

• 药剂与工艺 •

基于电子鼻和 HS-GC-MS 技术分析不同炮制程度阿胶珠挥发性成分差异

付 莉, 王小燕, 夏 杰, 毛春芹, 党晨希, 刘诗怡, 谢 辉*, 陆兔林*

南京中医药大学药学院, 江苏 南京 210023

摘 要: 目的 探究阿胶 *Asini Corii Colla* 及不同炮制程度阿胶珠的挥发性成分差异, 解析阿胶炒制过程中的气味变化规律及其物质基础。方法 采用 Heracles Neo 超快速气相色谱电子鼻技术和顶空进样-气相色谱-质谱联用技术(headspace injection-gas chromatography-mass spectrometry, HS-GC-MS), 结合相对气味活度值(relative odor activity values, ROAV)与化学计量分析, 系统表征不同炮制程度阿胶珠挥发性成分差异。结果 电子鼻数据检测结果显示不同炮制程度阿胶珠饮片气味特征存在显著差异; HS-GC-MS 技术在阿胶生品与炮制品中分别检测出 33 种和 62 种挥发性成分, 通过正交偏最小二乘法-判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)对其进行差异性分析, 结果显示阿胶生品、炮制不及、炮制适中和炮制太过阿胶珠饮片的挥发性成分有明显差异, 以变量重要性投影(variable importance projection, VIP)值 >1 的标准共筛选了 12 种差异挥发性气味成分, 其中正己醛、正戊醛、2-正戊基呋喃、异戊醇、反-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、辛醛、庚醛的 ROAV ≥ 1 , 是关键性气味差异物质。结论 随着阿胶炒制程度的不断增加, 其挥发性成分呈现一定的动态变化规律。通过电子鼻和 HS-GC-MS 技术可有效区分阿胶和不同炮制程度阿胶珠饮片, 为其他动物药的挥发性成分研究和生产线智能控制识别提供参考。

关键词: 阿胶; 阿胶珠; 挥发性成分; 电子鼻; 顶空进样-气质联用技术; 相对气味活度值

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)22-8102-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.22.005

Analysis of differences of volatile components in Ejiao_{zhu} with different processing degrees based on electronic nose and HS-GC-MS technology

FU Li, WANG Xiaoyan, XIA Jie, MAO Chunqin, DANG Chenxi, LIU Shiyi, XIE Hui, LU Tulin

School of Pharmacy, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

Abstract: Objective To explore the differences in volatile components between Ejiao (*Asini Corii Colla*) and Ejiao_{zhu} with different degrees of processing, and to analyze the regularity of odor changes and their material basis during the stir-frying process of Ejiao. **Methods** Heracles Neo ultra-fast gas chromatography electronic nose technology and headspace-gas chromatography-mass spectrometry (HS-GC-MS) were employed, combined with relative odor activity values (ROAV) and chemometric analysis, to systematically characterize the differences in volatile components of Ejiao_{zhu} with different processing degrees. **Results** The detection results of electronic nose revealed significant differences in the odor of Ejiao_{zhu} decoction pieces with different processing degrees. HS-GC-MS technology detected 33 and 62 volatile components in raw Ejiao and processed products respectively. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) was used for differential analysis, and the results indicated obvious differences in volatile components among raw Ejiao, under-processed, moderately-processed, and over-processed Ejiao_{zhu} decoction pieces. A total of 12 differential volatile odor components were screened out based on the criterion of variable importance in projection (VIP) value > 1 . Among them, *n*-hexanal, *n*-pentanal, 2-pentylfuran, isoamyl alcohol, *trans*-2-octenal, 1-octen-3-ol, nonanal, octanal, and heptanal had ROAV ≥ 1 , which were the key odor-differentiating substances. **Conclusion** As the stir-frying degree of Ejiao increases, its volatile components exhibit a certain dynamic change pattern. The combination of electronic nose and HS-GC-MS technology can

收稿日期: 2025-07-10

基金项目: 国家重点研发计划项目: 基于轻量化 AI 计算平台的炒炙饮片多维全息质量表征体系研究 (2023YFC3504203)

作者简介: 付 莉, 硕士研究生, 研究方向为中药制药技术与产品开发。E-mail: 2436267594@qq.com

*通信作者: 谢 辉, 教授, 硕士生导师, 主要从事中药制剂技术与质量评价研究。E-mail: njxh66@njucm.edu.cn

陆兔林, 教授, 博士生导师, 主要从事中药炮制及中药饮片质量标准研究。E-mail: ltl2021@njucm.edu.cn

effectively distinguish Ejiao and Ejiaozhu decoction pieces with different processing degrees, which provides a reference for the research on volatile components of other animal medicines and the intelligent control and identification in production lines.

Key words: Ejiao; Ejiaozhu; volatile components; electronic nose; HS-GC-MS; ROAV

阿胶为马科马属动物驴 *Equus asinus* L. 的干燥皮或鲜皮经煎煮、浓缩制成的固体胶，是中国传统贵重药材，其性甘、平，归肺、肝、肾经，具有补血滋阴、润燥、止血的功能^[1]。阿胶中的主要化学成分有氨基酸、多肽及蛋白质类、多糖类，现有研究报道表明，阿胶具有抗贫血、止血、抗炎、抗氧化、抗疲劳和免疫调节等药理作用^[2]。阿胶作为动物药，经蛤粉烫至成珠后可以使其质地酥脆，降低其滋腻之性，矫正其不良气味^[3]。阿胶的挥发性成分与其气味特征存在密切关联，相关研究已在成分鉴别、气味特征分析等方面取得一定进展。在成分上，通过 GC-FID/Q TOF 技术已鉴别出 33 种挥发性成分，包括醛类、酮类、吡嗪类等多种类型，其中醛类、吡嗪类和烷烃类为主要成分，且醛类和吡嗪类是决定其气味特征的关键物质^[4]；在气味特征上，经感官分析构建出由腥味、焦糊味和肉味构成的风味轮廓，己醛等多种化合物是其重要组成^[5]。有研究报道，阿胶经蛤粉炮制后醇类、烷烃类成分含量显著升高，而含氮类成分含量降低^[6]。但现有研究缺乏对阿胶珠炮制过程中挥发性成分的动态变化规律及关键气味活性物质的系统解析，在炮制程度与挥发性成分变化关联性等方面存在空白。

近年来，气相色谱-质谱联用、电子鼻等技术的应用，为中药和食品中挥发性成分和风味物质的定性定量分析提供了有力工具^[7-8]。Heracles Neo 超快速气相色谱电子鼻主要利用气敏传感器来模拟人类的嗅觉系统，将气味分子转化为不同电信号来识别混合气体，具有响应时间短、检测速度快，无需复杂的预处理过程等优点^[9]，可实现不同样品的快速区分，适配生产线智能控制需求。顶空进样-气相色谱-质谱联用技术（headspace injection-gas chromatography-mass spectrometry, HS-GC-MS）集气味信息采集-富集-进样为一体，分析效率高、操作简单、灵敏度高^[10]，可以免除冗长繁琐的样品前处理过程，对样品中的挥发性成分进行定性和定量分析。挥发性物质的气味特征与其嗅觉阈值存在紧密关联，而相对气味活度值（relative odor activity values, ROAV）正是一种通过嗅觉阈值来确定风味贡献程度的指标^[11]。本研究采用电子鼻和 HS-GC-MS 技术分析阿胶及不同炮制程度阿胶珠挥发性成

分的变化情况，结合 ROAV 法确定其中各风味物质对其整体风味的贡献大小，探讨阿胶及不同炮制程度阿胶珠挥发性成分及差异，分析炒制过程中的气味变化规律及其物质基础。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Heracles Neo 超快速气相色谱电子鼻、PAL RSI 全自动顶空进样器，法国 Alpha MOS 公司；CGD-600FZ 型炒药机，杭州海善制药设备股份有限公司；7890-7000c 型气质联用仪、Agilent 7697A 型气相色谱顶空进样器，美国 Agilent 公司；CAV64C 型分析天平，奥豪斯仪器（上海）有限公司；DFY-300 型摇摆式高速万能粉碎机，温岭市林大机械有限公司。

