DOI:10.12441/spyswjs.20240925002 [文章编号] 1673-1689(2026)01-0052-12

福建不同生姜种质资源重要化学成分和自由基清除能力差异研究

陈梅春[1] 林恩泉[1] 郑雪芳[1] 李祖亮[2] 刘 波[1] 王阶平[1*]

(1. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所福建省农业生物药物工程技术研究中心,福建 福州 350003;
2. 福建省农业科学院作物研究所,福建 福州 350003)

摘要:【目的】对福建省不同生姜种质资源开展化学成分分析并评价其综合品质和自由基清除能力。【方法】采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)与液相色谱串联四极杆飞行时间质谱(LC-QTOF-MS)测定福建13份生姜种质资源的重要化学成分,结合主成分分析(PCA)与聚类分析解析不同生姜间的成分差异,并通过ABTS$^+$自由基清除率评估不同生姜种质资源的自由基清除能力。【结果】从13份生姜种质资源中共鉴定出65种物质,包括44种挥发性物质和21种非挥发性物质。其中,1种姜辣素类化合物与2种二氢姜黄素衍生物为首次在该类物质中鉴定发现。在13份生姜种质资源中,挥发性物质总峰面积最高的是J9,非挥发性物质总峰面积最高的为J10。聚类分析结果显示,来源地相同或邻近的生姜种质资源聚为一类,13份生姜种质资源可划分为3大类群:类群I包括J8和J9,类群II包括J2、J5、J4、J1、J7和J3,类群III包括其余5份生姜种质资源。通过PCA筛选出桉叶油醇、柠檬醛、橙花醛、姜烯、*α*-姜黄烯、*β*-倍半水芹烯、*β*-红没药烯、1-脱氢-6-姜二酮等29种差异特征成分;同时对生姜种质资源的风味综合得分进行了排序,其中J9和J8位列前2位。进一步测定了不同生姜种质资源甲醇提取物的ABTS$^+$自由基清除能力,结果显示,其半抑制质量浓度(IC_{50})为69.00~172.33 μg/mL,其中J3的ABTS$^+$自由基清除能力最强。相关性分析结果表明,姜辣素类化合物对生姜种质资源甲醇提取物ABTS$^+$自由基清除能力的贡献度高于二苯基庚烷类化合物。【结论】该研究筛选了适用于不同生姜加工产品的优质种质资源,为生姜深加工产业的发展提供了数据支撑。

关键词:生姜种质资源;化学成分;主成分分析;聚类分析;自由基清除能力

Differences in Important Chemical Components and Free Radical Scavenging Activities of the Ginger Germplasm Resources from Fujian

CHEN Meichun[1] *LIN Enquan*[1] *ZHENG Xuefang*[1] *LI Zuliang*[2] *LIU Bo*[1] *WANG Jieping*[1*]

(1. Fujian Provincial Engineering Research Center for Agricultural Biopharmaceuticals, Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. Institute of Crop Sciences, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to analyze the important chemical components of different ginger germplasm resources from Fujian and evaluate their comprehensive quality and free radical scavenging activities. [**Method**] Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and liquid chromatography-quadrupole-time of flight-mass spectrometry (LC-QTOF-MS) were employed to determine the importance chemical components in 13 ginger germplasm resources. Differences in the chemical compounds were analyzed by the cluster analysis and

基金项目:福建省省属公益项目(2022R1034003);福建省人民政府-中国农业科学院"5511"协同创新工程项目(XTCXGC2021019)。

通信作者:王阶平(1972—),男,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事生物资源研究。E-mail: wangjpfaas@foxmail.com

收稿日期:2024-09-25 **修回日期:**2024-11-30

principal component analysis (PCA). The free radical scavenging activities of the ginger germplasm resources against $ABTS^+$ were further evaluated. [**Result**] A total of 65 chemical compounds were identified from the 13 ginger germplasm resources, including 44 volatile compounds and 21 non-volatile compounds. Among them, one gingerol and 2 dihydrocurcumin derivatives were the newly detected compounds in ginger. The highest total peak areas of volatile compounds and non-volatile compounds were detected in ginger germplasm resources J9 and J10, respectively. According to the results of cluster analysis, the 13 ginger germplasm resources were clustered into 3 groups: Group I including J9 and J8, Group II including J2, J5, J4, J1, J7, and J3, and Group III including the remaining 5 resources. PCA identified 29 differential representative components including eucalyptol, neral, citral, zingiberene, *α*-curcumene, *β*-bisabolene, *β*-sesquiphellandrene, and 1-dehydro-6-gingerdione. Regarding the comprehensive score of ginger quality, the top 2 ginger germplasm resources were J9 and J8. The ginger germplasm resources exhibited the $ABTS^+$ free radical scavenging activities with the IC_{50} values in the range of 69.00~172.33 μg/mL, and the ginger germplasm resource J3 displayed the strongest $ABTS^+$ free radical scavenging activity. The correlation analysis showed that gingerols made greater contributions to the $ABTS^+$ free radical scavenging activity than diarylheptanoids. [**Conclusion**] This study can screen out the elite ginger germplasm resources suitable for different processing products of ginger and provide data support for the deep processing industry of ginger.

Keywords: ginger germplasm resources; chemical component; principal component analysis; cluster analysis; free radical scavenging activity

生姜是姜科多年生草本植物姜（*Zingiber officinale*）的新鲜根茎，富含多种营养成分和活性物质，具有消炎抗菌、抗衰老、抗肿瘤、降血糖、减脂等多重保健功效，是一类极具开发价值的药食两用资源[1-2]。我国是世界上生姜栽培面积最广且总产量最高的国家，产地主要分布在山东、云南、四川、湖南、贵州、广东和福建等省份。随着消费结构的改变及人们健康意识的增强，市场对生姜的需求量日益增长，促使生姜种植面积与产量呈现逐年上升趋势[3]。

生姜化学成分比较复杂，已鉴定的成分达100多种，主要包括姜精油、姜辣素类和二苯基庚烷三大类[4-5]，这些成分具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤等多种生物活性[6-8]。此外，生姜还含有蛋白质、淀粉、脂肪、纤维素、微量元素等营养物质[1]，其中许多成分具备开发为功能食品或药品的潜力。生姜虽为无性繁殖作物，但因栽培地域广，受管理水平、气候环境等因素影响，其生物学性状呈现出多元变异，形成了丰富的种质资源。已有研究证实，不同品种、不同产地的生姜，其化学成分存在差异，进而导致其生物活性明显不同[9-11]。

生姜的化学成分组成是其风味品质的物质基础，成分的差异直接影响了生姜的口感、品质及生物活性[12-13]。根据根茎颜色，生姜可分为3个品种，即灰姜、黄姜和红姜[14]。品种类别、栽培技术及种植环境等均会对生姜活性成分产生重要影响[15-16]。因此，明确生姜种质资源的重要化学成分组成，对其资源的开发利用具有重要意义。本研究拟针对福建省不同地市种植的生姜种质资源开展化学成分分析，阐释不同生姜种质资源的化学成分差异，评价其综合品质和抗氧化能力，筛选适用于不同生姜加工产品的优质种质资源，为生姜深加工产业发展提供数据支撑，助力生姜产业发展升级。

1 材料与方法

1.1 材料

13份福建生姜种质资源信息见表1。根据文献[14]中关于生姜块茎外观形态的分类标准，本研究供试的13份生姜均属于灰姜。收集的13份生姜均统一种植于福建省福州市闽侯县基地，采用统一水肥管理措施。于2021年4月6日种植，2021年11月20日采收，采收后的生姜样品置于室温干燥处保存备用。

