基于电子鼻与 GC-IMS 技术分析不同产地当归对鸡汤风味的影响

高萍[1]，徐培[1,2]，周剑琴[1]，文钰[1]，张凯[1]，唐英明[1,2*]

（1.四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院，四川成都，610100）

（2.川菜人工智能重点实验室，烹饪科学四川省高等学校重点实验室，四川成都 610100）

摘要：为研究不同产地当归对鸡汤风味的影响，以甘肃、四川、云南产的当归熬制鸡汤。采用气相色谱-离子迁移谱（Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy，GC-IMS）技术结合电子鼻检测其挥发性成分并进行对比分析。结果表明，电子鼻主成分分析显示，不同当归之间分布距离较广，风味特征差异性显著，表现为四川>云南>甘肃，电子鼻分析表明 4 个产地的样品差异性明显。GC-IMS 共检测出 73 种挥发性化合物，包括醛类 27 种、萜类 11 种、醇类 10 种、酮类 10 种、酯类 8 种、酸类 2 种、杂环 3 种、苯类 2 种，其中相对含量为醛类 43.73%、萜类 7.66%、醇类 5.29%。采用 OPLS-DA 建模通过置换检验验证其可靠性，并通过变量投影重要性值（VIP）筛选出 15 种关键性物质（醇类 4 种、醛类 4 种、酮类 3 种、萜类 2 种、酯类 1 种、杂环类 1 种）。综上所述，醛类为鸡汤的关键风味物质，其香气具有花香、草香、瓜果香以及其他特殊芳香气。本文旨在对不同产地当归的风味物质分析，为今后药膳汤品开发及应用提供基础理论和支撑依据，为实践提供新的思路和方法。

关键词：当归；药膳鸡汤；电子鼻；气相色谱–离子迁移谱；主成分分析；正交偏最小二乘法判别分析

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0883

Analysis of the Influence of *Angelica sinensis* from Different Regions on the Flavor of Chicken Soup Using Electronic Nose and GC-IMS Techniques

GAO Ping[1], XU Pei[1,2], ZHOU Jianqin[1], WEN Yu[1], ZHANG Kai[1], TANG Yingming[1,2*]

(1.Cuisine Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

(2.Key Laboratory of Artificial Intelligence for Sichuan Cuisine, Culinary Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: To investigate the influence of *Angelica sinensis* from different regions on the flavor of chicken soup, samples were prepared using *A. sinensis* sourced from Gansu, Sichuan, and Yunnan. The volatile compounds were analyzed and compared using Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy (GC-IMS) combined with an electronic nose. Principal component analysis (PCA) of the electronic nose data revealed a wide distribution distance among the different origins, indicating significant differences in flavor characteristics, ranked as Sichuan>Yunnan>Gansu. The electronic nose analysis confirmed that the samples from the three origins exhibited distinct differences. GC–IMS identified a total of 73 volatile compounds, including 27 aldehydes, 11 terpenes, 10 alcohols, 10 ketones, 8 esters, 2 acids, 3 heterocycles, and 2 benzenes, with aldehydes, terpenes, and alcohols accounting for 43.73%, 7.66%, and 5.29% of the relative content, respectively. Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS–DA), validated by permutation testing, was used to identify 15 key compounds based on variable importance in projection (VIP) values: 4 alcohols, 4 aldehydes, 3 ketones, 2 terpenes, 1 ester, and 1 heterocyclic compound. Overall, aldehydes were determined to be the key flavor compounds in chicken soup, contributing floral, herbal, fruity, and other characteristic aromas. This study provides a comprehensive analysis of the flavor compounds in *A. sinensis* from different origins, offering a theoretical basis and

收稿日期：2025-06-26；修回日期：2025-10-06；接受日期：2025-10-15

基金项目：川菜人工智能重点实验室项目（CR24Z01）；四川旅游学院大学生科研项目（2025XKZ21）；川菜人工智能重点实验室项目（CR23Z23）；烹饪科学重点实验室项目（PRKX2022Z14）

作者简介：高萍（2004-），女，本科，研究方向：食品科学，E-mail：3148410045@qq.com

通讯作者：唐英明（1977-），男，本科，讲师，研究方向：食品科学，E-mail：17297811@qq.com

technical support for the development and application of medicinal chicken soups, and introducing new perspectives and methods for practical implementation.

Key words: *Angelica sinensis*; medicinal chicken soup; electronic nose; gas chromatography–ion mobility spectroscopy; principal component analysis; orthogonal partial least squares discriminant analysis

当归（*Angelica sinensis* (Oliv.) Diels），为伞形科草本植物，以干燥根入药，是市场需求旺盛的知名药草。首见于汉代《神农本草经》，又名干归，列于中品[1]，有“补血圣药”之称，在《本草纲目》中，被列为芳草类，性甘、辛、温，归为肝、心、脾经，具有止痛、造血、润肠通便等功效，谚语“十方九归”强调了它在中药方剂中应用的广泛性和重要性[2,3]。当归鸡汤是鸡肉与当归搭配熬制而成具有一定药用价值的药膳汤品，当归独特的香气和滋味会对鸡汤的风味产生影响，其具有滋补功效、补血益气、抗氧化等作用[4]。这不仅实现了中药材与食材的融合，同时还蕴含了深厚的文化底蕴和食疗智慧，充分体现了我国传统的“药食同源”的文化。

目前，国外研究主要集中在鸡汤的基本营养成分、风味物质、感官评价方面，例如，Guan 等[5]研究了烹饪时间对鸡骨架白鸡汤营养迁移的变化，结果表明，鸡骨骼组织中的总脂、水溶性蛋白、总糖等营养物质在加热过程中会迁移到汤中，鸡汤加热 180 min 的总营养成分含量最高。Yue 等[6]研究了酶处理对鸡汤的品质影响，结果表明，在酶解处理前的鸡汤鉴定出 52 个鲜味肽。与 Liao 等[7]研究结果一致，酶解是改善鸡汤风味的有效方法。Rong 等[8]研究不同熬制时间对鸡汤风味的影响，结果表明，熬制 2.5 h 时，鸡汤滋味成分最高，挥发性物质含量最丰富。对于当归鸡汤这种药膳类汤品的研究较少，在国外应用并不广泛，其独特的风味和功效尚未引起关注。

国内对当归的研究涵盖化学成分、药理作用、炮制方法等多个方面。现研究表明，当归中含有多糖、挥发油、阿魏酸等多种化学成分[9]，这些化学成分赋予了当归多种药理作用，如改善造血功能、调节免疫力、润肠通便等[10]。近年来，随着人们生活水平的提升，对健康饮食的关注度不断提高，药膳当归鸡汤逐渐受到消费者的青睐。在当归鸡汤的研究方面，已有学者对其制作工艺进行研制优化，毕宇等[11]通过单因素试验和正交实验等方法，确定了当归鸡汤的最佳制作工艺。

风味物质是决定食品品质的和消费者接受程度的关键因素之一。然而，不同产地当归鸡汤的风味物质研究相对匮乏，对其风味特征的认识还不够深入。行业中当归产地多样，四川、云南、甘肃产当归因在药膳中常见用量广被广泛采用，但其炖制风味差异鲜受关注。本文采用 GC-IMS 结合电子鼻（Electronic Nose）技术，前者准确地鉴定挥发性风味物质的种类及含量，后者快速、客观地评价当归鸡汤的整体气味特征[12]，旨在明确产地差异、找寻最适炖制鸡肉的当归，为药膳汤品开发及应用提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

黄油母鸡，湘佳品牌（永辉超市购入）；矿泉水，农夫山泉；甘肃（岷县）当归，养年华品牌（京东超市购入）；四川（双流）当归，北京同仁堂品牌（京东超市购入）；云南（鹤庆）当归，北京同仁堂品牌（京东超市购入）。

1.2 主要仪器设备

A6-001 型电子天平，浙江纪铭科技有限公司；MC-HX2227 电磁炉，美的集团有限公司；FOX400 电子鼻，法国 Alpha Mos 公司；FlavourSpec®-GC-IMS 联用仪，德国 GAS 公司；湘玻气相色谱 20 mL 顶空瓶，湖南比克曼生物科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将鸡肉洗净，切成 2 cm 大小的块，随机分成 4 组，每组 300 g。样品 A 添加云南当归、样品 B 添加四川当归、样品 C 添加甘肃当归、样品 D 为参照组不加药材。

制作过程：将当归 4 g 清洗干净，用水浸泡 15 min。姜切片，葱切段备用；锅中烧水，将鸡肉放入锅中焯水 1 min，然后清洗干净。焯水后按鸡肉与矿泉水质量比为 1:3 放入锅中，并加入姜 2 g、葱 2 g、当归（分别是甘肃、

