

基于植物性状和挥发性成分的罗勒种质资源遗传多样性分析

张亚娇¹, 于福来², 元超², 陈晓鹭², 谢小丽², 王凯², 黄梅², 陈振夏², 官玲亮^{2*}, 陈松笔^{2*}

1. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163000; 2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业农村部中药材生物学与栽培重点实验室(试运行)/海南省热带药用植物工程研究中心, 海南海口 571101

摘要: 分析不同罗勒种质资源表型性状与化学型的遗传多样性, 为罗勒种质资源创新利用和品种选育提供理论参考。调查测定 15 份罗勒种质资源植物学性状, 采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)测定其叶片挥发性成分, 并结合相对气味活度值(ROAV)探究不同罗勒种质关键香气化合物, 并且对供试罗勒种质进行主成分分析和聚类分析。结果表明: 除分枝数外, 15 份罗勒种质的株高、株幅、叶长、叶宽及茎粗差异显著。通过 GC-MS 技术从 15 份罗勒种质中共鉴定出 104 种挥发性成分, 包括烷烃类 37 种, 萜烯类 32 种, 酯类 8 种, 酚类 5 种, 醇类 4 种, 醛类 3 种, 醚类 1 种, 其他 14 种, 其中共有成分有 2 种, 即 2,4-二叔丁基酚和十七烷。根据查询并计算 ROAV 值, 发现关键香气物质有丁香酚、芳樟醇、桉叶油醇、顺式-柠檬醛、肉桂酸甲酯、4-烯丙基苯甲醚等。挥发性物质主成分分析和聚类分析将罗勒分为 5 类, 泰国罗勒、茴香罗勒、暹罗皇后罗勒和甜罗勒聚为一类; 九层塔罗勒、热那亚罗勒、红鲁宾罗勒、紫黑蛋白石罗勒和紫夜罗勒聚为一类; 柠檬罗勒和丁香罗勒聚为一类; 托斯卡纳罗勒、冥王星罗勒和大叶罗勒聚为一类; 肉桂罗勒单独聚为一类。而植物学表型性状聚类分析也将罗勒分为 5 类, 冥王星罗勒聚为一类, 丁香罗勒、茴香罗勒和紫黑蛋白石罗勒聚为一类, 泰国罗勒单独聚为一类, 大叶罗勒和肉桂罗勒单独聚为一类, 其余 8 份种质聚为一类。15 份罗勒种质植物学性状和挥发性成分差异显著, 遗传多样性丰富, 可针对性的进行罗勒特异种质的选育。

关键词: 罗勒; 植物学性状; 挥发性成分; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: Q949.95 文献标志码: A

Genetic Diversity Analysis of Basil (*Ocimum basilicum*) Germplasm Resources Based on Plant Traits and Volatile Components

ZHANG Yajiao¹, YU Fulai², YUAN Chao², CHEN Xiaolu², XIE Xiaoli², WANG Kai², HUANG Mei², CHEN Zhenxia², GUAN Lingliang^{2*}, CHEN Songbi^{2*}

1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Biology and Cultivation of Chinese Medicinal Materials, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Trial operation) / Hainan Provincial Engineering Research Center for Tropical Medicinal Plants, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: The study was aimed to analyze the genetic diversity of the phenotypic traits and chemotypes of different *Ocimum basilicum* germplasm resources, to provide theoretical reference for the innovative utilization of basil germplasm resources and variety selection. The botanical traits of 15 basil germplasm resources and the volatile components of the leaves investigated and determined using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), together with the relative odour activity values (ROAV). At the same time, principal component analysis and cluster analysis were carried out on the tested germplasms. The 15 basil germplasms differed significantly in plant height, plant width,

收稿日期 2022-10-17; 修回日期 2022-10-28

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31870317); 海南省自然科学基金项目 (No. 2019RC316, No. 820MS102)。

作者简介 张亚娇 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 药用植物种质资源评价及次生代谢调控。*通信作者 (Corresponding author): 陈松笔 (CHEN Songbi), E-mail: songbichen@catas.cn; 官玲亮 (GUAN Lingliang), E-mail: gllgirl123@163.com。

leaf length, leaf width and stem thickness, except for the number of branches. 104 volatile compounds were identified, including 37 alkanes, 32 terpenes, 8 esters, 5 phenols, 4 alcohols, 3 aldehydes, 1 ether, and 14 other compounds, of which there are two types of common components, 2,4-di-tert-butylphenol and heptadecane. According to the ROAV values obtained from the enquiries and calculations, the key aroma substances were found to be eugenol, linalool, eucalyptol, cis-citral, methyl cinnamate, 4-allyl anisole, etc. The principal component analysis and cluster analysis of the volatile substances the germplasms could be classified into five groups, namely, Thai basil, Anise basil, Siam queen basil and Sweet basil were grouped together, Jiu Cengta basil, Genovese basil, Red rubin basil, Purple dark opal basil and Purple ruffles basil were grouped together, Clove basil and Lemon basil were grouped together, Tuscany basil, Pluto basil and Italian large leaf basil were grouped together, Cinnamon basil was grouped one category. The phenotypic trait cluster analysis also classified basil into five groups, with Pluto basil into a group, Clove basil, Anise basil and Purple dark opal basil into a group, Thai basil into a group, Italian large leaf basil and Cinnamon basil into a group. The remaining eight germplasm were clustered into a group. The 15 germplasms have significant differences in botanical characters and volatile components, and are rich in genetic diversity, which could be targeted for breeding of basil-specific germplasms.

