

SHS-GC-MS 技术结合 ROAV 分析 6 个姜黄种质花序的香气成分

陈品品^{1#*}, 尤桂春¹, 刘 靚¹, 马晓娟¹, 陈日忠²

(1. 泉州市农业科学研究所, 福建 泉州 362212 中国; 2. 福建泉州东润园生物科技发展有限公司, 福建 泉州 362018 中国)

摘 要: 为探究不同姜黄(*Curcuma longa*)种质花序的挥发性成分组成及其香气贡献, 揭示品种与地理来源对香气特征的影响。采用静态顶空-气相色谱-质谱联用技术(SHS-GC-MS)对 6 个姜黄种质花序的挥发性成分进行分析, 结合相对香气活度值(ROAV)评估关键香气活性物质。结果表明, 鉴定出 53 种挥发性成分, 总相对含量均高于 98.78%, 以萜烯类、醇类和酯类为主, 其中萜烯类含量最高(达 54.91%)。不同种质间成分差异显著, 同一省内种质亦呈现代谢多样性: C2(泉州洛江)萜烯类含量突出, 具木质和胡椒香韵; C1(泉州德化)和 C3(漳州)分别以酯类及萜烯-醇均衡组合为特征; 广西种质酯类总量最高(35.51%), 果香显著; 四川产区种质关键性香气成分均为甜瓜醛, 区域香气特征相似。ROAV 分析表明, β -月桂烯、桉叶油醇、异戊酸甲酯等为关键香气成分, 共同塑造了以果香、木香、薄荷香和花香为主的复合香型。姜黄花序香气特征受品种和地理来源共同影响, 萜烯类(最高占比 54.91%)、酯类(如广西品种达 35.51%)及 ROAV 关键成分(β -月桂烯、桉叶油醇等)共同构成其香气物质基础。研究结果首次明确了姜黄花序的地域性香气特征(如四川产区的甜瓜醛贡献、福建产区的代谢多样性), 为高香气品质姜黄种质选育与区域化栽培提供了科学依据。

关键词: 姜黄; 静态顶空; 花序; 香气成分; 相对气味活度值

中图分类号: S565.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)04-0716-10

陈品品, 尤桂春, 刘靚, 等. SHS-GC-MS 技术结合 ROAV 分析 6 个姜黄种质花序的香气成分[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(4): 716–725. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250125 CSTR:

32425.14.j.cnki.rdswwb.20250125



姜黄(*Curcuma longa*)为姜科姜黄属多年生草本植物, 是中国重要的传统中药材^[1], 主要分布于福建、四川、广西及云南等地^[2], 其根茎和块根分别作为“姜黄”(或“莪术”)与“郁金”入药, 并于 2019 年被列入药食同源名录。现代研究表明, 姜黄具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、降血糖、降血脂及免疫调节等多种生物活性^[3–5], 目前已广泛应用于食品、医药和化妆品等领域。当前对姜黄的研究与利用多集中于地下根茎部位, 其活性成分(姜黄素、挥发油等)已较为明确^[6–7]。在采收与加工过程中, 约占植株生物量 40% 的地上部分(包括茎、叶和花)常被废弃, 不仅导致资源浪费, 也忽视了其潜在的利用价值。近年研究发现, 姜黄地上部分同样

富含挥发油、黄酮、多糖等活性成分^[8–9], 其中挥发油具有较强的抗菌、抗炎、抗氧化及抗肿瘤等药理潜力。已有研究显示, 同属植物莪术叶片中某些倍半萜类成分的含量甚至高于根茎^[10–12], 提示姜黄非传统药用部位具有重要开发前景。尽管如此, 目前对姜黄地上器官挥发性成分的系统研究仍较为缺乏, 尤其是花序间成分差异及香气贡献尚未明确。姜黄花序为穗状花序, 呈圆柱形或卵形, 花序长约 10~18 cm, 苞片密集、覆瓦状排列, 每苞片内含 1 朵小花, 花瓣颜色呈淡黄色, 具有独特芳香。

静态顶空-气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, SHS-GC-MS)能够有效避免非挥发物干扰, 无需复杂前处理, 适用



收稿日期: 2025-09-17

修回日期: 2025-12-07

基金项目: 福建省科技计划项目(2024N0040)

*第一作者/通信作者: 陈品品(1983—), 女, 硕士, 助理研究员。研究方向: 芳香植物精油成分分析与利用。E-mail: chenpinpin2004@163.com

于挥发性成分的快速分析^[13];结合相对气味活度值法(relative odor activity value, ROAV),可科学评估各组分对整体香气的贡献程度,目前,该方法已广泛应用于食品及药用植物的风味物质研究中^[14]。因此,为了系统解析不同姜黄种质花序的挥发性成分组成及其香气特征,本研究采用 SHS-GC-MS 技术结合 ROAV 方法,对 6 个姜黄种质花序的挥发物进行定性、定量及香气贡献评价,旨在明确关键香气成分,揭示品种与地理来源的影响,为姜黄全植株资源化利用、香气品质育种及高附加值产品开发提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料 供试的 6 个姜黄种质的花序均采集自泉州市农业科技园区(24°29' ~ 25°15' N,

118°38' ~ 19°05' E)姜黄种植示范基地。该基地属亚热带海洋性季风气候,年均气温 19.5 ~ 22 ℃,年均降水量 1250 ~ 1800 mm,日照充足,土壤为 pH6.8 ~ 7.3 的中性至微酸性的砂壤土,适宜姜黄生长。所有种质均已在该基地成功引种并规范化栽培超过 2 年,生长状况一致。样品于 2024 年 10 月上旬集中采集,此时正值盛花期,花序苞片已充分舒展、色泽鲜亮,大部分小花处于半开放至全开放状态。样品具体信息详见表 1 和图 1。