1.2 材料

阿胶药材由华润三九医药股份有限公司提供，经南京中医药大学陈建伟教授鉴定，为马科马属动物驴 *E. asinus* L. 的干燥皮或鲜皮经煎煮、浓缩制成的固体胶，质量经检验均符合《中国药典》2025 年版规定，阿胶样品信息见表 1。蛤粉，批号为 210609，购于安徽丰原铜陵中药饮片有限公司。

2 方法与结果

2.1 供试品的制备

2.1.1 阿胶供试品的制备 取 15 批阿胶药材(Y1~

表 1 阿胶样品信息

Table 1 Information of Ejiao samples

序号	批号	产地	生产企业
Y1	2308003	山东	东阿阿胶股份有限公司
Y2	2302008	山东	东阿阿胶股份有限公司
Y3	23010261	山东	山东福牌阿胶股份有限公司
Y4	2211049	山东	山东福牌阿胶股份有限公司
Y5	201008	山东	山东东阿国胶堂阿胶药业有限公司
Y6	2208009	山东	山东宏济堂阿胶药业有限公司
Y7	23051301	山东	山东济韵阿胶股份有限公司
Y8	22040114	河北	河北东汝阿胶制药股份有限公司
Y9	22030131	河北	河北东语阿胶制药有限公司
Y10	20100108	河北	河北东语阿胶制药有限公司
Y11	220901	湖南	湖南爱敬堂制药有限公司
Y12	200409	湖南	湖南爱敬堂制药有限公司
Y13	20220901	湖南	山东喜君康医药集团有限公司
Y14	20200402	湖南	九芝堂股份有限公司
Y15	230430	河南	河南老君堂制药有限公司

Y15), 烘软, 切制成阿胶丁, 粉碎过三号筛, 共计得到 15 批阿胶生品粉末 (S1~S15), 储存于干燥器内, 备用。

2.1.2 不同炮制程度阿胶珠饮片的制备 根据实验室前期研究, 阿胶珠的最佳炮制工艺为取蛤粉(过三号筛)置炒药机内, 加热至 180 °C 翻动滑利时投入阿胶丁, 炒制规定时间, 迅速取出, 筛去蛤粉, 放凉。投料比为 1 份阿胶丁中加入 8 倍量蛤粉。本研究分别在炒制 3、5、7 min 时取样, 放凉。15 批阿胶 (Y1~Y15) 共计得到 45 批不同炮制程度阿胶珠饮片。

根据饮片性状, 炒制 3 min 的阿胶珠, 未完全膨大, 内有溏心, 归为炮制不及类; 炒制 5 min 的阿胶珠, 圆整度好且内无溏心、表面无焦斑, 归为炮制适中类; 炒制 7 min 的阿胶珠, 表面有明显焦斑, 归为炮制太过类。取样后将其粉碎, 过三号筛, 储存于干燥器内, 备用。

2.2 电子鼻技术分析整体性气味

2.2.1 电子鼻检测 采用顶空进样, 为了得到较好的色谱信息, 以色谱峰数量、色谱峰面积及分离效果为指标分别对称样量、进样体积、孵化温度、孵化时间、捕集温度进行考察, 确定阿胶样品最佳检测条件: 取阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末各 1.0 g, 置于 20 mL 顶空进样瓶中, 密封压盖; 进样量 5.000 mL; 孵化温度 80 °C; 孵化时间 20 min; 捕集温度 35 °C; 捕集时间 50 s; 捕集阱分流速率 10 mL/min; 进样口温度 200 °C; 检测器温度 260 °C; 初始炉温 50 °C, 程序升温: 以 2 °C/s 升温至 80 °C; 以 3 °C/s 升温至 250 °C, 保持 21 s; 采集时间 110 s。

2.2.2 整体性气味分析 Heracles Neo 超快速气相色谱电子鼻具有 2 根极性存在差异的色谱柱, 即 MXT-5 (低极性) 柱和 MXT-WAX (极性) 柱, 一次进样, 双柱同时分析, 谱图同时呈现 2 根色谱柱的分离结果, 用 Origin 2024 软件得到气味色谱峰, 可得到蛤粉、阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末的气味色谱图, 结果见图 1, 阿胶生品粉末和不同炮制程度阿胶珠饮片粉末的挥发性成分在 2 根不同极性的色谱柱下均能够较好地分离, 且存在明显差异。

通过色谱叠加图可以看出阿胶生品粉末与不同炮制程度阿胶珠饮片粉末在气味上存在较大差异。生品粉末气味成分少, 且响应均较低, 炮制品

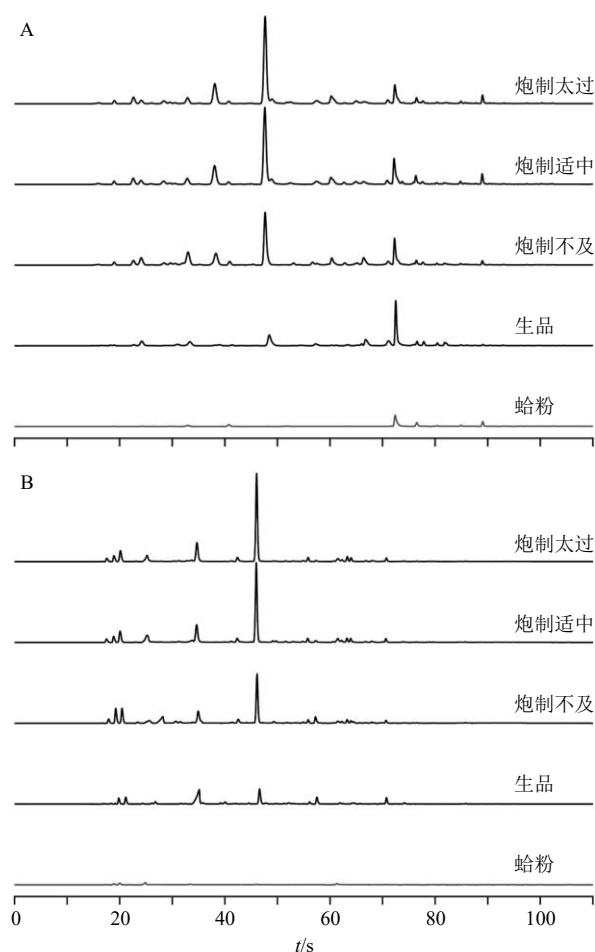
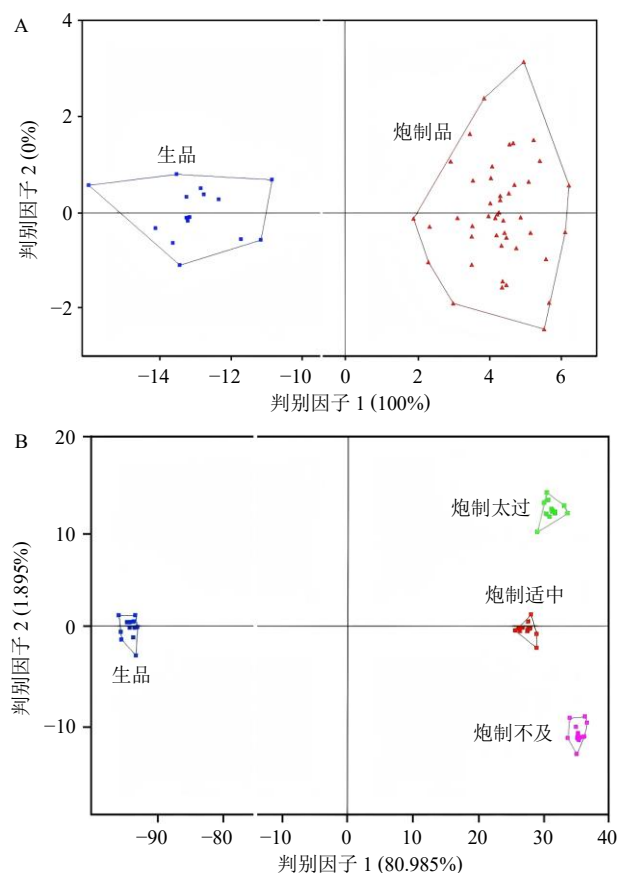