1.2 仪器与试剂

GC-MS：Agilent 7890A/5975C型，美国安捷伦科技有限公司；LC-QTOF-MS：Agilent 1260-6520型，美国安捷伦科技有限公司；数显恒温水浴锅：

表 1 福建生姜种质资源信息

Table 1 Information of ginger germplasm resources from Fujian

样品	种质资源名称	来源地
J1	小姜	三明市明溪县
J2	大姜	福州市罗源县
J3	小姜	福州市罗源县
J4	小姜	宁德市屏南县
J5	小姜	三明市尤溪县
J6	小姜	漳州市漳浦县
J7	大姜	龙岩市漳平市
J8	大姜	厦门市同安区
J9	大姜	莆田市荔城区
J10	大姜	三明市将乐县
J11	小姜	三明市将乐县
J12	大姜	宁德市福鼎市
J13	大姜	福州市晋安区

HH-3A 型，国华（常州）仪器制造有限公司；萃取头：65 μm PDMS/DVB SPME 型，美国 Supelco 公司。

α-姜黄烯、α-法尼烯、6-姜酚、8-姜酚、8-姜烯酚、10-姜酚等标准品：色谱纯，上海源叶生物科技有限公司；正构烷烃 C_7~C_{40} 混合标准品：色谱纯，北京百灵威科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 挥发性物质测定

1）挥发性物质萃取：采用顶空固相微萃取法富集生姜中的挥发性物质。将 65 μm PDMS/DVB 萃取头用丙酮浸泡 30 min 后，于 250 ℃条件下老化 30 min。称取 5 mg 新鲜生姜置于密封的顶空瓶中，于 30 ℃水浴锅中平衡 5 min，随后插入 SPME 萃取头吸附 10 min；吸附完成后，250 ℃解吸 3 min，进行 GC-MS 分析。

2）GC-MS 测定与分析：色谱柱为 HP-5MS（30 m×250 μm×0.25 μm），进样口温度 250 ℃，初始柱温 50 ℃。色谱初始温度为 50 ℃并保持 2 min，以 8 ℃/min 升温至 200 ℃，再以 20 ℃/min 升温至 280 ℃并保持 2 min。质谱条件中离子源为 EI，采集模式为全扫描，溶剂延迟 6 min，EMV 模式为相对值，扫描范围 25.00~550.00，MS 离子源温度 230 ℃，四极杆温度 150 ℃。用正己烷稀释正构烷烃混合标准品，按上述色谱条件进行分析。结合 NIST 质谱库检索、保留指数及部分标准品（α-姜黄烯和 α-法尼烯）对检测到的挥发性物质进行鉴定。采用峰面积归一化法计算各挥发性物质的相对含量，即各挥发性物质的峰面积占总峰面积的比值。

1.3.2 非挥发性物质测定

1）非挥发性物质提取：将新鲜生姜切片后，置于托盘中自然通风干燥，将干燥后的姜片置于粉碎机中粉碎成生姜粉。以甲醇为提取溶剂，超声提取生姜粉末中的非挥发性物质，设定料液比为 1 g∶20 mL、提取时间 15 min、提取温度 80 ℃。提取完成后，将提取物冷冻干燥，计算得率。

2）LC-QTOF-MS 测定：色谱柱为 ZORBAX SB-C18 色谱柱（2.1 mm×150 mm×3.5 μm）。进样量 5 μL，柱温 25 ℃，流动相 A 为体积分数 0.1% 的甲酸水，流动相 B 为甲醇，流量 0.3 mL/min。当洗脱时间为 0~8 min 时，流动相 B 体积分数为 5%；8~38 min 时，流动相 B 体积分数从 5% 升至 95%；38~45 min 时，流动相 B 体积分数为 95%；45~47 min 时，流动相 B 体积分数从 95% 降至 5%。采集模式为 ESI^-，离子扫描范围为 100~3 000，干燥气温度 350 ℃，干燥气流量 8 L/min。

3）定性与定量分析：结合一级离子、二级离子碎片、部分姜辣素标准品（6-姜酚、8-姜酚、8-姜烯酚及 10-姜酚）及参考文献[17-19]，对生姜非挥发性物质进行鉴定。采用峰面积归一化法进行定量分析，计算各非挥发性物质的相对含量。进一步通过外标法计算姜辣素类化合物 6-姜酚和 10-姜酚的质量分数，结果以每克提取物干粉中含有的姜辣素类化合物质量（mg/g）表示。

1.3.3 $ABTS^+$ 自由基清除能力测定

参照文献[20]的方法测定不同生姜甲醇提取物的 $ABTS^+$ 自由基清除能力。

1.4 数据分析

所有试验均设置 3 次平行，采用 SPSS 20.0 进行 PCA、聚类分析、Duncan 差异显著性分析、Pearson 相关性分析及 IC_{50} 计算。

2 结果与讨论

2.1 不同生姜种质资源的挥发性物质组成

13 份生姜种质资源的挥发性物质组成见表 2。其中大姜 J9 的挥发性物质总峰面积最高，表明该种质资源的挥发性物质相对含量最高，即姜精油含量最为丰富。

从 13 份生姜中鉴定出的部分挥发性物质如

表2　不同生姜种质资源的各挥发性物质峰面积

Table 2　Peak areas of various volatile components from different ginger germplasm resources

样品	峰面积				
	总挥发性物质	醇类化合物	醛类化合物	萜烯类化合物	其他类化合物
J1	3.12×10^9	3.14×10^8	6.31×10^8	1.94×10^9	1.20×10^7
J2	2.08×10^9	2.44×10^8	1.66×10^8	1.46×10^9	4.09×10^6
J3	4.72×10^9	7.19×10^8	1.04×10^8	2.75×10^9	4.98×10^7
J4	2.39×10^9	2.76×10^8	3.22×10^8	1.62×10^9	1.38×10^7
J5	2.29×10^9	3.62×10^8	4.44×10^8	1.37×10^9	2.40×10^7
J6	6.79×10^9	8.05×10^8	1.65×10^8	3.95×10^9	1.98×10^8
J7	6.35×10^9	8.97×10^8	8.56×10^8	4.32×10^9	8.75×10^7
J8	5.58×10^9	5.83×10^8	6.42×10^8	4.14×10^9	6.75×10^7
J9	8.60×10^9	1.09×10^9	8.23×10^8	6.46×10^9	1.07×10^8
J10	4.92×10^9	8.61×10^8	1.30×10^9	2.39×10^9	2.00×10^8
J11	3.88×10^9	7.12×10^8	1.03×10^9	1.95×10^9	5.78×10^7
J12	3.35×10^9	5.20×10^8	1.22×10^9	1.34×10^9	9.28×10^7
J13	5.16×10^9	7.95×10^8	1.80×10^9	2.34×10^9	1.01×10^8

表3所示，从供试样品中共鉴定出44种挥发性物质，包括24种萜烯类化合物、9种醛类化合物、6种醇类化合物和5种酯/酮等其他化合物。不同生姜种质资源中，醇类化合物主要为桉叶油醇，相对含量为5.18%~10.43%；醛类化合物主要为柠檬醛和橙花醛，相对含量分别为3.80%~20.49%和1.38%~8.29%；萜烯类化合物主要包括姜烯、*α*-姜黄烯、*α*-法尼烯、*β*-倍半水芹烯和*β*-红没药烯，相对含量分别为12.63%~25.12%、3.69%~9.61%、6.54%~10.32%、5.89%~11.86%和2.99%~7.22%。