四川、云南）烧开后，改小火保持微沸，熬 60 min；最后，4 个样品加入盐 2 g 调味；将炖煮完成的 4 个样品去掉表面油脂，装入塑封盒，分别取样编号待检。

1.3.2 电子鼻分析

参考杨柳青等[13]方法稍作调整，每组称取样品各 5 g 于 10 mL 顶空瓶中，进行密封，编号待检；顶空温度 70℃，孵化 300 s；载气流量 150 mL/s；进样体积 1.00 mL；进样速度 1.00 mL/s；数据采集时间为 120 s；数据采集延迟 180 s；各样品平行 10 次，取 3 次传感器在 120 s 时的稳定信号进行分析。各传感器对应的敏感物质类型见表 1[14]。

表 1 传感器对应敏感物质类型

Table 1 Sensors correspond to the type of sensitive substances

序号	传感器名称	敏感物质类型
1	LY2/LG	氯、氟、氮氧化合物、硫化物
2	LY2/G	氨、胺类化合物、氮氧化合物
3	LY2/AA	乙醇、丙酮、氨
4	LY2/Gh	氨、胺类化合物
5	LY2/gCTI	硫化物
6	LY2/gCT	丙烷、丁烷
7	T30/1	极性化合物、氯化氢
8	P10/1	非极性、碳氢化合物、氨、氯
9	P10/2	非极性；甲烷、丁烷
10	P40/1	氟、氯
11	T70/2	甲苯、二甲苯、一氧化碳
12	PA/2	乙醇、氨水、胺类化合物
13	P30/1	碳氢化合物、氨、乙醇
14	P40/2	氯、硫化氢、氟化物
15	P30/2	硫化氢、铜
16	T40/2	氯
17	T40/1	氟
18	TA/2	乙醇

1.3.3 气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）技术

参考刘彩玲[15]等方法稍作修改，选用 FlavourSpec®风味分析仪系统分析不同产地的当归鸡汤中的挥发性物质。每组样品分别称量 5.00 g 汤汁于 20 mL 顶空瓶中，立即用带有聚四氟乙烯涂层的盖子进行密封，待测。每个样品平行 3 次。

进样条件：孵育温度 80 ℃，孵育时间 15 min，进样针 65 ℃顶空自动进样 500 μg.g^{-1}，转速 500 r/min。

分析条件：使用 MXT-5 金属毛细管气相色谱柱（15 m×0.53 mm×1 μm），气相色谱柱温 60 ℃。载气/漂移气为 N_2（纯度≥99.999%）。载气程序：初始流量 2 mL/min，保持 2 min，18 min 内流速升至 100 mL/min，保持 30 min。漂移气流量为 150 mL/min；IMS 温度 45 ℃。

数据分析：使用仪器配套的分析软件，采用内置的 GC×IMS Library Search 软件中的 NIST 质谱数据库和 IMS 数据库中标准化合物进行定性分析，通过匹配保留时间、离子迁移率等确定当归鸡汤中的挥发性物质的种类[16]。

1.4 数据处理

借助 Microsoft Office Excel 2021 进行数据处理；借助 DC-IMS 系统内的自带软件 VOCal 基于保留时间、迁移时间这两项关键指标，从而完成对挥发性物质的定性分析；GC-IMS 系统的内置 Reporter、Gallery Plot 等插件具备自动处理数据的能力，可以生成挥发性化合物的二维谱图、三维谱图、差异谱图、指纹谱图；借助 SIMCA14.1 软件制作 PCA、OPLS-DA、VIP 值；借助 OriginPro2024 软件制作雷达图、聚类热图；化合物查找网站 http://www.ichemistry.cn/。

2 结果与分析

2.1 不同产地当归熬制的鸡汤电子鼻分析

通过电子鼻分析当归鸡汤的气味指纹图谱，结果见图 1。图中为不同产地当归熬制的鸡汤对电子鼻传感器响应信号强度大小，除 LY2/LG、LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCTI 和 LY2/gCT 对传感器信号强度差异均不明显，其余 12 个传感器信号强度差异相对明显。其中 T70/2 信号响应强度大小顺序为：B>A>D>C；其中 TA/2、T40/1、T40/2、P30/2、P40/2、P30/1、PA/2、T70/2、P40/1、P10/2、P10/1、T30/1 信号响应强度顺序为：B>D>A>C。表 1 列出了传感器敏感物质类型有 18 个，将其结合图 1 可知，TA/2、T40/1、T40/2、P30/2、P40/2、P30/1、PA/2、T70/2、P40/1、P10/2、P10/1、T30/1 传感器对极性物质、非极性物质（碳氢化合物、氨、氯）、芳香类（甲苯、二甲苯）、氯类及胺类等物质敏感，表明 4 个产地的样品在以上物质类型方面差异性明显，反之，剩下的传感器对碳氧化合物、硫化物、胺类化合物、氨、丁烷、丙酮等敏感类物质无明显差异，表明 4 个产地的样品在以上部分物质类型方面差异性明显。

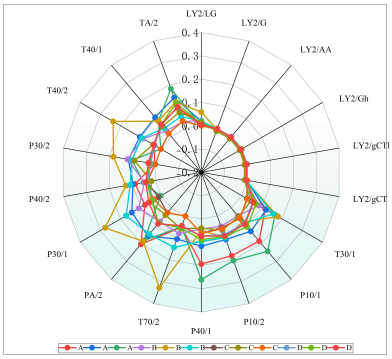
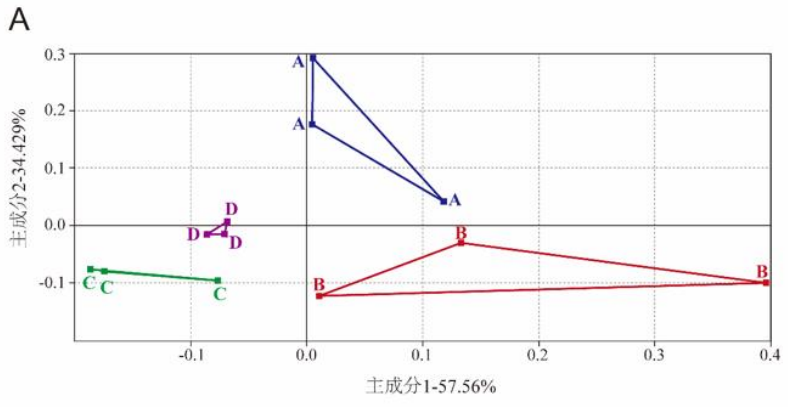


图 1 当归鸡汤电子鼻雷达图

Fig.1 Angelica Chicken Soup Electronic Nose Radar Map

采用主成分分析方法对 4 种不同产地的当归鸡汤样品挥发性风味物质进行分析，结果见图 2A、B 所示。在图 2A，PCA 模型第一主成分（57.56%）和第二主成分（34.429%）两者累计贡献率为 92%，大于 80%，表明主成分可以反映各样品的香气整体信息[16]。图 2B 是采用 SIMCA14.1 软件对不同产地当归鸡汤样品检测的数据绘制的 PCA 图。根据图 2AB 可知，不同产地的当归熬制的鸡汤气味能有效辨别，说明 4 种不同产地的当归熬制的鸡汤的香气存在显著差异。第一主成分贡献率大于第二主成分贡献率，表明样品在横坐标距离越大，差异性就越大。根据图 2AB 可知，横坐标顺序由左至右分别 C、D、A、B，样品 D 在第二象限各平行之间分布较近，说明其具有一定的重复性；样品 A 在第一象限各平行之间分布距离相近，说明具有一定的稳定性；样品 C 在第三象限两样品分布距离较近，但其中一个样品分布较远，说明该样品存在一定的差异；样品 B 在第四象限各平行之间分布距离较广，说明其差异性大。4 组样品 A、B、C、D 分布距离较远，说明该 4 组香气特征差异较大。样品 D 组间分布较近，呈三角形，相较于其他加入当归的样品相对于稳定，说明当归的加入对鸡汤的风味具有一定的影响。



