

5 种药食兼用菊花挥发性有机物的 HS-GC-IMS 与指纹图谱

HS-GC-IMS analysis and fingerprint study of volatile organic compounds in
five species medicinal and edible *Chrysanthemum morifolium* Ramat.

丁云龙¹

王浩东^{1,2}

唐国玮¹

田 星^{1,3}

DING Yun-long¹ WANG Hao-dong^{1,2} TANG Guo-wei¹ TIAN Xing^{1,3}

(1. 湖南中医药大学药学院, 湖南 长沙 410208; 2. 湖南口味王集团有限责任公司,
湖南 益阳 413056; 3. 湖南省康德佳林业科技有限责任公司, 湖南 永州 425600)

(1. School of Pharmacy, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China;

2. Hunan Flavor King Group Co., Ltd., Yiyang, Hunan 413056, China;

3. Hunan Kangdejie Forestry Technology Co., Ltd., Yongzhou, Hunan 425600, China)

摘要:目的:研究菊花品种和产地鉴别、挥发性风味成分特性。方法:以金丝皇菊、皇菊、杭白菊、毫菊、贡菊 5 种药食兼用菊花为研究对象,利用顶空气相色谱—离子迁移谱,结合聚类分析和关系矩阵,以数据可视化的形式研究不同品种菊花中 VOCs 指纹图谱的差异性及其变化。结果:不同品种菊花之间的 VOCs 差异明显($P < 0.05$),两两之间的相似度基本低于 70%,且均有其独特的挥发性成分;5 种菊花挥发性物质含量由高到低的顺序为:贡菊、金丝皇菊、皇菊、毫菊和杭白菊。结论:HS-GC-IMS 能够弥补常规 VOCs 检测缺憾,适用于不同品种菊花的区分和鉴定。

关键词:菊花;挥发性有机物;顶空气相色谱—离子迁移谱;指纹图谱;风味物质

Abstract: Objective: To understand the difference of cumulative content and species of volatile organic compounds (VOCs) in five different species of *Chrysanthemum morifolium* Ramat..

Methods: In this study, five different species of *Chrysanthemum morifolium* Ramat., namely, Jinsihuangju, Huangju, Hangbaiju, Boju, and Gongju. The differences and variations of the fingerprints of volatile organic compounds (VOCs) in

different species of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. were studied by headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy (HS-GC-IMS), combined with cluster analysis and relationship matrix in the form of data visualization. **Results:** There were significant differences in VOCs among different varieties of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. ($P < 0.05$), and the similarity between them was less than 70%, and all of them had their own unique volatile organic components; the five kinds of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. in the order of high to low VOCs content were: Gonju, Jinshi Huangju, Huangju, Boju, and Hangbaiju. **Conclusion:** HS-GC-IMS can make up for the shortcomings of conventional VOCs detection, making detection more data basis and support, and providing theoretical basis and data support for the differentiation and identification of different varieties of *Chrysanthemum morifolium* Ramat..

Keywords: *Chrysanthemum morifolium* Ramat.; volatile organic compounds (VOCs); headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy (HS-GC-IMS); fingerprint; flavor substance

菊花(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)是一种传统的药食同源植物,有着悠久的食用历史,含有丰富的维生素、矿物质及微量元素。目前,市场上的菊花加工产品种类繁多(如菊花茶饼、菊花酱、菊花酿、菊花茶等),但关于菊花的研究主要集中在药用菊花生物活性、营养繁殖和栽培技术等方面,而对于食用菊花的风味品质研究则鲜有报道^[1-2]。

目前,挥发性风味成分检测的技术主要有固相微萃取—气相色谱—质谱(SPME-GC-MS)^[3]、电子鼻和联用

基金项目:湖南省大学生创新创业训练项目(编号: S202110541005X);湖南中医药大学药学一流学科开放基金重点项目(编号:2021YX05);湖南省企业科技特派员计划项目(编号:2021GK5087)

作者简介:丁云龙,男,湖南中医药大学在读本科生。

通信作者:田星(1986—),女,湖南中医药大学副教授,博士。

E-mail: acctianxing@hotmail.com

收稿日期:2022-01-29 **改回日期:**2022-05-17

技术^[3-4]、全二维气相色谱—质谱技术(GC×GC/TOFMS)^[5-6]、气相色谱嗅闻分析(GC-O)^[7-8]、高效液相色谱(HPLC)^[9]以及顶空固相微萃取和气相色谱—质谱联用(HS-SPME/GC-MS)^[10]等技术,但上述方法或存在气体传感器阵列漂移现象,或存在检测灵敏度易受温度、湿度、样品性状稳定性等外界环境因素影响,或存在前处理复杂及应对复杂样品分析复杂、对未知成分无法较好地定性等问题^[11-13]。

顶空气相色谱—离子迁移谱(HS-GC-IMS)是一种基于气相色谱法和离子迁移谱仪联用的新技术,可以检测未经预处理的液体或固体样品中挥发性有机物的指纹,并能更全面地保留样品的风味物质^[14]。由于其具有灵敏度高、响应快、分析高效、样品无需预处理以及操作简便等特点,已被用于食品中挥发性化合物的检测^[15-16],而在菊花挥发性成分分析中的应用较少,尤其是在对不同品种菊花挥发性成分的指纹图谱分析中的应用方面尚未见报道。

