称取白芍样品粉末 2 g, 于 20 mL 螺口顶空瓶中, 聚四氟乙烯隔垫密封。进样方式: 顶空进样; 样品加热温度 120 °C; 加热时间 30 min; 进样量 1 000 μL。

2.4.2 气相色谱条件 色谱柱: SH-I-5 Sil MS 型毛细管色谱柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 程序升温 (初始 50 °C, 保持 5 min, 以 6 °C/min 升到 80 °C, 保持 5 min; 以 8.5 °C/min 升到 250 °C, 保持 10 min), 恒压模式 (51.5 kPa), 进样口温度 250 °C, 色谱柱体积流量 1 mL/min, 吹扫流量 3 mL/min, 分流比 20 : 1。

2.4.3 质谱条件 离子源温度 230 °C; 接口温度 250 °C; 电离方式为电子轰击电离源 (EI), 溶剂延迟时间 0 min; 检测器电压: 相对于调谐结果, 0.3 kV; 采集时间: 0~45 min; 采集方式: Q3Scan; 扫描范围  $m/z$  50~600。

2.4.4 数据处理 白芍挥发性成分的鉴定使用质谱库 (NIST20) 检索 (相似度≥80%), 并采用面积归一化法进行相对定量。利用 SIMCA 14.1 对挥发性成分进行主成分分析 (principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘法-判别分析 (orthogonal partialLeast squares-discriminant analysis, OPLS-DA), 筛选 VIP > 1,  $P \leq 0.05$  的差异挥发性成分。

3 结果与分析

3.1 不同产地白芍色度分析

3.1.1 色度值分析 安徽亳州白芍粉末  $L^*$  值较高, 颜色较浙江临安、山东曹县产地白芍粉末颜色明亮; 山东曹县白芍粉末  $a^*$  值、 $b^*$  值最高, 说明山东曹县白芍粉末颜色偏红、偏黄。结果见表 3 和图 1。

表 3 不同产地白芍色度测定值

Table 3 Color measurement results of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

样品	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$E_{ab}$
S1	83.70	2.35	9.90	84.32
S2	85.17	2.08	8.49	85.62
S3	84.41	2.29	9.76	85.00
S4	84.10	2.43	9.58	84.68
S5	84.07	2.39	9.92	84.69
S6	84.56	2.22	9.64	85.14
S7	84.92	2.23	9.72	85.50
S8	84.45	2.33	9.80	85.05
S9	84.75	2.35	9.81	85.35
S10	84.35	2.13	9.26	84.88
S11	84.74	2.24	9.98	85.36
S12	82.21	2.70	9.75	82.83
S13	81.42	2.85	10.28	82.12
S14	81.83	2.78	9.92	82.48
S15	81.77	2.79	9.70	82.39
S16	82.60	2.78	10.23	83.28
S17	82.49	2.60	9.81	83.11
S18	81.64	2.72	9.92	82.29
S19	81.11	2.86	10.28	81.81
S20	81.80	2.84	10.15	82.48
S21	82.14	2.75	9.62	82.75
S22	80.87	3.21	11.00	81.68
S23	82.21	3.16	11.84	83.12
S24	81.91	3.25	11.82	82.82
S25	79.47	3.63	11.46	80.37
S26	82.01	3.01	11.15	82.82
S27	82.53	3.06	11.13	83.33
S28	81.14	3.24	10.91	81.93
S29	82.49	3.23	11.65	83.37
S30	82.70	3.12	11.14	83.51
安徽亳州产平均值	84.47	2.28	9.62	85.05
浙江临安产平均值	81.90	2.77	9.97	82.55
山东曹县产平均值	81.70	3.21	11.34	82.55

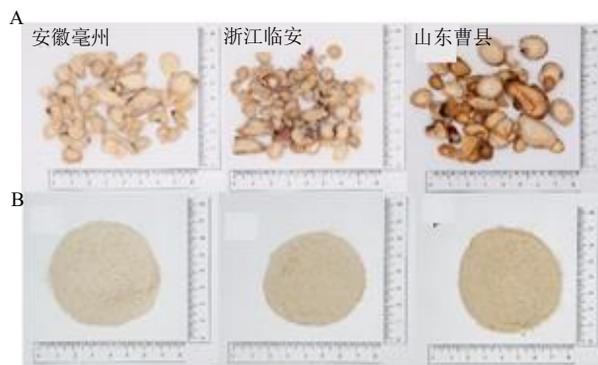


图 1 不同产地白芍饮片 (A) 及粉末 (B) 外观  
Fig. 1 Appearance of decoction pieces (A) and powders (B) of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

3.1.2 PCA 利用 Origin 2024 对不同产地白芍各样本色度值进行 PCA 分析, PC1 贡献率 84.6%, PC2 贡献率 14.6%, 2 个主成分的总贡献率为 99.2%, 可用来解释不同产地白芍颜色的大部分信息, 如图 2-A。3 个产地白芍样品可大致区分, 表明测色仪可鉴定出不同产地白芍样品颜色差异。聚类分析 (hierarchical cluster analysis, HCA) 结果显示, 当欧式距离为 10 时, 可按照产地分为 3 类, 与主成分分析结果一致, 见图 2-B。

### 3.2 不同产地白芍味道分析

利用 SIMCA 14.1 对不同产地白芍各样本电子舌传感器响应值进行 PCA, 模型解释率参数  $R^2_x$  为 0.989, 预测能力参数  $Q^2$  为 0.929, 见图 3-A, PC1 的贡献率为 68.4%, PC2 的贡献率为 23.1%, 2 个主成分贡献率之和为 91.5%, 3 个产地的白芍样品各聚为一组, 作 OPLS-DA, 见图 3-C, 筛选 VIP>1 的差异传感器为丰富性、涩味和咸味, 见图 3-D, 说明这 3 个味道是引起 3 个产地白芍的味道有差异的主要原因。由雷达图 3-B 可知, 安徽亳州的苦味、鲜味、咸味较明显; 浙江临安的涩味、丰富性、甜味较明显; 山东曹县的涩味回味较明显。