不同品种、不同产地生姜的特征香气成分存在差异。Kiran等[21]研究发现，生姜品种‘Nagaland Nadia’中*α*-姜黄烯质量分数高于姜烯，但该现象未在其他品种中出现。Jayasundara等[22]对斯里兰卡不同品种生姜的挥发性成分进行分析，发现生姜品种‘Siddha’中的*β*-倍半水芹烯、法尼醛、丁子香酚、香叶醇、芳樟醇和冰片等芳香类物质的质量分数高于生姜品种‘Rangoon’。李智宁等[23]对5个省份不同品种的生姜进行研究，发现‘鲁姜’的柠檬醛质量分数明显高于‘豫姜’‘皖姜’‘渝姜’和‘滇姜’，但水芹烯质量分数低于其他品种；同时，‘鲁姜’中桉叶油醇质量分数远高于其他品种，‘豫姜’的乙酸香叶酯质量分数最高。本研究结果显示，福建13份生姜的挥发性物质中姜烯质量分数均高于*α*-姜黄烯，与其他研究结果较为一致。但值得注意的是，13份生姜中均未检测到水芹烯，表明福建生姜与其他省份生姜的挥发性物质存在明显差异。13份生姜种质资源中8种主要香气成分的峰面积如图1所示，大姜J2中8种香气成分的峰面积均较低；大姜J9中桉叶油醇、姜烯、*α*-姜黄烯、*α*-法尼烯、*β*-倍半水芹烯和*β*-红没药烯的峰面积远高于其他12份生姜，而柠檬醛和橙花醛的峰面积处于中等水平；小姜J6和大姜J13中柠檬醛和橙花醛的峰面积高于其他11份生姜。

2.2　不同生姜种质资源的非挥发性物质组成

姜辣素类物质是生姜辣味的物质基础，其组分变化也是反映生姜品质的重要指标。姜辣素类物质包括姜酚、姜烯酚、姜酮、姜二酮、姜二醇等系列化合物，其中6-姜酚的质量分数最高，占姜辣素类物质的60%以上[8]。生姜在加热及长期贮藏条件下，姜辣素类物质会发生转化，如姜酚可生成姜烯酚和姜酮类物质，而这2类物质在新鲜生姜中的质量分数极低[2]。二苯基庚烷类化合物分为线性二苯基庚烷类化合物和环状二苯基庚烷类化合物，其中线性二苯基庚烷类化合物主要包括姜黄素类、脱甲氧基姜黄素类、二氢/四氢姜黄素类等化合物[2]。作者采用甲醇超声提取法提取了13份生姜种质资源的非挥发性物质，并对提取物进行成分分析，各生姜的非挥发性物质得率和峰面积见表4。结果表明，峰面积最高的为J10，最低的为J3。

结合文献[17-18]，通过一级相对分子质量、二级离子碎片信息及部分姜辣素标准品，对生姜非挥发性物质进行鉴定，见表5。从13份生姜种质资源的非挥发性提取物中共鉴定出21种化合物，包括14种姜辣素类化合物和7种二苯基庚烷类化合物，其中化合物1、14和15为首次在该类物质中鉴定得到。化合物1的分子离子峰*m/z*为395.10，其特征二级碎片离子*m/z*为349.10，与10-姜酚的分子离子峰一致；缺失的碎片相对分子质量为46.00，对应基团为—O—CH_2OH，因此推测化合物1为5-羟基-1-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-14-(羟甲氧基)十四烷-3-酮。化合物14和15的分子离子峰*m/z*分别为413.15和423.16，且均检出含有二氢姜黄素类化合物的特征离子峰(*m/z*分别为369.17、219.13)，因此

表 3 不同生姜种质资源中挥发性物质 GC-MS 结果

Table 3 GC-MS results of volatile components from different ginger germplasm resources

类别	化合物名称	相对含量/%												
		J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13
醇类化合物	桉叶油醇	5.18±1.75	6.65±2.78	8.52±0.84	5.43±1.77	7.64±1.18	5.58±0.28	9.17±0.18	6.52±2.91	8.10±0.98	8.36±1.72	10.43±1.18	7.88±0.08	8.05±1.06
	芳樟醇	0.47±0.20	0.33±0.16	0.77±0.18	0.44±0.28	0.72±0.14	1.03±0.22	0.87±0.11	0.51±0.22	0.47±0.02	1.22±0.27	1.23±0.13	1.14±0.00	0.91±0.34
	茨醇	0.70±0.27	1.08±0.99	1.31±0.45	0.71±0.23	1.68±0.18	0.89±0.14	1.63±0.23	1.21±0.83	1.48±0.27	1.01±0.32	1.18±0.23	1.30±0.00	0.94±0.19
	萜品醇	1.08±0.47	0.71±0.61	1.43±0.63	0.69±0.30	1.58±0.37	0.85±0.08	0.65±0.15	1.21±0.83	0.85±0.31	1.46±0.28	1.77±0.41	2.18±0.19	1.66±0.32
	反-𬌗牛儿醇	1.75±1.09	1.68±0.16	1.63±1.19	1.74±1.44	2.17±1.62	2.26±0.33	0.29±0.03	0.45±0.36	—	3.59±1.61	2.54±0.77	1.88±0.14	1.87±0.52
醛类化合物	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛	0.61±0.16	0.31±0.07	0.64±0.04	0.37±0.23	0.48±0.03	0.82±0.06	0.36±0.05	0.34±0.11	0.26±0.09	0.78±0.28	0.74±0.04	1.09±0.12	1.06±0.13
	异橙花醛	0.65±0.21	0.19±0.25	0.80±0.06	0.39±0.32	0.63±0.06	1.20±0.15	0.58±0.06	0.46±0.16	0.42±0.12	1.06±0.34	0.98±0.08	1.43±0.14	1.46±0.15
	异柠檬醛	1.22±0.40	0.51±0.34	1.61±0.14	0.78±0.58	1.37±0.17	2.12±0.33	1.18±0.15	0.91±0.27	0.77±0.17	1.98±0.55	1.91±0.10	2.51±0.23	2.53±0.29
	橙花醛	4.28±1.63	1.38±1.21	5.18±0.60	2.50±1.80	4.90±1.09	6.36±1.09	3.41±0.45	2.64±0.86	2.82±0.63	6.49±1.53	6.66±0.39	8.21±0.58	8.29±0.96
	柠檬醛	11.83±4.86	3.80±2.42	12.09±1.22	6.23±3.56	9.78±0.27	12.57±1.17	6.70±0.82	6.30±2.08	4.73±1.63	14.20±4.53	15.09±2.05	20.49±1.38	18.20±0.90
萜烯类化合物	*β*-蒎烯	—	0.11±0.18	0.30±0.09	0.08±0.14	0.13±0.22	—	—	0.25±0.29	0.15±0.02	0.12±0.13	0.11±0.14	0.16±0.14	0.18±0.03
	δ-榄香烯	0.11±0.03	0.18±0.10	0.14±0.06	0.14±0.05	0.09±0.02	0.17±0.06	0.11±0.01	0.18±0.01	0.23±0.04	0.08±0.01	0.09±0.02	0.06±0.01	0.11±0.01
	α-柏木烯	—	—	—	—	—	—	0.06±0.05	0.10±0.01	0.11±0.02	0.62±0.05	0.63±0.11	—	—
	α-香柠檬烯	0.26±0.04	0.33±0.03	0.26±0.04	0.35±0.05	0.23±0.05	0.24±0.03	0.41±0.05	0.36±0.06	0.41±0.09	—	—	0.21±0.03	0.28±0.08
	大根香叶烯 D	0.20±0.09	0.22±0.28	0.23±0.09	0.21±0.07	0.18±0.06	0.31±0.10	0.29±0.06	0.31±0.03	0.41±0.07	0.16±0.03	0.15±0.05	0.20±0.15	0.19±0.01
	γ-榄香烯	0.56±0.15	0.73±0.34	0.69±0.16	0.63±0.09	0.50±0.08	0.83±0.23	0.72±0.06	0.90±0.06	1.12±0.15	0.45±0.06	0.47±0.08	0.33±0.00	0.61±0.03
	β-法尼烯	0.47±0.13	0.52±0.25	0.54±0.09	0.54±0.16	0.43±0.06	0.54±0.16	0.67±0.05	0.82±0.10	0.94±0.16	0.41±0.09	0.39±0.11	0.23±0.20	0.43±0.02
	香树烯	0.53±0.16	0.49±0.29	0.59±0.12	0.61±0.08	0.48±0.15	0.60±0.13	0.63±0.02	0.86±0.16	0.86±0.11	0.43±0.09	0.40±0.11	0.26±0.02	0.49±0.02
	α-姜黄烯	5.47±1.49	5.84±0.59	5.33±0.47	6.85±0.42	5.59±1.24	6.96±0.83	9.61±0.67	8.14±1.35	8.41±0.57	4.03±0.59	4.18±0.78	3.69±0.29	4.13±0.40
	姜烯	18.65±2.68	19.85±3.39	17.90±0.56	19.48±1.04	18.30±1.47	16.30±2.22	20.48±2.07	23.41±2.01	25.12±0.79	15.36±1.21	16.54±2.21	12.63±1.23	13.98±1.27
	α-法尼烯	8.93±1.65	6.54±3.30	7.98±0.88	8.17±1.65	6.76±0.50	10.32±1.53	7.03±0.69	9.91±1.64	9.66±0.71	7.14±0.83	6.86±1.15	7.14±0.38	6.96±0.64
	β-红没药烯	4.46±0.76	4.67±0.75	4.68±0.15	4.85±0.03	4.52±0.23	4.11±0.31	6.30±0.54	6.89±0.58	7.22±0.08	3.77±0.55	3.84±0.68	2.99±0.21	3.63±0.31
	β-倍半水芹烯	8.41±1.35	8.62±1.18	8.76±0.36	9.22±0.38	8.45±0.89	7.62±0.72	9.97±0.90	11.84±0.85	11.86±0.07	7.19±0.97	7.42±1.11	5.89±0.43	7.34±0.55
	γ-红没药烯	0.29±0.07	0.28±0.08	0.31±0.02	0.29±0.03	0.26±0.02	0.29±0.06	0.41±0.04	0.47±0.04	0.57±0.04	0.24±0.03	0.25±0.04	0.21±0.05	0.26±0.05
其他类化合物	乙酸冰片酯	0.14±0.07	—	0.12±0.02	0.12±0.12	0.21±0.11	—	—	0.22±0.08	0.25±0.03	0.26±0.03	0.21±0.02	0.22±0.03	0.21±0.00
	乙酸香叶酯	0.89±0.36	0.51±0.51	0.66±0.28	0.77±0.40	0.66±0.15	1.42±0.25	0.64±0.06	0.73±0.13	0.70±0.18	2.80±0.58	0.87±0.23	2.00±0.13	1.24±0.16