研究拟以5种不同品种药食兼用菊花(金丝皇菊、皇菊、杭白菊、亳菊、贡菊)为研究对象,采用HS-GC-IMS技术对菊花中复杂挥发性有机物进行采集和痕量分析,以期对菊花品种和产地鉴别、挥发性风味成分特性的研究和品质控制提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

金丝皇菊、皇菊:湖南省康德佳林业科技有限公司;

杭白菊:杭州巨佳茶叶有限公司;

亳菊、贡菊:安徽常富国药有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

顶空气相色谱—离子迁移谱仪器:FlavourSpec®型,山东海能科学仪器有限公司;

分析天平:E02140型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 取1g样品置于20mL顶空瓶中,80℃孵育20min后进样。每个样本进行3次平行测定。

1.2.2 HS-GC-IMS测定条件 参考梁天一等^[17]的方法并稍作修改,采用顶空气相色谱—离子迁移谱(HS-GC-IMS)对不同品种菊花中挥发性风味物质进行分析。色谱柱类型:MXT-5(15m×0.53mm,1μm),分析时间30min,色谱柱温度60℃,载气/漂移气:N₂(纯度≥99.999%)。载气流量:初始流量2.0mL/min,20min内线性升至100.0mL/min,保持7min,运行时间15min。漂移气流量150mL/min,IMS温度45℃。采用自动顶空进样,其条件为:进样体积200μL,孵育时间20min,孵

育温度80℃,进样针温度85℃,孵化转速500r/min。

1.2.3 数据处理 使用HS-GC-IMS仪器自带的分析软件VOCal分析谱图,应用软件内置的NIST 2014保留指数数据库(美国国家标准与技术研究所)和IMS 2019数据库(山东海能科学仪器有限公司)对5种菊花的特征挥发性风味物质进行定性分析。采用Reporter插件对5种菊花样品的谱图进行直接比对,分析品种间的差异性。运用Gallery Plot插件对5种菊花样品的指纹图谱进行对比,定量比较不同品种菊花之间的挥发性有机物差异。采用Dynamic PCA插件生成动态主成分分析图和相似度分析图,根据样品相似度利用TBtools软件得出关系矩阵,进行5种菊花样品间的动态主成分分析和相似度分析以及快速区分种类。

2 结果与分析

2.1 挥发性有机物的HS-GC-IMS谱图对比分析

如图1所示,不同品种菊花的特征挥发性物质具有不同的HS-GC-IMS特征图谱,其表现为在相同保留时间和漂移时间的情况下,挥发性有机物累积含量以及种类具有明显差异,可以作为区分不同品种菊花指纹特征的依据。李冬玲^[18]研究发现,菊花的种源或种是对其挥发性成分含量影响最大的因素。中国菊花品类多,分布广,其生长的地域差异会带来温度、湿度、光照等外界生长环境的差异,从而影响菊花生长过程中的次生代谢反应以及其中小分子挥发性有机物的累计含量和组成,进而导致其品质、成分的差异^[19]。因而可通过挥发性有机物的种类增减及含量识别不同品种的菊花。若要进一步对不同品种菊花的挥发性物质变化情况及其差异进行研究,还需对各品种菊花的指纹图谱进行分析^[20]。

2.2 挥发性有机物的HS-GC-IMS定性分析

由图1和表1可知,5种菊花中可识别出的挥发性物质共有87种(74种单体及部分物质的二聚体),对87种物质进行分类,可分为10大类,其中酯类有22种(含4种二聚体)、醇类14种(含2种二聚体)、酮类8种、醛类17种(含4种二聚体)、羧酸类2种、醚类3种、呋喃类3种、噻唑类1种、吡嗪类1种、烯烃类16种(含3种二聚体)。

87种物质中,1,8-桉叶素、苧烯、 α -蒎烯等物质在杭白菊和亳菊中含量较低,而在金丝皇菊、皇菊和贡菊中含量较高。其中属于醇类的1,8-桉叶素,有类似樟脑气味的特异芳香味,具有抗炎、抗菌杀菌、抗肿瘤等作用^[21-22],被广泛应用于中药制剂中^[23],同时也可作为食品添加剂使用。属于烯烃类的苧烯具有抗氧化作用, α -蒎烯有显著的松香味^[1], α -松油烯可用作橘子香精香料的调配^[24]。