图 1 蛤粉、阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末在 MXT-WAX (A) 和 MXT-5 (B) 色谱柱下的气味信息

Fig. 1 Odor information of clam powder, raw Ejiao powder and Ejiaozhu decoction piece powders with different processing degrees under MXT-WAX (A) and MXT-5 (B) chromatographic columns

粉末气味成分明显增加, 且成分响应均较高。观察 MXT-WAX 色谱柱下的气味信息, 可发现 10~60 s 内的大部分色谱峰随着炮制时间增加而变大, 65~85 s 内逐渐减小; MXT-5 色谱柱下的气味信息可发现在 10~50 s 内的大部分色谱峰随着炮制时间增加而变大, 55~80 s 内逐渐减小。

为了探究阿胶生品粉末与不同炮制程度阿胶珠饮片粉末气味成分差异, 依据电子鼻检测结果, 使用 Alpha Soft 17.0 软件对采集的数据进行判别因子分析 (discriminant factor analysis, DFA), 结果见图 2-A。在此模型中, 判别因子 1 的贡献率达 100%, 可以体现所有的原始信息, 且 2 组样本距离较远, 表明阿胶生品粉末、阿胶珠饮片粉末在气味信息方面存在较明显的差异。在此基础上进一步探究不同炮制程度阿胶珠饮片粉末的气味成分差异, 结果见



A-阿胶生品粉末与不同炮制程度阿胶珠饮片粉末气味成分差异;
B-不同炮制程度阿胶珠饮片粉末的气味成分差异。
A-the difference of odor components between raw Ejiao powder and Ejiao decoction piece powders with different processing degrees;
B-the difference of odor components in the powder of Ejiao decoction piece powders with different processing degrees.

图 2 阿胶及不同炮制程度阿胶珠饮片气味 DFA 图

Fig. 2 DFA diagram of odor profiles for Ejiao and Ejiao decoction pieces with different processing degrees

图 2-B, 判别因子 1 的贡献率为 80.985%, 判别因子 2 的贡献率为 1.895%, 累积贡献率为 82.880%, 可以体现大部分的原始信息。在 DFA 模型图中可以看出, 不同炮制程度阿胶珠饮片粉末气味之间存在显著差异。因此, 有必要进一步分析不同炮制程度阿胶珠粉末间的挥发性成分变化。

2.3 HS-GC-MS 技术分析挥发性成分

2.3.1 顶空进样条件 精密称取阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末各 4.0 g, 置于 20 mL 顶空进样瓶中, 密封压盖。加热箱温度 120 °C, 定量环温度 135 °C, 传输线温度 150 °C, 平衡 20 min, 气相循环 21 min。

2.3.2 GC-MS 分析条件 色谱柱为 HP-5 ms 毛细管柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 采用程序升温:

起始柱温为 40 °C, 保持时间 5 min; 以 10 °C/min 升温至 80 °C; 以 3 °C/min 升温至 100 °C; 以 10 °C/min 升温至 180 °C; 进样口温度为 280 °C; 载气为高纯氦气, 载气体积流量 1.0 mL/min, 分流比 20:1。离子源为电子轰击离子源, 电子碰撞能量 70 eV, 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 质谱接口温度 280 °C, 采集方式为全扫描模式, 扫描范围 m/z 40~400。

2.3.3 挥发性成分分析 15 批阿胶生品粉末及 45 批不同炮制程度阿胶珠饮片粉末中共检测出 62 种成分, 阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末总离子流图见图 3。本研究中海粉作为辅料, 主要成分为碳酸钙, 通过电子鼻技术分析单独加热炒制的蛤粉, 未检出明显的挥发性成分, 对阿胶珠饮片粉末的整体挥发性成分影响可以忽略不计, 故不作特别分析, 各挥发性成分的平均相对百分含量具体结果见表 2。阿胶生品粉末、炮制品粉末中共检测出 62 种挥发性成分, 包括 1-戊烯-3-酮、2-丁基环己-1-酮、环癸酮等 5 种酮类化合物, 壬醛、正己醛、正丁醛等 20 种醛类化合物, 正辛醇、2-庚炔-1-醇、庚醇等 8 种醇类化合物, 羰基硫、二甲基二硫 2 种含硫化合物, 2,4-辛二烯、异丁烯、环庚烷等 10 种烃类化合物, 叔戊基胺、*N*-甲酰基-*N*-甲基甲酰胺、吡嗪酰胺等 4 种含氮化合物, 2-乙基咪喃、*N*-甲基吡咯、2-甲基吡嗪等 12 种杂环类化合物, γ -己内酯 1 种酯类化合物。

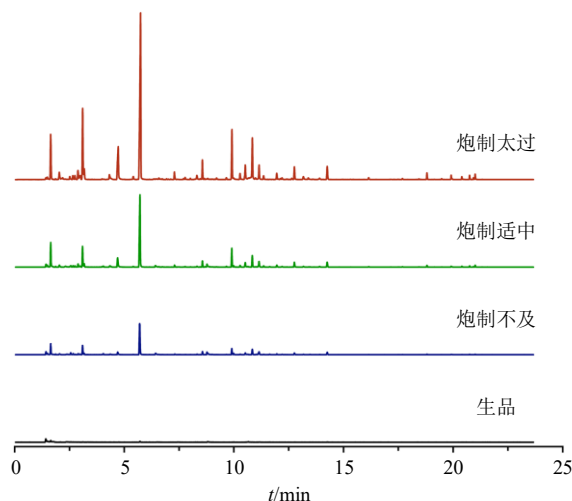


图 3 阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末的挥发性成分的 HS-GC-MS 分析总离子流图

Fig. 3 Total ion chromatograms of HS-GC-MS analyzed for volatile components in raw Ejiao powder and Ejiao decoction piece powders with different processing degrees

表 2 阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末中挥发性成分及平均相对百分含量 ($\bar{x} \pm s, n = 15$)Table 2 Volatile components and average relative percent contents in raw Ejiao powder and Ejiaozhu decoction piece powders with different processing degrees ($\bar{x} \pm s, n = 15$)

