

研究报告

不同种类沉香的GC-MS差异化分析

邱聪花^{1, 2, 3}

(1. 国家燃香类产品质量监督检验中心(福建), 福建 永春 362600;

2. 永春县产品质量检验所, 福建 永春 362600;

3. 福建省香产品质量检验中心, 福建 永春 362600)

摘要:目的:采用GC-MS分析不同种类沉香化学组分的差异,建立野生沉香和人工沉香的辨识方法。方法:HP-5 MS弹性石英毛细管柱;载气:He;载气流量2.0 mL/min;进样量1 μ L;离子源温度230 $^{\circ}$ C;四极杆温度150 $^{\circ}$ C;质量扫描范围10~550 m/z。中药色谱指纹图谱相似度评价系统、Simca-P 14.1软件进行数据分析处理。结果:建立野生沉香和人工沉香GC-MS指纹图谱,得出野生沉香和人工沉香指纹图谱的差异性,鉴定出33个共有成分,筛选出人工沉香和野生沉香的显著性差异成分4个。结论:野生沉香的主要共有成分为倍半萜类化合物,分布于I区;人工沉香的主要共有成分为色酮类化合物,分布于II区;筛选出2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]色酮、1-[4-(3-甲氧基苯)羟基]-3-癸烯-5-酮、8-羟基-1,11-艾瑞莫菲二烯-9-酮和6,7-二甲氧基-2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]色酮可用于识别野生沉香和人工沉香。

关键词:沉香;GC-MS;OPLS-DA;差异成分;辨别

中图分类号:O657.63 文献标识码:A 文章编号:1009-8143(2026)03-0001-08

Doi:10.3969/j.issn.1009-8143.2026.03.01

GC-MS Differentiation Study of Different Kinds of Agarwood

Qiu Cong-hua^{1, 2, 3}

(1. National Quality Supervision and Inspection Center for Incense Products(Fujian), Yongchun, Fujian 362600, China;

2. Yongchun Product Quality Inspection Institute, Yongchun, Fujian 362600, China;

3. Fujian Quality Inspection Center of Incense Products, Yongchun, Fujian 362600, China)

Abstract:Objective: GC-MS was used to analyze the characteristic constituent of different kinds of agarwood, establish the identification method of wild agarwood and artificial agarwood. **Methods:** The analysis was carried out on a HP-5 MS capillary fused silica column, Carrier gas: He, with a flow rate of 2.0 mL/min, injection volume was 1 μ L, ion source temperature was maintained at 230 $^{\circ}$ C, quadrupole temperature was maintained at 150 $^{\circ}$ C, mass scan range was 10~550 m/z. The similarity evaluation system of Chinese medicine chromatographic fingerprint and Simca-P 14.1 software were used for data analysis. **Results:** The GC-MS fingerprints of wild agarwood and artificial agarwood were established, 33 common constituents were identified, and 4 significant differences between artificial agarwood and wild agarwood were screened out. **Conclusion:** The main common constituents of wild agarwood were sesquiterpenoids, and they were all distributed in area I, the main common constituents of artificial agarwood were chromones, most of which were distributed in area II. 2-[2-(4-methoxyphenyl) ethyl] -chromone, 1- [4- (3-methoxyphenyl) hydroxy] -3-decen-5-one, 8-hydroxyl-1, 11-eremophiladien-9-one and 6, 7-dimethoxy-2-[2-(4methoxyphen) ethyl]chromone can be used to identify wild agarwood and artificial agarwood.

Key words: agarwood; GC-MS; OPLS-DA; differential constituents; distinguish

收稿日期:2025-12-13

基金项目:福建省市场监督管理局科技项目(FJMS20119051)

作者简介:邱聪花(1992—),女,硕士,从事香产品原材料研究。Email:695802656@qq.com

引言

沉香(Agarwood)为瑞香科植物受外界创伤后,经自身抵御系统应激反应后产生的带有油脂的木材^[1],是我国传统的名贵中药材,具有行气止痛、温中止呕、纳气平喘的功能,极具药用价值^[2-4]。沉香因特有的芬芳被广泛应用于日用化妆品、保健品、家居行业等,被誉为“香中之王”。野生天然沉香结香时间长、产量低,供不应求,价格昂贵,为满足市场需求,人们逐渐开发利用人工沉香。随着人工结香技术的不断发展,人工沉香与野生沉香品质难以依靠感官评审进行区分,且因沉香化学组分复杂多样,难以区分,亟需引入现代分析技术,形成一套简洁的辨识方法。