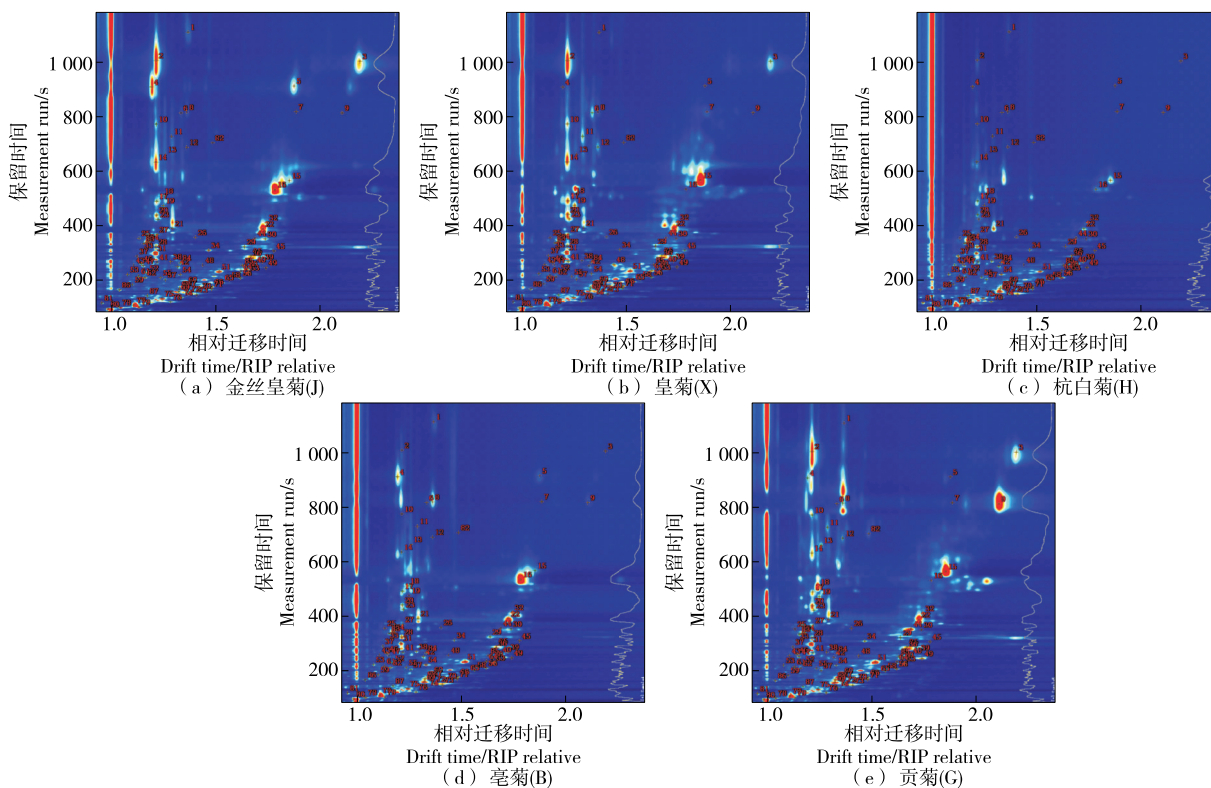


图 1 5 种菊花挥发性有机物的 HS-GC-IMS 定性分析

Figure 1 Qualitative analysis of volatile organic compounds of five different varieties of *Chrysanthemum morifolium* by HS-GC-IMS

根据物质分类,对 87 种物质的峰体积数据进行归类加和,得图 2。由于物质的峰体积与含量呈正比,因此峰体积值越大,物质的含量越高。根据图 2 可知,贡菊中挥发性物质的总量明显($P < 0.05$)高于其他 4 种菊花,主要是烯烃类物质明显($P < 0.05$)高于其他 4 种菊花,这些物质的大量存在使得贡菊具有独特浓郁的香气。由此可知,5 种菊花挥发性物质含量由高到低的顺序为:贡菊、金丝皇菊、皇菊、亳菊和杭白菊。

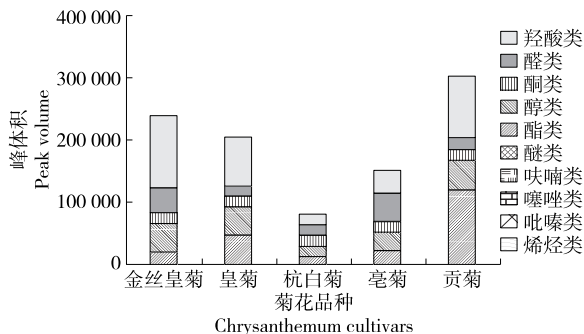


图 2 5 种菊花中各类挥发性物质峰体积数据柱状图

Figure 2 Histogram of peak volume data of various VOCs in five different varieties of *Chrysanthemum morifolium*