注：“—”表示未检出。

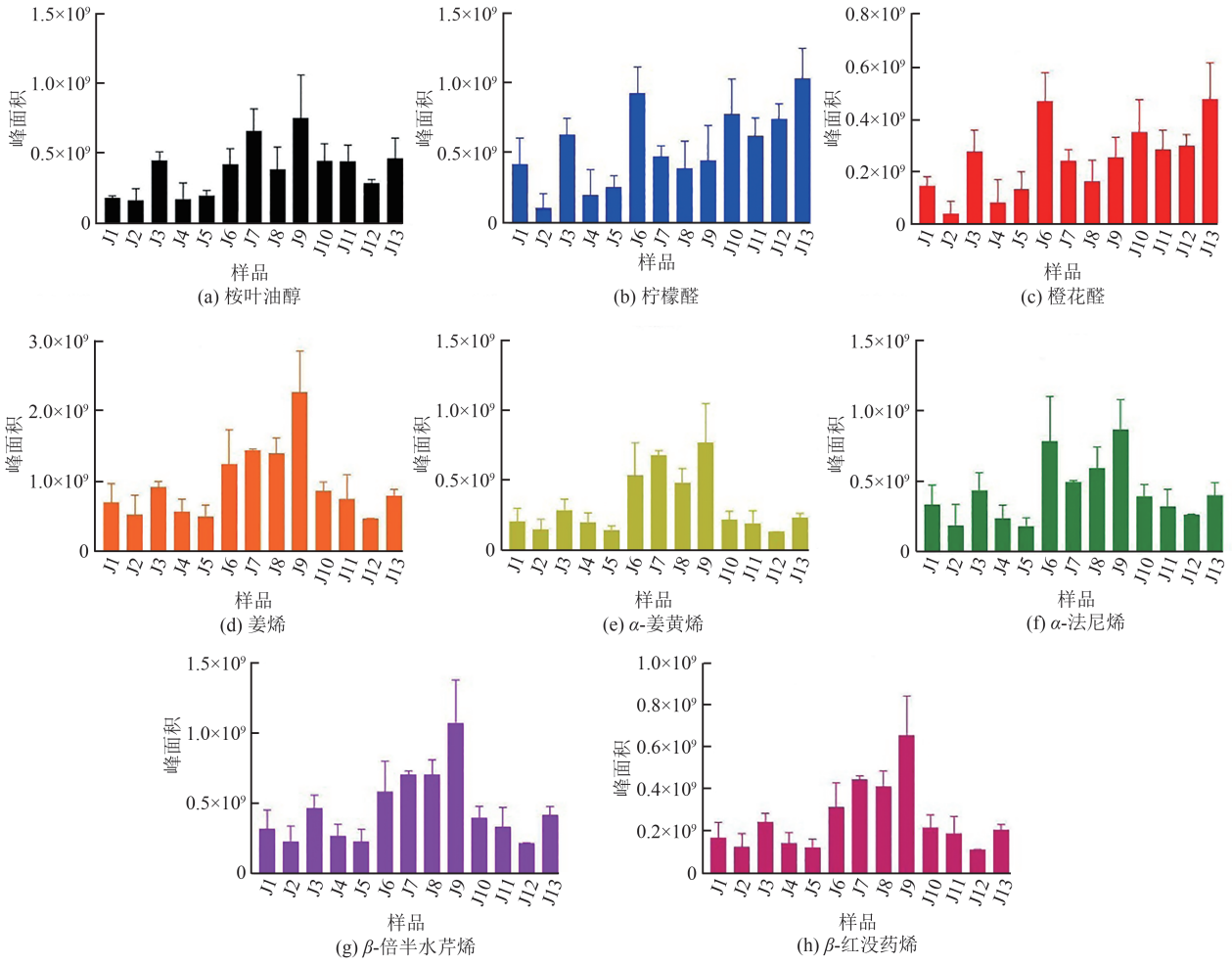


图 1　不同生姜种质资源的主要香气成分

Fig. 1　Main aroma components of different ginger germplasm resources

表 4　不同生姜种质资源的非挥发性物质得率与峰面积

Table 4　Yields and peak areas of non-volatile components from different ginger germplasm resources