Keywords: *Ocimum basilicum*; botanical traits; volatile components; principal component analysis; cluster analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.04.018

罗勒 (*Ocimum basilicum*) 为唇形科罗勒属植物, 全世界约有 65~150 种^[1-2], 广泛分布于热带与亚热带地区。罗勒不仅作为一种天然的香辛料, 还可作为传统药物具有疏风解表、化湿和中、强心安神、行气活血、解毒消肿、散瘀止痛等功效^[3], 享有“药草女王”之称^[4]。由于罗勒属植物易发生种间杂交和多倍体化, 使罗勒属的分类学极其复杂, 常出现同名异物或同物异名的现象, 造成罗勒资源无法得到有效利用, 使罗勒种质和新品种选育较困难。因此, 对罗勒种质进行遗传多样性分析, 将对罗勒种质资源的挖掘与创新以及提高育种效率具有重要意义。

目前, 关于罗勒属植物的分类大多数是基于叶、花及颜色等形态特征进行分类, 而形态特征的表达往往受植株发育及环境条件的影响, PATEL 等^[5]对印度南北 2 种不同农业气候条件下的不同罗勒品种的表型性状和产量进行比较试验, 发现不同罗勒品种表型性状以及精油产量差异显著, 证实了罗勒属具有基因型响应环境变化而改变性状表达的能力。为了便于分类, LAWRENCE^[6]以及 GRAYER 等^[7]提出了一种基于挥发油的标准化描述系统, 根据占主导地位的挥发性芳香化合物或含量大于 20% 的组分, 对罗勒进行了“化学型”分类。TANGPAO 等^[8]采用水蒸气蒸馏法提取泰国 5 种常见罗勒精油, 通过气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 得出其主要成分为芳樟醇、丁香酚和甲基丁香酚, 并将其气味特征分为柑橘类和香料类。TELICI 等^[9]同样采用以上方法和技术对土耳其 18 个罗勒品种进行研

究, 发现其主要成分为芳樟醇、肉桂酸甲酯、甲基丁香酚、柠檬醛、甲基胡椒酚。宋佳昱等^[10]从我国绿罗勒、莴苣罗勒和大叶罗勒的精油中分别鉴定出 40、26、36 种成分, 其中绿罗勒和大叶罗勒的主要成分为芳樟醇 (68.07%、66.93%), 莴苣罗勒的主要成分为桉树脑 (56.29%)。以上研究表明罗勒的挥发性成分在不同基因资源间存在显著差异, 同时也有部分受到环境影响。目前对于罗勒种质资源遗传多样性分析大多是针对单一表型性状或是挥发性成分进行单独分析, 鲜有将二者结合起来的研究报道, 这导致了资源评价及鉴定的不确定性。

本研究在对收集的 15 份罗勒种质资源进行植物学性状考察的基础上, 通过 GC-MS 技术对其叶片的挥发性成分进行检测, 同时结合相对气味活度值 (ROAV) 分析并确定不同罗勒种质的关键特征挥发性物质, 即“化学型”, 以期从外观性状和理化特征的层面对罗勒资源的遗传多样性进行分析, 为罗勒种质资源评价体系的建立奠定基础, 也为罗勒属的分类鉴别及特异种质选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试种质栽培于中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所南药圃, 种质信息见表 1。

主要仪器及试剂: 电子游标卡尺、钢尺、气相色谱-质谱联用仪 (美国安捷伦科技有限公司)、HP-5MS 色谱柱、超声波清洗仪、分析天平、研钵、离心机, 无水硫酸钠、正己烷。

表 1 罗勒种质信息
Tab. 1 Germplasms information of *O. basilicum*

序号 No.	拉丁学名 Latin name	英文名 English name	中文名 Chinese name
1	<i>O. basilicum</i>	Jiucengta basil	九层塔罗勒
2	<i>O. basilicum</i> var. <i>cinnamon</i>	Cinnamon basil	肉桂罗勒
3	<i>O. basilicum</i> var. <i>majus</i>	Italian large leaf basil	大叶罗勒
4	<i>O. basilicum</i> var. <i>genovese gigante</i>	Genovese basil	热那亚罗勒
5	<i>Ocimum</i> × <i>citriodorum</i>	Lemon basil	柠檬罗勒
6	<i>O. basilicum</i>	Sweet basil	甜罗勒
7	<i>O. basilicum</i> var. <i>thyrsiflora</i>	Thai basil	泰国罗勒
8	<i>O. basilicum</i> var. <i>tuscan green</i>	Tuseny basil	托斯卡纳罗勒
9	<i>O. basilicum</i> var. <i>red rubin</i>	Red rubin basil	红鲁宾罗勒
10	<i>O. basilicum</i> var. <i>purpureum dark opal</i>	Purple dark opal basil	紫黑蛋白石罗勒
11	<i>O. gratissimum</i>	Clove scented basil	丁香罗勒
12	<i>O. basilicum</i> var. <i>pluto</i>	Pluto basil	冥王星罗勒
13	<i>O. basilicum</i> var. <i>siam queen</i>	Siam queen basil	暹罗皇后罗勒
14	<i>O. basilicum</i> var. <i>purple ruffles</i>	Purple ruffles basil	紫夜罗勒
15	<i>O. basilicum</i> var. <i>anise</i>	Anise basil	茴香罗勒