2.3 挥发性有机物的 HS-GC-IMS 指纹图谱分析

为了进一步研究不同品种菊花挥发性有机物变化情况及其差异,基于 HS-GC-IMS 分析软件中的 Gallery Plot 插件,利用 5 种菊花样品的二维图谱中的待分析峰生成指纹图谱见图 3。由图 3 及表 1 可知,5 种菊花的特征性风味物质差异性较大。对于不同品种菊花的特征性风味物质进行区域划分:A 区域为金丝皇菊的特征峰区域,主要含有 β -榄香烯、顺式-石竹烯、肉桂酸乙酯等 17 种可检出物质;B 区域为皇菊的特征峰区域,主要含有 α -松油醇、3-蒎烯、香茅醇等 22 种可检出物质;C 区域为贡菊的特征峰区域,主要含有 α -水芹烯、1-辛烯-3-醇、乙偶姻等 24 种可检出物质;D 区域为亳菊的特征峰区域,主要含有 2-蒎烯、柠檬烯、丁酸丙酯等 25 种可检出物质;E 区域为杭白菊的特征峰区域,与亳菊特征峰区域有很大的重合部分,主要含有乙酸丁酯、乙酸丙酯、柠檬烯等 24 种可检出物质。菊花中主要存在的挥发性风味物质为烃类及其含氧衍生物(萜类化合物),与周根等^[25]、Yang 等^[26]的研究结果基本一致。

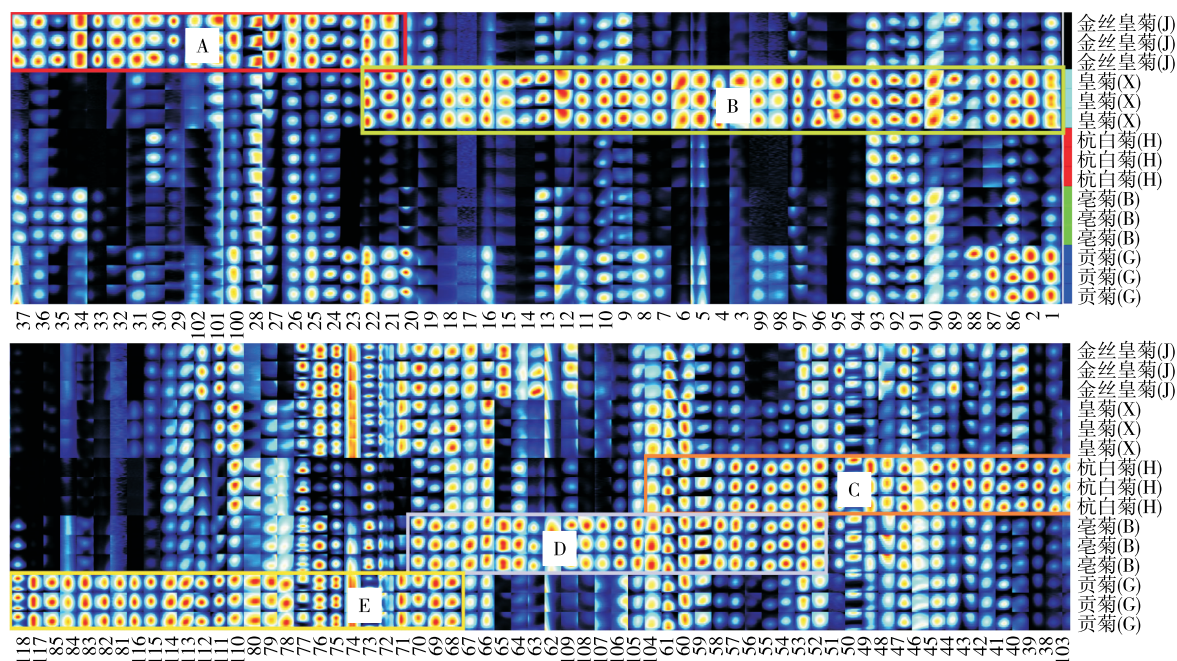
2.4 挥发性有机物的 HS-GC-IMS 动态主成分分析及相似度分析

为了更好地呈现和区分不同品种菊花的挥发性有机物的相关性,采用 Dynamic PCA 插件程序绘制主成分分

表 1 5 种菊花 HS-GC-IMS 图谱部分挥发性物质定性结果

Table 1 Qualitative results of some volatile substances in HS-GC-IMS profiles of five different varieties of *Chrysanthemum morifolium*