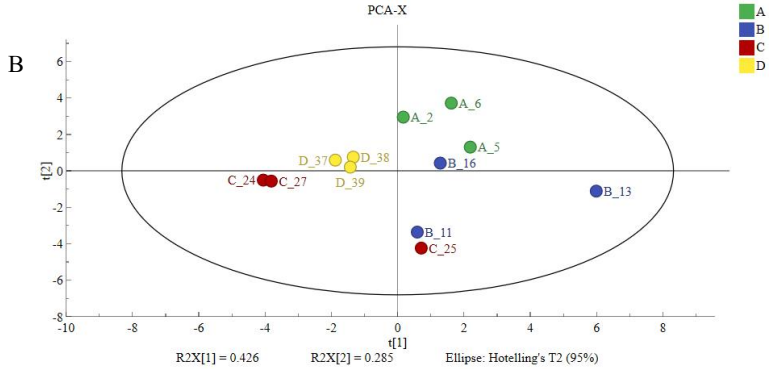
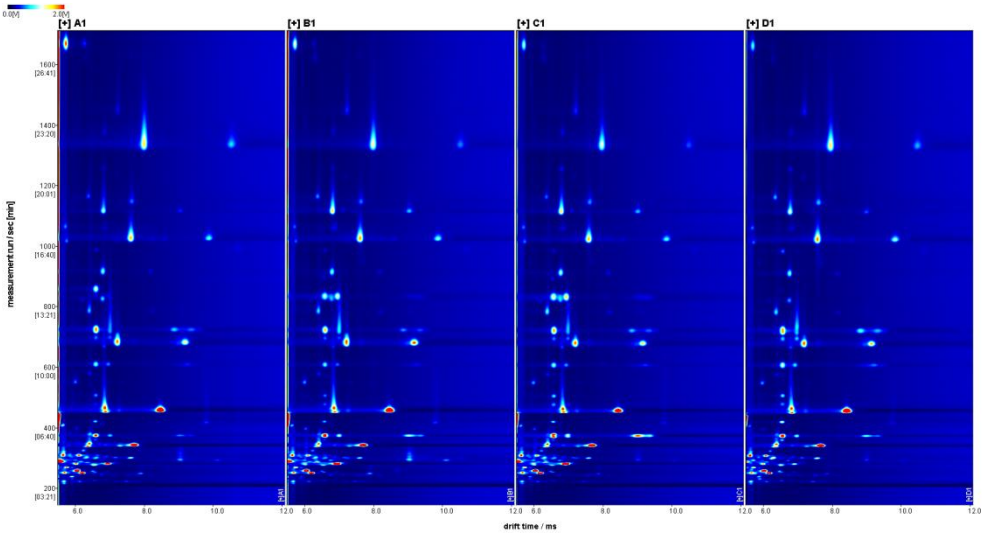


图 2 当归鸡汤电子鼻的主成分分析（PCA）二维图

Fig.2 Two-dimensional diagram of main component analysis (PCA) of angelica chicken soup electronic nose

2.2 不同产地当归熬制的鸡汤 GC-IMS 分析

2.2.1 不同产地当归熬制的鸡汤的挥发性成分对比分析



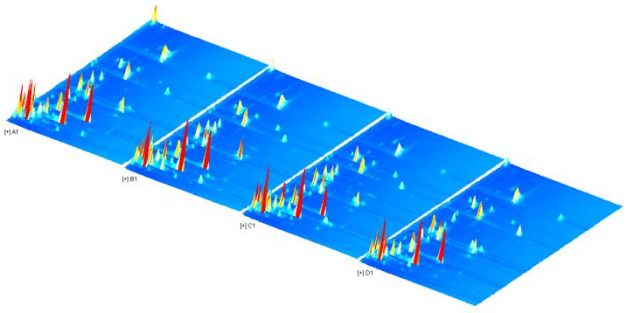


图 3 不同产地当归熬制的鸡汤 GC-IMS 二维及三维立体谱图

Fig.3 GC-IMS Two-dimensional and three-dimensional stereoscopic spectrum of chicken soup made from angelica from different places of origin

注：A-云南当归熬制的鸡汤；B-四川当归熬制的鸡汤；C-甘肃当归熬制的鸡汤；D-无当归熬制的鸡汤（参照样）。

如图 3 是不同产地熬制的鸡汤的挥发性风味物质成分二维谱图，借助 GC-IMS 技术，可以直观剖析样品中的

不同成分，从而对该成分进行定性分析。在以上谱图中，每一个点均对应一种化合物，颜色代表其化合物的信号强度[16]。部分化合物会出现两个甚至更多的点，这些点分别代表着相应化合物的二聚体或多聚体。从颜色与含量来看，根据谱图中点呈现出颜色的深度可以直观反映出该物质的含量，颜色越深，说明该物质的含量就越高[19]。见图 3，不同产地的当归熬制的鸡汤的挥发性成分有明显差异。

利用 VOCal 软件内置的插件制作出不同产地当归熬制的鸡汤样品的挥发性风味物质差异图谱（见图 4），横轴坐标为离子迁移时间，纵轴坐标为保留时间，以未添加当归组 D 作为参照图谱，颜色表示化合物浓度的信号强度，将背景颜色显示为白色，若图谱中呈现出蓝色，说明该物质浓度下降，若图谱中呈现为红色，说明该物质的浓度上升[20]。图 4 中挥发性化合物的颜色可以直观反映出信号峰的强度，判断其该-挥发性物质成分在各样品中的含量，颜色越淡表明该化合物的相对含量低，反之，颜色越浓代表该化合物的含量越高。根据图 4 上方红色方框标注来看，表明该物质浓度含量多少顺序为：A>B>D>C；根据中间的红色方框标注来看，该物质浓度含量多少顺序为：C>B>A>D；根据下方的红色方框标注来看，该物质浓度含量多少顺序为：B>A>C>D。根据差异图谱，可以直观地进行对比不同产地当归熬制出的鸡汤挥发性风味物质成分的差异。随着保留时间及迁移时间，图 A、B、C 三个样品的蓝色点面积逐渐减少，表明不同产地当归熬制的鸡汤挥发性风味物质的成分相对含量的差异也逐渐变小。综合分析认为：B＞A＞C＞D（参照组不参与讨论），总的来看：样品呈现 B＞A＞C，即四川＞云南＞甘肃。四川当归炖制后鸡汤呈现清甜中带有淡淡药香的复合风味；云南当归炖制后的鸡汤的药香更为醇厚，辛香突出；甘肃当归炖制后的鸡汤药香浓郁不刺鼻，呈现淡淡木质香和甜香风味。

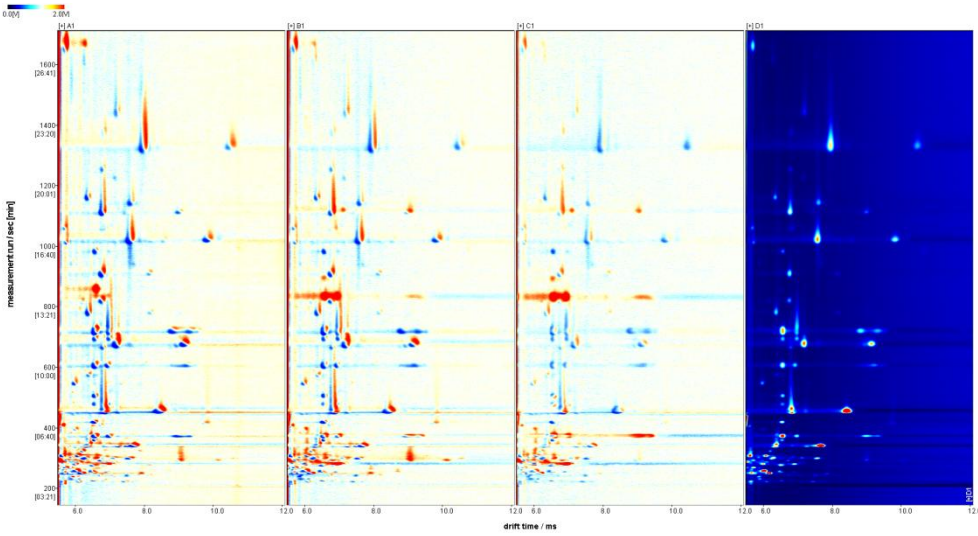


图 4 不同产地当归熬制的鸡汤挥发性风味物质差异对比图

Fig.4 Comparison of the differences in volatile flavor substances of chicken soup boiled with angelica from different origins