1.2 方法

1.2.1 罗勒植物学性状调查 于2022年6月晴天上午 10: 00—12: 00 选取同时播种、水肥管理条件一致、无病虫害的 15 份罗勒种质，每份种质选取 3 株，观测并记录其地上部主要性状（包括株高、株幅、分枝数、叶长、叶宽、茎粗、叶片形状、叶脉颜色及叶片平整度）。叶片均选择长势良好、无病虫害的成熟叶片进行采集，采后立即放入冰盒中，备用。

1.2.2 样品预处理 将采集的新鲜叶片用蒸馏水清洗并擦拭干净，称取 1.00 g 叶片剪碎，冰浴充分研磨，转入 50 mL 离心管中，准确加入 25 mL 正己烷，超声 30 min（50 ℃，70 w），并加入适量无水硫酸钠过夜以除去水分，10 000 r/min 离心 5 min，吸取 1.5 mL 上清液，过滤转移至色谱瓶中用于 GC-MS 分析。

1.2.3 GC-MS 分析 色谱条件：色谱柱 HP-5MS 弹性石英毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氦气，载气流速为 1.0 mL/min，进样量为 1 μL，进样口温度为 220 ℃，进样方式为不分流进样。升温程序：以 60 ℃为起始温度，保持 5 min，6 ℃/min 升至 240 ℃，保持 5 min。质谱条件：EI 源，溶剂延迟 5 min，离子源温度为 230 ℃，扫描范围 45~500 amu。

1.2.4 ROAV 值计算 参照刘登勇等^[11]的方法，结合香气阈值，使用相对气味活度值（ROVA）确定罗勒的关键香气化合物。ROAV 值计算公式为：ROAV_i=[(C_i/C_{max})×(T_{max}/T_i)]×100。式中，

ROAV_i 为罗勒各挥发性化合物的相对气味活度值；C_i 为罗勒各挥发性化合物的相对百分含量；C_{max} 为罗勒整体香气贡献最大挥发性化合物的相对百分含量；T_i 为各挥发性成分对应的香气阈值；T_{max} 为罗勒总体香气贡献最大对应的香气阈值。所有化合物的 ROAV≤100，其中，1≤ROAV≤100 的化合物为关键香气化合物，0.1≤ROAV<1 为重要修饰关键香气化合物。

1.3 数据处理

采用 SPSS 21.0 和 Excel 2010 软件对罗勒植物学性状进行整理及单因素方差分析（ANOVA）。将得到的质谱图通过 NIST 数据库比对确定化合物（匹配度≥80%），按照气相色谱峰面积归一化法计算各挥发性成分的相对含量，采用 Origin 21 和 SPSS 21.0 软件进行主成分分析及聚类分析^[12-13]。

2 结果与分析

2.1 不同罗勒种质植物学性状分析

形态学研究是利用物种表型特征作为研究生物遗传多样性的方法之一，具有操作简单、观测直接等特点^[14]。从表 2 可以看出，不同罗勒种质的株高、株幅、叶长、叶宽及茎粗差异较大，15 份罗勒种质的株高分布范围为(30.2±1.79)~(56.2±7.19)cm。其中，肉桂罗勒和大叶罗勒显著高于九层塔罗勒、柠檬罗勒、托斯卡纳罗勒等种质。株幅范围在(11.4±1.34)~(32.2±2.28)cm 之间，紫黑蛋白石罗勒和茴香罗勒显著大于热那亚罗勒、甜罗

勒、泰国罗勒等种质。不同罗勒种质叶片的长、宽差异较大，叶长范围为(2.1±0.26)~(11.7±1.51)cm，叶宽在(1.4±0.23)~(10.2±2.18)cm 之间，其中，托斯卡纳罗勒的叶长和叶宽均显著高于其他种质。

茎粗范围在(3.2±0.27)~(6.3±0.25)mm 之间，紫黑蛋白石罗勒的茎粗值最大。不同罗勒种质的分枝数差异较小，仅甜罗勒和红鲁宾罗勒的分枝数显著大于冥王星罗勒和柠檬罗勒。