化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms
肉桂酸乙酯	1 518.7	1 109.822	1.371 06	醋酸戊酯	953.2	307.797	1.779 66
石竹烯	1 447.7	1 005.570	1.219 73	环己酮	895.8	261.247	1.148 08
石竹烯(二聚体)	1 445.8	1 002.674	2.189 65	二丙基硫醚	881.3	252.456	1.157 30
β -榄香烯(单体)	1 381.7	908.557	1.196 80	乙酰基呋喃	888.4	256.334	1.440 83
β -榄香烯(二聚体)	1 384.2	912.207	1.877 14	乙酸异戊酯	869.8	246.251	1.741 66
二氢桂酸乙酯(单体)	1 317.5	814.340	1.337 26	3-甲基丁酸乙酯	860.8	241.339	1.649 45
二氢桂酸乙酯(二聚体)	1 319.5	817.219	1.885 85	(E)-2-己烯醛(单体)	845.0	232.807	1.519 21
醋酸乙烯酯(单体)	1 318.5	815.780	1.365 12	(Z)-2-己烯醛(二聚体)	835.0	227.377	1.176 89
醋酸乙烯酯(二聚体)	1 317.5	814.340	2.107 02	糠醛(单体)	824.5	221.689	1.083 53
醋酸苯乙酯	1 289.1	772.603	1.218 84	糠醛(二聚体)	824.5	221.689	1.333 64
乙基 2-苯乙酸乙酯	1 257.8	726.548	1.291 98	乙酸丁酯(单体)	802.5	209.796	1.239 13
香茅醇	1 231.3	687.689	1.365 12	乙酸丁酯(二聚体)	802.0	209.538	1.620 64
苯甲酸乙酯	1 213.9	662.172	1.261 78	己烯醛(单体)	789.6	202.816	1.262 18
α -松油醇	1 193.8	632.588	1.218 14	己烯醛(二聚体)	789.1	202.557	1.566 47
乙酸马鞭烯醇酯	1 148.1	565.519	1.854 96	(E)-2-戊烯醛(单体)	748.8	184.976	1.105 43
(E,E)-2,4-辛二烯醛	1 125.6	532.406	1.785 08	(E)-2-戊烯醛(二聚体)	747.6	184.459	1.361 31
蒎烯	1 096.7	489.935	1.220 20	乳酸乙酯	814.0	216.001	1.135 40
顺式-对位-薄荷-2-烯-1-醇	1 109.9	509.371	1.246 40	丁酸	803.9	210.572	1.164 21
氧化芳樟醇	1 085.9	474.098	1.253 68	2-甲基丁酸乙酯	836.4	228.153	1.657 52
γ -烯	1 061.9	438.826	1.220 20	4-甲基-1-戊醇	846.9	233.841	1.622 94
1,8-桉叶素(单体)	1 028.5	389.876	1.295 90	3-甲基丁酸甲酯	766.6	192.474	1.534 19
1,8-桉叶素(二聚体)	1 027.6	388.436	1.726 84	甲基异丁酮	730.5	177.266	1.486 15
β -罗勒烯	1 051.1	422.989	1.226 02	2,5-二甲基呋喃	717.7	171.876	1.357 76
6-甲基-5-庚烯-2-酮	994.3	341.029	1.178 60	乙偶姻	712.9	169.854	1.328 77
2,4,5-三甲基噻唑	1 004.3	354.299	1.137 59	1,4-二氧六环	686.1	158.849	1.325 66
辛醛	1 005.9	356.669	1.406 89	戊醛	696.4	162.892	1.427 13
3-萜烯	1 014.0	368.517	1.222 35	醋酸丙酯	707.6	167.608	1.482 01
香桉烯(单体)	972.6	323.494	1.218 25	1-丁醇	660.0	150.989	1.374 33
香桉烯(二聚体)	972.0	323.020	1.639 27	3-甲基丁醛	650.3	148.069	1.411 60
2-萜烯	1 002.4	351.455	1.737 69	醋酸乙酯	616.0	137.738	1.340 16
茨烯	943.4	299.798	1.214 14	2-丁酮	601.9	133.471	1.248 01
柠檬烯	1 044.0	412.591	1.745 89	甲基丙醛	562.4	121.567	1.286 32
苯甲醛(单体)	956.8	310.699	1.149 90	丙酮	519.1	108.541	1.115 48
苯甲醛(二聚体)	956.8	310.699	1.469 77	乙醇(单体)	494.5	101.130	1.046 10
α -蒎烯	930.5	289.372	1.670 71	乙醇(二聚体)	497.5	102.028	1.136 18
三环烯	920.5	281.316	1.667 98	甲醇	473.0	94.636	0.988 79
2-乙基吡嗪	929.2	288.297	1.127 72	二甲基硫醚	547.7	117.144	0.959 59
丙酸丁酯(单体)	905.2	268.921	1.288 03	2-癸烯醛	1 242.7	704.459	1.487 46
丙酸丁酯(二聚体)	903.6	267.608	1.725 88	1-辛烯-3-醇	986.6	334.824	1.158 09
丁酸丙酯	892.7	258.741	1.688 80	庚醛	899.3	264.119	1.332 93
戊酸	902.8	266.951	1.222 23	2-庚酮	885.2	254.587	1.629 75
正己醇	875.9	249.546	1.322 72	2-乙基呋喃	700.4	164.587	1.043 36
环己烯-2-酮	888.0	256.114	1.110 97	2-甲基丙醇	634.1	143.175	1.175 86
α -水芹烯	1 004.0	353.922	1.688 99				