峰号	t_R / min	化合物名称	分子式	平均相对百分含量/%				化合物 类别
				生品	炮制不及	炮制适中	炮制太过	
1	1.423	羰基硫	COS	5.41±2.86	4.44±3.14	1.22±0.34	0.29±0.17	含硫类
2	1.484	异丁烯	C ₄ H ₈	0.89±0.73	1.30±0.66	0.99±0.59	0.52±0.37	烃类
3	1.647	叔戊基胺	C ₅ H ₁₃ N	9.05±5.72	7.26±2.85	6.60±2.62	6.60±1.65	含氮类
4	1.735	N-甲酰基-N-甲基甲酰胺	C ₃ H ₅ NO ₂	0.30±0.23	0.31±0.38	0.10±0.13	0.05±0.08	含氮类
5	1.876	甲基环氧丙烷	C ₄ H ₈ O	0.15±0.13	0.55±0.34	0.32±0.13	0.12±0.10	烃类
6	2.052	正丁醛	C ₄ H ₈ O	0.55±0.36	0.65±0.34	0.89±0.09	1.09±0.11	醛类
7	2.563	2-甲基戊醛	C ₆ H ₁₂ O	0.50±0.42	1.84±0.90	0.73±0.21	0.48±0.14	醛类
8	2.668	丁二醛	C ₄ H ₆ O ₂	0.35±0.16	1.16±0.74	0.63±0.16	0.47±0.08	醛类
9	2.746	2,3-二甲基丁烷	C ₆ H ₁₄	未检出	未检出	0.22±0.14	0.33±0.19	烃类
10	2.899	1-戊烯-3-醇	C ₅ H ₁₀ O	未检出	0.98±0.68	1.17±0.48	1.42±0.58	醇类
11	2.948	1-戊烯-3-酮	C ₅ H ₈ O	未检出	0.15±0.12	0.38±0.30	0.52±0.35	酮类
12	2.994	环庚烷	C ₇ H ₁₄	未检出	0.19±0.17	0.35±0.21	0.53±0.08	烃类
13	3.099	正戊醛	C ₅ H ₁₀ O	4.36±3.65	5.53±3.34	8.17±1.00	10.01±0.91	醛类
14	3.165	2-乙基呋喃	C ₆ H ₈ O	0.47±0.24	0.63±0.55	1.46±0.55	1.57±0.24	杂环类
15	3.996	N-甲基吡咯	C ₅ H ₇ N	未检出	未检出	0.15±0.11	0.12±0.12	杂环类
16	4.052	二甲基二硫	C ₂ H ₆ S ₂	1.47±0.94	0.69±0.29	0.28±0.45	0.23±0.24	含硫类
17	4.318	3,4-二氢-2H-吡喃	C ₅ H ₈ O	未检出	未检出	0.51±0.62	0.92±0.68	杂环类
18	4.354	吡咯	C ₄ H ₅ N	0.27±0.18	0.41±0.36	0.44±0.44	0.26±0.43	杂环类
19	4.697	异戊醇	C ₅ H ₁₂ O	1.34±1.18	1.92±1.12	4.37±1.02	4.64±2.47	醇类
20	5.414	顺式-3-辛烯-1-醇	C ₈ H ₁₆ O	0.14±0.17	0.09±0.09	0.30±0.15	0.37±0.09	醇类
21	5.701	正己醛	C ₆ H ₁₂ O	9.90±5.92	25.65±5.24	39.40±4.70	35.73±3.26	醛类
22	6.147	N-乙基吡咯	C ₆ H ₉ N	未检出	0.08±0.12	0.07±0.06	0.06±0.08	杂环类
23	6.413	2-甲基吡嗪	C ₅ H ₆ N ₂	未检出	0.58±0.60	0.53±0.54	0.19±0.31	杂环类
24	6.572	反式-1,2-二甲基环丙烷	C ₅ H ₁₀	0.05±0.03	0.10±0.09	0.11±0.07	0.12±0.08	烃类
25	6.723	糠醛	C ₅ H ₄ O ₂	未检出	未检出	0.06±0.05	0.06±0.05	醛类
26	7.288	反式-2-己烯醛	C ₆ H ₁₀ O	未检出	0.27±0.25	0.74±0.33	0.94±0.47	醛类
27	7.772	正丁醇	C ₄ H ₁₀ O	未检出	0.05±0.06	0.22±0.04	0.20±0.08	醇类
28	8.320	5-甲基-2-己酮	C ₇ H ₁₄ O	0.39±0.29	0.54±0.43	0.64±0.48	0.77±0.23	酮类
29	8.462	顺-4-庚烯醛	C ₇ H ₁₂ O	未检出	0.05±0.05	0.08±0.05	0.07±0.03	醛类
30	8.571	庚醛	C ₇ H ₁₄ O	1.09±0.62	1.57±0.94	2.17±0.59	1.91±0.47	醛类
31	8.655	1,2-环氧辛烷	C ₈ H ₁₆ O	未检出	未检出	0.09±0.02	0.09±0.07	烃类
32	8.793	2,5-二甲基吡嗪	C ₆ H ₈ N ₂	0.96±0.85	3.48±2.96	1.26±0.75	0.59±0.78	杂环类
33	8.886	2-乙基吡嗪	C ₆ H ₈ N ₂	未检出	0.08±0.07	0.04±0.06	0.01±0.01	杂环类
34	9.003	2,3-二甲基吡嗪	C ₆ H ₈ N ₂	未检出	0.12±0.04	0.12±0.03	0.11±0.04	杂环类
35	9.208	2-乙基-3-甲基环戊烯	C ₈ H ₁₄	0.06±0.04	0.07±0.07	0.16±0.08	0.14±0.05	烃类
36	9.656	2-庚炔-1-醇	C ₇ H ₁₂ O	0.04±0.16	0.10±0.10	0.20±0.12	0.24±0.16	醇类
37	9.909	2-庚烯醛	C ₇ H ₁₂ O	1.15±0.88	3.02±2.52	5.95±2.62	6.79±3.34	醛类
38	9.989	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	0.46±0.09	1.08±0.59	0.71±0.16	0.30±0.20	醛类
39	10.289	庚醇	C ₇ H ₁₆ O	0.19±0.11	0.24±0.18	0.49±0.19	0.67±0.19	醇类
40	10.518	1-辛烯-3-醇	C ₈ H ₁₆ O	0.32±0.11	1.00±0.71	1.78±0.69	2.08±0.75	醇类
41	10.840	2-正戊基呋喃	C ₉ H ₁₄ O	2.80±2.13	3.52±3.28	4.80±2.38	6.35±1.95	杂环类
42	11.086	2-乙基-5-甲基吡嗪	C ₇ H ₁₀ N ₂	未检出	0.26±0.18	0.19±0.15	0.13±0.12	杂环类
43	11.152	辛醛	C ₈ H ₁₆ O	1.32±0.77	3.00±1.67	2.46±0.85	2.10±0.87	醛类

表 2 (续)

峰号	<i>t_R</i> / min	化合物名称	分子式	平均相对百分含量/%				化合物 类别
				生品	炮制不及	炮制适中	炮制太过	
44	11.359	(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	C ₇ H ₁₀ O	未检出	0.10±0.12	0.50±0.30	0.57±0.32	醛类
45	11.627	吡嗪酰胺	C ₅ H ₅ N ₃ O	未检出	0.22±0.02	0.22±0.03	0.05±0.08	含氮类
46	11.958	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	C ₉ H ₁₆	0.27±0.27	0.42±0.28	0.91±0.35	0.88±0.22	烃类
47	12.199	反式-3-辛烯-2-酮	C ₈ H ₁₄ O	未检出	0.10±0.11	0.31±0.13	0.29±0.06	酮类
48	12.663	γ-己内酯	C ₆ H ₁₀ O ₂	0.06±0.05	0.05±0.06	0.10±0.08	0.17±0.09	酯类
49	12.762	反-2-辛烯醛	C ₈ H ₁₄ O	0.41±0.29	0.83±0.64	1.45±0.48	1.99±0.62	醛类
50	13.174	正辛醇	C ₈ H ₁₈ O	0.16±0.06	0.14±0.04	0.38±0.20	0.46±0.13	醇类
51	13.394	2,4-辛二烯	C ₈ H ₁₄	未检出	未检出	0.06±0.07	0.21±0.17	烃类
52	13.447	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	C ₈ H ₁₂ N ₂	0.11±0.02	0.43±0.09	0.17±0.07	0.10±0.05	杂环类
53	14.253	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	1.24±0.55	1.83±1.00	2.38±0.58	2.09±0.43	醛类
54	16.149	(<i>Z</i>)-2-壬烯醛	C ₉ H ₁₆ O	未检出	0.02±0.04	0.14±0.13	0.22±0.08	醛类
55	17.687	2-甲基-1,5-环己二烯	C ₇ H ₁₂	未检出	0.05±0.03	0.13±0.07	0.16±0.06	烃类
56	18.285	金刚烷胺	C ₁₀ H ₁₇ N	未检出	0.03±0.04	0.04±0.03	0.02±0.03	含氮类
57	18.812	反式-2-癸烯醛	C ₁₀ H ₁₈ O	未检出	0.20±0.17	0.37±0.20	0.64±0.18	醛类
58	18.888	2-丁基环己酮	C ₁₀ H ₁₈ O	未检出	0.03±0.04	0.03±0.04	0.03±0.04	酮类
59	19.911	反式-2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	未检出	0.09±0.05	0.22±0.10	0.62±0.27	醛类
60	20.403	环癸酮	C ₁₀ H ₁₈ O	未检出	0.13±0.08	0.30±0.14	0.35±0.06	酮类
61	20.751	反-2-十一碳烯醛	C ₁₁ H ₂₀ O	未检出	0.07±0.04	0.24±0.13	0.41±0.09	醛类
62	20.925	2,4-壬二烯醛	C ₉ H ₁₄ O	未检出	未检出	0.12±0.09	0.18±0.10	醛类