样品	得率/%	峰面积
J1	9.56±0.44^{c}	8.39×10^{5}
J2	8.11±1.19^{d}	8.13×10^{5}
J3	4.95±0.99^{e}	3.53×10^{5}
J4	5.61±0.43^{e}	3.89×10^{5}
J5	7.92±1.03^{d}	8.01×10^{5}
J6	10.99±0.57^{b}	10.14×10^{5}
J7	13.43±1.00^{a}	11.74×10^{5}
J8	7.70±0.08^{d}	8.00×10^{5}
J9	10.25±0.84^{bc}	8.46×10^{5}
J10	12.71±0.57^{a}	15.83×10^{5}
J11	7.71±0.86^{d}	7.20×10^{5}
J12	10.27±0.26^{bc}	8.24×10^{5}
J13	9.59±0.05^{c}	9.38×10^{5}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

推测化合物 14 和 15 均为二氢姜黄素衍生物。

非挥发性物质在生姜种质资源中的相对含量见表 6。结果表明，生姜的非挥发性物质主要由姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物组成，两者的相对含量分别为 41.13%~59.37% 和 41.47%~60.78%。不同生姜种质资源中姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物峰面积见图 2。大姜 J10 的姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物峰面积均最高，小姜 J3 和大姜 J8 的二苯基庚烷类化合物峰面积高于姜辣素类化合物，J6、J7、J9、J11、J12 和 J13 的姜辣素类化合物峰面积高于二苯基庚烷类化合物，其他生姜中 2 类化合物的峰面积相当。姜辣素类化合物中 6-姜酚和 10-姜酚质量分数较高，分别为 22.31~40.13 mg/g 和 2.92~18.80 mg/g。其中 J6 和 J10 的 6-姜酚峰面积较高，J12 的 6-姜酚峰面积最低；J7 和 J10 的 10-姜酚峰面积较高，J3 的 10-姜酚峰面积最低。

表5 生姜种质资源非挥发性物质鉴定

Table 5 Non-volatile components of ginger germplasm resources

化合物编号	分子离子峰 *m/z*	二级碎片离子 *m/z*	化合物名称
1	395.10	349.10、363.16、179.01、119.01	5-羟基-1-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-14-(羟甲氧基)十四烷-3-酮
2	377.18	331.10、281.23、165.07	12-姜酚
3	375.15	347.07、209.03、195.02、165.02、151.00	12-姜二酮
4	389.16	361.08、195.02、179.02、165.02、151.00	5-羟基-1-(3,4-二羟基-5-甲氧基苯基)-7-(4-羟基-3-甲氧基苯基)庚-3-酮
5	373.16	329.06、193.04、179.03、165.02、149.02	5-羟基-1,7-双(4-羟基-3-甲氧基苯基)庚-3-酮
6	433.19	373.06、358.06、219.05、177.01、151.00	3-乙酰氧基-5-羟基-1-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-7-(3,4-二羟基-5-甲氧基苯基)庚烷
7	431.17	371.06、311.05、189.05、163.04	3,5-二乙酰氧基-1,7-双(3,4-二羟基苯基)庚烷
8	475.20	445.08、415.08、355.07、177.01、151.00	3,5-二乙酰氧基-7-(4-羟基苯基)-1-(3,4-二羟基苯基)庚烷
9	293.18	293.11、193.04、177.01、151.00、135.01	6-姜酚
10	293.17	193.04、135.01	6-异姜酚
11	321.20	298.15、193.04、178.02、149.03、127.08	8-姜酚
12	289.15	274.06、191.10、174.99、149.03	1-脱氢-6-姜二酮
13	349.24	298.15、193.04、178.02、155.11	10-姜酚
14	413.15	369.17、298.15、219.13、155.11	二氢姜黄素衍生物
15	423.16	413.15、397.25、369.17、219.13、177.02	二氢姜黄素衍生物
16	345.21	298.15、195.09、163.07、149.03、134.00	1-脱氢-10-姜二酮
17	277.22	195.02、174.99、149.03、134.00	1-脱氢-5-姜酚
18	303.16	398.18、298.15、195.02	8-姜烯酚
19	279.23	223.12、175.00、149.03、134.00	5-姜酚
20	255.23	175.00、149.03、134.00	6-(4-羟基-3-甲氧基苯基)己烷-1,2,4-三醇
21	281.25	255.18、175.00、149.03、134.00	5-姜二醇

2.3 不同生姜种质资源化学成分PCA结果

以鉴定出的挥发性物质和非挥发性物质为评价指标，采用SPSS软件对13份生姜种质资源进行PCA。结果显示，特征根>1的主成分有11个，累计方差贡献率达98.48%。根据各主成分的特征值和方差贡献率，计算并构建生姜风味综合得分，见表7。其中J9的综合得分最高，为3.47；其次为J8，为1.99；J10的综合得分最低，为−1.92。生姜挥发性物质结果显示，在13份生姜种质资源中，挥发性物质排名前2位的分别为J9和J8。上述结果表明，J9和J8适用于生姜精油的提取，其中J9的应用潜力尤为突出。

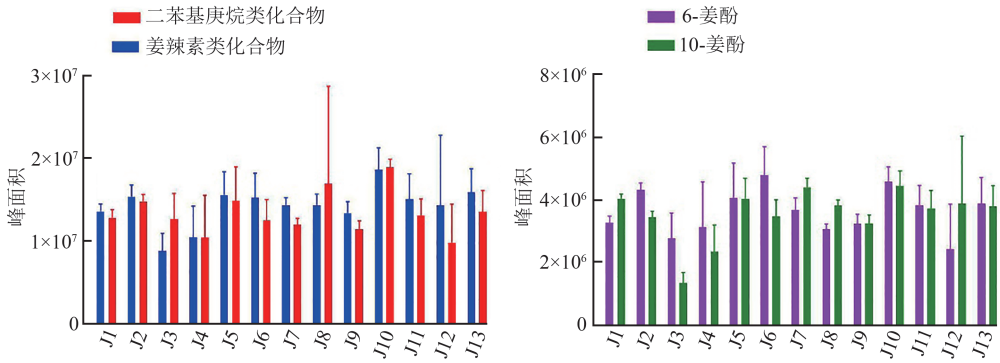
可鉴定物质在各主成分上的载荷量分布结果显示，对主成分贡献较大（载荷>0.70或<−0.70）的物质有29种，包括6种醇/酯类化合物、5种醛类化合物、13种萜烯类化合物、3种姜辣素类化合物和2种二苯基庚烷类化合物，见表8。这些化合物可能是导致生姜种质资源差异的关键成分，其组成差异使不同生姜种质资源呈现出不同的风味品质。

已有研究表明，在生姜挥发性物质中，萜烯类化合物对生姜香味的贡献最大。Yamaguchi等[24]研究表明，影响生姜香味的关键挥发性成分为香叶醛和橙花醛；潘少香等[25]研究表明，生姜中香茅醛、香叶醛、橙花醛等关键挥发性成分减少会降低鲜姜的风味品质。醛类化合物具备果香、花香、坚果香、木质及草香等多种香气特征，本研究中不同生姜种质资源中相对含量较高的为柠檬醛、橙花醛等醛类化合物，这类化合物呈现典型的柠檬果香；但在风味综合得分排名靠前的生姜种质资源中，柠檬醛、橙花醛等醛类化合物的相对含量均较低，表明该类化合物对福建生姜种质资源风味综合品质得分呈负贡献。萜烯类化合物具有特殊香气，且香味阈值低、赋香作用强。本研究筛选出的13种萜烯类化合物呈现丰富的香型，涵盖花香、松木香、脂肪香、青香、果香和辛香，对生姜种质资源风味综合得分呈正贡献。其中，*α*-姜黄烯、姜烯和*β*-倍半水芹烯呈典型辛香，是生姜种质资源的特