每一行代表一个样品中选取的全部信号峰 每一列代表同一物质在不同样品中的信号峰 1. 1-甲基-4-(1-甲基乙基)-1,4-环己二烯 2. 2-(4-甲基苯基)丙-2-醇 3. 2,5-二甲基呋喃 4. 2-乙酰基呋喃 5. 正戊酸 6. 4-甲基-1-戊醇 7. α , α -5-三甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-甲醇 8. 3,7-二甲基-6-辛烯-1-醇 9. 1-丁醇 10. 异松油烯 11. 3,7,7-三甲基二环[4.1.0]庚-3-烯 12. 3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯 13. 4-甲基-2-戊酮 14. 2-甲基丁酸乙酯 15. 乙酸戊酯 16. 苯乙酸乙酯 17. 3-苯丙酸乙酯(二聚体) 18. 3-苯丙酸乙酯(单体) 19. 异戊酸甲酯 20. 乙酸冰片酯 21. 2-(4-甲基-3-环己烯基)-2-丙醇 22. [1R-(1R*,4Z,9S*)]-4,11,11-三甲基-8-亚甲基-二环[7.2.0]十一烯(单体) 23. [1R-(1R*,4Z,9S*)]-4,11,11-三甲基-8-亚甲基-二环[7.2.0]十一烯(二聚体) 24. 2-乙基呋喃 25. 苯甲醛(二聚体) 26. 正庚醛 27. 乙醇(二聚体) 28. 甲醇 29. 2,4,5-三甲基噻唑 30. 乙酸乙酯 31. 乳酸乙酯 32. 异戊酸乙酯 33. β -榄香烯(二聚体) 34. β -榄香烯(单体) 35. 正丁酸 36. 环己酮 37. 肉桂酸乙酯 38. 2-环己烯-1-酮 39. 2-乙基吡嗪 40. 乙酸丙酯 41. 乙酸丁酯(二聚体) 42. 乙酸丁酯(单体) 43. 二甲基硫 44. 二丙硫醚 45. 2-甲基丙醛 46. 1,4-二氧己环 47. 甲基庚烯酮 48. 顺式-2-己烯醛 49. 己醛(二聚体) 50. 己醛(单体) 51. 辛醛 52. 戊醛 53. 苯甲醛(单体) 54. 丁酸丙酯 55. 丙酸丁酯(单体) 56. 丙酸丁酯(二聚体) 57. 糠醛(单体) 58. 糠醛(二聚体) 59. 3-甲基丁醛 60. 乙醇(单体) 61. 丙酮 62. 双戊烯 63. 2-萜烯 64. 正己醇 65. (2E,4E)-2,4-辛二烯醛 66. 2-甲基丙醇 67. 反式-2-戊烯醛(单体) 68. 反式-2-戊烯醛(二聚体) 69. 反式-2-己烯醛 70. 2-丁酮 71. 三环萜 72. 桉烯(二聚体) 73. 桉烯(单体) 74. 2-蒎烯 75. 樟脑萜 76. 1,8-环氧对孟烷(二聚体) 77. 1,8-环氧对孟烷(单体) 78. 3-羟基-2-丁酮 79. 1-烯-3-辛醇 80. 2-庚酮 81. 2-癸烯醛 82. α -水芹烯 83. 2-环己烯-1-醇 84. 苯甲酸乙酯 85. 乙酸-3-甲基丁酯 86~118. NF(未检出)

图 3 5 种菊花特征挥发性物质的 HS-GC-IMS 指纹图谱

Figure 3 Fingerprint of characteristic volatile compounds from five different varieties of *Chrysanthemum morifolium* base on HS-GC-IMS

析图。由图 4 可知,从菊花的挥发性成分差异上来看 5 种菊花样品两两之间的相似度均基本低于 70%,说明 5 种菊花之间的特征性的挥发性有机物有一定的差异,每个样品均有其独特的挥发性成分。同时,菊花品种间的差异以数据为基础,PC1 的贡献率为 43%,PC2 的贡献率为 22%,两者之和贡献率达 65%,说明这两部分代表了样品的绝大部分信息。5 个品种的菊花样本之间的距离较大,说明菊花的品种对于挥发性成分的影响较大,与 Yang 等^[26]的结果,即不同品种菊花的挥发性成分分布具有显著性差异保持一致。

3 结论

以 5 种不同品种的药食兼用菊花(金丝皇菊、皇菊、

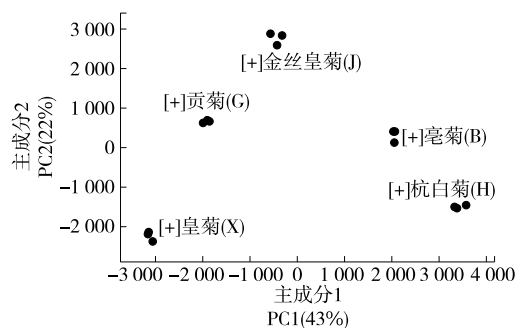


图 4 5 种菊花挥发性成分的主成分分析结果

Figure 4 Principal component analysis (PCA) of volatile components in five different varieties of *Chrysanthemum morifolium*

杭白菊、亳菊、贡菊)为原料,基于顶空气相色谱—离子迁移谱对不同品种菊花的挥发性风味成分进行了综合分析,共检测出 87 种挥发性有机物,综合比对二维差异图谱和指纹差异图谱表明 5 种菊花的挥发性有机物累积含量和种类都有显著性差异,采用动态主成分分析对各品种样品进行分离,表明 5 种菊花之间的特征性风味物质有一定差异。