表 2 不同罗勒种质植物学性状

Tab. 2 Botanical traits of different *O. basilicum* germplasms

种质 Germplasm	株高 Plant height/cm	株幅 Plant amplitude/c m	分枝数 Branch number	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	茎粗 Stem thickness/m m	叶片形状 Blade shape	叶片 颜色 Leaf color	叶脉 颜色 Leaf vein color	叶片 平整度 Blade flatness	花冠 颜色 Corolla color
九层塔罗勒	47.2±8.04 ^{bcd}	16.2±3.03 ^{def}	15.8±3.56 ^{abc}	9.5±1.66 ^{bc}	5.9±1.49 ^{bc}	5.1±0.63 ^{bcd}	卵状披针形	绿色	绿色	向下卷曲	浅粉色
肉桂罗勒	56.0±2.74 ^a	20.2±6.30 ^{bcd}	19.2±4.15 ^{ab}	5.8±0.66 ^{fg}	3.3±0.22 ^{ef}	4.3±0.52 ^{de}	卵形	绿色	绿色	平整	紫色
大叶罗勒	56.2±7.19 ^a	14.0±4.64 ^{ef}	19.0±4.36 ^{ab}	9.7±1.59 ^b	6.4±1.31 ^b	4.4±0.74 ^{de}	椭圆形	绿色	绿色	向下卷曲	白色
热那亚罗勒	50.8±8.82 ^{abc}	19.4±4.83 ^{cde}	18.4±4.34 ^{abc}	8.2±1.13 ^{cd}	5.5±0.71 ^{bcd}	4.9±0.96 ^{bcd}	卵形	绿色	绿色	向下卷曲	白色
柠檬罗勒	44.6±2.30 ^{cd}	22.4±8.91 ^{bcd}	13.8±3.63 ^c	5.0±0.78 ^{gh}	2.5±0.79 ^{fg}	3.2±0.40 ^e	卵状披针形	翠绿色	绿色	平整	白色
甜罗勒	51.4±6.91 ^{abc}	18.0±7.14 ^{def}	20.0±2.83 ^a	7.8±1.82 ^{de}	5.1±1.34 ^{cd}	5.1±0.55 ^{bcd}	卵状披针形	绿色	绿色	向下卷曲	白色
泰国罗勒	50.6±1.34 ^{abcd}	11.4±1.34 ^f	16.2±2.68 ^{abc}	4.5±0.27 ^{gh}	2.0±0.16 ^g	3.2±0.27 ^g	卵形	绿色	绿色	平整	紫色
托斯卡纳罗勒	48.8±2.17 ^{bcd}	19.4±2.51 ^{cde}	16.0±0.71 ^{abc}	11.7±1.51 ^a	10.2±2.18 ^a	5.7±0.81 ^{ab}	近心形	翠绿色	绿色	皱缩	白色
红鲁宾罗勒	45.8±3.27 ^{cd}	22.6±5.68 ^{bcd}	19.4±0.89 ^a	5.6±0.80 ^{fg}	3.5±0.32 ^{ef}	5.4±0.91 ^{bc}	卵形	绿色	紫色	平整	浅粉色
紫黑蛋白石罗勒	48.2±1.79 ^{bcd}	31.6±3.36 ^a	19.2±2.28 ^{ab}	6.5±0.30 ^{ef}	4.5±0.18 ^{de}	6.3±0.25 ^a	卵圆形	绿色	紫色	平整	粉色
丁香罗勒	53.6±6.54 ^{ab}	26.6±9.56 ^{abc}	14.6±2.41 ^{abc}	4.6±0.44 ^{gh}	1.6±0.27 ^g	4.1±0.99 ^{ef}	卵状披针形	翠绿色	绿色	平整	粉色
冥王星罗勒	30.2±1.79 ^e	27.6±1.95 ^{ab}	14.2±2.59 ^c	2.1±0.26 ⁱ	1.4±0.23 ^g	5.5±0.35 ^{bc}	卵形	绿色	绿色	平整	白色
暹罗皇后罗勒	47.2±5.89 ^{bcd}	20.2±5.59 ^{bcd}	18.4±4.93 ^{abc}	6.5±0.83 ^{ef}	3.5±0.60 ^{ef}	3.4±0.46 ^{fg}	卵状披针形	绿色	绿色	平整	粉色
紫夜罗勒	43.4±1.14 ^d	20.8±3.70 ^{bcd}	16.2±2.59 ^{abc}	5.6±0.95 ^{fg}	3.6±0.54 ^{ef}	5.0±0.27 ^{bcd}	卵形	绿色	紫色	平整	紫色
茴香罗勒	49.4±3.21 ^{abcd}	32.2±2.28 ^a	16.6±1.14 ^{abc}	4.0±0.13 ^h	1.9±0.32 ^g	4.7±0.34 ^{cde}	卵状披针形	绿色	绿色	平整	浅粉色

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 不同罗勒种质叶片的挥发性成分分析

通过 GC-MS 联用技术对 15 份罗勒种质的挥发性成分进行检测与分析，结果显示：15 份罗勒种质共检测出 104 种化合物（图 1），采用峰面积归一化法计算各挥发性成分的相对含量（表 3，表中仅体现含量在 2.00%以上的化合物），发现不同罗勒种质叶片的挥发性成分及含量存在一定差异。就成分数量而言，大叶罗勒和热那亚罗勒的化合物数量最多，分别鉴定出 36 种和 35 种；而红鲁宾罗勒和紫黑蛋白石罗勒的化合物数量最少，分别鉴定出 13 种和 14 种。由此可见不同罗勒种质的化合物数量差异较大。