1.2 试验方法 主要仪器:静态顶空-气相色谱-质谱联用仪(7697A-7890B-5977,美国安捷伦公司);HP-5ms 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm,美国安捷伦公司);电子天平(CP2202C,上海奥豪斯仪器有限公司);多功能植物萃取物(精油)生产机组(SJ-HX001,福建世纪海峡农业发展投资有限公司)。

表 1 姜黄样品信息
Tab. 1 The information of *Curcuma longa* samples

样品种质 Sample germplasm	来源 Origin of the cultivar	主要性状差异 Main trait differences			
		株高/cm Plant height	顶苞颜色 Apical bract color	根茎剖面颜色 Rhizome cross-section color	根茎长/cm Rhizome length
C1	福建泉州市德化县雷锋镇潘祠村	175 ~ 190	白粉色	浅黄色	10.0 ~ 13.5
C2	福建泉州市洛江区马甲镇梧峰村	155 ~ 175	绿色	橙黄色	8.0 ~ 10.0
C3	福建漳州市平和县崎岭乡顶寨村	160 ~ 180	白粉色	浅黄色	8.5 ~ 10.0
C4	四川乐山市犍为县罗城镇黎明村	115 ~ 130	白粉色	亮黄色	5.5 ~ 7.5
C5	广西防城港东兴市东兴镇大田村	130 ~ 155	白紫色	浅黄色	7.5 ~ 9.7
C6	四川宜宾市兴文县莲花镇长岭村	120 ~ 145	紫红色	橙黄色	5.0 ~ 6.7

GC-MS 参数为静态顶空(SHS)条件:取试验材料花序的苞片 10.0 g 放入 20 mL 顶空钳口瓶中,密封瓶口;加热箱温度 50 ℃,定温环温度 50 ℃,传输线温度 70 ℃,平衡时间 15 min,进样持续时间 0.50 min。气相色谱质谱(GC-MS)条件:进样口温度为 230 ℃;载气为高纯氦气(99.999%),恒定流量 0.8 mL·min⁻¹;分流比 5:1;溶剂延迟时间 0.5 min。升温程序:从初始温度为 45 ℃,保持 3 min,以 25 ℃·min⁻¹ 升至 250 ℃,总时长 11.2 min;四级杆温度 150 ℃,离子源为 EI,离子源温度 250 ℃,电子能量 70 eV,扫描范围 50 ~ 600 m·z⁻¹;采集方式为 SCAN 扫描。

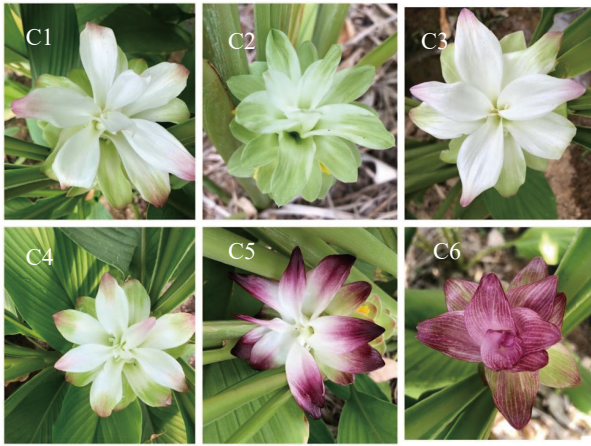
1.3 相对气味活度值 (ROAV) 评价方法 采用 ROAV 评价花序各挥发性成分对总体香气的贡

献,参考文献 [13, 15] 的方法,定义对花香气贡献最大成分的 $ROAV_{stan}=100$,其他挥发性成分的 ROAV,按下式计算:

$$ROAV_i = \frac{C_i}{C_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i} \times 100$$

式中: C_i 为挥发性成分的相对含量(%); T_i 为挥发性成分的气味阈值(μg·kg⁻¹); C_{stan} 为对姜黄的花香气贡献最大组分的相对含量(%); T_{stan} 为对姜黄的花香气贡献最大组分的气味阈值(μg·kg⁻¹)。

1.4 数据处理 挥发性成分经过 SHS-GC-MS 分离,质谱数据系统检索及 NIST 2014 标准质谱图数据库比对,采用峰面积归一化法进行定量分析,计算各成分的相对含量^[16]。利用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理。



C1(泉州德化), C2(泉州洛江), C3(漳州), C4(四川乐山), C5(广西防城港), C6(四川宜宾)。

C1 (Quanzhou Dehua), C2 (Quanzhou Luojiang), C3 (Zhangzhou), C4 (Leshan Sichuan), C5 (Fangchenggang Guangxi), C6 (Yibin Sichuan).