现今,沉香的研究主要集中于特有成分色酮、倍半萜类化合物的HPLC、GC-MS分析,关于人工沉香与野生沉香的定性分析和差异性研究较少。为此,本研究通过对野生沉香和人工沉香的GC-MS指纹图谱分析,结合主成分分析(PCA)、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)及 t 检验等方法,寻找野生沉香和人工沉香的显著性差异成分,为二者的区分辨别提供数据支持,有利于科学地评价人工沉香,并指导健康白木香进行高效结香。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

GC-MS联用仪:7890B-5977B型,美国安捷伦。

电子天平:CPA225D型,德国赛多利斯公司。

高速粉碎机:FW-100型,上海科恒实业发展有限公司。

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9123A型,上海精宏实验设备有限公司。

95%乙醇:色谱纯,西陇科学有限公司。

本试验采用的20批沉香样品采购于福建省金丰香业股份有限公司,样品信息详见表1。

1.2 实验方法

1.2.1 样品溶液的制备

取出粉碎后的沉香样品,用80目筛过滤收集备用。准确称取0.1 g沉香粉末,加入10 mL的95%乙醇溶液,振荡摇匀后室温放置24 h。取适量的沉香提取液经0.45 μm 滤头过滤收集,即得沉香样品溶液。

1.2.2 沉香乙醇浸提物含量测定

取上述沉香样品溶液5 mL于蒸发皿中,放置水浴锅蒸干后于烘箱(103 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 干燥3 h,取出蒸发皿放于干燥器中冷却后迅速称重。

1.2.3 GC-MS分析条件

GC条件:色谱柱为HP-5MS(30 m $\times$ 320 μm $\times$ 0.25 μm),弹性石英毛细管柱,固定相为5%-苯基-95%二甲基聚硅氧烷。柱温60 $^{\circ}\text{C}$ (保留2 min),以4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至230 $^{\circ}\text{C}$,保持20 min;汽化室温度250 $^{\circ}\text{C}$;载气为高纯He(99.999%);柱前压5.08 psi,载气流量2.0 mL/min;进样量1 μL ;分流比10:1;溶剂延迟5 min;溶剂:乙醇。

MS条件:离子源为EI源;离子源温度230 $^{\circ}\text{C}$;四极杆温度150 $^{\circ}\text{C}$;电离能量70 eV;发射电流34.6 μA ;接口温度280 $^{\circ}\text{C}$;质量扫描范围10~550 m/z。

1.2.4 数据处理分析

(1)GC-MS指纹图谱分析

将20批次沉香样品的GC-MS数据导出CDF文件,并导入“中药色谱指纹图谱相似度评价系统2012版”(国家药典委员会发布)软件进行处理分析,设定样品S1为参照图谱,选取“时间窗宽度”为0.2 min,经多点校正,自动匹配,建立不同种类沉香GC-MS指纹图谱。

(2)PCA主成分分析

将20批次沉香样品33个共有峰的峰面积数据导入Simca-P(14.1版 赛多利斯),分别进行PCA及OPLS-DA,筛选出具有重要贡献程度(VIP>1)的共有成分。将VIP>1的共有成分分别进行组间 t 检验,得到具有统计学意义($P<0.05$)的差异性成分。结合 P 值、VIP值、组间差异等对共有成分进行综合筛选,查找出显著性差异成分。

2 结果与讨论

2.1 沉香乙醇浸提物含量

图1为野生沉香和人工沉香的乙醇浸提物含量,其浸提物含量的平均值分别为33.3%、50.8%,人工沉香乙醇浸提物含量均值显著高于野生沉香。《中华人民共和国药典》2025年版中规定沉香的乙醇提取物含量应不低于10.0%^[5],本研究的沉香样品乙醇浸提物都显著高于药典中的规定值。二者存在显著的差异,可能为野生沉香结香时间历经几十