2.2.2 同产地当归熬制的鸡汤的挥发性风味物质定性

由表 2 可知，表 2 列出了定性的挥发性化合物的名称、CAS 号、保留指数、保留时间、迁移时间及对挥发性物质进行分类并计算出各样品的相对含量。GC-IMS 检测技术在不同产地当归熬制的鸡汤共检测出 73 种挥发性物质，其中包括醛类 27 种，萜类 11 种、醇类 10 种、酮类 10 种、酯类 8 种、苯类 2 种、酸类 2 种、杂环 3 种，其中相对含量为醛类 43.73%、萜类 7.66%、醇类 5.29%、酮类 2.88%、酯类 1.81%、苯类 0.98%、酸类 2.22%、杂环类 1.32%。其中糖醛、正己醛、正辛醛、苯甲醛与已有研究者通过气相色谱-嗅觉-质谱法（Gas Chromatography-Olfactometry-Mass Spectrometry，GC-O-MS）在鸡汤中检测出多个相同物质[21]。结果表明，当归鸡汤的主要化合物是醛类，是鸡汤的关键风味物质，对鸡汤风味的构成起到不可替代的作用[22]，醛类是由不饱和脂肪酸的氧化或食品中的脂质的热氧化分解而成的，四川当归熬制的鸡汤醛类相对含量均高于其他类，具有一定的花香、瓜果香气、青草味[23]。不同产地当归熬制的鸡汤在 73 种挥发性化合物的含量方面存在显著差异（P<0.05），表明不同产地的当归可能对风味物质组成和含量分布产生重要影响。

表 2 不同产地当归熬制的鸡汤 GC-IMS 定性、定量结果

Table 2 GC-IMS qualitative and quantitative results of chicken soup boiled with angelica from different origins

类别	名称	CAS#	保留指数 RI	保留时间 Rt/s	迁移时间 Dt/a.u	样品（相对含量%） A	B	C	D	气味描述
醛类	糠醛	C98011	1442	1459.078	1.33763	0.25±0.01^{b}	0.32±0.03^{a}	0.35±0.01^{a}	0.35±0.01^{a}	有苯醛的气味
	壬醛-M	C124196	1409.7	1362.131	1.47982	3.17±0.64^{a}	2.79±0.18^{a}	2.98±0.66^{a}	3.57±0.24^{a}	具有强烈的油脂气味和甜橙气息
	壬醛-D	C124196	1402.4	1340.417	1.94053	0.74±0.34^{a}	0.54±0.09^{a}	0.79±0.58^{a}	0.9±0.09^{a}	具有强烈的油脂气味和甜橙气息
	(E)-2-庚烯醛-M	C18829555	1332.6	1131.06	1.25788	1.33±0.06^{c}	1.96±0.04^{a}	1.85±0.21^{a}	1.57±0.03^{b}	具有脂芳香
	(E)-2-庚烯醛-D	C18829555	1328.3	1118.353	1.66385	0.22±0.01^{c}	0.47±0.07^{b}	0.42±0.09^{b}	0.3±0.01^{c}	具有脂芳香
	正辛醛-M	C124130	1300.7	1035.429	1.40957	3.8±0.17^{a}	3.65±0.17^{a}	3.91±0.65^{a}	4.16±0.12^{a}	ND
	正辛醛-D	C124130	1298.7	1029.601	1.82204	0.93±0.18^{a}	0.94±0.14^{a}	1.35±0.8^{a}	1.3±0.10^{a}	ND
	(E)-2-己烯醛-M	C6728263	1225	790.667	1.17959	0.87±0.04^{bc}	0.86±0.02^{c}	1.04±0.07^{a}	0.94±0.02^{b}	具有新鲜的绿叶香味
	(E)-2-己烯醛-D	C6728263	1225	790.667	1.51456	0.08±0.01^{b}	0.08±0.01^{b}	0.11±0.01^{a}	0.09±0.00^{b}	具有新鲜的绿叶香味
	庚醛-M	C111717	1192.5	684.937	1.33519	3.04±0.12a	3.01±0.18a	3.04±0.19a	3.13±0.13a	有果子香味
	庚醛-D	C111717	1192.5	684.937	1.69702	1.46±0.26^{a}	1.6±0.42^{a}	1.9±0.60^{a}	1.79±0.10^{a}	有果子香味
	反式-2-戊烯醛-M	C1576870	1135.5	554.231	1.11407	0.31±0.04^{a}	0.32±0.02^{a}	0.36±0.02^{a}	0.37±0.00^{a}	土豆，豌豆
	反式-2-戊烯醛-D	C1576870	1133.9	550.658	1.36413	0.06±0.01^{b}	0.05±0.01^{ab}	0.05±0.00^{ab}	0.06±0.01^{a}	土豆，豌豆
	正己醛-M	C66251	1097.8	468.154	1.2624	5.28±0.13^{a}	5.08±0.05^{a}	4.81±0.35^{a}	5.17±0.18^{a}	有醛的气味
	正己醛-D	C66251	1093.1	461.683	1.56104	6.43±0.61^{a}	5.21±1.06^{ab}	4.98±1.00^{ab}	6.25±0.72^{b}	有醛的气味
	正戊醛-M	C110623	998.6	346.421	1.18527	2.53±0.09^{a}	2.3±0.10^{a}	2.29±0.11^{a}	2.57±0.11^{a}	有特殊香味的浸透性液体
	正戊醛-D	C110623	997	344.399	1.42156	4.82±0.07^{a}	4.52±0.13^{b}	4.23±0.66^{b}	4.8±0.04^{a}	有特殊香味的浸透性液体
	2-甲基丁醛-M	C96173	928.4	304.341	1.1718	0.63±0.02^{a}	0.63±0.07^{a}	0.59±0.03^{a}	0.98±0.02^{a}	ND
	2-甲基丁醛-D	C96173	925.3	302.559	1.40623	0.65±0.04^{b}	0.55±0.08^{b}	0.4±0.10^{b}	0.73±0.01^{a}	ND
	乙缩醛	C105577	900.5	288.3	1.1353	0.23±0.03^{ab}	0.19±0.01^{b}	0.18±0.04^{c}	0.17±0.01^{a}	具有刺激性气味
	2-甲基丁醛	C96173	899	287.409	1.1718	0.27±0.01^{a}	0.43±0.04^{ab}	0.36±0.07^{b}	0.07±0.00^{b}	具有果香味
	丁醛-M	C123728	892.2	283.548	1.11425	1.37±0.14^{b}	1.11±0.09^{a}	1.22±0.10^{a}	1.18±0.07^{c}	有窒息性醛味
	丁醛-D	C123728	890.7	282.656	1.2827	2.64±0.11^{a}	5.18±0.24^{b}	4.5±0.81^{ab}	0.86±0.02^{ab}	有窒息性醛味
	丙烯醛	C107028	838	252.358	1.04812	1.26±0.04^{b}	1.33±0.13^{a}	1.29±0.06^{a}	1.25±0.03^{c}	ND
	丙醛-M	C123386	789.8	224.664	1.04362	0.63±0.1^{a}	0.56±0.06^{a}	0.52±0.08^{a}	0.62±0.07^{a}	有窒息性刺激气味
	丙醛-D	C123386	788.7	224.048	1.13457	0.17±0.02^{a}	0.16±0.01^{a}	0.14±0.02^{a}	0.18±0.01^{a}	有窒息性刺激气味
	苯甲醛	C100527	1496.4	1622.2	1.16294	0.18±0.01^{a}	0.25±0.01^{ab}	0.23±0.01^{b}	0.22±0.01^{a}	具有苦杏仁味
醇类	反式-3-己烯-1-醇	C928972	1376.4	1262.502	1.25785	0.13±0.01^{c}	0.14±0.01^{a}	0.19±0.00^{ab}	0.16±0.01^{b}	具有清新、自然的青香气味
	正戊醇-M	C71410	1266	923.871	1.24958	1.09±0.05^{c}	1.05±0.05^{c}	1.32±0.09^{a}	1.22±0.03^{b}	有温和的特殊气味
	正戊醇-D	C71410	1264.2	918.043	1.50456	0.14±0.01^{c}	0.12±0.01^{c}	0.17±0.03^{b}	0.14±0.00^{b}	有温和的特殊气味
	正丁醇	C71363	1147.9	582.537	1.19448	0.18±0.01^{ab}	0.21±0.03^{b}	0.37±0.32^{a}	0.17±0.00^{ab}	具有如酒的特殊香味
	2-戊醇	C6032297	1115.3	508.193	1.21645	0.39±0.05^{a}	0.35±0.05^{a}	0.46±0.02^{a}	0.46±0.07^{a}	ND
	丙醇	C71238	1042.7	400.21	1.11471	0.12±0.00^{ab}	0.2±0.02^{b}	0.31±0.23^{a}	0.1±0.01^{a}	有类似乙醇的气味
	乙醇-M	C64175	946.3	314.627	1.04581	1.48±0.02^{a}	1.44±0.11^{a}	1.49±0.07^{a}	1.88±0.10^{a}	有酒的气味和刺激性辛辣味
	乙醇-D	C64175	940.4	311.253	1.12847	0.99±0.09^{b}	0.99±0.08^{b}	1.15±0.38^{b}	1.18±0.06^{a}	有酒的气味和刺激性辛