图 1 姜黄种质的花序

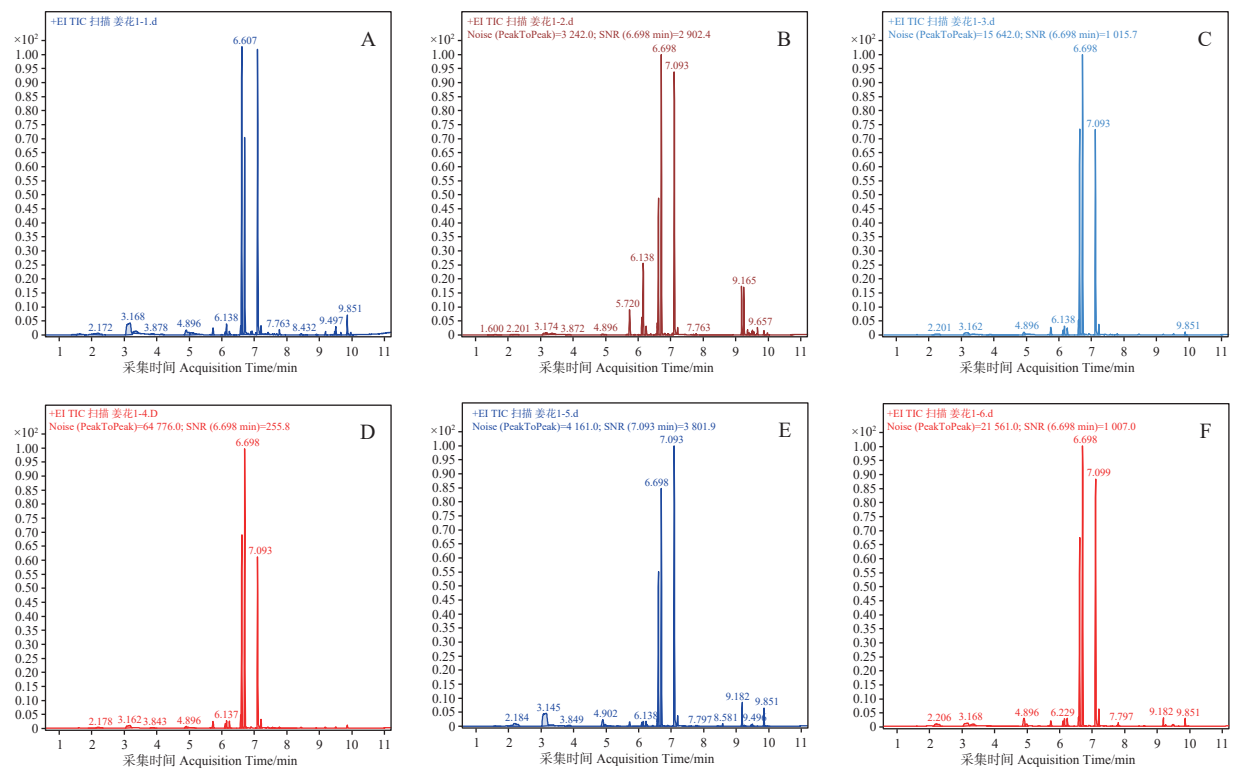
Fig. 1 Inflorescences of *Curcuma longa* samples

2 结果与分析

2.1 不同姜黄种质花序的挥发性成分分析 采用 SHS-SGC-MS 技术对 6 个姜黄种质花序的挥发性成分进行分析, 获得总离子流图 (total ion chromatogram, TIC; 图 2)。经筛选剔除匹配度低于<80%、结构不明确及色谱柱流失所引起的峰,

最终鉴定出 53 个挥发性成分(表 1)。各样品挥发性成分总相对含量在 98.78%~99.87%, 表明分析结果具有良好的代表性。主要挥发性成分包括 3-萜烯(18.53%~37.44%)、桉叶油醇(14.85%~28.66%)、甲酸芳樟酯(23.39%~32.30%)、2-甲基丁腈(1.45%~10.98%)、 β -月桂烯(0.47%~10.27%)和 4-己烯-1-醇(0.07%~2.26%)等。

由表 2 与图 2 可知, 姜黄花序挥发性成分以萜烯类、醇类和酯类为主, 其相对含量与组成在不同种质间存在显著差异。萜烯类化合物数量最多(19 种), 相对含量介于 24.23%~54.91%; 酯类 12 种, 含量范围为 24.03%~35.51%; 醇类 8 种, 含量为 15.27%~32.76%。此外, 还鉴定出烃类 7 种(1.01%~3.73%)、醚类 2 种(0.24%~2.06%)及其他类别 5 种(1.51%~11.20%)。萜烯类成分在所有品种中均占比较高, 尤其在 C2 中达到 54.91%, 其中 3-萜烯(30.17%)、 β -月桂烯(10.27%)和丁香烯(3.85%)含量突出。醇类中桉叶油醇普遍存在于各品种中, 在 C1 中含量最高(28.66%)。酯类中甲酸芳樟酯分布较为均匀且含量显著(23.39%~32.30%); C5 中酯类总量最高(35.51%), 其中苯甲



A. C1(泉州德化); B. C2(泉州洛江); C. C3(漳州); D. C4(四川乐山); E. C5(广西防城港); F. C6(四川宜宾)。

A. Quanzhou Dehua; B. Quanzhou Luojiang; C. Zhangzhou; D. Leshan, Sichuan; E. Fangchenggang, Guangxi; F. Yibin, Sichuan.

图 2 不同姜黄种质花序的挥发性成分总离子流图

Fig. 2 TIC of volatile compounds in inflorescences of different *Curcuma longa* germplasms

酸异戊酯含量达 2.22%。烃类、醚类及其他类成分虽然占比较低,但部分品种中特定成分含量突出,如 C5 中 2-甲基丁腈含量为 10.98%,可能对整体香气风格产生重要影响。

表 2 不同姜黄种质花序的挥发性成分 SHS-GC-MS 分析结果

Tab. 2 Analysis results of volatile components in inflorescences of different *C. longa* germplasms by SHS-GC-MS