表1 沉香样品信息

编号	产地	样品信息	感官评价
SA1	广东	奇楠,结香 18个月	白褐色薄片,香气淡薄冰凉,质轻松脆,不腻手
SA2	广东	奇楠,结香 18个月	白褐色块状,香味淡,质硬,不腻手
SA3	茂名	奇楠,冷钻 12个月	黄褐色片状,香气清凉舒畅,稍腻手
SA4	广西	奇楠,结香 18个月	黄褐色块状,香气混杂,夹带清凉,质脆
SA5	茂名	奇楠,结香 18个月	黑褐色片状,香气浓郁清新,清凉提神,质硬
SA6	惠东	白木香,结香 18个月	白褐色块状,纹路清晰,气味清凉舒适,稍腻手
SA7	惠东	结香 18个月	黑褐色片状,纹路清晰,气味清新,稍腻手
SA8	深圳	奇楠,结香 18个月	黄褐色片状,气味清凉,细腻粘手
SA9	深圳	白木香,结香 18个月	褐色块状,香味淡,木质疏松,质轻,不腻手
SA10	陆河	白木香,结香 18个月	褐色粒状,香气清新凉爽,木质疏松,质轻稍腻手
SW1	香港	白木香(包头)	黑色薄片,纹路清晰,香气淡雅,略带焦香,颗粒感,不腻手
SW2	香港	白木香(皮油)	片状树皮,表皮可见树皮纹路,内有深褐色油脂,香气淡雅清爽,不腻手,材质韧度大
SW3	香港	白木香(虫漏)	褐色条状,油脂呈条状分布于木材间,香气淡雅,夹带奶香及甜味,无黏腻感
SW4	海南	绿奇楠	黑褐色薄片,香气淡,质地清脆
SW5	柬埔寨	蜜香树	规则块状,可见油脂较为均匀分布于木间隙,香气浓郁,奶香味中夹带清凉的甜味,稍腻手,硬度大
SW6	伊利安	鹰木树	规则块状,横切可见清晰油脂及木材纹路,香气浓,清凉甜味,带花香,稍腻手
SW7	老挝	蜜香树	浅褐色规则块状,香气淡,清凉中夹带淡淡木香味,不腻手,表皮粗糙松散,质轻
SW8	芽庄	—	黑褐色块状,清凉奶香味,油脂丰富,质硬
SW9	加里曼丹	鹰木树	褐色片状,香气浓郁,较松软
SW10	马来西亚	—	黑褐色片状,质硬,香味淡,带有奶香味

注:“—”表示样品种类不详;SA1-SA10为人工沉香;SW1-SW10为野生沉香。

年甚至上百年,表面经风吹日晒雨淋后,香氛逐渐散发,多为朽木,而随着人工结香技术的不断发展,越来越多的人工沉香经过种苗培育及结香技术优化提升,结油率及特有成分已远超过野生沉香。因野生沉香和人工沉香乙醇浸提物的含量高低不一,