15 份罗勒种质的挥发性成分中含有烷烃类 37 种，萜烯类物质 32 种，此外还包括酯类 8 种，酚类 5 种，醇类 4 种，醛类 3 种，醚类 1 种，其他类物质 14 种，相对含量占总挥发性成分的 79.29%~96.39%。所有材料中共有挥发性成分有 2

种，分别为 2,4-二叔丁基酚和正十七烷，相对含量分别为 0.72%~8.26%、0.44%~5.11%。由图 2 可知，15 份罗勒种质的不同类型化合物的相对含量存在差异，其中酚类化合物含量比较高的罗勒种质有九层塔罗勒、大叶罗勒、热那亚罗勒和红鲁宾罗勒，相对含量在 43.97%~61.16%之间；醚类化合物含量较高的种质有甜罗勒、暹罗皇后罗勒、泰国罗勒和茴香罗勒，相对含量在 51.55%~87.95%之间。萜烯类化合物含量较高的种质是托斯卡纳罗勒（39.87%）和紫夜罗勒（33.69%），醛类化合物含量较高的种质是柠檬罗勒（59.02%）和丁香罗勒（60.22%），紫黑蛋白石罗勒的醇类化合物含量（37.73%）最高，肉桂罗勒的酯类化合物含量（77.97%）最高，冥王星罗勒的烷烃类化合物含量（33.14%）最高。虽然萜烯类和烷烃类化合物种类数量多，但在罗勒种质中的相对含量不一定最高。

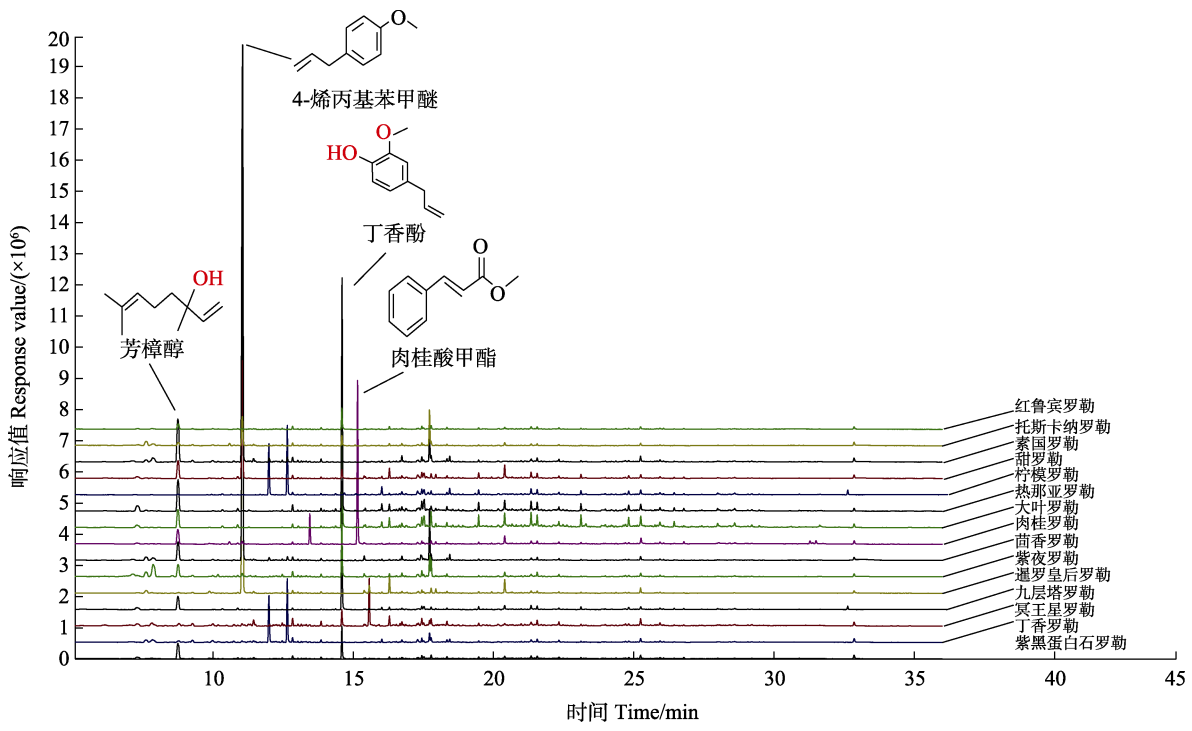


图 1 不同罗勒种质挥发性成分总离子流色谱图

Fig. 1 Total ion flow chromatogram of volatile components from different *O. basilicum* germplasms