										辣味
	异丙醇-D	C67630	938.7	310.282	1.23216	0.16±0.01^{a}	0.13±0.01^{a}	0.12±0.02^{a}	0.07±0.01^{a}	有类似乙醇的气味
	异丙醇-M	C67630	939.3	310.579	1.08056	0.26±0.01^{a}	0.24±0.02^{b}	0.22±0.01^{b}	0.2±0.02^{c}	有类似乙醇的气味
	甲基庚烯酮	C110930	1345.6	1170.088	1.18297	0.25±0.01^{a}	0.34±0.04^{ab}	0.28±0.02^{bc}	0.41±0.02^{c}	具有水果香气和新鲜清香香气
	3-羟基-2-丁酮	C513860	1312.6	1071.156	1.05731	0.38±0.03^{c}	0.36±0.02^{b}	0.35±0.03^{c}	0.37±0.03^{a}	黄油味，奶油味
	1-辛烯-3-酮	C4312996	1308.1	1057.542	1.26513	0.15±0.01^{a}	0.21±0.03^{a}	0.18±0.04^{a}	0.19±0.01^{a}	ND
	羟基丙酮	C116096	1286.7	991.305	1.21709	0.16±0.01^{b}	0.16±0.03^{a}	0.14±0.00^{ab}	0.26±0.02^{ab}	ND
	2-庚酮	C110430	1187.6	673.282	1.25479	0.43±0.03^{b}	0.4±0.01^{b}	0.49±0.02^{b}	0.55±0.03^{a}	具有特殊的香气
酮类	2-己酮	C591786	1049.7	408.703	1.20168	0.04±0.00^{c}	0.02±0.00^{c}	0.02±0.00^{b}	0.02±0.00^{a}	ND
	1-戊烯-3-酮	C1629589	1028.8	383.224	1.08518	0.12±0.01^{c}	0.11±0.01^{c}	0.11±0.01^{b}	0.1±0.00^{a}	呈香辣、醚香、胡椒、大蒜、芥菜、洋葱等强烈刺激性气味
	4-甲基-2-戊酮	C108101	1026.8	380.797	1.18691	0.79±0.04^{a}	0.73±0.03^{b}	0.66±0.06^{bc}	0.67±0.01^{c}	酮样香味
	2-丁酮-M	C78933	910.3	293.927	1.25121	0.1±0.02^{a}	0.28±0.05^{ab}	0.18±0.04^{b}	0.14±0.01^{b}	有丙酮的气味
	2-丁酮-D	C78933	911	294.352	1.0589	0.29±0.03^{c}	0.31±0.04^{a}	0.31±0.02^{b}	0.44±0.01^{bc}	有丙酮的气味
	γ-松油烯	C99854	1247.8	864.762	1.22458	1.98±0.25^{b}	0.76±0.02^{b}	0.56±0.10^{b}	0.35±0.00^{a}	具有柑橘和柠檬香气
	双戊烯	C138863	1204	722.4	1.21959	2.5±0.17^{a}	2.21±0.21^{b}	2.2±0.11^{bc}	2.48±0.08^{c}	有好闻的柠檬香味
	桉叶油素-D	C470826	1205.6	727.395	1.73471	0.38±0.04^{a}	0.32±0.05^{a}	0.29±0.02^{a}	0.44±0.01^{a}	具有樟脑样香气和清凉味道
	桉叶油素-M	C470826	1206.6	730.726	1.29248	1.28±0.08^{b}	1.7±0.25^{c}	1.34±0.09^{c}	1.78±0.13^{b}	具有樟脑样香气和清凉味道
	双戊烯-M	C138863	1197.6	701.587	1.21207	0.38±0.03^{b}	0.4±0.05^{a}	0.4±0.01^{b}	0.53±0.04^{a}	柠檬香
萜类	双戊烯-D	C138863	1197.1	699.922	1.28996	0.14±0.02^{b}	0.18±0.05^{b}	0.2±0.02^{b}	0.3±0.02^{a}	柠檬香
	月桂烯-M	C123353	1161	612.507	1.21961	1.06±0.07^{b}	0.98±0.11^{b}	0.96±0.02^{b}	1.22±0.04^{a}	具有愉快的、清淡的香脂味
	月桂烯-D	C123353	1160.6	611.675	1.70958	0.21±0.02^{b}	0.22±0.03^{b}	0.22±0.02^{b}	0.34±0.06^{a}	具有愉快的、清淡的香脂味
	β-蒎烯	C127913	1102.9	479.883	1.21809	0.2±0.01^{b}	0.29±0.04^{b}	0.36±0.03^{b}	0.31±0.05^{a}	具有树脂和松脂香气
	2-蒎烯-M	C80568	1022.8	375.944	1.22137	1.86±0.11^{c}	2.47±0.13^{b}	2.63±0.12^{a}	2.23±0.09^{ab}	ND
	2-蒎烯-D	C80568	1022.8	375.944	1.73334	0.13±0.02^{c}	0.35±0.04^{a}	0.65±0.05^{a}	0.22±0.04^{b}	ND
	丙酸正丙酯	C106365	1062	423.667	1.21481	0.4±0.04^{d}	0.37±0.05^{b}	0.37±0.03^{a}	0.6±0.08^{c}	ND
	乙酸丁酯	C123864	1053.4	413.152	1.24927	0.07±0.00^{b}	0.06±0.00^{b}	0.05±0.01^{b}	0.05±0.00^{a}	具有愉快水果香味
	正丙酸乙酯-M	C105373	965.7	325.795	1.15049	0.29±0.02^{a}	0.22±0.03^{b}	0.23±0.01^{b}	0.25±0.01^{b}	有菠萝香味
酯类	正丙酸乙酯-D	C105373	965	325.391	1.45397	0.05±0.00^{a}	0.03±0.01^{b}	0.03±0.00^{b}	0.03±0.00^{b}	有菠萝香味
	乙酸甲酯	C79209	870	270.775	1.02977	0.1±0.00^{a}	0.09±0.00^{b}	0.09±0.02^{b}	0.12±0.01^{b}	具有芳香味
	乙酸乙酯	C141786	867.4	269.289	1.09186	0.1±0.01^{b}	0.1±0.01^{b}	0.09±0.01^{b}	0.09±0.00^{a}	具有水果香味
	甲酸乙酯	C109944	836.4	251.466	1.21038	0.04±0.01^{a}	0.03±0.00^{a}	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	有好闻的芳香味
	庚酸乙酯	C106309	1338.2	1147.913	1.41678	0.71±0.05^{a}	0.76±0.07^{a}	0.79±0.05^{a}	0.97±0.04^{a}	具有菠萝的香气
苯类	正丙苯-M	C103651	1236	826.466	1.15209	0.12±0.02^{b}	0.15±0.02^{b}	0.17±0.02^{b}	0.09±0.01^{a}	ND
	正丙苯-D	C103651	1236	826.466	1.25458	0.61±0.04^{bc}	1.19±0.18^{ab}	1.19±0.16^{a}	0.38±0.03^{c}	ND
酸类	乙酸-M	C64197	1511.2	1666.469	1.06035	2.95±0.39^{a}	2.17±0.1^{b}	1.72±0.15^{c}	1.6±0.07^{c}	有刺激性气味
	乙酸-D	C64197	1512.5	1670.372	1.15949	0.19±0.04^{a}	0.11±0.01^{b}	0.08±0.01^{bc}	0.07±0.00^{c}	有刺激性气味
杂环	四氢呋喃	C109999	870	270.775	1.06082	0.88±0.02^{a}	0.73±0.03^{b}	0.67±0.11^{b}	0.75±0.04^{b}	有乙醚气味
	四氢吡咯	C123751	1009.9	360.172	1.0458	0.39±0.01^{a}	0.36±0.02^{a}	0.37±0.01^{a}	0.37±0.03^{a}	有特殊气味

类	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	C25773404	1418.1	1387.369	1.24861	0.18±0.01[a]	0.17±0.01[a]	0.21±0.04[a]	0.19±0.01[a]	具有豌豆清香和格蓬的膏香

注：“ND”表示未查到，香气描述来源于 http://www.ichemistry.cn/网站；M 表示单聚体、D 表示二聚体，表中各样品组的小写字母表示为差异显著（P<0.05）。