个体差异较大,无法通过该数据对二者进行界定,仅能作为二者判定的参考指标之一。

2.2 不同种类沉香 GC-MS 指纹图谱

图2为不同种类沉香的GC-MS指纹图谱,经多点校正,在10批次野生沉香和10批次人工沉香中

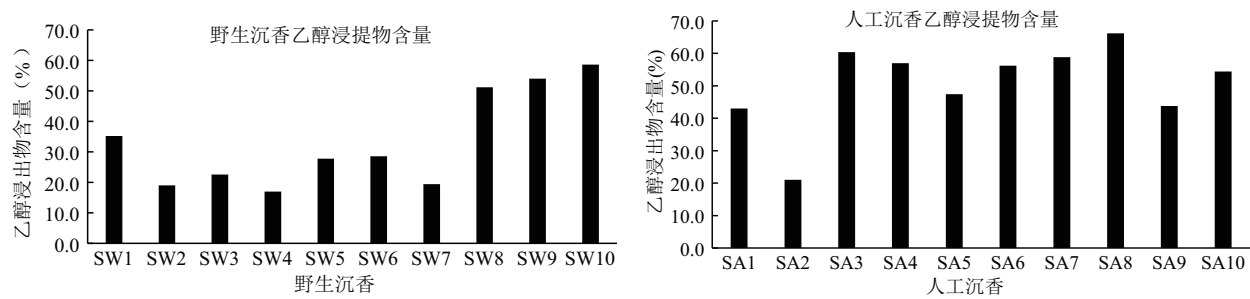


图1 不同种类沉香乙醇浸提物含量

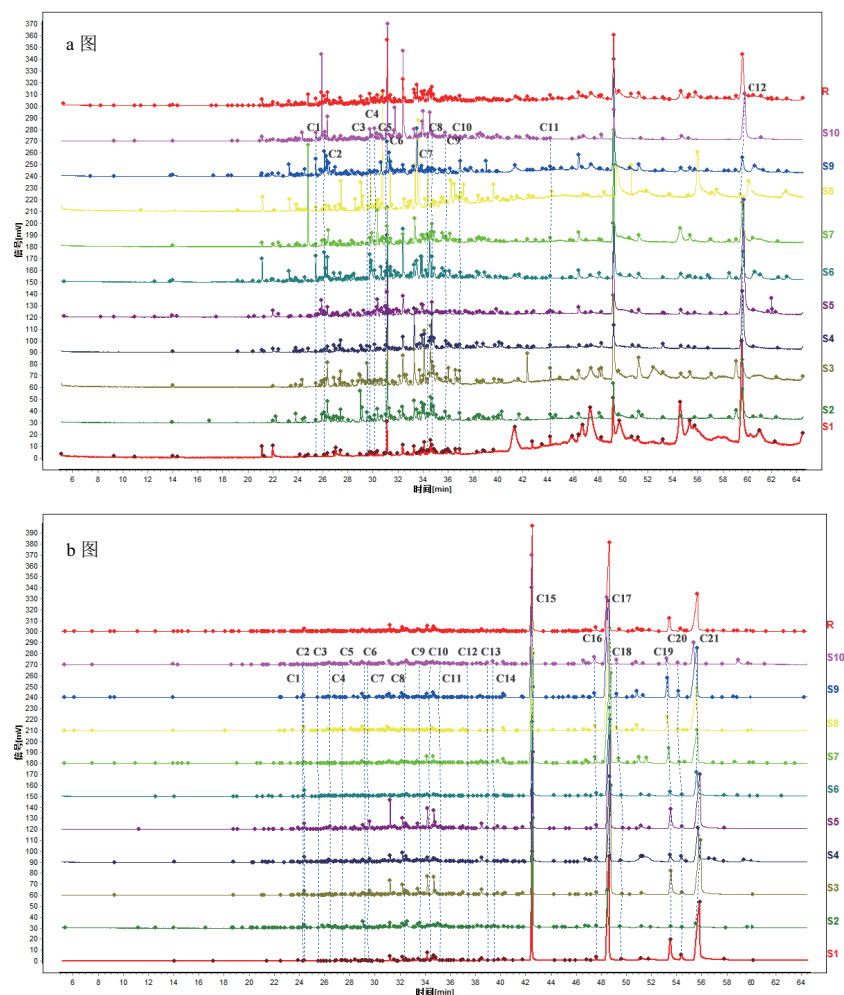


图2 不同种类沉香GC-MS指纹图谱

注:a图为野生沉香GC-MS指纹图谱,b图为人工沉香GC-MS指纹图谱。

分别寻找到共有成分12个和21个。观察图谱中共有峰的分布特征,可知野生沉香与人工沉香有显著区别。依据保留时间将其划分为两个区域:Ⅰ区(保留时间25~38 min)和Ⅱ区(保留时间38~60 min)。野生沉香GC-MS共有成分主要分布于Ⅰ区,该区域的化合物成分丰富多样,且相对含量较高。人工沉香GC-MS共有成分在Ⅰ、Ⅱ区域均有分布,相对含量较高的共有峰都分布于Ⅱ区,Ⅰ区共有峰的相对含量都较小。进一步对33个共有峰进行定性和定量分析,结果如表2、表3所示。

经Wiley和Nist质谱库比对分析,33个共有成分主要为倍半萜类、色酮类化合物以及少数的芳香族和烷烃类成分。经比对,两类沉香仅在Ⅰ区中发现1个共有成分桉叶醇,其余组分差异较大。野生沉香中发现共有成分12个,含有8个倍半萜类化合物,均处于Ⅰ区域,且8个倍半萜类化合物相对总含

量2.3%~9.5%,平均为6.3%,明显高于人工沉香Ⅰ区的倍半萜类化合物的相对含量(总量0.30%~2.49%,平均值1.08%)。Ⅱ区中野生沉香仅含有1个色酮类成分6-甲氧基-2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]-色酮,相对含量0.9%~28.3%。人工沉香Ⅱ区则含有3个色酮类成分2-(2-苯基乙基)色酮、2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]-色酮、6,7-二甲氧基2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]色酮,相对总含量在51.9%~75.9%,显著高于野生沉香。由此得出野生沉香和人工沉香在Ⅰ、Ⅱ区的分布各有特色,即野生沉香Ⅰ区以倍半萜成分为主,人工沉香Ⅱ区以色酮类成分为主。

GC-MS指纹图谱分析,野生沉香发现共有成分12个,人工沉香发现共有成分21个,野生沉香的12个共有成分中含有8个倍半萜类化合物,占比66%,人工沉香的倍半萜类化合物占比48%,明显低于野