15 批阿胶生品粉末检测出的 33 种共有挥发性成分中,平均相对百分含量较高的化合物有正己醛(9.90±5.92)%、叔戊基胺(9.05±5.72)%、羰基硫(5.41±2.86)%、正戊醛(4.36±3.65)%、2-正戊基呋喃(2.80±2.13)%。阿胶珠(炮制适中)饮片中检测出了 62 种共有挥发性成分,平均相对百分含量较高的化合物有正己醛(39.40±4.70)%、正戊醛(8.17±1.00)%、叔戊基胺(6.60±2.62)%、2-庚烯醛(5.95±2.62)%、2-正戊基呋喃(4.80±2.38)%、异戊醇(4.37±1.02)%等,其中醛类物质占比较大。

随着炮制程度的增加,醛类含量呈“逐渐增加”和“先增加后减少”2 种趋势。醛类成分种类和含量增加的原因可能是因为炮制初期,脂肪氧化和美拉德反应等快速生成醛类,导致成分种类增加和短时含量累积;部分醛类成分含量减少的原因可能是随着炮制时间延长,醛类进一步挥发或反应,含量下降;大量醛的产生也与 Strecker 降解反应有关,Strecker 降解反应是氨基酸和羰基化合物之间的热反应^[12]。酮类、醇类、烃类、杂环类化合物的含量也多呈逐渐上升趋势。醛类、酮类可能进一步环化形成内酯,如 γ-己内酯,这是一种常见的食物风味物质,具有奶油、椰子样香气^[13]。含硫化合物主要

来源于含硫氨基酸的分解,含硫类、含氮类大部分呈现不愉快的风味^[14],随着炮制时间的增加,含硫类、含氮类化合物含量逐渐减少。阿胶主要含有胶原蛋白和糖类成分,加热可能引起美拉德反应、脱羧、脱氨等,生成小分子烃类。大部分烃类化合物含量随着炮制时间的增加而升高,但是这些成分没有明显的气味偏向性^[15],因此对阿胶生品粉末及阿胶珠饮片粉末的整体气味影响不大。

2.4 挥发性成分 ROAV 分析

2.4.1 ROAV 的计算^[9] 通常选择阈值较低但相对含量较高的风味物质,即对样品贡献最大的风味物质,定义为 ROAV_{max}=100。其他物质按照以下公式计算。

$$ROAV=100\times C_iT_{\max}/C_{\max}T_i$$

C_i 为各挥发性物质的相对质量分数, *T_i* 为各挥发性物质的嗅觉阈值, *C_{max}* 及 *T_{max}* 分别为对样品风味贡献最大的组分的相对质量分数和嗅觉阈值

2.4.2 ROAV 分析结果 ROAV 可用于解释如何通过挥发性化合物的相对含量来评估单个挥发性化合物对样品整体气味的贡献。当 ROAV≥1.0 时,被视为对样品气味有直接影响,是关键性气味物质;当 0.1≤ROAV<1.0 时,被视为对样品气味有重要修饰作用,可辅助增强部分香气化合物的呈味特性;当

ROAV<0.1 时, 被视为对样品气味作用较小^[16]。

将阿胶及不同炮制程度阿胶珠所含挥发性成分 CAS 号导入 AroChemBase 数据库, 并结合《化合物嗅觉阈值汇编》^[17]查阅嗅觉阈值, 计算其相对气味活度值, 结果见表 3。由表 3 可知, 阿胶、阿胶珠(炮制不及、适中、太过)的关键性气味物质(ROAV≥1.0) 分别有 13、16、18、18 种, 共有的关键性气味物质有 13 种, 包括醛类 8 种(壬醛、正己醛、正丁醛、2-甲基戊醛、正戊醛、反-2-辛烯醛、辛醛、庚醛); 醇类 3 种, 其中 1-辛烯-3-醇呈胡萝卜味、果香, 异戊醇呈酒精味, 庚醇呈新鲜、坚果味; 杂环类 1 种, 即 2-正戊基呋喃, 呈大豆味、黄油味; 含硫类 1 种, 即二甲基二硫, 呈洋葱味、腐烂味, 这些物质为阿胶及阿胶珠饮片的整体风味起到了重要的贡献作用。相较于阿胶生品, 阿胶珠增加了 5 个关键气味物质, 分别是(Z)-2-壬烯醛、顺-4-庚烯醛、反式-2,4-癸二烯醛、反-2-十一碳烯醛、2,4-壬二烯醛。这些醛类物质主要呈果香、黄瓜味、杏仁味、油脂味等, 可能来源于脂肪的氧化降解、游离氨基酸与还原糖产生的美拉德反应、蛋白质的

表 3 阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末中挥发性成分 ROAV 值

Table 3 ROAV values of volatile components in raw Ejiao powder and Ejiaozhu decoction piece powders with different processing degrees

类型	化合物名称	CAS 号	嗅觉阈值/ (μg·kg ⁻¹)	ROAV 值			
				生品	炮制不及	炮制适中	炮制太过
酮类	1-戊烯-3-酮	1629-58-9	23.00	未检出	0.21	0.21	0.31
	环癸酮	1502-06-3	440.00	未检出	0.01	0.01	0.01
	5-甲基-2-己酮	110-12-3	89.00	0.22	0.12	0.09	0.12
醛类	壬醛	124-19-6	1.10	56.76	32.48	27.47	26.54
	正己醛	66-25-1	5.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	正丁醛	123-72-8	2.20	12.57	5.75	5.15	6.94
	2-甲基戊醛	123-15-9	3.20	7.83	11.23	2.88	2.12
	正戊醛	110-62-3	12.00	18.33	8.99	8.64	11.68
	反式-2-己烯醛	6728-26-3	88.70	未检出	0.06	0.11	0.15
	(Z)-2-壬烯醛	60784-31-8	0.02	未检出	22.64	89.26	155.22
	反-2-辛烯醛	2548-87-0	3.00	6.95	5.37	6.14	9.29
	苯甲醛	100-52-7	750.89	0.03	0.03	0.01	0.01
	辛醛	124-13-0	0.59	113.36	99.69	53.24	50.14
	顺-4-庚烯醛	6728-31-0	0.03	未检出	39.99	40.76	39.05
	庚醛	111-71-7	2.80	19.64	10.93	9.82	9.52
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	15.40	未检出	0.12	0.41	0.52
	反式-2-癸烯醛	3913-81-3	250.00	未检出	0.02	0.02	0.04
	反式-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	0.03	未检出	61.52	102.39	318.86
	反-2-十一碳烯醛	53448-07-0	0.78	未检出	1.76	3.91	7.28
	2,4-壬二烯醛	6750-03-4	0.05	未检出	未检出	29.26	51.57
醇类	正辛醇	111-87-5	125.80	0.06	0.02	0.04	0.05
	庚醇	111-70-6	5.40	1.77	0.86	1.14	1.73
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1.50	10.85	12.97	15.05	19.37
	正丁醇	71-36-3	459.20	未检出	0.00	0.01	0.01
	异戊醇	123-51-3	4.00	16.96	9.37	13.85	16.24
	1-戊烯-3-醇	616-25-1	358.10	未检出	0.05	0.04	0.06
	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	1 750.00	0.03	0.04	0.01	0.00
杂环类	2-正戊基呋喃	3777-69-3	5.80	24.38	11.84	10.49	15.32
	2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	16.00	未检出	0.32	0.15	0.11
	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	13360-65-1	8.60	0.62	0.98	0.25	0.17
	二甲基二硫	624-92-0	1.10	67.67	12.20	3.23	2.86
含硫类							