2.2.3 同产地当归熬制的鸡汤挥发性成分指纹图谱分析

如图 5 可以看出，A-D 样品中相同的挥发性成分及相对含量较稳定的物质有正己醛、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、3-羟基-2-丁酮、2-庚酮、1-辛烯-3-酮、2-蒎烯、正戊醛、双戊烯、正辛醛、庚醛、丙烯醛、反式-2-戊烯醛、四氢吡咯、3-羟基-2-丁酮等，表明 A-D 样品都具有一定豌豆的清香、果香及奶油味；A 样品中异丙醇、1-戊烯-3-酮、乙酸丁酯、丙醛、正丙酸乙酯、丁醛、异丙醇、乙缩醛、2-甲基丁醛、乙酸甲酯、丙醛、桉叶油素、反式-2-戊烯醛、甲酸乙酯、四氢呋喃、乙酸、丁醛、正丙酸乙酯、γ-松油烯的含量较高；B 样品中糠醛、苯甲醛、桉叶油素、双戊烯、(E)-2-庚烯醛、2-丁酮、2-甲基丁醛、丁醛的含量较高；C 样品中 2-甲基丁醛、丁醛、(E)-2-庚烯醛、2-蒎烯、正丙苯、(E)-2-己烯醛、反式-3-己烯-1-醇、反式-2-戊烯醛、2-戊醇、正戊醇、正戊醇、正辛醛、壬醛、乙醇、庚醛、丙醇、正丁醇的含量较高；D 样品中有 2-甲基丁醛、乙酸甲酯、丙醛、桉叶油素、甲基庚烯酮、乙醇、壬醛、月桂烯、庚酸乙酯、双戊烯、2-蒎烯、羟基丙酮、丙酸正丙酯、2-丁酮、正丙苯、4-甲基-2-戊酮的含量较高。如图 5，样品 A(云南)、样品 B（四川）、样品 C（甘肃）组醛类、醇类、酯类及其他类均高于样品 D（对照组），

表明不同产地当归的添加鸡汤的风味有相应的变化，主要的香气来源于醛类，由于脂质氧化和降解，油酸会产生庚醛、辛醛、壬醛等化合物，从而产生带有青草和脂肪味的香气[24,25]。根据指纹图谱可以看出对照组的鸡汤，在熬制过程中醛类、酯类、醇类、萜类、酮类的相对含量较高，其中酮类化合物较多，酮类源于美拉德反应，酮类化合物在高温下易与其他羰基化合物发生缩合反应，生成烯酮或二酮化合物，这类物质对鸡汤中的油脂香气有一定贡献；当归的加入使鸡汤中的醛类、醇类、酯类含量增加，其中酯类是鸡汤中的酮类在加热过程可能会发生氧化反应生成羧酸，与鸡汤中游离的醇类发生酯化反应，生成酯类，这类物质具有果香或花香。4 个样品组中相同的挥发性化合物及相对含量较稳定的还有杂环类化合物，它的生成只要来源于食材中含碳、氧、硫等元素的小分子成分，在高温下发生一系列化学反应，如 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪是鸡汤等肉类熬煮中产生的典型含氮杂环化合物，其生成与美拉德反应有关，具有豌豆的清香。通过不同产地当归鸡汤挥发性风味成分指纹图谱分析，发现不同产地当归鸡汤的挥发性风味成分差异明显，可为其选择产地提供理论依据。

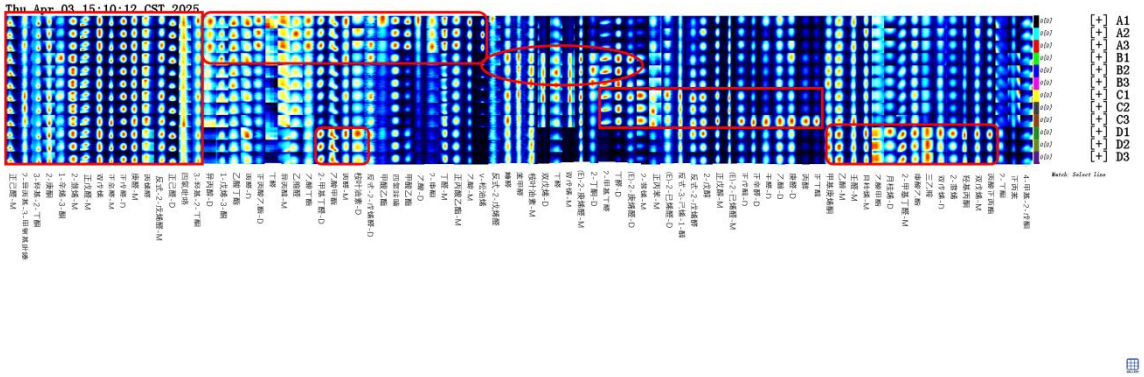


图 5 不同产地当归熬制的鸡汤挥发性成分指纹图谱

Fig.5 Fingerprint map of volatile ingredients of chicken soup boiled with angelica from different origin

注：A-云南当归熬制的鸡汤；B-四川当归熬制的鸡汤；C-甘肃当归熬制的鸡汤；D-无当归熬制的鸡汤（参照样）。

2.2.4 不同产地当归熬制的鸡汤 GC-IMS 主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）

为展示不同产地当归熬制的鸡汤样品间的挥发性风味物质种类的差异，进行了 PCA 分析，结果见图 6。图 6 为不同产地当归熬制的鸡汤样品间的差异，图中椭圆为 Hotelling’s T2（95%）置信间，反映了各样品数据的离散程度。从图 6 可看出，样品 D（对照组，黄色）与添加当归的鸡汤样品明显分开，说明其当归的添加在一定程度上改变了鸡汤的挥发性化合物的组成。在添加不同产地的当归样品中，各样品间分布存在一定的差异。如样品 A、B、C 分布在图 6 横纵坐标的不同的位置，表明不同产地当归的添加使鸡汤的挥发物化合物存在差异，样品 B、C 分布距离较邻近，说明两样品之间具有一定相似度。随着不同产地的当归添加，鸡汤的风味随之具有相应的变化，

见样品 C 分布在横纵坐标为正的区域，表明其甘肃的当归风味最佳。

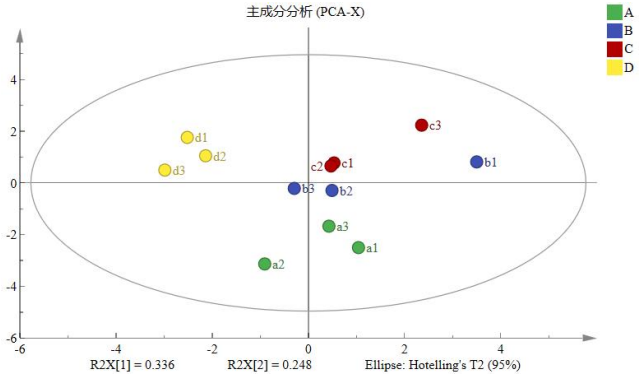


图 6 不同产地当归熬制的鸡汤 GC-IMS 主成分分析图

Fig.6 Analysis chart of the main ingredients of GC-IMS chicken soup boiled with angelica from different origins

2.2.5 不同产地当归熬制的鸡汤化合物聚类分析

聚类热图是一种应用广泛的统计可视化方法之一，能够将大量数据进行高效聚合处理，最终以渐变图谱的形式呈现[26]。热图中红色为浓度含量较高，蓝色则为浓度含量较低，可通过颜色深浅直观判断。如图 7，B、C 样品挥发性风味物质相对含量相似，聚在一类，A、D 样品相对含量较高且分别独立于其他样品；图 7 中丁醛-M、乙酸-M、γ-松油烯、乙酸乙酯、甲酸乙酯、丙醛-M、正丁醇、正戊醇-M、正辛醛-D、壬醛-D、反式-2-戊烯醛-M、(E)-2-已烯醛-M 等挥发性风味物质在当归鸡汤中相对含量与参照组的鸡汤有明显区别。样品 A、D 与其他两样品化合物的含量在图中明显可见较大的差异，而样品 B、C 化合物的浓度相似度较高，表明样品 B、C 的风味相似度较高。样品 A、D 酯类的相对含量较高，酯类是鸡肉在高温炖煮中通过脂质氧化过程中游离脂肪酸酯和醇类之间的反应生成的，具有一定果香[27]。聚类结果与主成分分析结果相吻合。