表2 野生沉香 GC-MS 共有成分分析表

共有成分	保留时间	SW1	SW2	SW3	SW5	SW6	SW7	SW8	SW9	SW10
桉叶醇	25.446	0.08	0.3	0.17	0.24	1.87	0.19	0.25	1.77	1.05
马兜铃烯	26.140	0.09	0.9	0.45	0.56	1.85	0.41	0.32	2.2	1.09
柳杉二醇	29.541	0.05	0.92	1.71	0.12	0.18	0.13	0.23	0.13	0.15
(-)-异长叶醇	29.781	0.32	0.5	0.41	0.12	2.28	0.77	2.89	0.39	1.17
Dehydrofukinone	30.377	0.34	1.44	0.48	1.36	0.27	3.30	0.60	0.48	0.06
1,8-二甲基-4,4a,5,6,7,8-六氢-3H-萘-2-酮	31.039	0.19	0.59	0.32	0.72	0.50	0.65	0.09	0.14	0.85
正十六烷酸	34.355	0.28	9.38	0.20	0.19	0.32	0.52	2.62	0.21	0.33
香根酮	34.712	0.79	1.09	1.36	1.05	1.57	1.37	0.40	0.52	0.77
雅樞蓝酮	35.837	0.35	1.45	0.35	0.16	0.55	0.60	0.20	0.58	0.90
γ -马榄烯	36.962	0.26	0.91	0.83	0.2	0.62	0.17	0.16	1.91	0.15
2,2'-亚甲基双-4-甲基-6-叔丁基苯酚	44.199	0.55	0.49	0.87	0.29	0.16	0.32	0.36	0.26	0.06
6-甲氧基-2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]-色酮	59.540	25.30	11.59	4.86	41.93	7.43	14.20	0.92	5	17.91

表3 人工沉香 GC-MS 共有成分分析表

共有成分	保留时间	SA1	SA2	SA3	SA4	SA6	SA7	SA8	SA9	SA10
β -榄香烯	24.246	0.02	0.03	0.05	0.04	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01
α -檀香醇	24.385	0.08	0.69	0.36	0.54	0.84	0.13	0.38	0.17	0.17
桉叶醇	25.473	0.01	0.07	0.03	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03
3,7(11)-桉叶二烯	26.410	0.05	0.50	0.17	0.29	0.13	0.05	0.15	0.10	0.36
1,2-二氢-3,5-二甲氧基-萘	27.436	0.03	0.01	0.05	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.06
d-愈创木烯	29.177	0.05	0.36	0.11	0.09	0.10	0.07	0.07	0.03	0.17
4,8-二甲基-6-(1-甲基乙烯基)-2-萘酮	29.435	0.01	0.02	0.03	0.07	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01
8-羟基-1,11-艾瑞莫非二烯-9-酮	32.363	0.07	0.38	0.11	0.14	0.11	0.17	0.11	0.24	0.66
4,6,6-三甲基-2-(3-甲基丁烷基-1,3-二烯基)-3-氧三环[5.1.0.0(2,4)]辛烷	33.574	0.09	1.27	0.18	0.28	0.13	0.08	0.04	0.10	0.21
3-甲基丁基醚-2-叔丁基-6-甲基苯酚	34.357	0.02	0.66	0.02	0.05	0.04	0.07	0.05	0.08	0.27
缬草醛	35.181	0.02	0.42	0.05	0.07	0.06	0.01	0.01	0.01	0.09
异丁基二苯乙烯酮	37.414	0.01	0.11	0.03	0.06	0.03	0.02	0.00	0.01	0.07
1,5-二苯基-1-戊烯-3-酮	38.966	0.02	0.24	0.03	0.08	0.08	0.06	0.01	0.00	0.30
香树烯	39.455	0.04	0.46	0.04	0.06	0.09	0.18	0.04	0.03	0.75
2-(2-苯基乙基)色酮	42.529	17.97	48.49	8.58	23.67	31.72	27.17	21.95	20.18	32.43

(续表3)