Strecker 降解、部分酰胺类化合物在高温下的水解反应等^[18]。

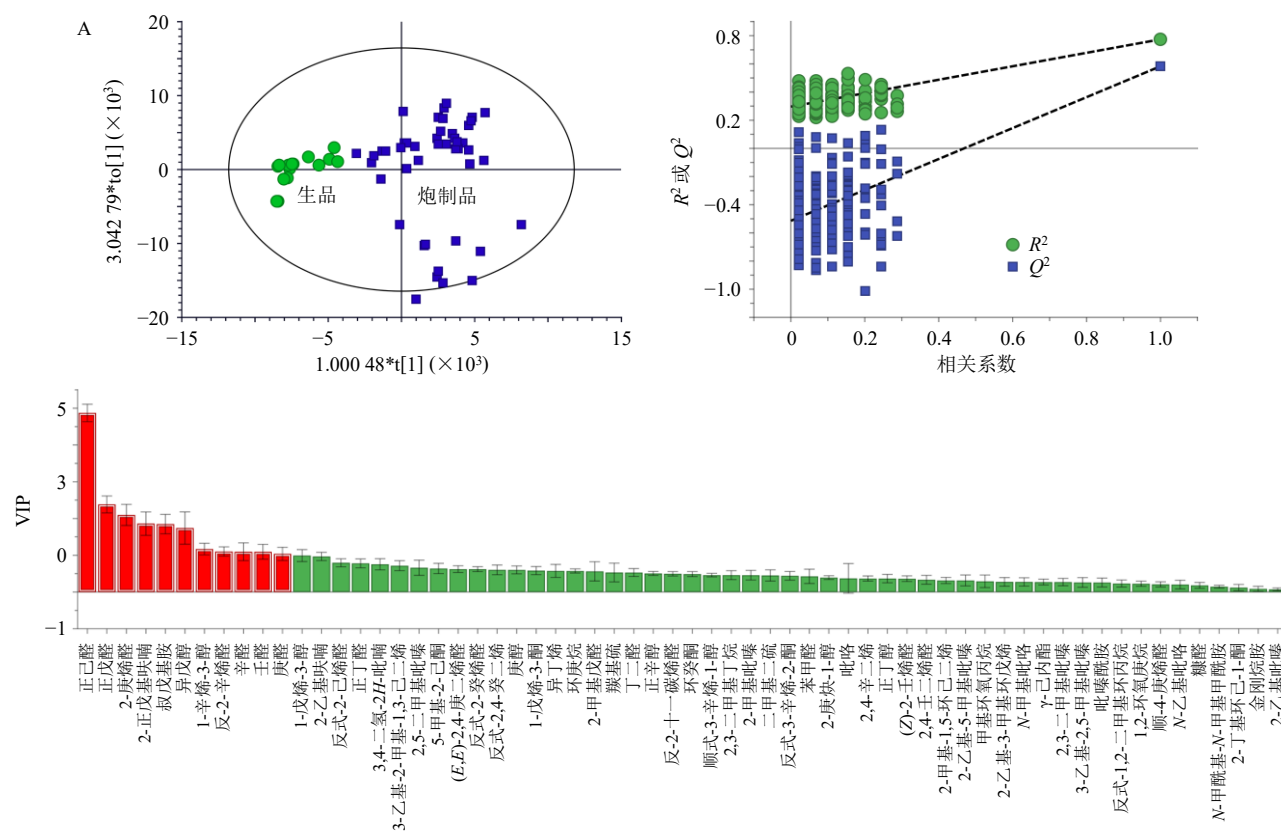
除关键性气味物质外,对阿胶的整体风味起修饰作用的有 5-甲基-2-己酮、3-乙基-2,5-甲基吡嗪;对阿胶珠的整体风味起修饰作用的成分有 1-戊烯-3-酮、5-甲基-2-己酮、反式-2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、2-乙基-5-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-甲基吡嗪。其中,1-戊烯-3-酮、5-甲基-2-己酮具有果香和甜味,可能是生成杂环化合物的中间体,对香气的形成具有重要作用^[5];3-乙基-2,5-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪具有咖啡香和烤香,是令人喜爱的芳香味道^[19];反式-2-己烯醛具有油脂香、果香,(E,E)-2,4-庚二烯醛具有肉桂味。