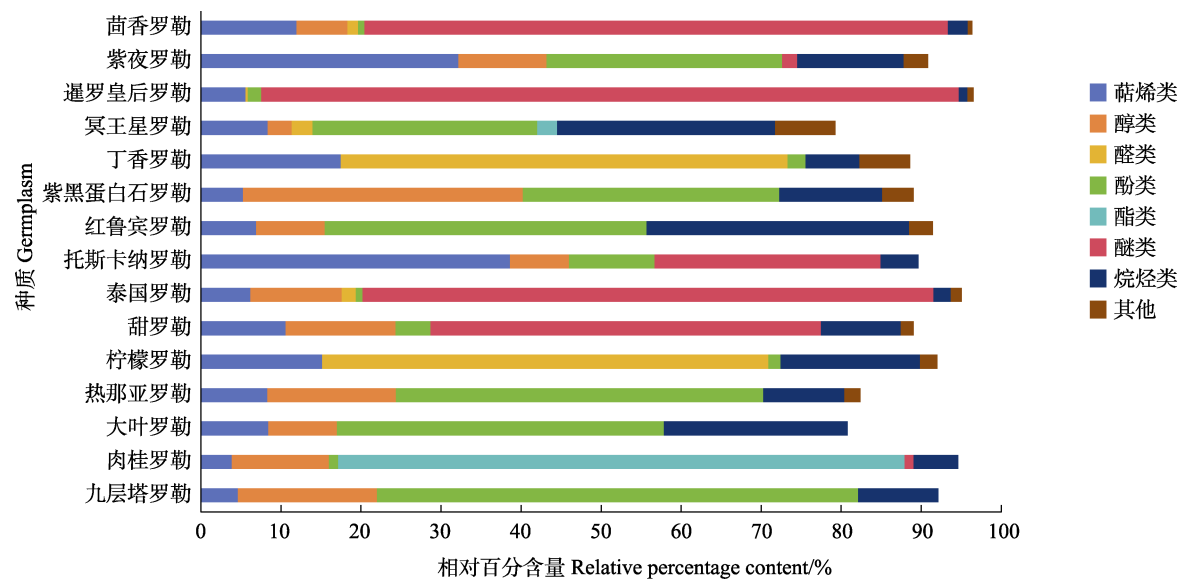


图 2 不同罗勒种质不同类型化合物的相对含量

Fig. 2 Relative content of different types of compounds of different *O. basilicum* germplasms

不同罗勒种质叶片的主要挥发性成分也存在一定差异。15 份罗勒种质材料中，九层塔罗勒、热那亚罗勒、红鲁宾罗勒和紫黑蛋白石罗勒的丁香酚含量较高，相对含量分别为 58.91%、44.80%、33.68%、28.35%。暹罗皇后罗勒、茴香罗勒、泰国罗勒、甜罗勒和托斯卡纳罗勒中的 4-烯丙基苯甲醚含量较高，相对含量分别为 87.16%、72.87%、71.34%、48.81%、28.24%。柠檬罗勒和丁香罗勒的柠檬醛含量较高，分别为 31.05%和 29.67%。肉桂罗勒中的肉桂酸甲酯含量最高，为 68.19%。大叶罗勒中的 2-甲氧基-5-丙-2-烯基苯酚含量最高，为 38.11%。紫黑蛋白石罗勒中的芳樟醇含量最高，为 30.11%。冥王星罗勒的甲基丁香酚含量最高，为 18.15%（表 3）。