类别 Class	编号 Code	化合物 Compound	化学文摘服务号 CAS No.	相对含量 Relative Content/%					
				C1	C2	C3	C4	C5	C6
萜烯类 Terpenes	1	α -水芹烯 α -Phellandrene	99-83-2	—	0.28	0.10	0.10	—	0.05
	2	茨烯 Camphene	79-92-5	—	0.10	—	—	—	—
	3	β -水芹烯 β -Phellandrene	555-10-2	0.37	2.22	0.71	0.73	0.53	0.66
	4	γ -柠檬烯 γ -Limonene	499-97-8	1.28	—	1.45	1.33	1.51	2.15
	5	β -月桂烯 β -Myrcene	123-35-3	0.47	10.27	1.02	1.11	—	—
	6	β -松油烯 β -Terpinene	99-85-4	—	0.18	—	—	—	—
	7	D-柠檬烯 D-Limonene	5989-27-5	0.80	1.13	1.72	—	0.81	0.09
	8	3-蒎烯 3-Carene	13466-78-9	18.53	30.17	34.43	37.44	23.85	32.49
	9	水合桉烯 trans-Sabinene hydrate	17699-16-0	0.08	0.07	—	—	—	—
	10	丁香烯 Caryophyllene	87-44-5	—	3.85	—	—	—	—
	11	反式- β -金合欢烯 (E)- β -Farnesene	18794-84-8	—	3.50	—	—	—	—
	12	律草烯 Humulene	6753-98-6	—	0.46	—	—	—	—
	13	(+)-香橙烯 Aromandendrene	489-39-4	—	0.23	—	—	—	—
	14	β -柏木萜烯 (+)- β -Funebrene	79120-98-2	—	0.15	—	—	—	—
	15	β -依兰油烯 β -Muurolene	30021-74-0	—	1.24	—	—	—	—
	16	金合欢烯 α -Farnesene	502-61-4	0.69	—	0.50	0.17	0.26	0.16
	17	δ -杜松烯 δ -Cadinene	483-76-1	0.22	0.68	—	—	—	—
	18	角鲨烯 Squalene	111-02-4	1.60	0.38	—	0.36	1.51	0.65
	19	1-表双环倍半水芹烯 (+)-epi-Bicyclosquiphellandrene	54274-73-6	0.19	—	—	—	0.05	—
	小计			24.23	54.91	39.93	41.24	28.52	36.25
醇类 Alcohols	1	2,2,4,4-四甲基-1,3-环丁二醇 2,2,4,4-tetramethyl-1,3-Cyclobutanediol	3010-96-6	—	—	—	—	—	0.26
	2	4-己烯-1-醇 (E)-4-Hexen-1-ol	928-92-7	2.19	0.07	1.57	0.72	1.81	2.26
	3	桉叶油醇 Eucalyptol	470-82-6	28.66	14.85	27.17	28.03	17.45	20.87
	4	紫苏醇 Perillyl alcohol	536-59-4	0.44	—	—	—	—	0.06
	5	苯乙醇 Phenylethyl Alcohol	60-12-8	0.45	—	—	—	—	—
	6	3-苯丙醇 3-Phenylpropanol	122-97-4	0.45	0.04	0.13	0.13	0.07	0.08
	7	罗勒烯醇 Ocimenol	5986-38-9	0.09	—	—	—	—	—
	8	α -松油醇 α -Terpineol	98-55-5	0.48	0.31	0.16	0.14	—	—
	小计			32.76	15.27	29.03	29.02	19.33	23.53
酯类 Esters	1	异戊酸甲酯 Methyl isovalerate	556-24-1	0.47	0.09	0.11	0.39	0.39	—
	2	1,6-己二醇二丙烯酸酯 Hexamethylene diacrylate	13048-33-4	—	—	—	—	—	0.67

续表 2 Tab. 2 Continued

类别 Class	编号 Code	化合物 Compound	化学文摘服务号 CAS No.	相对含量 Relative Content/%					
				C1	C2	C3	C4	C5	C6
	3	丙烯酸丁酯 2-Propenoic acid, butyl ester	141-32-2	1.94	—	—	—	0.19	0.23
	4	丁酸异戊酯 Isoamyl N-butyrate	106-27-4	0.06	—	—	—	0.09	—
	5	2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基) 丙烷-2-基碳酸乙酯 Ethyl 2-(5-methyl-5-vinyltetrahydrofuran-2-yl)propan-2-yl carbonate	1 000 373-80-3	0.16	—	—	—	—	—
	6	甲酸芳樟酯 Linalyl formate	115-99-1	25.71	25.95	25.68	23.39	32.30	30.43
	7	乙酸苄酯 Benzyl acetate	140-11-4	0.07	—	0.10	0.08	—	—
	8	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	119-36-8	—	—	—	—	0.10	0.39
	9	苯甲酸异丁酯 Isobutyl benzoate	120-50-3	—	—	—	—	0.22	0.06
	10	2-甲基丁酸苯甲酯 benzyl 2-methyl butyrate	56 423-40-6	0.05	—	—	—	—	—
	11	戊酸苄酯 benzyl valerate	10 361-39-4	0.05	—	—	—	—	—
	12	苯甲酸异戊酯 Isoamyl Benzoate	94-46-2	0.39	—	0.14	0.17	2.22	0.81
	小计			28.90	26.04	26.03	24.03	35.51	32.59
烃类 Hydrocarbons	1	氟环己烷 Fluorocyclohexane	372-46-3	1.39	—	—	—	—	—
	2	1-甲基环戊烯 Methylcyclopentene	693-89-0	—	—	0.89	1.07	2.66	1.85
	3	3-(2-丁烯-1-基氧基)-1-丁烯 3-(2-butenyloxy)-1-Butene	1 476-05-7	—	0.30	—	—	—	—
	4	4-乙基-3-乙烯环己烷 4-Ethyl-3-ethylidenecyclohexene	61 233-77-0	0.24	—	—	—	—	—
	5	反式-4,8-二甲1,3,7-三烯 (E)-4,8-Dimethylnona-1,3,7-triene	19 945-61-0	0.86	0.59	1.23	1.07	1.07	1.64
	6	3-氨基苯乙炔 3-Aminophenylacetylene	54 060-30-9	—	—	—	0.21	—	—
	7	邻伞花烃 o-Cymene	527-84-4	—	0.12	—	—	—	—
	小计			2.49	1.01	2.12	2.35	3.73	3.49
醚类 Ethers	1	庚醚 1-heptoxyheptane	629-64-1	1.74	0.67	0.49	0.32	0.74	0.09
	2	异丁香酚甲醚 (E)-methyl isoeugenol	93-16-3	0.32	—	—	—	0.19	0.15
	小计			2.06	0.67	0.49	0.32	0.93	0.24
其他 Others	1	2-甲基丁腈 2-methylbutylnitrile	18 936-17-9	8.41	1.45	2.06	2.44	10.98	2.34
	2	异丁香酚 Isoeugenol	97-54-1	—	—	—	—	0.14	0.15
	3	吲哚 Indole	120-72-9	0.27	—	0.21	—	0.08	0.08
	4	安息香醛 Benzaldehyde	100-52-7	0.06	0.06	—	—	—	—
	5	甜瓜醛 Melonal	106-72-9	—	—	—	0.41	—	0.11
	小计			8.74	1.51	2.27	2.85	11.20	2.68
合计		53		99.18	99.41	99.87	99.81	99.22	98.78

注: “—”表示未查询或检测出。下同。

Note: “—”indicates not detected or not queried.similarly hereinafter.