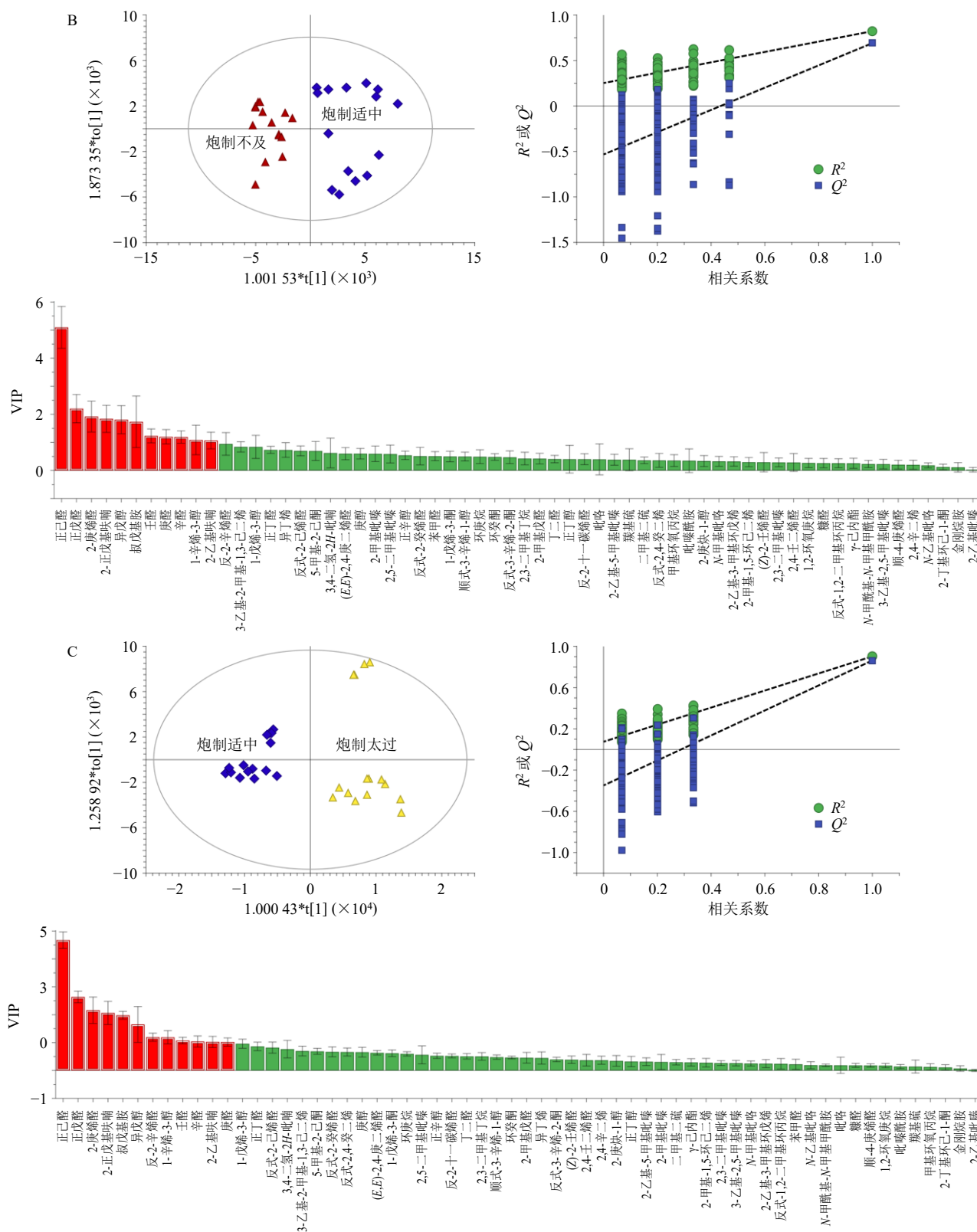
2.5 不同炮制程度阿胶珠饮片粉末气味成分差异性分析

2.5.1 数据处理 选取各批样品 3 次电子鼻测定的平均响应值为特征值,采用 Heracles NEO 型超快速气相电子鼻自带的 Alpha Soft V14.2 软件对阿胶及不同炮制程度阿胶珠的色谱图数据进行 DFA;将 HS-GC-MS 检测所得数据导入 Mass Hunter 软件,根据美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)质谱数据库的检索结果(匹配度 $\geq 80.0\%$ 的成分),结合 CAS 号、

精确相对分子质量、关键碎片离子进行鉴定,并采用峰面积归一化法计算其相对百分含量。利用 SIMCA-P14.1 软件进行正交偏最小二乘法-判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)和置换检验分析(replacement test analysis, RTA),筛选出变量重要性投影(variable importance projection, VIP)值 >1 且 $P<0.05$ 的显著差异成分,结合 ROAV 法评估挥发性成分的贡献,分析阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末的挥发性成分差异。

2.5.2 气味成分差异性分析 为了探究阿胶生品粉末及不同炮制程度阿胶珠饮片粉末气味差异性标记物,以 62 个气味成分峰面积为变量,用 SIMCA-P14.1 软件分别建立阿胶生品粉末和所有程度阿胶珠饮片粉末(图 4-A)、炮制不及和炮制适中饮片粉末(图 4-B)、炮制适中和炮制太过饮片粉末(图 4-C)的 OPLS-DA 模型,可见不同炮制程度阿胶珠饮片粉末能较好地地区分开。为了防止模型存在过度拟合现象,对模型进行置换检验(200 次)验证,结果见图 4。一般认为 R^2 拟合直线在 Y 坐标轴的截距小于 0.3,说明该模型较为可靠, Q^2 拟合直线在 Y 坐标轴的截距小于 0,说明该模型不存在过度拟合的现象^[20-21]。结果表明,3 个模型的拟合度良好,未出





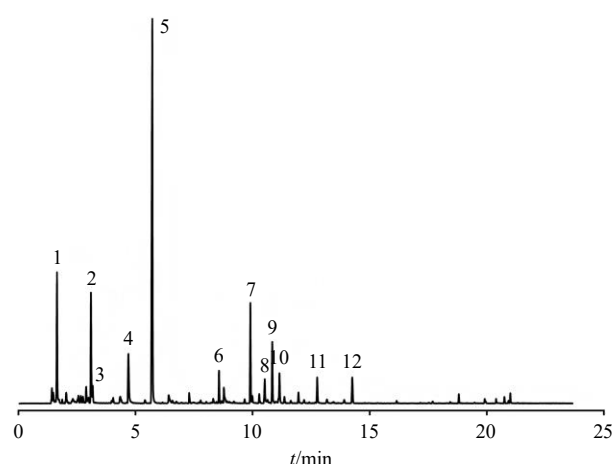
A-阿胶生品和所有程度阿胶珠饮片; B-炮制不及和炮制适中阿胶珠饮片; C-炮制适中和炮制太过阿胶珠饮片。

A-raw Ejiao and Ejiao decoction pieces with all processing degrees; B-under-processed and moderately processed Ejiao decoction pieces; C-moderately processed and over-processed Ejiao decoction pieces.

图 4 不同炮制程度阿胶珠饮片粉末 OPLS-DA 得分图、置换检验图及 VIP 图

Fig. 4 OPLS-DA score plot, permutation test plot and VIP plot of Ejiao decoction piece powders with different processing degrees

现过拟合现象。进一步以 VIP 值 >1 且 $P < 0.05$ 为标准筛选分析各模型，由此推断正己醛、正戊醛、2-庚烯醛、2-正戊基呋喃、叔戊基胺、异戊醇、1-辛烯-3-醇、反-2-辛烯醛、辛醛、壬醛、庚醛 11 个成分可能为区分立阿胶生品粉末和阿胶珠饮片粉末的气味差异标志物；正己醛、正戊醛、2-庚烯醛、2-正戊基呋喃、异戊醇、叔戊基胺、壬醛、庚醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、2-乙基呋喃 11 个成分可能为区分炮制不及与炮制适中阿胶珠饮片粉末的气味差异标志物；正己醛、正戊醛、2-庚烯醛、2-正戊基呋喃、叔戊基胺、异戊醇、反-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、辛醛、2-乙基呋喃、庚醛 12 个成分可能为区分炮制适中与炮制太过阿胶珠饮片粉末的气味差异标志物（均按 VIP 值大小顺序排列）。总离子流色谱图中 12 个气味差异标志物分布见图 5，其中，正己醛、正戊醛、2-正戊基呋喃、异戊醇、反-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、辛醛、庚醛的 ROAV ≥ 1.0 是关键性气味差异物质。



1-叔戊基胺；2-正戊醛；3-2-乙基呋喃；4-异戊醇；5-正己醛；6-庚醛；7-2-庚烯醛；8-1-辛烯-3-醇；9-2-正戊基呋喃；10-辛醛；11-反-2-辛烯醛；12-壬醛。
1-2-methyl-2-butanamine; 2-pentanal; 3-2-ethylfuran; 4-3-methyl-1-butanol; 5-hexanal; 6-heptanal; 7-2-heptenal; 8-1-octen-3-ol; 9-2-n-pentylfuran; 10-octanal; 11-(E)-2-octenal; 12-nonanal.

图 5 总离子流色谱图中 12 个气味差异标志物分布图

Fig. 5 Distribution chart of 12 odor differential markers in total ion current chromatogram

3 讨论

本研究利用 Heracles Neo 超快速气相电子鼻采集阿胶及不同炮制程度阿胶珠饮片的色谱数据并进行 DFA，结果表明电子鼻可快速有效的区分不同炮制程度的阿胶珠。比较 Heracles Neo 超快速气相电子鼻中 2 根不同极性色谱柱所得气味信息，发现

低极性柱（MXT-5）对阿胶中的气味成分分离效果较好且气味信息更丰富，因此，HS-GC-MS 检测时使用 HP-5 ms 毛细管柱，与 MXT-5 柱极性相近。

大量研究结果均表明动物药的腥臭气味集中在醛类、胺类、含硫类，而动物药炮制去腥除臭的物质基础大多归因于动物药中醛类、胺类物质的减少和辅料的“补香掩臭”^[22-25]。但本研究中醛类含量分别呈“逐渐增加”和“先增加后减少”2 种趋势，原因可能是（1）与不同厂家原料的来源和制备工艺有密切关系：阿胶的原料来源和各个厂家的生产工艺可能会影响其挥发性成分的含量；（2）阿胶珠的炮制工艺参数不同：阿胶丁的大小、蛤粉的用量、炮制温度以及炮制时间不同，对醛类成分的生成、分解、转化等过程的影响也各不相同；（3）在复杂的气味体系中，醛类成分浓度的高低会影响其感官气味特征。例如，正己醛、庚醛、反-2-辛烯醛等在低浓度下会散发出令人愉悦的清香和鲜爽气味，而在高浓度下会呈现令人不快的草味或青臭味^[26-27]。本研究中醛类含量增加但感官腥味未增强，可能因浓度仍处于“清香”的阈值范围内。