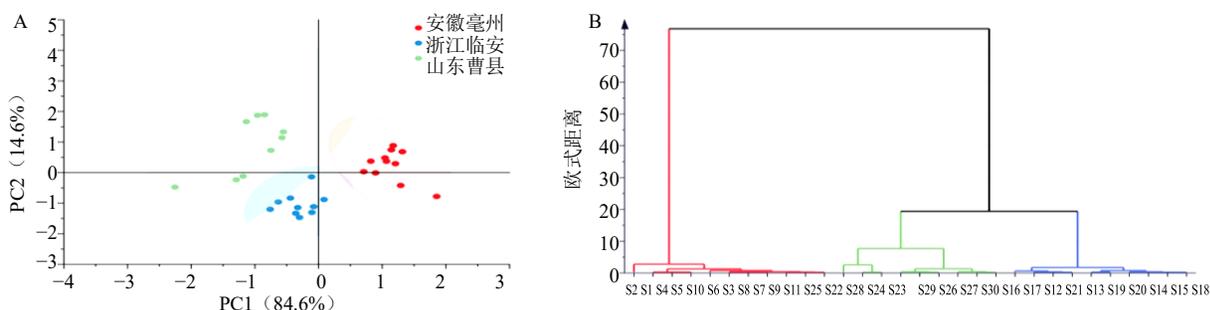


图 2 不同产地白芍测色仪响应值的 PCA (A) 和 HCA (B)  
Fig. 2 PCA (A) and HCA (B) of color measurement results of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

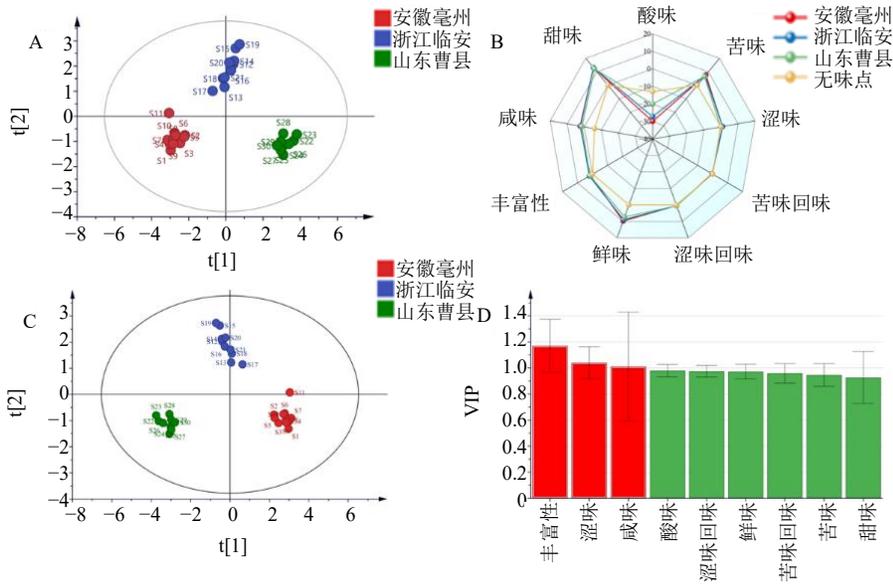


图3 不同产地白芍电子舌分析

Fig. 3 Electronic tongue analysis of *Paeoniae Radix Alba* of different regions

### 3.3 不同产地白芍气味分析

**3.3.1 PCA** 利用 Origin 2024 对不同产地白芍各样本电子鼻传感器响应值进行 PCA。如图 4-A，2 个主成分贡献率之和为 96.4%，安徽亳州可与其他 2 个产地区分，浙江临安与山东曹县产地白芍有重叠部分，说明安徽亳州白芍气味独特，浙江临安与山东曹县产地白芍气味相似。

**3.3.2 电子鼻传感器响应值分析** 由电子鼻响应雷达图 4-B 可知，不同产地白芍传感器响应不同，其气味差异主要体现在 W5S、W1S、W1W、W2S、

W2W、W3S 传感器上。

**3.3.3 不同产地白芍气味差异比较** 如图 4-C，比较不同产地白芍在上述 6 种传感器上的响应值，发现安徽亳州白芍对上述 6 种传感器响应值均最大，说明安徽亳州白芍含有较多的氮氧化物、短链烷烃、硫化物、醇醚醛酮类、芳香成分和长链烷烃。山东曹县白芍对上述 6 种传感器响应值均最小，说明其氮氧化物、短链烷烃、硫化物、醇醚醛酮类、芳香成分和长链烷烃含量均最少。

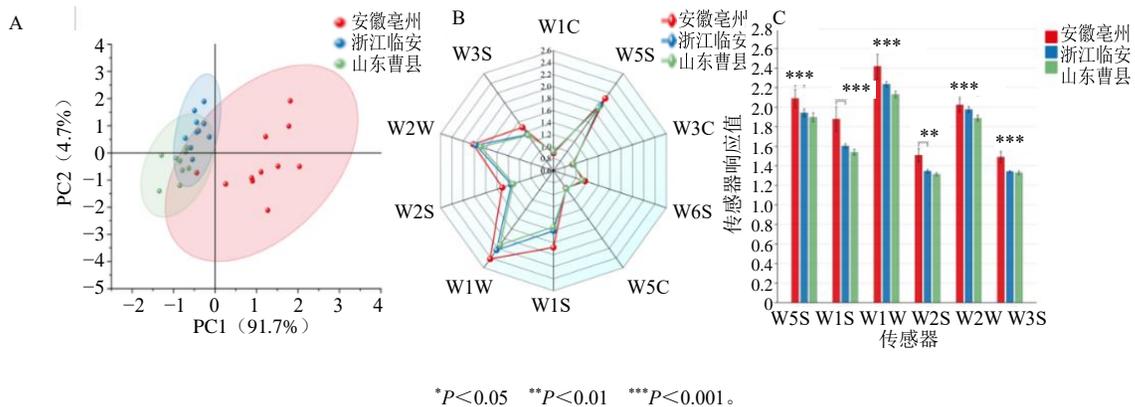


图4 不同产地白芍电子鼻响应值的 PCA (A)、气味雷达分析 (B)、分组误差柱状图 (C)