2.2 花序香气成分分析 结合文献资料^[17-25], 获取了 31 种香气化合物的气味阈值, 并依据 1.3 中所述公式计算其相对气味活度值(ROAV), 结果列

表 3 ROAV 分析不同姜黄种质花序的挥发性化合物

Tab. 3 ROAV analysis of volatile compounds inflorescences of different *C. longa* germplasms

编号 Code	类别 Class	化合物 Compound	气味阈值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Olfactory threshold	相对气味活度值 ROAV						香气描述 Aroma description
				C1	C2	C3	C4	C5	C6	
1		α -水芹烯	0.04	—	1.02	0.47	0.06	—	0.11	黑胡椒和薄荷香气
2		茨烯	0.88	—	0.02	—	—	—	—	木香、薄荷味
3		β -水芹烯	0.036	1.54	9.01	3.69	0.49	2.45	1.67 *	
4		γ -柠檬烯	0.21	0.91	—	1.29	0.15	1.20	0.93	柑橘味、清淡的香脂香
5		β -月桂烯	0.015	0.56	100.00	12.71	1.80	—	—	清淡的香脂香气
6	萜烯类 Terpenes	γ -松油烯	0.26	—	0.10	—	—	—	—	*
7		D-柠檬烯	0.034	3.52	4.85	9.46	—	3.97	0.24	柑橘味
8		3-萜烯	9.30	0.30	0.47	0.69	0.10	0.43	0.32	松木样香气
9		水合桉烯	0.098	0.12	0.10	—	—	—	—	*
10		丁香烯	0.016	—	35.14	—	—	—	—	丁香、松木香、柑橘香
11		律草烯	0.16	—	0.42	—	—	—	—	酒花香、丁香
12		β -柏木萜烯	0.005 014	—	4.37	—	—	—	—	*
13		金合欢烯	0.087	1.19	—	1.07	0.05	0.50	0.17	苹果香、玫瑰香
14		4-己烯-1-醇	0.110	2.98	0.09	2.67	0.16	2.74	1.87 *	
15		桉叶油醇	0.050 8	84.34	42.70	100.00	13.46	57.25	37.35	桉叶香气、樟脑香
16	醇类 Alcohols	紫苏醇	7.00	3.00	—	—	—	—	—	琥珀香、
17		苯乙醇	0.012	5.61	—	—	—	—	—	玫瑰味、面包香
18		3-苯丙醇	0.42	0.16	0.01	0.06	0.01	0.03	0.02	甜花香、甜蜜饯香
19		α -松油醇	0.86	0.08	0.05	0.03	—	—	—	油脂香气、薄荷香
20		异戊酸甲酯	0.004 4	15.97	2.99	4.67	2.16	14.77	—	果香(苹果、菠萝、香蕉)
21		丙烯酸丁酯	0.002 9	100.00	—	—	—	10.92	7.21	果香、香蕉味
22	酯类 Esters	丁酸异戊酯	0.000 15	59.79	—	—	—	100.00	—	果香
23		乙酸苜酯	0.364	0.03	—	0.05	0.01	—	—	茉莉花香、果香
24		水杨酸甲酯	0.016	—	—	—	—	1.04	2.22	薄荷香
25		苯甲酸异戊酯	0.25	0.23	—	0.10	0.02	1.48	0.29	果香、龙涎香
26	烃类 Hydrocarbons	邻伞花烃	0.004	—	4.38	—	—	—	—	清香味
27	醚类 Ethers	异丁香酚甲醚	1.60	0.03	—	—	—	0.02	0.01	花香(康乃馨、石竹)
28		异丁香酚	0.01	—	—	—	—	2.33	1.36	丁香味
29	其他 Others	吲哚	0.008 1	4.98	—	4.85	—	1.65	0.90	花香
30		安息香醛	0.085	0.11	0.10	—	—	—	—	苦杏仁、樱桃及坚果香
31		甜瓜醛	0.000 1	—	—	—	100.00	—	100.00	瓜香、清香、脂蜡香

注: “*”表示无相关香气描述。
Note: “*”indicates no relevant aroma description.

特征。萜烯类成分中, β -月桂烯、丁香烯及 *D*-柠檬烯 3 个成分贡献显著,赋予样品黑胡椒、薄荷、松木与柑橘等多样香气属性^[23, 26]。醇类中桉叶油醇,呈现出明显的桉叶与樟脑香气^[27];苯乙醇则带有玫瑰和面包香韵^[28]。酯类成分如异戊酸甲酯、丙烯酸丁酯和丁酸异戊酯,提供整体香气中的果香调,表现出苹果、桃、菠萝和香蕉等风味特征^[29-30]。此外,其他类化合物中的甜瓜醛贡献了清晰的瓜香和脂蜡香^[31],而异丁香酚则提供典型的丁香香气^[32]。总体而言,姜黄花序香气层次丰富,以果香、木香、薄荷香和花香为主调,多种化合物共同作用,形成强烈而持久的芳香特征。