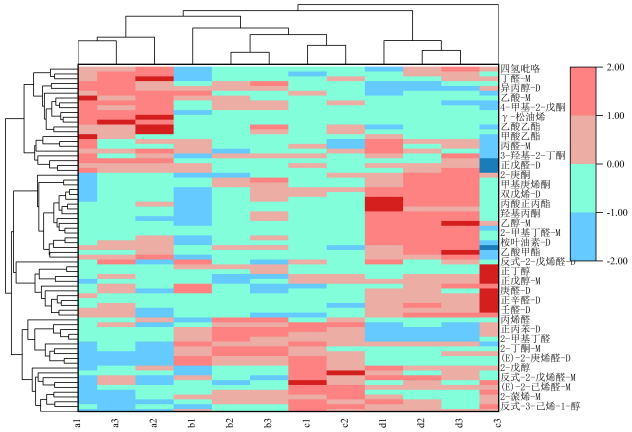


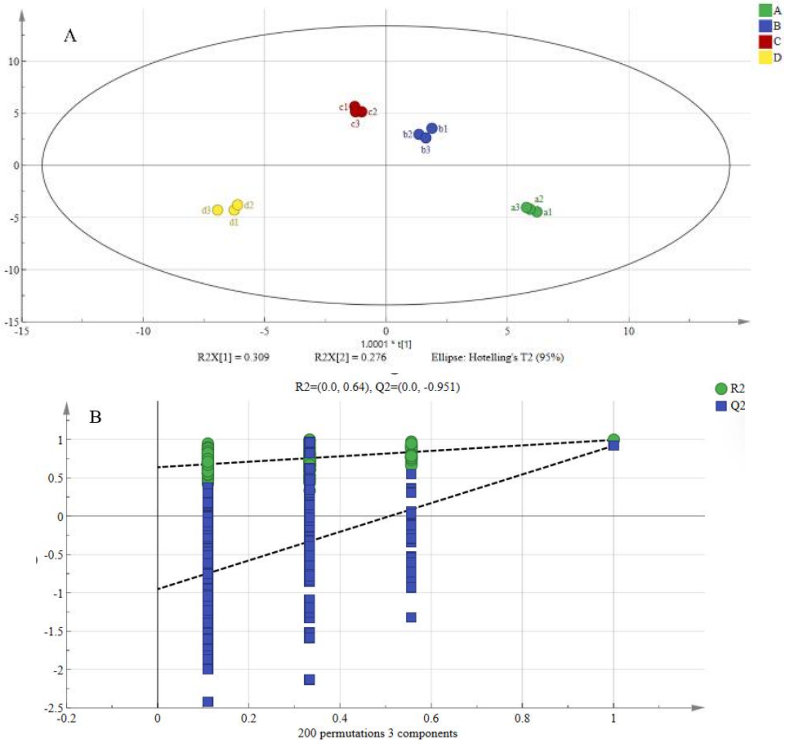
图 7 不同产地当归熬制的鸡汤化合物聚类热图

Fig.7 Heat map of chicken soup compound clusters made of angelica from different origins

2.2.6 不同产地当归熬制的鸡汤化合物正交偏最小二乘法判别分析(Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis，OPLS-DA)

OPLS-DA 是一种回归建模技术，属于监督的判别分析统计方法，可容纳多个因变量和自变量，主要用于分类和特征选择，能够高效地识别组间差异变量[28]。为进一步探究不同产地当归的加入鸡汤中挥发性化合物的差异特征，本研究利用 SIMCA14.1 软件对不同产地当归鸡汤样品检测的数据运行 OPLS-DA 程序，以已定性的挥发性化合物相对含量为 Y 变量，进行建模分析，绘制出 OPLS-DA 模型得分图（图 8）。由图 8 可看出，模型的解释率和预测能力能分别通过 R^2X、R^2Y 和 Q^2 值评估。图 8A 显示，R^2X=0.409，R^2Y=0.276，表明模型能够解释样品间的差异，图中四川、云南、甘肃等产地当归熬制的鸡汤样品及参照组样品分布情况更加显著且样品 B、C 相对与样品 A、D 两者之间分布距离接近，与主成分分析、聚类热图结果吻合。为确保模型未出现过度拟合，采用 200 次置换检验验证。验证结果图 8B 显示，斜率为正，Q^2 回归线与 y 轴的交点位于 0 以下，表明该构建的模型具有良

好的可靠性，不存在过度拟合现象，说明模型能有效地判别和区分不同产地当归熬制的鸡汤挥发性物质[29]。此外，通过 OPLS-DA 模型的变量重要性投影（VIP）值筛选，VIP 值>1 的化合物被认为是区分不同产地当归鸡汤和解释其挥发性物质的关键贡献者[30]。结果见图 8C，以 VIP 值>1 为标准，共筛选出 15 种关键性化合物，其中醇类 4 种，分别是正戊醇-M、正戊醇-D 具有温和的特殊气味；反式-3-己烯-1-醇，具有清新、自然的青香气味；2-戊醇；醛类 4 种，分别是（E)-2-己烯醛，具有脂芳香；苯甲醛，具有苦杏仁味；(E)-2-庚烯醛-M、(E)-2-庚烯醛-D，具有新鲜的绿叶香味；酮类 3 种，分别是 2-丁酮-M，有丙酮的气味；甲基庚烯酮，具有水果香气和新鲜清香香气；2-庚酮，具有特殊的香气；萜类 2 种，分别是桉叶油素-M ，具有樟脑样香气和清凉味道；2-蒎烯-D；酯类 1 种，正丙酸乙酯-D，有菠萝香味；杂环类 1 种，2-异丙基-3-甲氧基吡嗪，具有豌豆清香和格蓬的膏香。其中正戊醇 VIP 值最大，为 1.27，具有温和的特殊香气，根据筛选出的 15 种关键性化合物其香气特征具有新鲜绿叶香味、苦杏味、草香味、果香味、清凉味、豌豆清香、脂芳香以及其他特殊芳香气味。如图 8C，在 15 种筛选出关健化合物中结合相对含量分析区分不同产地的当归，正丙酸乙-D 的 VIP 值为 1.10，在相对含量中 A 样品的含量最高为 0.05%，即云南当归，2-丁酮-M 的 VIP 值为 1.24，在相对含量中 B 样品的含量最高为 0.28%，苯甲醛的 VIP 值为 1.18，在相对含量中 B 样品的含量最高为 0.25%，甲基庚烯酮的 VIP 值力 1.13，在相对含量中 B 样品的含量最高为 0.34%，(E)-2-庚烯醛-M、(E)-2-庚烯醛-D 的 VIP 值分别为 1.12、1.10，在相对含量中 B 样品的含量最高分别为 1.96%、0.47%，桉叶油素-M 的 VIP 值 1.10，在相对含量中 B 样品的含量最高为 1.70%，即四川当归；正戊醇 M、正成醇-D 的 VIP 值分别为 1.27、1.26，在相对含量中 C 样品的含量最高分别为 1.32%、0.17%，(E)-2-日烯醛-M 的 VIP 值为 1.20，在相对含量中 C 样品的含量最高为 1.24%，反式-3-己烯-1-醇的 VIP 值为 1.17，在相对含量中 C 样品的含量最高为 0.19%，2-戊醇的 VIP 值为 1.12，在相对含量中 C 样品的含量最高为 0.46%、2-菰烯-D 的 VIP 值为 1.12，在相对含量中 C 样品的含量最高为 0.65%。2-庚酮的 VIP 值为 1.12，在相对含量中 C 样品的含量最高为 0.49%，2-异丙基-3-甲氧基吡嗪的 VIP 值为 1.10，在相对含量中 C 样品的含量最高为 0.21%，即甘肃当归。根据 VIP>1 筛选出的 15 种关键化合物结合其相对含量，C 样品的相对含量均高于其他样品，结果表明样品组 C 的风味更佳，即甘肃当归。



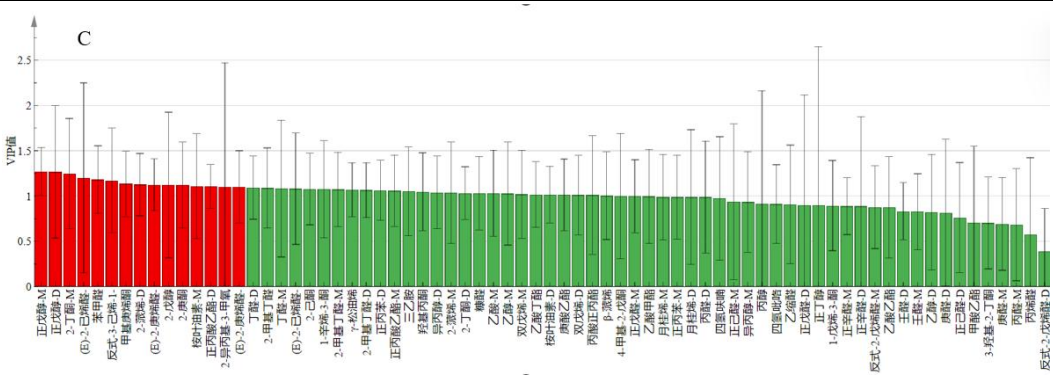


图 8 不同产地当归熬制的鸡汤 GC-IMS 正交偏最小二乘法判别分析图

Fig.8 GC-IMS orthogonal least squares discrimination analysis chart of chicken soup boiled with angelica from different origins