共有成分	保留时间	SA1	SA2	SA3	SA4	SA6	SA7	SA8	SA9	SA10
(7,14)-二羟二苯并[a,j]蒽	47.573	0.59	0.75	0.43	0.85	0.61	1.23	0.85	0.70	4.14
2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]-色酮	48.647	34.66	15.88	51.41	31.95	43.64	43.82	46.14	36.34	27.39
6-甲基-2-[(4-甲基苯)氨基]-3,1-苯并噁嗪-4-酮	49.472	0.60	1.42	0.14	0.74	0.58	0.99	0.56	0.79	1.54
8-甲氧基-12a-甲基-11,12-octahydrochrysen-2-酮	53.424	7.21	1.01	7.08	2.80	2.16	3.52	3.36	5.37	2.38
6,7-二甲氧基-2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]色酮	54.296	1.66	0.10	0.46	1.95	0.57	0.27	0.18	1.62	0.71
1-[4-(3-甲氧基苯)羟基]-3-癸烯-5-酮	55.666	28.87	5.05	26.27	14.64	11.90	12.89	19.57	26.50	11.53

生沉香。反之,人工沉香中色酮类化合物的总含量显著高于倍半萜类成分的含量,相对总含量在51.9%~75.9%,高达一半及以上。童玉贵等^[6]也通过图谱划分特征区间,并表明在整树结香工艺中,色酮类成分含量升高。相关研究表明,健康的白木香主要以脂肪酸和烷烃类成分为主^[7-8],而人工沉香中时常发现烷烃类成分与2-(2-苯乙基)色酮类共存于树脂通道中^[9],可推测人工沉香结香时间短,次级代谢不完全相关,尚有烷烃类成分,而短时间内人工沉香最先形成色酮类化合物,倍半萜类成分出现时间相对较晚,且含量也较低^[10]。众多研究表明,在人工沉香中色酮类化合物显著高于倍半萜类化合物^[11-12],野生沉香中倍半萜高于人工沉香^[13-14],本研究也证明了上述观点。因此,推测通过色酮及倍半萜类化合物在GC-MS指纹图谱中的分布及总含量的统计,可作为人工沉香与野生沉香的辨识方法之一。

2.3 不同种类沉香PCA分析

图3为无监督化不同种类沉香共有成分PCA示意图,PCA结果表明野生沉香和人工沉香在范围内可进行分区,除野生沉香SW10和SW6偏离群体,其余野生沉香都能较好地聚集。人工沉香组内差异较大,整体较为分散,聚类情况一般,其中样品SA8和SA9处于野生沉香和人工沉香分区的中间,推测该两个样品有向野生沉香聚拢的倾向。

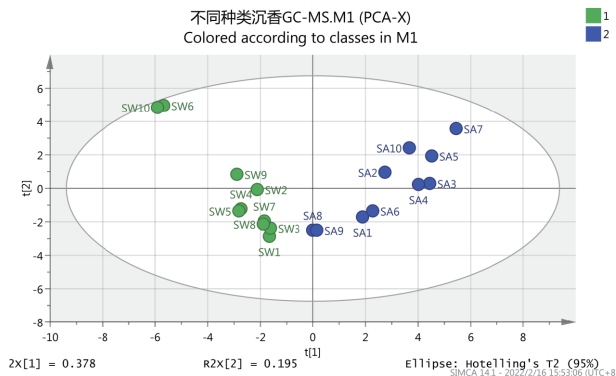


图3 不同种类沉香GC-MS共有成分PCA示意图

注:“SW”表示野生沉香;“SA”表示人工沉香。下同。

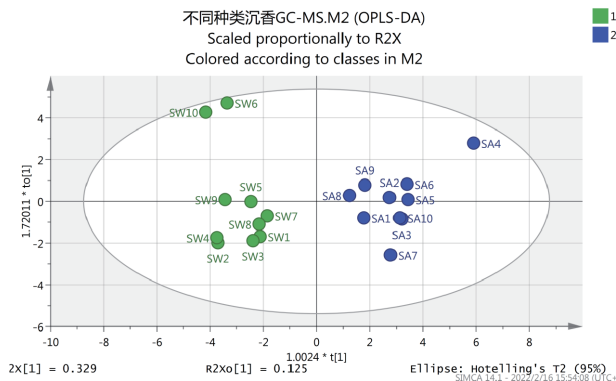


图4 不同种类沉香GC-MS共有成分OPLS-DA示意图

对野生沉香和人工沉香样本进行OPLS-DA分析,见图4。其中 $R^2(X)$ 为59.9%, $R^2(Y)$ 为89.1%, $Q^2(\text{cum})$ 为60.3%,说明59.9%的变量可以用来解释各组之间89.1%的差异,该模型的预测能力为