通过 HS-GC-MS 分析鉴定了阿胶及不同炮制程度阿胶珠饮片中的挥发性气味成分，结果表明在阿胶珠的炮制过程中，酮类、醇类、杂环类、酯类含量多呈上升趋势，含氮类、含硫类化合物含量呈下降趋势，说明阿胶在蛤粉炒制的过程中，增加了多数香气成分，降低了腥臭成分。关键性气味差异物质包括醛类、醇类和杂环类，对区分不同炮制程度阿胶珠有较大贡献。其中，正己醛、正戊醛、2-正戊基呋喃、异戊醇、反-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇的含量随炒制时间的延长而增加，壬醛、辛醛、庚醛的含量呈先增加后减少的趋势，成分的变化可能为阿胶多由胶原蛋白、多肽类物质、多糖类物质及其他小分子物质组成，经蛤粉炒制后出现了不饱和脂肪酸的氧化裂解、氨基酸反应、糖类降解、脂肪的氧化、美拉德反应及氨基酸的热解等现象^[6]。可见，阿胶的物质组成复杂，对于其中相关成分的转化情况以及新成分生成的具体原因，还需要开展更为深入的研究。

综上，本研究为探寻阿胶及不同炮制程度阿胶珠挥发性成分及差异提供了研究数据和方法参考，以期与其他动物药挥发性成分的相关研究提供参考。传统对阿胶珠的研究多集中于炮制工艺优化、化学成分（如氨基酸、多肽）及药效评价，本研究

聚焦于“气味物质”与“炮制程度”的关联性，从感官科学与中药炮制学交叉角度切入，通过联用现代分析技术与化学计量学方法，阐明炒制过程中气味变化规律及物质基础，突破了传统经验性炮制评价的局限性。但本研究在气味物质定量分析方面仍存在局限，采用的面积归一化法仅能获取相对含量，无法精准反映关键性气味差异物质的实际绝对含量。针对该不足，未来研究可对筛选出的关键性气味差异物质，采用内标法等更精准的定量手段开展绝对定量分析，探索炮制程度影响挥发性成分变化的深层规律。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 204.
- [2] Yu X J, Kong L M, Wang B, *et al.* Asini Corii Colla (Ejiao) as a health-care food and traditional Chinese medicine: A review of its chemical composition, pharmacological activity, quality control, modern applications [J]. *J Funct Foods*, 2025, 125: 106678.
- [3] 叶慧, 孙海英, 刘晓华, 等. 中药炮制气味变化及其分析技术研究进展 [J]. *中草药*, 2024, 55(18): 6416-6424.
- [4] 穆传辉, 嵇传良, 段小波, 等. 基于超快速气相电子鼻与 GC-FID/QTOF 联用鉴定阿胶中关键香气化合物的研究 [J]. *皮革科学与工程*, 2025, 35(4): 9-16.
- [5] 随新平, 朱庆珍, 张宁, 等. 阿胶的香气活性物质分析 [J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(3): 89-100.
- [6] 杜莉杰, 张帅, 王计童, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析阿胶、龟甲胶、鹿角胶 3 种动物胶蛤粉烫炮制前后挥发性成分变化 [J]. *中草药*, 2022, 53(4): 1030-1041.
- [7] Yang B, Wang W J, Zhang J N, *et al.* Comparative study on organoleptic properties and volatile organic compounds in turmeric, turmeric essential oil, and by-products using E-nose, HS-GC-IMS, and HS-GC-MS [J]. *Food Chem X*, 2024, 25: 102107.
- [8] Liu X, Liu L X, Xu Q G, *et al.* Comparison of flavor components between normal and gas-producing wasabi based on HS-GC-IMS, HS-GC-MS and electronic sensory technology [J]. *Anal Methods*, 2025, 17(7): 1627-1642.
- [9] 商杰, 彭嘉玉, 郑郁清, 等. 基于电子鼻和 HS-GC-MS 技术结合相对气味活度值分析甘草不同炮制品气味差异及其物质基础 [J]. *中国中药杂志*, 2024, 49(19): 5218-5228.
- [10] 赵元钰, 杨瑞琦, 朱克曜, 等. 基于电子鼻和 HS-GC-MS 技术的当归及其混伪品气味差异分析 [J]. *中国现代中药*, 2025, 27(3): 451-459.
- [11] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV” 法 [J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 370-374.
- [12] Fei C, Xue Q, Li W, *et al.* Variations in volatile flavour compounds in *Crataegi Fructus* roasting revealed by E-nose and HS-GC-MS [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 1035623.
- [13] 邵军强, 戴怡凤, 刘永国, 等. α,β -不饱和 γ -内酯的合成及香气特征研究 [J]. *日用化学工业*, 2013, 43(4): 294-298.
- [14] 王进, 朱建才. 应用 GC-MS/GC-O 法鉴定阿胶关键香气化合物 [J]. *食品工业*, 2016, 37(7): 265-269.
- [15] 范红. 动物药腥臭气物质分析与水蛭炮制矫臭初探 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2023.
- [16] Su D, He J J, Zhou Y Z, *et al.* Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics [J]. *Food Chem*, 2022, 373(Pt B): 131587.
- [17] 荷·里奥·范海默特著. 刘强, 冒德寿, 汤峨译. 化合物香味阈值汇编 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 277-411.
- [18] 余远斌, 舒畅, 肖作兵, 等. GC-MS/GC-O 结合化学计量学方法研究不同产地阿胶的关键香气组分 [J]. *现代食品科技*, 2016, 32(2): 269-275.
- [19] 雷洋. 炒制对燕麦主要功能成分理化特性及挥发性风味物质的影响研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2022.
- [20] 王立磊, 杨艳芹, 谢佳灵, 等. 基于电子鼻与 GC-MS 融合技术的优质红茶和缺陷红茶香气品质评价 [J]. *食品科学*, 2024, 45(2): 274-282.
- [21] 吴怡, 余荷蓉, 聂心如, 等. 基于智能感官技术与多元统计分析的黄芪蜜炙程度快速辨识研究 [J]. *中国中药杂志*, 2024, 49(20): 5451-5459.
- [22] 刘倩, 张定堃, 李雪, 等. 酒醋共制前后美洲大蠊的气味成分与化学成分的变化及炮制矫味机制初探 [J]. *中国药学杂志*, 2023, 58(6): 497-505.
- [23] 叶慧, 张定堃, 韩丽, 等. HS-SPME-GC-MS 结合主观嗅觉评价研究不同批次地龙腥臭气特征性物质基础 [J]. *中成药*, 2023, 45(12): 4150-4155.
- [24] 范红, 张定堃, 叶慧, 等. HS-SPME-GC-MS 分析水蛭不同炮制品的腥臭气物质及去腥矫臭机制 [J]. *中国药学杂志*, 2023, 58(9): 771-785.
- [25] Ye H, Liu X M, Huang H Z, *et al.* An improved technique for trimethylamine detection in animal-derived medicine by headspace gas chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry [J]. *J Vis Exp*, 2023(193): e65291.
- [26] 刘洋, 刘雅芳, 林智, 等. 白茶贡眉的香气组成与关键呈香成分分析 [J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 183-190.
- [27] 尤秋爽, 石亚丽, 朱荫, 等. 加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响 [J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 194-200.

[责任编辑 郑礼胜]