顶空气相色谱—离子迁移谱可作为菊花挥发性成分分析的有效辅助技术,可通过指纹图谱中特征成分的差异精确区分菊花的品种及地理来源差异,为菊花品种、产地鉴别提供理论依据和数据支持。

参考文献

- [1] 陈志星, 杨敏, 赵娅红, 等. SPME-GC/MS 联合分析法测定食用菊花挥发成分研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(17): 161-165.
CHEN Z X, YANG M, ZHAO Y H, et al. SPME-GC/MS Analysis of chemical components of volatile components from *Chrysanthemum* in flowers[J]. Food Research and Development, 2020, 41(17): 161-165.
- [2] 潘芸芸, 冉聪, 刘琼, 等. 四种食用菊花主要成分分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 248-253.
PAN Y Y, RAN C, LIU Q, et al. Analysis of the main components of four cultivars edible *Chrysanthemum* flowers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(12): 248-253.
- [3] 赵宁, 魏新元, 樊明涛, 等. SPME-GC-MS 结合电子鼻技术分析不同品种猕猴桃酒香气物质[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 249-255.
ZHAO N, WEI X Y, FAN M T, et al. Analysis of volatile components of kiwifruit wines made from different cultivars using solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science, 2019, 40(22): 249-255.
- [4] RYAN D, SHELLIE R, TRANCHIDA P, et al. Analysis of roasted coffee bean volatiles by using comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1054(1/2): 57-65.
- [5] BAGGENSTOSS J, POISSON L, KAEGI R, et al. Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(14): 5836-5846.
- [6] KUMAZAWA K, MASUDA H. Investigation of the change in the flavor of a coffee drink during heat processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(9): 2674-2678.
- [7] LOPEZ-GALILEA I, FOURNIER N, CID C, et al. Changes in headspace volatile concentrations of coffee brews caused by the roasting process and the brewing procedure[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(22): 8560-8566.
- [8] MOON J K, SHIBAMOTO T. Role of roasting conditions in the profile of volatile flavor chemicals formed from coffee beans[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(13): 5823-5831.
- [9] 赵恒阳, 李欣, 范婷婷. 利用分子感官科学技术鉴定咖啡风味物质[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 419-423.
ZHAO J Y, LI X, FAN T T. Insights into the flavor of coffee by molecular sensory science approaches[J]. Food Industry, 2021, 42(12): 419-423.
- [10] 张锦程, 余佶, 麻成金, 等. GC-MS 结合 ROAV 分析评价加工工艺对藤茶香气成分的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 20-25, 31.
ZHANG J C, YU J, MA C J, et al. Analysis of volatile aroma components of *Ampelopsis grossedentata* tea with different processing technology based on GC-MS combined with ROAV[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 20-25, 31.
- [11] 贾雪梅. 白酒识别电子鼻系统特征降维与分类器设计[D]. 天津: 天津大学, 2017: 4-6.
JIA X M. Feature reduction and classifier design based on electronic nose system for Chinese liquors recognition[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 4-6.
- [12] 孙玉冰. 基于电子鼻技术的茶树虫害信息检测[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 5-9.
SUN Y B. Study of pest information for tea plant based on electronic nose[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 5-9.
- [13] 陈鑫郁, 贺金娜, 陈通, 等. 气相色谱离子迁移谱联用技术在食用植物油品质检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(2): 396-401.
CHEN X Y, HE J N, CHEN T, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in quality determination of edible vegetable oil[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(2): 396-401.
- [14] QI H, DING S, PAN Z, et al. Characteristic volatile fingerprints and odor activity values in different citrus-tea by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Molecules, 2020, 25(24): 6027.
- [15] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2020, 315(1): 126158-126164.
- [16] 弘子珊, 谭超, 苗玥, 等. 基于顶空气相色谱—离子迁移谱的不同产地咖啡挥发性有机物指纹图谱分析[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 243-249.
HONG Z S, TAN C, MIAO Y, et al. Fingerprint analysis of volatile organic compounds in coffees from different geographical origins by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2020, 41(8): 243-249.
- [17] 梁天一, 杨娟, 董浩, 等. 基于 GC-IMS 技术鉴别不同年份新会陈皮中的挥发性风味物质[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 168-173.
LIANG T Y, YANG J, DONG H, et al. Identification of volatile flavor substances in Xinhui tangerine peel in different years based on GC-IMS technology [J]. China Condiment, 2020, 45(4): 168-173.