表 3 15 份罗勒种质叶片挥发性成分及相对含量

		Tab. 3 Volatile components and relative content of leaves of different 15 <i>O. basilicum</i> germplasms															%	
类别	序号	挥发性成分	分子式	九层塔 罗勒	肉桂 罗勒	大叶 罗勒	热那亚 罗勒	柠檬 罗勒	甜罗勒	泰国 罗勒	托斯卡 罗勒	红鲁宾 罗勒	紫黑蛋白 石罗勒	丁香 罗勒	冥王星 罗勒	暹罗皇 后罗勒	紫夜 罗勒	茴香 罗勒
Category	No.	Volatile component	Structural formula	Jucengta basil	Cinnamon basil	Italian large leaf basil	Genovese basil	Lemon basil	Sweet basil	Thai basil	Tuscan basil	Red rubin basil	Purple dark opal basil	Clove scented basil	Pluto basil	Siam queen basil	Purple ruffles basil	Anise basil
萜烯类	1	大根香叶烯 D	C ₁₅ H ₂₄	-	0.88	-	-	2.80	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	0.57
	2	(+)-桥-二环倍半水芹烯	C ₁₅ H ₂₄	-	3.00	2.65	-	-	-	-	2.17	-	-	-	-	-	-	-
	3	β-石竹烯	C ₁₅ H ₂₄	1.27	-	1.17	1.53	4.36	0.80	0.20	-	-	-	1.51	-	-	-	0.23
	4	(1S,5S,6R)-2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯-1-基)双环[3.1.1]庚-2-烯	C ₁₅ H ₂₄	1.23	-	1.69	1.44	0.74	3.11	-	1.55	4.83	-	-	4.46	2.43	1.35	-
	5	巴伦西亚亚橘烯	C ₁₅ H ₂₄	2.12	-	2.93	3.15	3.25	-	-	-	-	2.50	-	-	-	-	-
	6	γ-依兰油烯	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	2.18	-	-	-	-	-	-	-	1.65	2.13	-	-
	7	1-甲基-4-[(2E)-6-甲基-2,5-庚二烯-2-基]环己烯	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	2.63	-	-	-	-	-	1.34	-	-	-	0.89
	8	2-异丙基-5-甲基-9-亚甲基-二环[4.4.0]-1-萜烯	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	4.58	-	-	-	2.74	-	-	-	-	-
	9	β-胡椒烯	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.50	-	-	-	-
	10	α-罗勒烯	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	-	-	-	0.76	-	-	-	3.28	-	1.04	-	-
	11	γ-松油烯	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	-	1.37	-	1.82	4.65	-	-	4.53	-	-	15.57	1.51
醇类	12	3,7,11-三甲基-1,3,6,10-十二碳-四烯	C ₁₃ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	3.40	21.73	-	-	4.33	2.25	-	7.82	7.16
	13	罗勒烯	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.71	-
	14	顺-4(1S),5-依兰油二烯	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	-	-	-	-	-	2.09	-	-	-	-	1.71	-
	15	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	C ₁₈ H ₃₄	-	-	-	-	-	-	-	8.51	-	-	-	-	-	-	1.59
醛类	16	桉叶油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	3.68	-	1.67	3.59	-	2.16	-	-	-	4.86	-	3.00	-	-	-
	17	芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O	13.71	10.94	6.90	12.47	-	11.59	11.44	5.00	8.56	30.11	-	-	-	11.01	6.36
	18	4-萜烯醇	C ₁₀ H ₁₈ O	-	1.19	-	-	-	-	-	2.40	-	-	-	-	-	-	-
酯类	19	顺式-柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	-	-	-	-	24.69	-	0.61	-	-	-	24.40	-	-	-	0.61
	20	柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	-	-	-	-	31.05	-	0.68	-	-	-	29.67	-	-	-	0.71
酚类	21	3,4-二甲基苯甲醛	C ₉ H ₁₀ O	-	-	-	-	-	-	0.45	-	-	-	1.75	2.61	0.26	-	-
	22	2,4-二叔丁基酚	C ₁₄ H ₂₂ O	1.22	1.16	2.74	1.09	1.55	1.44	0.83	2.98	6.53	3.72	2.25	3.13	0.72	8.26	0.83
	23	2-甲氧基-5-丙-2-烯基苯酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	-	-	38.11	-	-	-	-	7.71	-	-	-	-	-	-	-
	24	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	58.91	-	-	44.80	-	2.89	-	-	33.68	28.35	-	6.78	-	21.19	-
	25	甲基丁香酚	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.15	0.96	-	-