60.3%,预测能力大于50%, $R^2(Y)$ 与 $Q^2(cum)$ 之间的差值为0.288,小于0.3,表明模型的预测能力良好。图中野生沉香和人工沉香都可进行有效分离,虽野生沉香的SW10、SW6和人工沉香的SA4略偏移主体,但仍处于相应的分区内。

为寻找区分野生沉香和人工沉香之间的潜在标志物,通过OPLS-DA模型的S-plot荷载图,获取相关性和协方差的差异变量,选取VIP>1.0对分组贡献比较大的变量14个。通过组间 t 检验,筛选出具有统计学意义的差异变量14个($P<0.05$)。进一步对14个差异变量进行筛选 P 值 ≤ 0.01 ,得到10个差异较大的成分,如表4所示。在10个差异物中进行 $P\leq 0.01$,VIP ≥ 1.2 ,FC ≤ 0.2 筛选,得出4个显著性差异成分:2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]-色酮、1-[4-(3-甲氧基苯)羟基]-3-癸烯-5-酮、8-羟基-1,11-艾瑞莫菲二烯-9-酮和6,7-二甲氧基2-[2-(4甲氧基苯)乙基]色酮。

PCA分析得出野生沉香和人工沉香能够区分,

但少数几个样品也存在一定的跨区,这从侧面反映了随着结香时间的累积,人工沉香有趋于野生沉香分类的可能性。OPLS-DA分析野生沉香和人工沉香的差异,结合 P 值、VIP值及组间差异等,筛选出4个区分野生沉香和人工沉香的显著性差异成分:2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]色酮、1-[4-(3-甲氧基苯)羟基]-3-癸烯-5-酮、8-羟基-1,11-艾瑞莫菲二烯-9-酮和6,7-二甲氧基2-[2-(4甲氧基苯)乙基]色酮。该4个显著标志成分仅存在于人工沉香中,其中2个色酮类成分含量15.98%~51.87%,且尚未在野生沉香中检出。田程飘^[15]证实苯乙基色酮单体、双体衍生物在人工沉香的富集,马纳纳^[16]通过诱导人工栽培的白木香转录合成2-(2-苯乙基)色酮。结合本研究及相关报道推断色酮类成分是人工沉香结香的初始产物,且随着结香时间的累积逐渐形成倍半萜类化合物及多聚体色酮,而本研究筛选的4个显著性差异成分可作为野生沉香和人工沉香辨别的重要指标之一。

表4 不同种类沉香差异标志物

化学式	名称	保留时间	VIP	FC(组间差异)
C ₁₇ H ₁₄ O ₂	2-(2-苯基乙基)色酮	42.529	1.32	0.3
C ₁₈ H ₁₆ O ₃	2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]-色酮**	48.647	1.25	0
C ₁₇ H ₂₄ O ₃	1-[4-(3-甲氧基苯)羟基]-3-癸烯-5-酮**	55.666	1.23	0
C ₁₅ H ₂₂ O ₂	8-羟基-1,11-艾瑞莫菲二烯-9-酮**	32.363	1.24	0
C ₁₅ H ₂₄	d-愈创木烯	29.177	1.25	0.5
C ₁₅ H ₂₄ O	α -檀香醇	24.385	1.38	0.7
C ₂₀ H ₂₄ O ₂	(4Br,10bR,12aR)-8-methoxy-12a-methyl-1,3,4b,5,6,10b,11,12-octahydrochrysen-2-one	53.424	1.13	0
C ₁₆ H ₁₄ N ₂ O ₂	6-甲基-2-[(4-甲基苯基)氨基]-4H-3,1-苯并噁嗪-4-酮	49.472	1.13	0
C ₁₅ H ₂₂ O	3,5,6,7,8,8a-hexahydro-4,8a-dimethyl-6-(1-methylethenyl)-2(1H)naphthalenone	29.435	1.46	0.3
C ₂₀ H ₂₀ O ₅	6,7-二甲氧基2-[2-(4甲氧基苯)乙基]色酮**	54.296	1.25	0

注: P 值为人工沉香和野生沉香进行 t 检验得到的 P 值;VIP值为OPLS-DA模型多维分析得到的VIP预测值;FC=0表示该化合物为仅存在于人工沉香中的共有成分;FC>0表示野生沉香的成分在人工沉香个数的占比;“**”表示显著标志差异物(P 值 <0.01 ,VIP>1.0,FC=0)。