Fig. 4 PCA (A), odor radar analysis (B), group bar plot (C) of electronic nose response values of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

### 3.4 不同产地白芍挥发性成分分析

**3.4.1 挥发性成分鉴定** 采用 HS-GC-MS 对 3 个产地 30 批白芍样品进行测定，根据面积归一化法

计算各成分在不同产地白芍的相对含量，共鉴定出挥发性成分 53 种，其中安徽亳州白芍 46 种、浙江临安 41 种、山东曹县 45 种，具体结果见表 4。主

表4 不同产地白芍化学成分及相对含量

Table 4 Chemical compositions and relative content of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

编号	R/min	成分名称	类别	分子式	相对分子质量	CAS号	平均相对含量/%		
							安徽亳州	安徽阜阳	山东曹县
1	2.055	叔丁胺	胺类	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	73	75-64-9	3.83±0.74	4.25±0.56	4.41±0.67
2	2.115	硼烷二甲硫醚	其他	C <sub>2</sub> H <sub>9</sub> BS	76	13292-87-0	0.57±0.18	-	-
3	2.335	冰醋酸	羧酸类	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60	64-19-7	7.21±2.54	7.21±2.10	6.96±3.07
4	2.390	盐酸班布特罗	其他	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> ClN <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	404	81732-46-9	1.67±1.57	-	-
5	2.846	异戊醛	醛类	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86	590-86-3	-	0.86±0.26	0.91±0.29
6	2.9224	羟基-3-甲基丁醛	醛类	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	102	56805-34-6	2.33±0.51	-	-
7	2.9302	甲基丁醛	醛类	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86	96-17-3	-	1.67±0.27	1.18±0.19
8	3.1251	戊烯-3-醇	烯炔类	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86	616-25-1	0.88±0.17	0.72±0.13	-
9	3.130	氯代叔丁烷	其他	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl	93	507-20-0	-	-	0.60±0.07
10	3.293	反-4-甲基环己醇	醇类	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114	7731-29-5	1.53±0.27	1.62±0.26	1.57±0.23
11	3.4512	氨基-2,3-二甲基丁酰胺	胺类	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	131	4378-19-2	0.99±0.31	0.55±0.06	0.54±0.11
12	4.268	acetaldehyde 2,3-butane diol acetal	醛类	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116	3299-32-9	-	-	0.41±0.14
13	4.574	正戊醇	醇类	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88	71-41-0	1.00±0.19	0.77±0.22	0.66±0.13
14	4.9691	propanol,2,2-dimethyl-1-acetate	酯类	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130	926-41-0	0.63±0.13	0.56±0.20	0.71±0.25
15	5.200	but-2-en-1-ol,propanoic acid	酯类	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	146	22874-75-5	1.52±0.42	-	1.48±0.98
16	5.446	正己醛	醛类	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	100	66-25-1	5.91±0.75	5.67±0.66	7.62±0.92
17	5.6402	ethyl-5-methyltetrahydrofuran	其他	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114	931-39-5	1.88±0.22	1.43±0.14	0.48±0.20
18	6.429	糠醛	醛类	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	96	98-01-1	0.72±0.05	0.95±0.05	4.32±0.64
19	8.3742	庚酮	酮类	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114	110-43-0	0.60±0.06	0.51±0.14	0.41±0.10
20	8.780	正庚醛	醛类	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	14	111-71-7	0.55±0.08	0.51±0.03	0.53±0.04
21	10.866	苯甲醛	芳香类	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	106	100-52-7	0.66±0.09	0.77±0.07	0.83±0.22
22	11.341	正己酸	羧酸类	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116	142-62-1	0.32±0.07	0.36±0.03	0.29±0.07
23	11.513	苯酚	芳香类	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	94	108-95-2	0.53±0.07	0.50±0.07	0.47±0.06
24	12.0722	戊基呋喃	其他	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	138	3777-69-3	2.54±0.54	2.33±0.28	1.96±0.24
25	12.290	莰烯	烯炔类	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	136	586-62-9	-	-	0.43±0.04
26	12.562	正癸烷	烷烃类	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142	124-18-5	0.19±0.10	-	-
27	13.766	间伞花烃	芳香类	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	134	535-77-3	-	-	0.33±0.07
28	14.044	(+)-柠檬烯	萜类	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	136	5989-27-5	0.56±0.16	0.84±0.30	0.52±0.06
29	14.234	苯甲醇	醇类	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	108	100-51-6	1.22±0.22	0.91±0.19	0.78±0.19
30	16.984	川芎嗪	生物碱类	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub>	136	1124-11-4	0.94±0.13	0.36±0.08	0.31±0.12
31	17.686	正十一烷	烷烃类	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156	1120-21-4	0.48±0.23	0.54±0.10	0.37±0.05
32	17.808	正壬醛	醛类	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	142	124-19-6	0.24±0.04	0.30±0.03	0.27±0.02
33	19.012	(1R)-(+)-诺蒎酮	酮类	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	138	38651-65-9	1.02±0.12	0.99±0.12	1.08±0.24
34	19.250	α-酮戊二酸	酮类	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	146	328-50-7	-	-	0.28±0.03
35	19.587	苯甲酸	羧酸类	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	122	65-85-0	0.46±0.18	0.86±0.38	0.79±0.27
36	20.4636	6,6-二甲基螺[2.1]庚-2,2'-环氧乙烷]	其他	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	152	6931-54-0	2.27±0.61	2.01±0.28	3.12±0.60
37	20.677	水杨酸甲酯	酯类	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	152	119-36-8	0.48±0.08	0.26±0.05	0.24±0.10
38	20.780	桃金娘烯醛	醛类	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	150	18486-69-6	0.62±0.13	1.33±0.14	1.86±0.29
39	20.926	正十二烷	烷烃类	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170	112-40-3	0.91±0.41	1.03±0.19	0.80±0.11
40	21.3274	7-dimethylbenzofuran	其他	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O	146	28715-26-6	0.41±0.07	0.43±0.10	0.25±0.03
41	21.4603	5,5-trimethyl-4-methylen-2-cyclohexen-1-on	酮类	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	150	20548-00-9	0.29±0.03	0.30±0.03	-
42	22.314	桃金娘烷醇	醇类	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	154	53369-17-8	1.77±0.29	1.15±0.10	1.70±0.20
43	22.545	(E)-myrtenol	醇类	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	154	15358-91-5	0.48±0.05	0.37±0.06	0.44±0.05
44	22.812	紫苏醛	醛类	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	150	2111-75-3	0.42±0.09	0.52±0.18	0.77±0.09
45	23.332	正十三烷	烷烃类	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184	629-50-5	0.78±0.18	0.96±0.09	0.95±0.16
46	24.597	丁香酚	酚类	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	164	97-53-0	0.26±0.04	-	-
47	24.991	(-)-α-蒎烯	萜类	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	204	3856-25-5	0.86±0.13	0.75±0.17	0.46±0.11
48	25.215	广藿香烯	萜类	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	204	514-51-2	0.31±0.08	0.31±0.06	0.48±0.25
49	25.317	正十四烷	烷烃类	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198	629-59-4	0.22±0.03	0.24±0.03	0.22±0.09
50	26.120	丹皮酚	酚类	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	166	552-41-0	0.48±0.12	0.41±0.06	1.91±0.2
51	26.815	α-姜黄烯	萜类	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub>	202	644-30-4	0.71±0.17	0.52±0.17	0.32±0.08
52	27.4222	methyl-3,5-dodecadiyne	炔烃类	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	176	55638-52-3	1.94±1.21	-	-
53	30.082	香橙烯	萜类	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	204	489-39-4	1.40±0.52	0.89±0.19	0.74±0.21