表6　不同生姜种质资源的非挥发性物质相对含量

Table 6　Relative content of non-volatile components from different ginger germplasm resources

化合物	编号	相对含量/%												
		J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13
姜辣素类化合物	1	0.57	0.52	1.90	0.83	0.63	0.74	0.93	0.47	1.00	0.71	0.60	0.83	1.09
	2	1.64	2.23	4.08	2.28	1.24	3.15	2.26	1.95	3.89	1.36	2.51	3.40	2.52
	3	0.97	0.88	0.82	0.56	0.74	0.92	0.79	0.57	0.82	0.84	0.94	0.72	0.85
	9	12.46	14.37	12.89	15.03	13.42	17.31	14.01	9.81	13.06	12.29	13.72	10.08	13.25
	10	2.17	1.94	1.46	0.47	0.00	1.81	0.44	1.57	1.90	1.45	2.61	2.89	2.13
	11	5.37	4.53	2.81	4.80	5.36	7.01	6.86	5.04	6.40	6.54	6.13	6.66	6.11
	12	6.01	5.57	2.53	5.13	6.56	3.79	5.41	4.56	3.89	5.22	4.19	5.73	3.65
	13	15.35	11.49	6.24	11.29	13.33	12.50	16.81	12.28	13.13	11.93	13.29	16.17	12.95
	16	2.28	1.70	0.51	1.75	2.62	0.91	1.72	1.53	1.19	1.73	1.13	2.44	1.54
	17	0.53	0.99	1.03	1.05	1.07	0.96	0.79	1.39	1.48	1.10	1.27	1.55	1.48
	18	0.73	1.15	0.57	0.87	0.78	0.61	0.47	0.31	0.51	0.59	0.62	0.53	0.62
	19	2.09	3.85	3.77	3.81	3.64	3.27	2.72	4.56	4.61	4.21	4.41	5.79	5.17
	20	0.99	1.19	1.72	1.39	1.15	1.29	0.91	1.28	1.28	1.09	1.48	1.84	1.55
	21	0.33	0.55	0.80	0.79	0.63	0.63	0.37	0.55	0.71	0.53	0.57	0.74	1.07
二苯基庚烷类化合物	4	5.13	4.78	6.11	5.17	4.41	4.93	4.18	4.08	4.76	4.68	5.49	3.69	4.12
	5	6.11	7.06	9.46	8.42	6.99	9.07	6.24	4.36	7.14	6.45	8.11	4.70	7.29
	6	3.45	3.69	6.31	5.22	3.64	4.07	3.09	2.40	3.83	3.45	4.38	2.15	3.65
	7	14.25	10.64	8.25	8.78	15.46	10.70	16.83	7.30	12.33	15.51	12.40	15.40	13.13
	8	11.14	11.70	19.92	15.77	12.49	11.87	10.53	6.89	12.10	13.06	11.66	8.51	12.24
	14	5.11	7.19	7.22	4.75	3.16	3.54	0.97	21.32	2.14	1.26	2.49	1.03	2.82
	15	3.33	3.97	1.61	1.83	2.69	0.93	3.67	7.78	3.82	6.00	1.98	5.16	2.77



(a) 姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物　(b) 6-姜酚和10-姜酚

图2　不同生姜种质资源中姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物峰面积

Fig. 2　Peak areas of gingerols and diarylheptanoids from different ginger germplasm resources

征香气成分，对生姜香型具有重要贡献。大部分醇类化合物呈典型花香，如芳樟醇呈铃兰香，萜品醇呈丁香，反-牻牛儿醇呈玫瑰味。芳樟醇的气味阈值（10.00 μg/L）较低，对香味贡献较大，且氧化后可生成柠檬醛；桉叶油醇呈草药香，阈值（1.10 μg/L）极低，茨醇呈松木香，这2种醇类化合物对生姜种质资源风味综合得分均呈正贡献。

姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物均呈辛辣味，是生姜辛辣感的主要来源。姜辣素类化合物包括姜酚、姜烯酚、姜二酮、姜二醇、姜油酮、姜酮类化合物等，其中姜烯酚和姜油酮的辛辣味强于姜粉。有研究表明，6-姜酚、6-姜烯酚、8-姜酚、10-姜酚、10-姜烯酚、姜黄素类等物质的质量浓度是评价生姜品质的重要特征指标。Rafi等[26]研究表明，6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚和6-姜烯酚可作为特征物质用于评价印度3种生姜品种的品质；

表 7 不同生姜种质资源的主成分得分及风味综合得分

Table 7 Principal component scores and comprehensive flavor scores of different ginger germplasm resources

样品	主成分得分											综合得分	综合排序
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11		
J1	0.13	−2.64	−1.05	2.69	−3.26	0.39	0.43	−0.22	−2.85	−2.10	0.31	−0.55	8
J2	2.98	−2.86	−2.96	−1.85	−1.63	0.62	3.00	0.47	2.17	−0.10	−1.34	0.07	6
J3	0.53	5.05	−4.34	−2.64	2.10	−1.30	−0.43	1.97	−1.06	−1.02	0.00	0.09	5
J4	2.42	−0.41	−4.42	−0.35	−1.63	1.24	−2.41	−0.98	−0.76	2.79	−0.33	−0.04	7
J5	−0.66	−4.03	−1.18	−1.41	1.65	0.43	0.10	0.71	0.79	−0.12	3.03	−0.82	9
J6	−0.90	4.11	0.15	5.72	−1.46	0.30	0.23	1.93	1.70	0.36	0.41	0.97	4
J7	2.99	−3.55	1.35	3.02	4.77	1.30	−1.02	0.68	−0.28	−0.20	−1.43	1.33	3
J8	6.48	−0.22	4.18	−2.47	−2.05	−2.03	−2.46	0.48	0.97	−1.17	−0.33	1.99	2
J9	7.56	3.23	3.26	0.06	0.96	0.17	2.38	−1.83	−1.02	1.16	0.92	3.47	1
J10	−5.27	−1.22	0.46	1.41	0.00	−3.50	−0.88	−1.59	1.03	0.67	0.31	−1.92	13
J11	−4.52	0.43	−0.88	−0.17	1.32	−2.68	1.30	−1.70	−0.45	−0.36	−0.97	−1.66	11
J12	−6.97	−0.65	4.52	−2.54	−0.91	0.90	0.72	2.25	−1.34	1.62	−0.48	−1.90	12
J13	−4.78	2.75	0.93	−1.48	0.13	4.17	−0.96	−2.17	1.10	−1.52	−0.09	−1.05	10