3 结论

本研究通过对20批沉香的乙醇提取物含量、GC-MS指纹图谱研究及PCA分析,得出野生沉香与人工沉香存在如下差异:野生沉香的主要共有

成分为倍半萜类化合物,分布于Ⅰ区(保留时间25~38 min);人工沉香的主要共有成分为色酮类化合物,分布于Ⅱ区(保留时间38~60 min);筛选出2-[2-(4-甲氧基苯)乙基]色酮、1-[4-(3-甲氧基苯)羟基]-3-癸烯-5-酮、8-羟基-1,11-艾瑞莫菲二烯-9-

酮和6,7-二甲氧基2-[2-(4甲氧基苯)乙基]色酮仅存在于人工沉香中,可用于辨识野生沉香和人工沉香。

参考文献

- [1] 袁靖喆. 沉香特征性成分鉴定及机器学习分类模型区分海南沉香的研究[D]. 海南大学, 2022.
- [2] Hashim H Y, Kerr P G, Abbas P, et al. Aquilaria spp. (agarwood) as source of health beneficial compounds: A review of traditional use, phytochemistry and pharmacology[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 189: 331–360.
- [3] 李月菲, 田从魁, 孟嘉星, 等. 沉香的化学成分及药理作用研究进展[J]. 国际药学研究杂志, 2019, 46(7): 498–506.
- [4] 杨锦玲, 梅文莉, 董文化, 等. 沉香 GC-MS 指纹图谱分析[J]. 中成药, 2016, 38(8): 1765–1770.
- [5] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(四部). 2025 年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2025: 218.
- [6] 童玉贵, 林中, 黄萍, 等. 沉香挥发气温度相关 GC-MS 二维指纹图谱的研究及应用[J]. 福建分析测试, 2022, 31(2): 10–15.
- [7] 黄满勤. 真菌诱导结香的沉香质量分析及化学成分变化研究[D]. 广西大学, 2026.
- [8] 李远彬. 基于色谱联用技术的沉香标志性差异成分分析研究[D]. 广州中医药大学, 2017.
- [9] 刘欣怡. 不同沉香树所结沉香与良种叶片的解剖学及特性研究[D]. 海南大学, 2022.
- [10] 廖格. 人工沉香中 2-(2-苯乙基)色酮类化合物的分离鉴定与动态变化规律[D]. 四川省科学技术信息研究所, 2016.
- [11] 张睿, 李晓, 陈伟, 等. 基于色酮-倍半萜比值阈值的栽培沉香鉴别方法研究[J]. 植物化学分析, 2025, 36(3): 412–423.
- [12] 刘洋洋. 通体结香技术产沉香的质量特征研究[D]. 北京协和医学院, 2018.
- [13] 杨影, 韩豫, 陈彧, 等. 白木香人工结香技术和化学成分研究进展[J]. 热带林业, 2021, 49(3): 15–18.
- [14] 马永青, 袁丽华, 刘永利. 沉香化学成分与分析方法研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2017, 34(2): 181–192.
- [15] 田程飘. 广西沉香的化学成分分析及生物活性研究[D]. 广西民族大学, 2020.
- [16] 马纳纳. 白木香结香转录组分析及其聚酮环化酶 AsP-KC1 功能的初步验证[D]. 海南大学, 2020.

DOI (Digital Object Identifier)——数字对象标识符, 是一种对包括互联网信息在内的数字信息进行标识的工具。DOI 的结构式: <DIR>.<REG>/<DSS>, 分为前缀和后缀两部分中间用一斜杠分开, 前缀中又以小圆点分为两部分。

“doi: 10.3969/j.issn.1009-8143.2013.01.008”是一篇本刊论文的数字对象标识符 (DOI), 其中“10”为数字对象标识符代码; “3969”为管理或发行者代码; “j.issn.1009-8143”《福建分析测试》期刊的 ISSN 号; “2013.01.008”为这种期刊中某篇文章的代码, 2013 为出版年份, “01”是期数, “008”是文章顺序数。利用 DOI 码可以检索到这篇文章。

中文 DOI 注册的 DOI 码与 CrossRef DOI 一样都是进入全球解析系统, 成为国际期刊学术论文的一份子, 都可以通过 DOI 全球解析系统的网站 <http://www.doi.org> 进行解析服务, 或者通过 DOI 的 URL 形式 ([http://dx.doi.org/+DOI 号](http://dx.doi.org/+DOI号), 如 <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1009-8143.2013.01.008>) 在浏览器的地址栏中或网页的任意位置进行解析链接。

本刊自 2013 年第 1 期开始启用 DOI 编码。

《福建分析测试》编辑部

2026.5