要分为醛类、萜类、醇类、烷烃类等，见表5。安徽亳州白芍的特有成分为硼烷二甲硫醚、盐酸班布特罗、4-羟基-3-甲基丁醛、正癸烷、丁香酚、2-methyl-3,5-dodecadiyn; 山东曹县白芍的特有性成分为氯代叔丁烷、acetaldehyde 2,3-butane diol acetal、苾烯、间伞花烃、 $\alpha$ -酮戊二酸。

表5 不同产地白芍挥发性成分不同类别总相对含量比较

Table 5 Comparison of total relative content of volatile components in *Paeoniae Radix Alba* from different regions

化合物	个数	相对含量/%		
		安徽亳州	浙江临安	山东曹县
胺类	2	4.82	4.80	4.95
醇类	5	5.99	4.83	5.15
芳香类	3	1.19	1.27	1.64
酚类	2	0.75	0.41	1.91
醛类	10	11.29	11.82	17.87
炔烃类	1	1.68	—	—
生物碱类	1	0.94	0.36	0.31
羧酸类	3	8.00	8.43	8.05
萜类	5	3.84	3.31	2.50
酮类	4	1.91	1.79	1.77
烷烃类	5	2.58	2.78	2.34
烯烃类	2	0.88	0.72	0.43
酯类	3	2.63	0.82	2.43
其他	7	9.33	6.20	6.40
合计	53	55.85	47.54	55.73

3.4.2 PCA 利用 SIMCA 14.1 对不同产地白芍挥发性成分进行 PCA (PC1: 0.412, PC2: 0.180), 安徽亳州、浙江临安、山东曹县 3 个产地白芍各自聚集, 说明 3 个产地白芍挥发性成分存在一定差异, 见图 5。

3.4.3 差异挥发性成分筛选 为寻找不同产地白

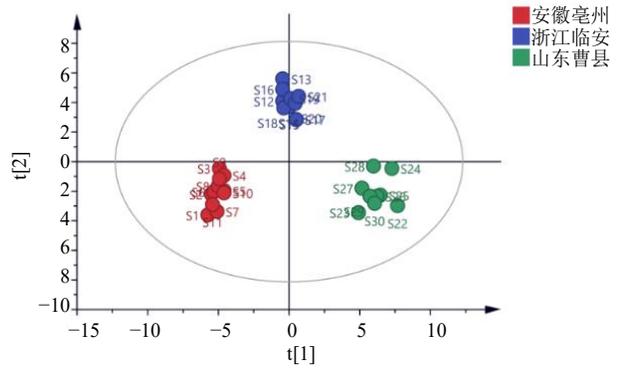


图5 不同产地白芍挥发性成分 PCA

Fig. 5 PCA of volatile components in *Paeoniae Radix Alba* from different regions

芍的差异性成分, 分别对安徽亳州与浙江临安白芍、安徽亳州与山东曹县白芍、浙江临安与山东曹县白芍作 OPLS-DA 分析, 并对每个 OPLS-DA 模型进行 200 次置换检验, 见图 6 和表 6, 以  $VIP > 1$ 、 $P < 0.05$  为标准筛选安徽亳州与浙江临安、安徽亳州与山东曹县、浙江临安与山东曹县的差异挥发性成分共 40 个, 从安徽亳州与浙江临安白芍中筛选出 22 个差异性成分, 分别是 (+)-柠檬烯、(E)-myrtenol、2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran、2-methyl-3,5-dodecadiyne、2-氨基-2,3-二甲基丁酰胺、2-庚酮、2-甲基丁醛、4-羟基-3-甲基丁醛、but-2-en-1-ol, propanoic acid、苯甲醇、苯甲醛、川芎嗪、丁香酚、糠醛、硼烷二甲硫醚、水杨酸甲酯、桃金娘烷醇、香橙烯、盐酸班布特罗、异戊醛、正癸烷、正壬醛; 从安徽亳州与山东曹县白芍中筛选出 29 个