不同种质间的特征香气成分存在显著差异,主要体现在关键香气成分的种类及其 ROAV 贡献强度上。C2(泉州洛江)的整体香气表现最为突出,其主要特征成分包括 β -月桂烯(ROAV 100)、丁香烯(ROAV 35.14)和桉叶油醇(ROAV 42.70),共同赋予该种质浓郁的果香、松木香和桉叶香气。C1(泉州德化)与 C5(广西防城港)则以酯类成分为主,如 C1 中丙烯酸丁酯(ROAV 100)及 C5 中丁酸异戊酯(ROAV 100),表现出浓郁的水果香气风格^[33]。C3(漳州)的香气组成中醇类与萜烯相对均衡,其中桉叶油醇(ROAV 100)、 β -月桂烯(ROAV 12.71)与 *D*-柠檬烯(ROAV 9.46)共同奠定了柑橘香与樟脑香的基底。C4(四川乐山)和 C6(四川宜宾)中甜瓜醛(ROAV 100)贡献显著,表现出清晰的瓜香和脂蜡香特征。整体上,不同种质间香气差异主要源于萜烯类和酯类成分的组成及含量变化,形成了从果香主导到木香、清香等不同风格的整体香韵。

3 讨论与结论

本研究采用 SHS-GC-MS 技术对 6 个姜黄种质的花序的挥发性成分进行了分析,共鉴定出 53 种化合物,总相对含量均高于 98.78%,表明这些挥发性成分构成了姜黄香气形成的物质基础。从组成类别来看,萜烯类、醇类和酯类是姜黄花序中最主要的三类挥发性成分,其中萜烯类不仅在种类数量(19 种)上占优势,在相对含量(最高达 54.91%)上也居于主导,这与姜黄作为姜科植物富含萜类次生代谢产物的特性相吻合^[34]。不同种质间挥发性成分的含量分布存在明显差异,尤其值

得注意的是,同一省份的不同种质也表现出显著化学多样性。例如,同产于福建省的 C2(泉州洛江区)中萜烯类总含量最高,其中,3-萜烯、 β -月桂烯和丁香烯的含量显著高于其他品种,提示该品种可能具有更强烈的木质和胡椒香韵;而同样来自福建的 C1(泉州德化)和 C3(漳州)则分别以酯类和均衡的萜烯-醇类组合为特征。相比之下,C5(广西东兴)中酯类总量最高(35.51%),尤其是以苯甲酸异戊酯的积累增强其果香调。而两个四川产区的 C4(乐山)与 C6(宜宾)均显示出甜瓜醛的显著贡献,体现出地理邻近产区在香气特征上可能的相似性。这些成分差异不仅体现了品种间的遗传多样性,也可能受栽培地域、生长条件等因素影响^[35-36],为今后开展姜黄香气品质定向育种的研究提供了理论依据。

通过 ROAV 分析,本研究进一步识别出对姜黄花序整体香气具有关键贡献的化合物。ROAV 值高的成分通常香气阈值较低,即便在微量存在时仍对香气感知起决定性作用^[26]。在萜烯类中, β -月桂烯、丁香烯及 *D*-柠檬烯表现出较高的香气活性,共同赋予样品以黑胡椒、松木和柑橘类香气。醇类中的桉叶油醇在所有种质中均具有极高 ROAV 值,其典型的樟脑和桉叶清香成为姜黄花的基础香调。酯类成分,如异戊酸甲酯、丙烯酸丁酯和丁酸异戊酯,显著增强了整体香气中的果香特征,如苹果、桃、香蕉和菠萝风味。此外,甜瓜醛和异丁香酚等其他类化合物也在特定种质中贡献了瓜香和丁香韵。由此可见,姜黄花序的香气并非由单一组分决定,而是由萜烯类、醇类和酯类等多类化合物共同作用的结果,整体呈现以果香、木香、薄荷香和花香为主体的复杂香气轮廓。姜黄花序的挥发性成分与根茎、叶的挥发性成分存在较大差别,根茎挥发油主要成分有芳姜黄酮、姜黄酮、姜烯、 β -红没药烯和倍半水芹烯等^[37-39],叶挥发油主要成分为榄香烯、蛇麻烯、莪术醇和莪术二酮等^[40-41]。

不同姜黄种质的花序在香气属性上表现出明显区别,其差异主要源于关键香气成分的种类、含量及 ROVA 值的综合影响。从地理分布看,福建产区的种质整体香气表现更为多样: C2(泉州洛江区)香气最为突出,主要由 β -月桂烯、丁香烯和桉叶油醇共同作用,呈现出强烈的果香、松木香和桉

脑香特征。C1(泉州德化)则因酯类物质含量较高而呈现出更浓郁的水果香调,其中丙烯酸丁酯和丁酸异戊酯等成分显示出极强的香气贡献能力。C3(漳州)的香气则相对均衡,萜烯与醇类物质配比较为协调,柑橘与樟脑香成为其基底风味。四川产区的 2 个种质(乐山与宜宾)均表现出瓜香和脂蜡香,形成区别于其他产区的香气风格。而广西产区(C5)则以酯类总量最高为特征,在果香表现上尤为突出。这些差异不仅体现了种质间挥发性成分积累的代谢差异,也可能与其基因表达、酶活性及环境适应策略有关^[42-43]。