表 8 生姜种质资源特征化学物质

Table 8 Characteristic chemical components of ginger germplasm resources

类别	特征物质	气味描述
醇/酯类化合物	芳樟醇	鲜嫩甜香，似铃兰香气
	桉叶油醇	草药香
	茨醇	松木香
	萜品醇	丁香
	反-牻牛儿醇	玫瑰味
	乙酸冰片酯	松香
醛类化合物	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛	柠檬香
	异橙花醛	柠檬香
	异柠檬醛	柠檬香
	橙花醛	柠檬香
	柠檬醛	甜柠檬香
萜烯类化合物	*β*-蒎烯	青草味、松木香
	α-柏木烯	松木香
	δ-榄香烯	甜香
	α-香柠檬烯	依兰香
	大根香叶烯 D	花香
	γ-榄香烯	脂肪香
	β-法尼烯	柑橘香
	香树烯	花香
	α-姜黄烯	辛香
	姜烯	辛香
	β-红没药烯	木香、花香、果香、青香
	β-倍半水芹烯	辛香
	γ-红没药烯	木香、花香、果香、青香
姜辣素类化合物	12-姜酚	辛辣味
	1-脱氢-6-姜二酮	辛辣味
	1-脱氢-10-姜二酮	辛辣味
二苯基庚烷类化合物	5-羟基-1，7-双（4-羟基-3-甲氧基苯基）庚-3-酮	辛辣味
	3，5-二乙酰氧基-7-（4-羟基苯基）-1-（3，4-二羟基苯基）庚烷	辛辣味

Yudthavorasit等[15]采用HPLC-DAD对中国、印度、马来西亚、泰国和越南5个国家的生姜样品进行分析，发现8-姜酚和甲基-6-姜酚是印度和泰国生姜的特征成分，甲基二乙酰氧基-8-姜二醇、10-姜二醇和二乙酰氧基-8-姜二醇是中国生姜的特征成分；Abdo等[13]结合UV和HPLC对不同地区来源的生姜进行鉴别，发现6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚和6-姜烯酚质量浓度可作为生姜贮藏前后的质量评价指标。本研究发现，12-姜酚、1-脱氢-6-姜二酮、1-脱氢-10-姜二酮这3种姜辣素类化合物和5-羟基-1，7-双(4-羟基-3-甲氧基苯基)庚-3-酮、3，5-二乙酰氧基-7-(4-羟基苯基)-1-(3，4-二羟基苯基)庚烷这2种二苯基庚烷类化合物，可作为福建生姜品质评价的特征指标。

2.4　不同生姜种质资源的聚类分析

以可鉴定的主要活性成分(挥发性物质和非挥发性物质)为指标，采用SPSS软件对13份生姜种质资源进行聚类分析，见图3。13份生姜可聚为3大类：类群I包含大姜J8和J9，类群II包含大姜J2、小姜J5、小姜J4、小姜J1、大姜J7和小姜J3，类群III包含其他5份生姜。进一步分析发现，尽管生姜外观形态及大小存在差异，但来源地相同或邻近的生姜化学组成更为相似，如J10(三明市大姜)与J11(三明市小姜)、J2(福州市大姜)与J5(三明市小姜)均呈现这一特征。这一结果表明，来源地对生姜化学成分的影响程度大于其自身外观形态和大小。

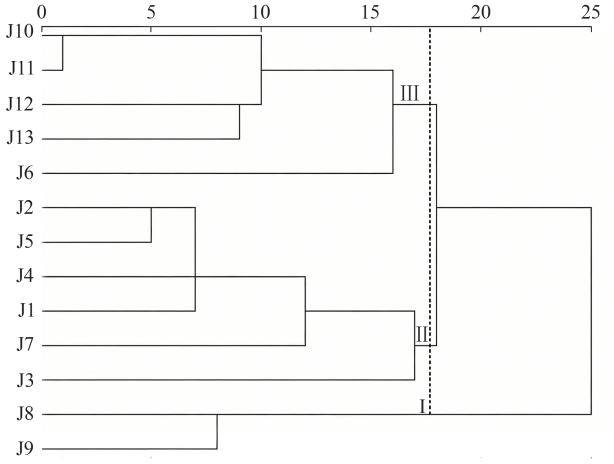


图3　不同生姜种质资源主要活性成分聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of main active components in different ginger germplasm resources

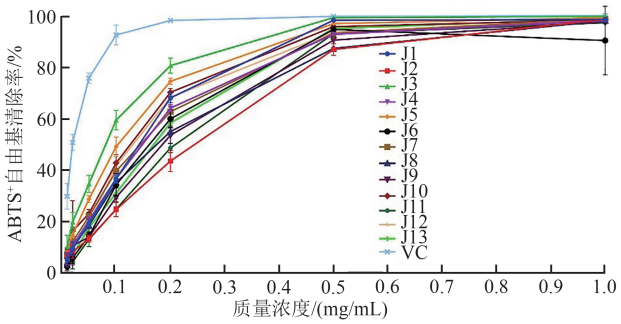


图4　不同生姜种质资源的ABTS$^+$自由基清除能力

Fig. 4　ABTS$^+$ free radical scavenging activities of different ginger germplasm resources

2.5　不同生姜种质资源的ABTS$^+$自由基清除率

姜辣素类化合物和二苯基庚烷类化合物具有抗氧化、抗肿瘤等生物活性。Chen等[20]研究发现，姜酮、6-姜酚、8-姜酚等姜辣素类化合物具有较强的DPPH自由基清除能力和ABTS$^+$自由基清除能力。Tao等[27]和Peng等[28]研究表明，二苯基庚烷类化合物具有较强的超氧阴离子清除能力和DPPH自由基清除能力。本研究以ABTS$^+$自由基清除能力为指标，评价13份生姜种质资源甲醇提取物的抗氧化能力。结果显示，提取物的ABTS$^+$自由基清除率随着其质量浓度的升高而增强，呈现明显的剂量依赖性，见图4。

13份生姜种质资源ABTS$^+$自由基清除率的IC_{50}见表9。结果显示，13份生姜种质资源中，J3和J5的ABTS$^+$自由基清除率最强，J2最弱。表明生姜J3和J5具有较强的抗氧化能力，可作为药用生姜的潜在种质资源。

表9　不同生姜种质资源ABTS$^+$自由基清除率的IC_{50}

Table 9　IC_{50} of ABTS$^+$ free radical scavenging activities of different ginger germplasm resources

样品	IC_{50}/(μg/mL)	样品	IC_{50}/(μg/mL)
J1	111.67±6.11	J8	136.67±7.37
J2	172.33±18.72	J9	150.00±13.00
J3	69.00±14.53	J10	100.67±11.68
J4	117.67±7.23	J11	166.00±13.75
J5	83.00±5.00	J12	111.00±11.53
J6	146.33±22.90	J13	131.67±4.93
J7	117.00±14.73	VC	19.67±2.08

进一步分析生姜种质资源的ABTS$^+$自由基清除率与已鉴定的姜辣素类化合物和二甲基庚烷类化合物峰面积的相关性。结果显示，不同生姜种质资源ABTS$^+$自由基清除率与姜辣素类化合物质

量分数的Pearson相关性系数为0.31，与二甲基庚烷类化合物质量分数的相关系数为−0.04，这表明姜辣素类化合物对生姜ABTS$^+$自由基清除率的贡献大于二甲基庚烷类化合物。

3 结论

生姜化学成分组成是其品质和生物活性的物质基础，本研究系统分析了福建13个生姜种质资源的化学组成和抗氧化能力。结果表明，从13个生姜中共鉴定出44种挥发性物质，包括24种萜烯类化合物、9种醛类化合物、6种醇类化合物、5种酯/酮类等其他化合物；共鉴定出21种非挥发性物质，包括14种姜辣素类化合物和7种二苯基庚烷类化合物，其中有1种姜辣素类化合物和2种二氢姜黄素衍生物为在该类物质中首次鉴定发现。聚类分析结果显示，13份生姜种质资源可聚为3大类，种植区域相同或邻近的生姜种质资源被聚为一类。PCA共筛选出29个差异特征成分，包括桉叶油醇、柠檬醛、橙花醛、姜烯、*a*-姜黄烯、*β*-倍半水芹烯、*β*-红没药烯、1-脱氢-6-姜二酮等。此外，ABTS$^+$自由基清除率与姜辣素类化合物的相关性强于二苯基庚烷类化合物。在13份生姜种质资源中，大姜J8和J9的姜精油含量较高，可作为精油提取用生姜；小姜J3和J5的ABTS$^+$自由基清除能力较强，可作为药用生姜优选材料。此外，本研究还发现，生姜种质资源活性成分组成丰富，不同生姜的香气组成差异明显，而姜辣素类化合物与二苯基庚烷类化合物的组成差异较小；来源地对生姜化学成分组成的影响程度大于其自身外观形态及大小。本研究为不同用途生姜种质资源的筛选与深加工产业提供了数据支撑。

参考文献

[1] KIYAMA R. Nutritional implications of ginger: chemistry, biological activities and signaling pathways[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2020, 86: 108486.