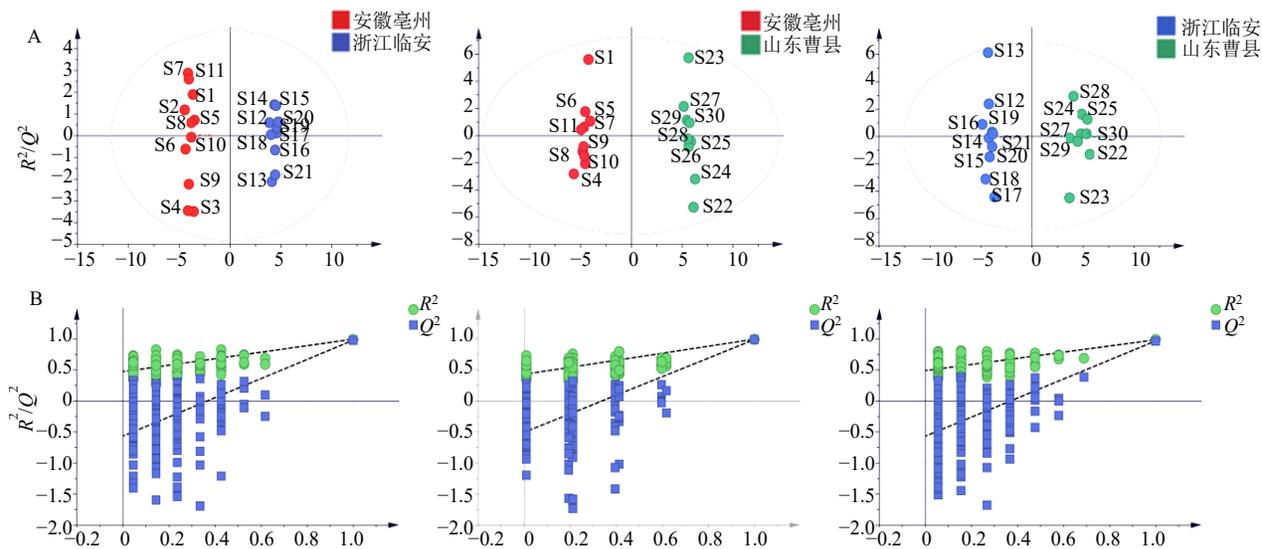


图6 OPLS-DA 得分图 (A) 和 OPLS-DA 模型的置换检验图 (B)

Fig. 6 OPLS-DA score plot (A) and permutation test plot of OPLS-DA model (B)

表6 白芍样品多元统计分析数据

Table 6 Multivariate statistical analysis data of *Paeoniae Radix Alba* samples

模型	参数	安徽亳州vs浙江临安	安徽亳州vs山东曹县	浙江临安vs山东曹县
OPLS-DA模型	$R^2_X(\text{cum})$	0.447	0.665	0.576
	$R^2_Y(\text{cum})$	0.995	0.995	0.985
	$Q^2(\text{cum})$	0.979	0.990	0.969
200次置换检验	$Q^2(\text{cum})$	-0.566	-0.505	-0.568
	$R^2$	0.473	0.430	0.490

差异性成分, 分别是(-)- $\alpha$ -蒎烯、1-戊烯-3-醇、2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran、2-methyl-3,5-dodecadiyne、2-庚酮、2-甲基丁醛、3,5,5-trimethyl-4-methylen-2-cyclohexen-1-on、4,7-dimethyl-benzofuran、4-羟基-3-甲基丁醛、6,6-二甲基螺[二环[3.1.1]庚-2,2'-环氧乙烷]、acetaldehyde 2,3-butane diol acetal、 $\alpha$ -姜黄烯、 $\alpha$ -酮戊二酸、苯甲醛、川芎嗪、丹皮酚、丁香酚、间伞花烃、蒎烯、糠醛、氯代叔丁烷、硼烷二甲硫醚、水杨酸甲酯、桃金娘烯醛、异戊醛、正癸烷、正己醛、正戊醇、紫苏醛; 从浙江临安与山东曹县白芍中共筛选出 22 个差异性成分, 分别是(-)- $\alpha$ -蒎烯、(+)-柠檬烯、1-戊烯-3-醇、2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran、2-甲基丁醛、3,5,5-trimethyl-4-methylen-2-cyclohexen-1-on、4,7-dimethyl benzofuran、6,6-二甲基螺[二环[3.1.1]庚-2,2'-环氧乙烷]、acetaldehyde 2,3-butane diol acetal、but-2-en-1-ol,propanoic acid、 $\alpha$ -酮戊二酸、丹皮酚、间伞花烃、蒎烯、糠醛、氯代叔丁烷、桃金娘烷醇、桃金娘烯醛、正己醛、正十二烷、正十一烷、紫苏醛, 见表 7。

### 3.5 气味与化学成分关联分析

电子鼻结果显示, W5S、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S 是响应较强的 6 个传感器, 为进一步分析电子鼻传感器与差异挥发性成分的关系, 对 40 个差异挥发性成分与 6 个电子鼻传感器做 Pearson 相关分析。根据相关系数( $r$ )的绝对值分为强相关、中等相关、低相关、基本不相关 4 个等级<sup>[9]</sup>。结果表明(图 7), C21(苯甲醇)、C40(香橙烯)与 W5S、C40(香橙烯)与 W1S、C10(正戊醇)、C21(苯甲醇)与 W1W、C27(水杨酸甲酯)、C40(香橙烯)与 W2S、C13(2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran)与 W2W、C1(硼烷二甲硫醚)、C2(盐酸班布特罗)、C4(4-羟基-3-甲基丁醛)、C8(2-氨基-2,3-二甲基丁酰胺)、C18(正癸烷)、C22(川芎嗪)、C27(水杨酸甲酯)、C35(丁香酚)、C39(2-methyl-3,5-

dodecadiyne)与 W3S 传感器呈强正相关( $P \leq 0.05$ ); C16(苯甲醛)与 W1W、C28(桃金娘烯醛)、C34(紫苏醛)与 W2W、C3(异戊醛)与 W3S 传感器呈强负相关( $P \leq 0.05$ )。