综上,本研究通过 SHS-GC-MS 技术结合 ROAV 分析,分析比较了 6 个姜黄种质花序的挥发性成分及香气贡献。结果表明,姜黄的花香气物质以萜烯类、醇类和酯类为主,不同种质间香气特征的差异既反映地理来源影响(如四川产区的瓜香特征),也体现同一区域内不同种质的代谢多样性(如福建产区的化学型分化)。该研究不仅明确了各种质的香气构成及种间联系,也为姜黄香气品质的品种选育与区域化开发提供了理论依据。后续工作可进一步整合多组学与分子生物学手段,深入解析香气成分合成的调控机制与地理适应规律,推动姜黄高香气品质种质的创新与利用。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025: 285.
- [2] 王鹏, 金正, 余婷, 等. 预测姜黄属植物在中国当前和未来气候情景下的潜在分布区变化[J]. 草业学报, 2024, 33(10): 14–27. <https://doi.org/10.11686/cyxb2023435>
- [3] 蔡聪艺, 张玲玲, 张文州, 等. 姜黄对急性痛风性关节炎小鼠抗炎活性的研究[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(9): 89–95. <https://doi.org/10.19804/j.issn1006-2513.2025.9.012>
- [4] 王海晶, 杨和平. 姜黄挥发油对人肺腺癌 A549 细胞作用的形态学研究[J]. 第三军医大学学报, 2005, 27(3): 220–222. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-5404.2005.03.011>
- [5] 孙林林, 乔利, 田振华, 等. 姜黄化学成分及药理作用研究进展[J]. 山东中医药大学学报, 2019, 43(2): 207–212. <https://doi.org/10.16294/j.cnki.1007-659x.2019.02.023>
- [6] 孙敬茹, 卜俊玲, 崔光红, 等. 姜黄植物不同发育阶段根茎中姜黄素类和萜类代谢物的积累和合成研究[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(5): 927–934. <https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20181226.003>
- [7] Yaikwawong M, Jansarikit L, Jirawatnotai S, et al. Curcumin reduces depression in obese patients with type 2 diabetes: a randomized controlled trial[J]. *Nutrients*, 2024, 16(15): 2414. <https://doi.org/10.3390/nu16152414>
- [8] 魏文文, 吴萍, 潘武, 等. 姜黄地上部分化学成分的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(1): 87–92. <https://doi.org/10.11926/jtsb.3604>
- [9] 马清苑. 姜黄多糖的提取工艺及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业, 2025, 46(7): 60–66.
- [10] 成晓静, 刘华钢, 廖月葵, 等. 3 种莪术不同部位挥发油成分比较[J]. 中药材, 2009, 32(10): 1551–1553. <https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2009.10.022>
- [11] Zhu J J, An Y W, Hu G, et al. Simultaneous determination of multiple sesquiterpenes in *Curcuma wenyujin* herbal medicines and related products with one single reference standard[J]. *Molecules*, 2013, 18(2): 2110–2121. <https://doi.org/10.3390/molecules18022110>
- [12] 黄盼, 王倩, 周改莲, 等. 广西莪术不同部位挥发性成分的 GC-MS 差异性分析[J]. 时珍国医国药, 2020, 31(10): 2366–2368. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0805.2020.10.018>
- [13] 陈品品, 庄卫东, 马晓娟, 等. SHS-GC-MS 技术结合 ROAV 分析翅果油挥发性成分[J]. 东南园艺, 2024, 12(1): 45–52. <https://doi.org/10.20023/j.cnki.2095-5774.2024.01.005>
- [14] Chen S, Tang J, Fan S S, et al. Comparison of potent odorants in traditional and modern types of Chinese *Xiaoqu* liquor (Baijiu) based on odor activity values and multivariate analyses[J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2392. <https://doi.org/10.3390/foods10102392>
- [15] 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. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-6630.2008.07.082>
- [16] 刘娜娜, 程晓, 潘珍珍, 等. 伏牛山区六妹羊肚菌挥发性呈香物质分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 161–167. <https://doi.org/10.12161/j.issn.1005-6521.2023.15.024>
- [17] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 李智宇, 王凯, 冒德寿, 等译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2018: 1–648.
- [18] 郭俊齐, 王亚菲, 沈瑜, 等. HS-SPME-GC-MS 技术结合 ROAV 分析桐柏山野红茶的关键香气物质[J]. 南方农业学报, 2025, 56(10): 3081–3092. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2025.10.008>
- [19] Yang C, Luo L P, Zhang H J, et al. Common aroma-active components of propolis from 23 regions of China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(7): 1268–1282. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3969>
- [20] Yu B, Zhang D, Yan X W, et al. Comparative evaluation of the chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of the volatile oils of hawk tea from six botanical origins[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2016, 13(11): 1573–1583. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201600>