注：A：OPLS-DA 得分图；B：置换检验图；C：VIP 值图。

3 结论

本文研究采用电子鼻、GC-IMS 检测，结合 PCA 和 OPLS-DA 建模分析。电子鼻结果表明，传感器对极性物质、非极性物质（碳氢化合物、氨、氯）、芳香类（甲苯、二甲苯）、氯类等物质敏感。GC-IMS 结果表明，GC-IMS 共检测出 73 种物质，其中醛类 27 种、萜类 11 种、醇类 10 种、酮类 10 种、酯类 8 种、酸类 2 种、杂环 3 种、苯类 2 种，其含量分别为 43.73%、7.66%、5.29%、2.88%、1.81%、2.22%、1.32%、0.98%。PCA 分析结果表明，样品 B、C 相似；样品 A、D 存在差异，与聚类分析结果吻合。OPLS-DA 建模并通过置换检验验证其可靠性，筛选出 VIP 值>1 的 15 种关键化合物，包括正戊醇-M、正戊醇-D、反式-3-己烯-1-醇、2-戊醇、(E)-2-己烯醛、苯甲醛、(E)-2-庚烯醛-M、(E)-2-庚烯醛-D、 2-丁酮-M、甲基庚烯酮、2-庚酮、桉叶油素-M 、2-蒎烯-D、正丙酸乙酯-D、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪。其中正戊醇 VIP 值最大，为 1.27，具有温和的特殊香气。本研究表明，当归鸡汤风味主要形成机制是可溶性、挥发性风味物质之间产生的多种化学反应的结果，主要来源于酯化反应和脂肪氧化分解。当归鸡汤的加入使鸡汤的风味体系更加风味，此外，醛类为鸡汤的关键风味物质，具有花香、草香、瓜果香以及其他特殊芳香气。不同产地当归熬制的鸡汤呈现出不同的风味特征，为今后药膳发展提供基础理论和支撑依据。

本研究联合电子鼻与气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）技术对不同产地当归熬制的鸡汤风味进行解析，结果两种检测方法得到的风味存在一定的差异，也反映了鸡汤风味体系的复杂性，为后续研究提供了重要启示。在今后的研究中考虑可以在滋味物质方面进行深入研究，可以采用电子舌、氨基酸分析滋味物质的影响。

参考文献

[1] 郭锦明.药用当归本草学及生药学的研究[J].中国处方药,2015,13(10):18-19.

[2] THI B B HOA P, HUAN F. NGOC P H. et al. In vitro plant regeneration, callus suspension culture, and production of bioactive metabolites in dong quai (*Angelica sinensis*) [J]. South African Journal of Botany, 2025, 183: 193-201.

[3] PAN X, GU Z, YANG Y, et al. Analysis of *Angelica sinensis* at different growth stages by 1H NMR-based metabolic fingerprinting combined with chemometrics [J]. Journal of Chromatography. B, Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2025, 1263: 124676.

[4] ZHOU J, LI J, WEI B B, et al. Research on differential quality markers of medicine herbs for Danggui Buxue Decoction before and after processing based on fingerprint and network pharmacology [J]. China journal of Chinese materia medica, 2024, 49(9): 2451-2460.

[5] GUAN H, TIAN Y, FENG C, et al. Migration of nutrient substances and characteristic changes of chicken white soup emulsion from chicken skeleton during cooking [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2024, 13(3): 410.

[6] YUE Z, LAI J, LI Q, et al. Enhancement of nutritional, organoleptic, and umami qualities of chicken soup induced by enzymatic pre-treatment of chicken [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101914.

[7] LIAO M., PENG S, GUO H, et al. The effect of enzymatic hydrolysis on the flavor improvement of chicken broth by characterizing key

taste and odor-active compounds [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105054.

[8] JIA R, YANG Y, LIAO G, et al. Effect of stewing time on the small Molecular metabolites, free fatty acids, and volatile flavor compounds in chicken broth [J]. Food Science of Animal Resources, 2024, 44(3): 651-661.

[9] 王庆彦,毕映燕,徐生杰,等.当归中活性成分提取方法及药理作用的研究进展[J].化学试剂,2025,47(4):43-51.

[10] 吴东海,吴婧,周玮,等.当归补血汤的药学、药理作用及临床应用研究进展[J].湖南中医药大学学报,2025,45(3):577-582.

[11] 毕宇,周桃英.当归山药药膳土鸡汤的研制[J].现代盐化工,2022,49(4):45-47.

[12] ZHENG W, WANG Y, XIAO L, et al. Origin identification for rice wines based on an electronic nose and convolution dot-product attention mechanism [J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2024, 375: 115521.

[13] 杨柳青,陈凯沁,王储炎,等.不同熬制时间对老母鸡汤风味品质的影响[J].中国食品添加剂,2023,34(4):276-284.

[14] CHEN L, HUAN J, YUAN C, et al, Volatile and non-volatile compound analysis of ginkgo chicken soup during cooking using a combi oven [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102276.

[15] 刘彩玲,李雪,刘光宪,等.4 种江西不同地方鸡品种对鸡汤滋味及挥发性风味的影响[J].食品工业科技,2025,46(14):71-83.

[16] 张士正,吴文娟,马洁,等.基于 GC-IMS 比较不同干燥方式对异叶青兰挥发性成分的影响[J].分析测试学报,2025,44(11):2295-2303.

[17] 刘程鹏,张香美,岳书华,等.基于电子鼻和 GC-IMS 分析不同品种鸡肉品质风味差异[J].保鲜与加工,2025,25(8):109-120.

[18] 张乐,张雅,史冠莹,等.GC-IMS 结合化学计量学分析 8 个产区香椿挥发性成分差异[J].食品科学,2022,43(22):301-308.

[19] 李永焜,杨涵越,严志慧,等.基于气相—离子迁移谱技术分析“金花”菌发酵紫娟红茶过程中挥发性物质和多酚类物质变化[J].食品与发酵工业,2025,51(20):359-370.

[20] 彭择,陈慧芝,牛犇,等.基于气相色谱-离子迁移谱分析发酵对蓝靛果-蓝莓果汁挥发性风味物质的影响[J].食品科学,2025,46(16):275-284.

[21] LI Z Q, GU H, SONG H, et al. Radix *Angelica sinensis* soup production by decocting process using high pressure [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): 620-631.

[22] 邹金浩,林耀盛,杨怀谷,等.岭南黄鸡炖鸡汤过程中营养及风味物质的变化[J].现代食品科技,2021,37(11):328-337.

[23] LEI W, CUI Z, HU W, et al. Characterization and comparison of flavor compounds in different specialty chicken meat after stewing [J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102589.

[24] GUAN H, ZHANG W, TIAN Y, et al. Analysis of the flavor profile of chicken white soup with varying fat addition using GC–MS, GC-IMS and E-nose combined with E-tongue [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102335.

[25] HUA W, LIU H, FEI Q, et al. Formation of volatile compounds in mutton during air fryer roasted mutton by means of GC–MS and GC-IMS [J]. Food Research International, 2025, 211: 116404.

[26] 刘振艳,张微,宋耀新.基于热图和聚类分析黑龙江 7 个产地紫苏梗中氨基酸含量及其营养评价[J].中国食品添加剂,2023,34(10):1-8.

[27] XU Y, LI L, HOU R, et al. Uncovering flavor and quality differences in Shuhua 9 peanuts dried at 35 ± 1 °C and 65 ± 1 °C using GC-IMS, untargeted metabolomics, and TMT-based proteomics [J]. LWT, 2025, 227: 117994.

[28] GONG S, ZHANG Z, CHEN J, et al. Enhanced understanding of dark tea quality through integrated GC-IMS and E-Nose analysis [J]. LWT, 2025, 224: 117806.

[29] 谢敬,周嘉诺,隆瑞,等.基于 GC-IMS 分析添加五谷对红茶菌奶酒挥发性风味物质的影响[J].中国酿造,2025,44(5):284-291.

[30] ZHOU L, ZHENG W, SUI Y, et al. Characterization of volatile organic compounds in selenium-enriched brown rice tea of different colors using E-nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. LWT, 2025, 224: 117830.