## 4 讨论

不同产地的气候、土壤、种植技术等因素可能导致白芍在挥发性成分和非挥发性成分上存在差异, 这些差异进一步影响了白芍的颜色、气味和味道特征, 从而形成了不同产地白芍的独特品质, 因此中药材的品质与产地密切相关。不同产地白芍质量评价研究多停留在非挥发性成分的鉴定与含量测定<sup>[12]</sup>, 而白芍含有多种挥发性成分, 且缺乏利用测色仪、电子鼻、电子舌等智能感官技术对白芍进行质量评价的研究。基于此, 本研究通过测色仪、电子鼻、电子舌等智能感官技术, 实现对白芍药材色泽、气味及味道的模糊信息数字化, 结合 HS-GC-MS 探讨不同产地白芍气味的差异来源。

通过分析发现 3 个产地白芍的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值有明显的区别, 山东曹县白芍粉末颜色偏暗发黑, 可能与其生长环境(地质、气候等)、种质、干燥方式等有关。PCA 和 HCA 显示安徽亳州、浙江临安和山东曹县白芍样品分别聚集, 说明各产地白芍样品颜色存在一定差异。电子舌检测结果表明, 不同产地白芍滋味差异主要表现在丰富性、涩味和咸味, 可能与其萜类、鞣质、生物碱类成分总含量相关<sup>[13]</sup>。

不同产地白芍气味差异主要体现在 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S 传感器上, 即氮氧化合物、烷烃类、硫化物、醇醚醛酮类、芳香类等成分有差异; 建立 OPLS-DA 模型对 3 个产地的白芍挥发性成分进行比较分析, 筛选  $VIP > 1$ ,  $P \leq 0.05$  的 40 个差异挥发性成分主要是醛类、烷烃类、醇类、萜类、酮类, 表明 HS-GC-MS 与电子鼻检测结果具有一致性, 进一步说明这些差异挥发性成分造成不同产地白芍气味差异的原因。差异挥发性

表 7 差异挥发性成分筛选结果  
Table 7 Screening results of differential volatile components

编号	成分	安徽亳州vs浙江临安		安徽亳州vs山东曹县		浙江临安vs山东曹县	
		VIP	<i>P</i>	VIP	<i>P</i>	VIP	<i>P</i>
C1	硼烷二甲硫醚	1.47	$3.18 \times 10^{-10}$	1.24	$1.48 \times 10^{-9}$	-	-
C2	盐酸班布特罗	1.09	$3.58 \times 10^{-4}$	-	-	-	-
C3	异戊醛	1.45	$1.30 \times 10^{-9}$	1.23	$5.58 \times 10^{-10}$	-	-
C4	4-羟基-3-甲基丁醛	1.50	$1.04 \times 10^{-11}$	1.25	$5.91 \times 10^{-11}$	-	-
C5	2-甲基丁醛	1.52	$2.24 \times 10^{-14}$	1.28	$2.07 \times 10^{-14}$	1.10	$2.58 \times 10^{-4}$
C6	1-戊烯-3-醇	-	-	1.26	$6.79 \times 10^{-12}$	1.38	$4.87 \times 10^{-12}$
C7	氯代叔丁烷	-	-	1.29	$1.00 \times 10^{-17}$	1.39	$1.19 \times 10^{-16}$
C8	2-氨基-2,3-二甲基丁酰胺	1.13	$2.60 \times 10^{-4}$	-	-	-	-
C9	acetaldehyde 2,3-butane diol acetal	-	-	1.26	$4.91 \times 10^{-12}$	1.37	$2.78 \times 10^{-11}$
C10	正戊醇	-	-	1.04	$2.03 \times 10^{-4}$	-	-
C11	but-2-en-1-ol,propanoic acid	1.46	$5.52 \times 10^{-10}$	-	-	1.06	$1.71 \times 10^{-4}$
C12	正己醛	-	-	1.04	$2.32 \times 10^{-4}$	1.20	$5.05 \times 10^{-5}$
C13	2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran	1.24	$2.69 \times 10^{-5}$	1.27	$1.35 \times 10^{-11}$	1.33	$5.46 \times 10^{-10}$
C14	糠醛	1.46	$5.61 \times 10^{-10}$	1.27	$2.78 \times 10^{-13}$	1.38	$5.52 \times 10^{-12}$
C15	2-庚酮	1.03	$2.48 \times 10^{-3}$	1.12	$2.25 \times 10^{-6}$	-	-
C16	苯甲醛	1.07	$7.85 \times 10^{-3}$	1.01	$2.06 \times 10^{-4}$	-	-
C17	菝葜烯	-	-	1.29	$2.00 \times 10^{-18}$	-	-
C18	正癸烷	1.43	$8.44 \times 10^{-9}$	1.17	$3.24 \times 10^{-8}$	-	-
C19	间伞花烃	-	-	1.27	$1.35 \times 10^{-13}$	1.38	$9.40 \times 10^{-13}$
C20	(+)-柠檬烯	1.23	$1.72 \times 10^{-5}$	-	-	1.31	$8.18 \times 10^{-9}$
C21	苯甲醇	1.01	$2.19 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
C22	川芎嗪	1.48	$3.13 \times 10^{-10}$	1.24	$4.30 \times 10^{-10}$	-	-
C23	正十一烷	-	-	-	-	1.19	$1.34 \times 10^{-4}$
C24	正壬醛	1.06	$1.77 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
C25	$\alpha$ -酮戊二酸	-	-	1.29	$1.83 \times 10^{-17}$	1.40	$2.11 \times 10^{-16}$
C26	6,6-二甲基螺[二环[3.1.1]庚-2,2'-环氧乙烷]	-	-	1.06	$5.27 \times 10^{-4}$	1.18	$6.56 \times 10^{-5}$
C27	水杨酸甲酯	1.38	$1.79 \times 10^{-7}$	1.12	$4.54 \times 10^{-6}$	-	-
C28	桃金娘烯醛	-	-	1.20	$4.90 \times 10^{-7}$	1.18	$7.63 \times 10^{-5}$
C29	正十二烷	-	-	-	-	1.05	$5.94 \times 10^{-3}$
C30	4,7-dimethylbenzofuran	-	-	1.12	$5.11 \times 10^{-6}$	1.11	$1.18 \times 10^{-4}$
C31	3,5,5-trimethyl-4-methylen-2-cyclohexen-1-on	-	-	1.29	$1.62 \times 10^{-17}$	1.39	$3.71 \times 10^{-16}$
C32	桃金娘烷醇	1.33	$3.17 \times 10^{-6}$	-	-	1.28	$4.86 \times 10^{-7}$
C33	( <i>E</i> )-myrtanol	1.19	$4.40 \times 10^{-4}$	-	-	-	-
C34	紫苏醛	-	-	1.21	$8.23 \times 10^{-9}$	1.07	$6.41 \times 10^{-3}$
C35	丁香酚	1.53	$2.95 \times 10^{-15}$	1.27	$2.63 \times 10^{-14}$	-	-
C36	(-)- $\alpha$ -蒎烯	-	-	1.11	$9.49 \times 10^{-7}$	1.06	$4.13 \times 10^{-4}$
C37	丹皮酚	-	-	1.27	$1.04 \times 10^{-13}$	1.37	$4.55 \times 10^{-14}$
C38	$\alpha$ -姜黄烯	-	-	1.08	$5.16 \times 10^{-6}$	-	-
C39	2-methyl-3,5-dodecadiyne	1.34	$8.45 \times 10^{-7}$	1.11	$2.42 \times 10^{-6}$	-	-
C40	香橙烯	1.08	$1.91 \times 10^{-3}$	-	-	-	-