099

- [21] Zhai X T, Granvogl M. Key odor-active compounds in raw green and red *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. and their changes during blanching[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(27): 7169–7183. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02012>
- [22] 林良静, 蔡惠钿, 包涵, 等. 潮汕特色佛手香黄的特征挥发性风味成分分析[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(7): 238–249. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.0929>
- [23] 江飞凤, 龙运忠, 谭晓辉, 等. 蜜柚发酵酒与蒸馏酒香气成分的 GC-MS 分析[J]. *中国酿造*, 2020, 39(11): 173–178. <https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2020.11.033>
- [24] Ferreira V, López R, Cacho J F. Quantitative determination of the odorants of young red wines from different grape varieties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(11): 1659–1667. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(20000901\)80:11<1659::AID-JSFA693>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1097-0010(20000901)80:11<1659::AID-JSFA693>3.0.CO;2-6)
- [25] Rodrigues H, Sáenz-Navajas M P, Franco-Luesma E, et al. Sensory and chemical drivers of wine minerality aroma: an application to Chablis wines[J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.036>
- [26] 牛丽影, 郁萌, 刘夫国, 等. 香橼精油的组成及香气活性成分的 GC-MS-O 分析[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(4): 186–191. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2013.04.006>
- [27] Mehta P K, De Sousa Galvão M, SOARES A C, et al. Volatile constituents of jambolan (*Syzygium cumini* L.) fruits at three maturation stages and optimization of HS-SPME GC-MS method using a central composite design[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(3): 733–749. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-1038-4>
- [28] 杨梅, 李涛, 巩文杰, 等. 柿子酒酿造工艺优化及香气成分分析[J]. *天津农学院学报*, 2023, 30(1): 12–17. <https://doi.org/10.19640/j.cnki.jtau.2023.01.003>
- [29] 张杰, 蒋茜, 徐飞, 等. 三种市售泡青菜香味物质的鉴定与对比研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 23–26. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-9973.2020.02.006>
- [30] 杨康慧, 李丹, 白丽霞, 等. 不同品种桃果实香气及氨基酸成分分析[J]. *南方农业学报*, 2025, 56(11): 3522–3532. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2025.11.020>
- [31] Corma A, Iborra S, Mifsud M, et al. A new, alternative, halogen-free synthesis for the fragrance compound Melonal using zeolites and mesoporous materials as oxidation catalysts[J]. *Journal of Catalysis*, 2005, 234(1): 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2005.06.006>
- [32] 陈倩莲, 刘仕章, 占仕权, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定 4 种武夷岩茶关键呈香物质[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 296–303. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090092>
- [33] 丁力杰, 唐云, 赵亚雄, 等. 白酒中的重要酯类物质及主要来源研究现状[J]. *酿酒科技*, 2024(3): 91–100. <https://doi.org/10.13746/j.njkj.2023104>
- [34] 郭晶晶, 袁长春, 傅凯, 等. 活性天然产物莪术烯的全合成[J]. *四川大学学报 (自然科学版)*, 2023(3): 135–140. <https://doi.org/10.19907/j.0490-6756.2023.035001>
- [35] 杨诗敏, 何林煜. 不同地域生姜挥发油的化学成分比较[J]. *食品安全导刊*, 2023(16): 100–102. <https://doi.org/10.16043/j.cnki.cfs.2023.16.056>
- [36] 陈雨然, 罗黎明, 刘志勇. 不同产地生姜挥发油化学成分比较与分析[J]. *江西中医药*, 2022, 53(4): 67–70.
- [37] 刘梦婷, 王清隆, 羊青, 等. 基于 GC-MS 分析不同资源姜黄挥发油成分及含量差异[J]. *中国调味品*, 2024, 49(9): 167–176. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-9973.2024.09.026>
- [38] 杨晓娜, 徐玲, 李田, 等. 腾冲姜黄精油的成分及其对变异链球菌抑菌机理的初探[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(12): 107–114. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040334>
- [39] 杨晓娜, 艾薇, 李悦, 等. 基于三种方法提取的腾冲野生姜黄精油成分比较及抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(5): 84–92. <https://doi.org/10.19804/j.issn1006-2513.2024.5.009>
- [40] 王茜, 苟学梅, 高刚, 等. 蓬莪术干叶和鲜叶精油化学成分分析与抗氧化、抑菌活性研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(8): 97–102. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2015.08.011>
- [41] 陈桂林, 娄欣颖, 谢易伶, 等. 莪术地上部分化学成分和药理作用的研究进展[J]. *中药与临床*, 2024, 15(5): 87–93. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-926X.2024.05.016>
- [42] 杨洁慧, 杜佳林, 李静文, 等. HS-GC-MS 结合 ROAV 分析不同品种橘红花挥发性成分[J]. *中国现代中药*, 2024, 26(4): 616–624. <https://doi.org/10.13313/j.issn.1673-4890.20240108004>
- [43] 刘茜, 陈敏, 靳可婷, 等. 四川省 9 个柑橘品种果实挥发性香气成分差异性分析及评价[J]. *中国果树*, 2025 (1): 55–67. <https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2025.01.009>

Identification of key aroma compounds extracted from inflorescences of *Curcuma longa* by SHS-GC-MS and ROAV

Chen Pinpin^{1##}, You Guichun¹, Liu Liang¹, Ma Xiaojuan¹, Chen Rizhong²

(1. Quanzhou Institute of Agricultural Sciences, Quanzhou, Fujian 362212, China; 2. Fujian Quanzhou Dongrunyuan Agricultural Technology Development Company Limited, Quanzhou, Fujian 362018, China)

Abstract: Inflorescences of different accessions of *Curcuma longa* germplasm were collected to analyze their volatile composition and aroma contributions with a view to elucidating the effects of cultivar and geographical origin on their aroma profiles. Static headspace-gas chromatography-mass spectrometry (SHS-GC-MS) was employed to analyze the volatile compounds from six accessions of *C. longa* germplasm. Key aroma-active substances were assessed by the relative odor activity value (ROAV). The results showed that 53 volatile compounds were identified, with total relative contents all exceeding 98.78%. Terpenes, alcohols, and esters were the predominant classes, among which terpenes showed the highest relative content (up to 54.91%). Significant compositional differences were observed among the germplasm accessions, and metabolic diversity was also noted within the same province: C2 (Luojiang, Quanzhou) exhibited prominent terpene content, imparting woody and peppery notes; C1 (Dehua, Quanzhou) and C3 (Zhangzhou) were characterized by a high ester content and a balanced terpene-alcohol profile, respectively; the Guangxi germplasm possessed the highest total ester content (35.51%), contributing a distinct fruity aroma; the key aroma component in the germplasm from Sichuan was melonal, indicating similar regional aroma characteristics. ROAV analysis indicated that β -myrcene, eucalyptol, and methyl isovalerate, among others, were key aroma compounds, collectively shaping a complex aroma profile dominated by fruity, woody, minty, and floral notes. The aroma profile of *C. longa* inflorescences is influenced by both germplasm and geographical origin. Terpenes (highest proportion: 54.91%), esters (e.g., 35.51% in the Guangxi germplasm), and key ROAV components (e.g., β -myrcene, eucalyptol) constitute the material basis of their aroma. These findings provide, for the first time, clear evidence of the region-specific aroma profiles in *C. longa* inflorescences (e.g., the contribution of melonal in Sichuan germplasm and the metabolic diversity in Fujian germplasm), offering a scientific basis for selecting high-aroma-quality germplasm and developing regional cultivation strategies for *C. longa*.

Keywords: *Curcuma longa*; static headspace; inflorescences; aroma components; relative odor activity value

(责任编辑: 潘学峰)