- [18] 李冬玲. 不同来源药用菊花挥发油和总黄酮含量的比较分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(7): 3 444-3 446.
- LI D L. Comparative analysis on essential oil and total flavonoids of medicinal chrysanthemum from different original locations and species[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(7): 3 444-3 446.
- [19] 张星海. 不同来源菊花化学成分、抗炎作用及其机理的研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2014: 24-31.
- ZHANG X H. Study on the changes of chemical composition, anti-inflammatory efficacy and mechanism of different cultivars of flos chrysanthemi[D]. Nanjing: Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2014: 24-31.
- [20] 姚文生, 蔡莹喧, 刘登勇, 等. 不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱分析[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 37-45.
- YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Volatile compounds analysis in chicken thigh smoked with different materials by GC-IMS fingerprint[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 37-45.
- [21] 尹晓燕, 王燕燕. 1,8-桉叶素药理作用及其机制研究进展[J]. 生命的化学, 2020, 40(11): 2 026-2 034.
- YIN X Y, WANG Y Y. Research progress on pharmacological activities and mechanism of 1,8-cineole[J]. Chemistry of Life, 2020, 40(11): 2 026-2 034.
- [22] JIANG H D, CAI J, XU J H, et al. Endothelium-dependent and direct relaxation induced by ethyl acetate extract from flos chrysanthemi in rat thoracic aorta[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2005, 101(1/2/3): 221-226.
- [23] 唐钢锋, 雷杰, 张晋芬. 微波提取-GC/MS-SCAN/SIM 法定量检测野菊花挥发油中 1,8-桉叶素, 樟脑, 异龙脑, 龙脑[J]. 分析试验室, 2010, 29(S1): 357-360.
- TANG G F, LEI J, ZHANG J F. Quantitative determination of 1,8-cineole, camphor, isoborneol and borneol in the volatile oil of wild chrysanthemum by microwave extraction GC/MS-SCAN/SIM[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2010, 29(S1): 357-360.
- [24] 李晓颖, 曹翠玲, 武军凯, 等. 顶空气相色谱-质谱联用法分析两种玉兰花挥发性成分[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(5): 53-60.
- LI X Y, CAO C L, WU J K, et al. Analysis on volatile components of two kinds of Magnolia flowers by headspace gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(5): 53-60.
- [25] 周根, 张四杰, 钱正, 等. 杭白菊 4 个品种挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(11): 3 718-3 726.
- ZHOU G, ZHANG S J, QIAN Z, et al. GC-MS analysis of volatile components in four species of chrysanthemum morifolium[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(11): 3 718-3 726.
- [26] YANG L, CHENG P, WANG J H, et al. Analysis of floral volatile components and antioxidant activity of different varieties of chrysanthemum morifolium[J]. Molecules, 2017, 22(10): 1 790-1 803.
- (上接第 51 页)
- [22] 齐富友, 蹇顺华, 刘吟, 等. 白苏叶挥发油超临界 CO₂ 萃取工艺优化、成分分析及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 142-148.
- QI F Y, JIAN S H, LIU Y, et al. Extraction process optimization, composition analysis of volatile oil from *Perilla frutescens* leaf and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 142-148.
- [23] 田思慧, 董春萍, 王车礼. 干燥工艺对姜黄中姜黄素类化合物和挥发油的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 169-175.
- TIAN S H, DONG C P, WANG C L. Effect of drying technology on curcumin compounds and volatile oil in *Curcuma longa* L.[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 169-175.
- [24] 饶先立, 郭宏霞, 孙胜南. 巴西苦橙精油和苦橙花精油的挥发性成分分析及卷烟应用效果[J]. 化工技术与开发, 2019, 48(4): 34-39.
- RAO X L, GUO H X, SUN S N. Analysis of volatile components of essential oil from Brazil bitter orange and bitter orange flower and its application in cigarette[J]. Tech Dev Chem Ind, 2019, 48(4): 34-39.
- [25] 姬小明, 李冰洁, 于建军, 等. 金莲花挥发油成分分析及其在卷烟加香中的应用[J]. 精细化工, 2011, 28(10): 982-986.
- JI X M, LI B J, YU J J, et al. Analysis of the essential oil from *troilus chinensis bunge* and its application in cigarette flavoring[J]. Fine Chemicals, 2011, 28(10): 982-986.
- [26] 张峰, 操晓亮, 伊勇涛, 等. 茶树花纯露的制备及其在卷烟中的应用[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(5): 27-33.
- ZHANG F, CAO X L, YIN Y T, et al. Preparation of tea flower hydrolats and its application in cigarette[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26(5): 27-33.
- [27] 孙兰茜, 周维, 黎洪利, 等. 珠兰精油挥发性成分及其加香方式对卷烟评吸效果的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(10): 133-136.
- SUN L X, ZHOU W, LI H L, et al. Effect of volatile components in *Chloranthus spicatus* essential oil and its flavor adding pattern on smoking evaluation of cigarette[J]. Guizhou Agric Sci, 2020, 48(10): 133-136.
- [28] 李佳楠, 陈小华, 郝毫, 等. 罗文莎叶挥发油的化学成分及抑菌与酶抑制作用[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 34-39.
- LI J N, CHEN X H, HAO H, et al. Chemical composition, bacteriostasis and enzyme inhibition of *Cinnamomum camphora* ct.cineole volatile oil[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 34-39.
- [29] 张凤梅, 唐石云, 刘哲, 等. 玫瑰精油香味成分分析及在卷烟加香中的应用[J]. 烟草科技, 2020, 53(5): 47-56.
- ZHANG F M, TANG S Y, LIU Z, et al. Aroma component analysis on mainstream cigarette smoke flavored with rose essential oil[J]. Tobacco Sci Tech, 2020, 53(5): 47-56.