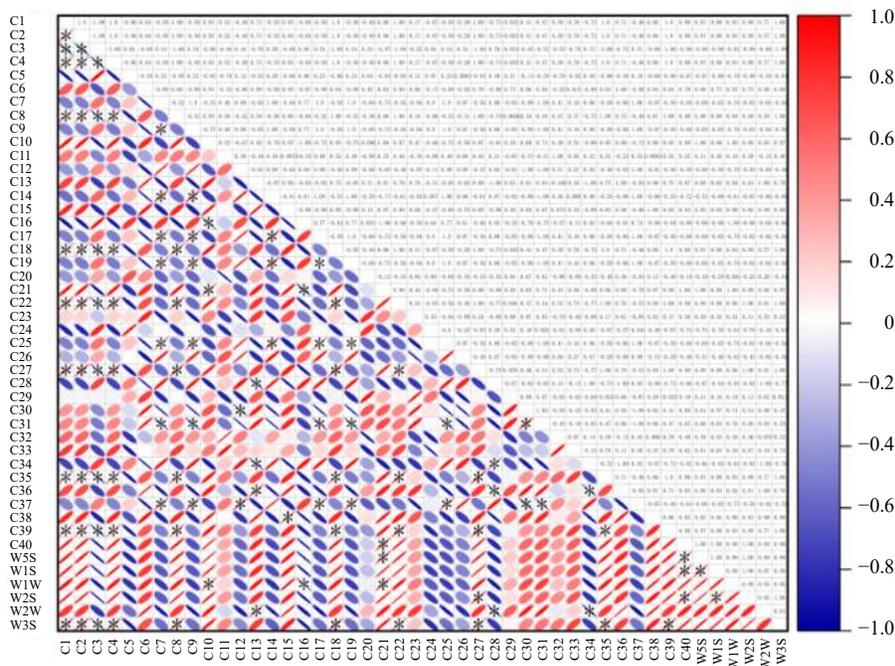


图 7 不同产地白芍挥发性成分与电子鼻传感器的 Pearson 相关性分析

Fig. 7 Pearson correlation analysis between volatile components and electronic nose sensors of *Paeoniae Radix Alba* from different regions

成分中的盐酸班布特罗<sup>[14]</sup>、糠醛<sup>[15]</sup>、苯甲醛<sup>[16]</sup>、蒎烯<sup>[17]</sup>、(+)-柠檬烯<sup>[18]</sup>、川芎嗪<sup>[19]</sup>、水杨酸甲酯<sup>[20]</sup>、桃金娘烯醛<sup>[21]</sup>、紫苏醛<sup>[22]</sup>、丁香酚<sup>[23]</sup>、(-)- $\alpha$ -蒎烯<sup>[24]</sup>、丹皮酚<sup>[25]</sup>、 $\alpha$ -姜黄烯<sup>[26]</sup>等 13 种成分具有抗炎、抗肿瘤、抗氧化、镇痛、活血、健脾等功效。这 13 种药效成分在不同产地白芍中的总含量为安徽亳州 8.88%、浙江临安 6.72%、山东曹县 11.96%，表明不同产地白芍药效成分含量具有一定的差异性，应深入研究这些挥发性成分的具体药效作用及其对药材整体质量的影响，将有助于中药材质量控制和标准化的进一步发展。