[2] ZHANG M M, ZHAO R, WANG D, et al. Ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) and its bioactive components are potential resources for health beneficial agents[J]. Phytotherapy Research, 2021, 35(2): 711-742.

[3] 王向东，宋玥，马艳芝. 不同生姜品种的品质比较与综合评价[J]. 中国农业科技导报，2023，25(4)：56-66.
WANG X D, SONG Y, MA Y Z. Quality comparison and comprehensive evaluation of different *Zingiber officinale* Rosc. varieties[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(4): 56-66. (in Chinese)

[4] MAO Q Q, XU X Y, CAO S Y, et al. Bioactive compounds and bioactivities of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)[J]. Foods, 2019, 8(6): 185.

[5] JOHNSON J B, MANI J S, WHITE S, et al. Pungent and volatile constituents of dried Australian ginger[J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 612-618.

[6] LI Y X, HONG Y, HAN Y Q, et al. Chemical characterization and antioxidant activities comparison in fresh, dried, stir-frying and carbonized ginger[J]. Journal of Chromatography. B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2016, 1011: 223-232.

[7] DE LIMA R M T, DOS REIS A C, DE MENEZES A P M, et al. Protective and therapeutic potential of ginger (*Zingiber officinale*) extract and [6]-gingerol in cancer: a comprehensive review[J]. Phytotherapy Research, 2018, 32(10): 1885-1907.

[8] YOCUM G T, HWANG J J, MIKAMI M, et al. Ginger and its bioactive component 6-shogaol mitigate lung inflammation in a murine asthma model[J]. American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology, 2020, 318(2): L296-L303.

[9] BAILEY-SHAW Y A, WILLIAMS L A D, JUNOR G O, et al. Changes in the contents of oleoresin and pungent bioactive principles of Jamaican ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) during maturation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(14): 5564-5571.

[10] ZAID A, HAW X R, ALKATIB H H, et al. Phytochemical constituents and antiproliferative activities of essential oils from four varieties of Malaysian *Zingiber officinale* Rose. against human cervical cancer cell line[J]. Plants, 2022, 11(10): 1280.

[11] SALMON C N A, BAILEY-SHAW Y A, HIBBERT S, et al. Characterisation of cultivars of Jamaican ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) by HPTLC and HPLC[J]. Food Chemistry, 2012, 131(4): 1517-1522.

[12] 郭孝萱，张芸丹，邱静，等. 生姜营养品质评价指标体系构建[J]. 中国调味品，2020，45(10)：192-196.
GUO X X, ZHANG Y D, QIU J, et al. Construction of nutritional quality evaluation index system of ginger[J]. China Condiment, 2020, 45(10): 192-196. (in Chinese)

[13] ABDO M T, EL-AHMADY S H, GAD H A. Quality control and long-term stability study of ginger from different geographical origins using chemometrics[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(8): 3429-3438.

[14] WARDANA S T, JUSWARDI J, LIAN A R N. Respons

pertumbuhan rimpang Jahe Merah（*Zingiber officinale* var. *Rubrum*）pada perendaman auksin dan PGPR[J]. Sriwijaya Bioscientia，2021，2(2)：53-58.

[15] YUDTHAVORASIT S，WONGRAVEE K，LEEPIPATPIBOON N. Characteristic fingerprint based on gingerol derivative analysis for discrimination of ginger（*Zingiber officinale*）according to geographical origin using HPLC-DAD combined with chemometrics[J]. Food Chemistry，2014，158：101-111.

[16] 张文焕. 生姜质量安全标准比对分析及特征成分差异研究[D]. 北京：中国农业科学院，2019.

[17] TAO Y，LI W K，LIANG W Z，et al. Identification and quantification of gingerols and related compounds in ginger dietary supplements using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2009，57(21)：10014-10021.

[18] JIANG H L，TIMMERMANN B N，GANG D R. Characterization and identification of diarylheptanoids in ginger（*Zingiber officinale* Rosc.）using high-performance liquid chromatography/electrospray ionization mass spectrometry [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry，2007，21(4)：509-518.

[19] SEMWAL R B，SEMWAL D K，COMBRINCK S，et al. Gingerols and shogaols：important nutraceutical principles from ginger[J]. Phytochemistry，2015，117：554-568.

[20] CHEN M C，LIN E Q，XIAO R F，et al. Structural characteristic，strong antioxidant，and anti-gastric cancer investigations on an oleoresin from ginger（*Zingiber officinale* var. Rose.)[J]. Foods，2024，13(10)：1498.

[21] KIRAN C R，CHAKKA A K，PADMAKUMARI AMMA K P，et al. Influence of cultivar and maturity at harvest on the essential oil composition，oleoresin and [6]-gingerol contents in fresh ginger from northeast India [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2013，61(17)：4145-4154.

[22] JAYASUNDARA N D B，ARAMPATH P. Effect of variety，location & maturity stage at harvesting，on essential oil chemical composition，and weight yield of *Zingiber officinale* Rose. grown in Sri Lanka [J]. Heliyon，2021，7(3)：e06560.

[23] 李智宁，魏悦，曹静亚，等. 不同产地生姜、干姜挥发油组分特征分析[J]. 江苏农业科学，2020，48(19)：215-221.
LI Z N，WEI Y，CAO J Y，et al. Analysis of volatile components of ginger and dried ginger from different regions by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2020，48(19)：215-221.(in Chinese)

[24] YAMAGUCHI K，KATO T，NOMA S，et al. The effects of high hydrostatic pressure treatment on the flavor and color of grated ginger[J]. Bioscience，Biotechnology，and Biochemistry，2010，74(10)：1981-1986.

[25] 潘少香，郑晓冬，刘雪梅，等. 干燥方式对生姜挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技，2016，37(24)：99-104115.
PAN S X，ZHENG X D，LIU X M，et al. The difference of aroma quality of ginger treated with different drying methods[J]. Science and Technology of Food Industry，2016，37(24)：99-104115.(in Chinese)

[26] RAFI M，LIM L W，TAKEUCHI T，et al. Simultaneous determination of gingerols and shogaol using capillary liquid chromatography and its application in discrimination of three ginger varieties from Indonesia [J]. Talanta，2013，103：28-32.

[27] TAO Q F，XU Y，LAM R Y Y，et al. Diarylheptanoids and a monoterpenoid from the rhizomes of *Zingiber officinale*：antioxidant and cytoprotective properties[J]. Journal of Natural Products，2008，71(1)：12-17.

[28] PENG F，TAO Q F，WU X M，et al. Cytotoxic，cytoprotective and antioxidant effects of isolated phenolic compounds from fresh ginger[J]. Fitoterapia，2012，83(3)：568-585.