由差异挥发性成分和响应强度高的电子鼻传感器相关联分析结果发现， $P \leq 0.05$  且具有强正相关性的挥发性成分包括 2-氨基-2,3-二甲基丁酰胺、正戊醇、苯甲醇、丁香酚、硼烷二甲硫醚、盐酸班布特罗、2-ethyl-5-methyltetrahydrofuran、4-羟基-3-甲基丁醛、2-methyl-3,5-dodecadiyne、川芎嗪、香橙烯、正癸烷、水杨酸甲酯 13 种成分，推测这些成分是区分不同产地白芍气味产生的主要物质基础。

综上所述，不同产地的白芍在色、气、味方面均表现出一定的差异性，这些差异性可能与产地的地理环境、气候条件以及种植技术等因素密切相关。未来的研究可以进一步增加更多产地白芍样

本，以期建立不同产地白芍的颜色、味道、气味模型，结合智能感官技术用于白芍质量评价，能够更加快速、有效实现对不同产地白芍的鉴别，为中药材的品质控制和产地溯源提供新的思路和方法。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

**参考文献**

- [1] 茹凯月, 仇婧玥, 宋厚盼, 等. 白芍的本草考证 [J]. 中医药通报, 2023, 22(8): 46-51.
- [2] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 157.
- [3] 崔红倩, 迟宇昊, 申远. 白芍的化学成分和药理作用研究进展 [J]. 新乡医学院学报, 2024, 41(3): 291-297.
- [4] 王世新, 王秋艳, 李爽, 等. 白术-白芍药对的物质基础及作用机制研究进展 [J]. 中草药, 2025, 56(7): 2582-2592.
- [5] 杜倩倩, 张铁军, 谢冬梅, 等. 基于指纹图谱结合化学模式识别法对不同种质白芍质量评价 [J]. 中草药, 2023, 54(10): 3292-3301.
- [6] 赵淼, 包永睿, 王帅, 等. 基于“质-量”双标的白芍质量分析方法研究 [J]. 中草药, 2023, 54(22): 7325-7330.
- [7] 王秋艳, 王世新, 隋方宇, 等. 白芍活性成分、药理作用及成分变化的影响因素研究进展 [J]. 中草药, 2025, 56(5): 1817-1829.
- [8] 李秋晗, 张喜武, 闫广利, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MSE 结合多元统计方法的不同产地白芍药材质量评价 [J]. 中草药, 2023, 54(7): 2243-2253.

- [9] 彭嘉玉, 黄玉珍, 温佳文, 等. 基于 HS-GC-MS 和电子感官技术分析白芍不同炮制品的颜色、气味变化 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(20): 141-150.
- [10] 谢亚婷, 叶先文, 张金莲, 等. 基于颜色量化与 HS-GC-MS 技术探讨白芍炮制前后成分、颜色变化 [J]. 时珍国医国药, 2022, 33(10): 2418-2421.
- [11] 郑郁清, 郭静英, 康爱圆, 等. 基于色度-化学成分关联的蜜糠炒白芍质量控制研究 [J]. 中草药, 2023, 54(2): 534-543.
- [12] 鄢贵, 龚普阳, 张复中, 等. 基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的白芍研究现状及研究热点可视化分析 [J]. 中草药, 2024, 55(11): 3805-3815.
- [13] 杨硕, 徐中利, 赵新芝, 等. 基于电子感官系统和 GC-IMS 技术的大黄饮片基原辨识研究 [J]. 中国药房, 2024, 35(9): 1076-1081.
- [14] 韩刚, 翟丽, 王炳强, 等. 高效液相色谱法测定盐酸班布特罗胶囊的含量 [J]. 药物分析杂志, 2006, 26(9): 1323-1324.
- [15] 吕仕超, 王云姣, 张婉勤, 等. 白芍总苷的心血管保护效应及其作用机制的研究进展 [J]. 现代药物与临床, 2022, 37(1): 207-210.
- [16] 柴金珍, 黄远英, 袁根良, 等. 无花果的药理作用研究进展 [J]. 中成药, 2016, 38(8): 1805-1810.
- [17] 宁二娟, 李晓, 王伟, 等. 不同陈化年份南阳艾叶挥发油成分测定及抗氧化活性研究 [J]. 中药材, 2024, 47(6): 1415-1419.
- [18] 陈佳梅, 黄世伟, 李莞, 等. ICP-MS 测定川芎及其近缘药材中的 24 种有害元素和营养元素 [J]. 中草药, 2025, 56(19): 7186-7199.
- [19] 房敏, 赵冠宇, 李泉洋, 等. 经典名方四物汤化学成分、药理作用、临床应用研究进展及质量标志物预测分析 [J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(7): 154-161.
- [20] 胡耶芳, 李晓, 刘子祯, 等. 滇白珠的化学成分、药理活性及质量控制研究进展 [J]. 中成药, 2020, 42(1): 162-168.
- [21] 李文璇. 路路通活性成分筛选及桃金娘烯醛和  $\beta$ -氧化石竹烯抑制 NLRP3 炎性小体治疗类风湿关节炎作用机制 [D]. 沈阳: 中国医科大学, 2021.
- [22] 何育佩, 郝二伟, 谢金玲, 等. 紫苏药理作用及其化学物质基础研究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(16): 3957-3968.
- [23] 朱熙妍, 付露欣, 周文, 等. 丁香酚的药理作用研究进展 [J]. 中医临床研究, 2024, 16(31): 128-133.
- [24] 肖淑华, 李字棋, 胡国婷, 等. 白豆蔻化学成分、药理作用研究进展及其质量标志物的预测分析 [J]. 中国医院药学杂志, 2024, 44(21): 2548-2556.
- [25] 张树蓉, 赵宏芬, 佟沫儒, 等. 牡丹皮化学成分、药理作用及其质量标志物 (Q-Marker) 的预测分析 [J]. 中草药, 2022, 53(16): 5215-5224.
- [26] 仇瑜, 张洪兵, 郭虹, 等. 姜黄的研究进展及质量标志物 (Q-Marker) 的预测分析 [J]. 中草药, 2021, 52(15): 4700-4710.

[责任编辑 时圣明]