续表 3 15 份罗勒种质叶片挥发性成分及相对含量

Tab. 3 Volatile components and relative content of leaves of different 15 <i>O. basilicum</i> germplasms (continued)																			%
类别	序号	挥发性成分	分子式	九层塔	肉桂	大叶	热那亚	柠檬	甜罗勒	泰国	托斯卡	红鲁宾	紫黑蛋白	丁香	冥王星	暹罗皇	紫夜	茴香	
Category	No.	Volatile component	Structural formula	Jiucengta basil	Rougui basil	Italian large leaf basil	Genovese basil	Lemon basil	Sweet basil	Thai basil	Tuscan basil	Red rubin basil	Purple dark opal basil	Clove scented basil	Pluto basil	Siam queen basil	Purple ruffles basil	Anise basil	
酯类	26	肉桂酸甲酯	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	-	68.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	27	棕榈酸甲酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	-	2.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	28	草酸-6-乙基-3-基庚酯	C ₁₈ H ₃₄ O ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.50	-	-	-	
醚类	29	4-烯丙基苯甲醚	C ₁₀ H ₁₂ O	-	1.13	-	-	-	48.81	71.34	28.24	-	-	-	-	87.16	1.90	72.87	
	30	二十八烷	C ₂₈ H ₅₈	3.70	0.99	1.68	1.21	1.21	1.25	-	1.69	3.52	1.76	-	2.96	-	-	-	
烷烃类	31	正十六烷	C ₁₆ H ₃₄	1.37	1.19	1.98	2.09	2.00	1.59	0.23	-	2.48	1.83	2.09	1.11	0.65	3.60	0.43	
	32	正十七烷	C ₁₇ H ₃₆	2.28	1.20	3.99	2.08	3.01	2.39	1.10	1.66	5.11	2.93	1.54	2.04	0.44	1.26	0.49	
	33	正二十七烷	C ₂₇ H ₅₆	0.69	0.92	1.06	-	3.08	-	-	1.35	-	-	1.23	2.18	-	1.36	-	
	34	正十八烷	C ₁₈ H ₃₈	1.18	0.42	3.48	1.16	1.56	1.05	-	-	-	-	-	1.58	-	-	-	
	35	正二十烷	C ₂₀ H ₄₂	-	-	3.20	0.57	0.88	-	-	-	3.42	-	-	-	-	2.09	0.36	
	36	2-甲基十七烷	C ₁₈ H ₃₈	-	-	3.53	0.38	-	-	-	-	-	-	-	0.84	-	-	-	
	37	正十五烷	C ₁₅ H ₃₂	0.77	-	0.58	-	-	2.51	-	-	-	-	1.86	1.53	-	1.14	0.52	
	38	8-甲基-十七烷	C ₁₈ H ₃₈	-	-	-	1.11	1.25	-	0.58	-	4.22	4.19	-	5.30	-	-	-	
	39	三十一烷	C ₃₁ H ₆₄	-	-	-	-	0.98	-	-	-	-	-	-	2.64	-	-	-	
	40	3,6-二甲癸烷	C ₁₂ H ₂₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.08	-	-	-	
其他	41	2,6,10-三甲基十五烷	C ₁₈ H ₃₈	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.23	-	
	42	1,3,3-三甲基三环[2.2.1.02,6]庚烷	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	-	-	-	-	-	9.27	-	-	-	-	-	-	
	43	1-碘三十二烷	C ₃₂ H ₆₅ I	-	0.85	-	-	1.03	0.69	-	-	4.76	2.14	-	1.46	-	1.60	0.28	
	44	1-碘十八烷	C ₁₈ H ₃₇ I	-	-	3.46	1.54	2.40	0.50	0.25	-	-	-	-	3.51	-	-	0.40	
	45	1-碘十六烷	C ₁₆ H ₃₃ I	-	-	-	2.01	2.18	1.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	46	1,2,3,5-四甲基苯	C ₁₀ H ₁₄	-	-	-	-	-	-	0.72	-	-	-	4.63	-	-	-	-	
	47	7,9-二叔丁基 1-氧杂吡啶(4,5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮	C ₁₇ H ₂₄ O	-	-	-	-	-	-	0.65	-	-	3.92	1.70	3.36	0.76	-	0.58	
	48	1,2,4,5-四甲基苯	C ₁₀ H ₁₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.17	-	-	-	
	49	4-异丙基甲苯	C ₁₀ H ₁₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.05	-	
	50	1-碘-2-甲基十一烷	C ₁₂ H ₂₅ I	-	-	-	-	-	-	-	-	2.98	-	-	-	-	-	-	
总计				92.13	94.63	80.82	82.40	92.02	89.07	95.06	94.78	89.64	89.05	88.61	79.29	96.55	90.85	96.39	

注：-表示未检测到相关化合物。
Note: - means that the related compound was not detected.

2.3 不同罗勒种质的关键香气化合物分析

为进一步确定不同罗勒种质的特征香气化合物,通过查阅相关文献参考各香气化合物阈值,并结合表 3 中共有组分的相对含量计算不同罗勒种质中的 ROAV 值。

由表 4 可知,部分罗勒资源表现出相似的气味,如九层塔罗勒、热那亚罗勒、甜罗勒以及紫黑蛋白石罗勒的主体香气物质均为丁香酚、芳樟醇和桉叶油醇,赋予其花木香、甜香及樟脑气味,其中 β -石竹烯和 4-烯丙基苯甲醚对甜罗勒香气具有重要修饰作用。此外,红鲁宾罗勒和紫夜罗勒的主体香气物质为丁香酚和芳樟醇,赋予其花木香和甜香等气味,其中罗勒烯为紫夜罗勒的重要香气修饰物质;顺式-柠檬醛作为丁香罗勒和柠檬罗勒的主体香气物质,赋予其柠檬气味,且柠檬醛对其香气均有重要修饰作用。

也有一些罗勒种质具有特殊的气味,如芳樟醇和肉桂酸甲酯为肉桂罗勒中的主体香气物质;大叶罗勒的主体香气物质为芳樟醇、桉叶油醇、 α -芹子烯和冰片,因此具有花木香、樟脑及丁香气味, β -石竹烯、2,4-二叔丁基酚等则对其香气具有重要修饰作用。此外,冥王星罗勒中以丁香酚、甲基丁香酚、萘以及桉叶油醇为主要香气物质,具有花木香、甜香及樟脑等气味, α -律草烯为主要香气修饰物质;暹罗皇后罗勒中以 β -罗勒烯、甲基丁香酚、4-烯丙基苯甲醚等为主体香气物质,具有柑橘香、花木香以及青草香等气味,樟脑为重要香气修饰物质;顺式-柠檬醛、芳樟醇以及 α -芹子烯作为茴香罗勒中的主体香气物质,具有柠檬香、花木香及丁香等气味。

2.4 不同罗勒种质挥发性物质主成分分析

利用 Origin 2021 软件对 15 份罗勒种质挥发性成分进行主成分分析,PC1、PC2、PC3 的方差贡献率依次为 52.83%、18.61%、13.60%,累计贡献率达 85.04%(表 5),说明这 3 个主成分可以解释挥发性成分的大部分信息,因此可用于鉴别不同罗勒种质挥发性成分的差异性。由图 3 可知,15 份罗勒种质被大致划分为 5 类,其中九层塔罗勒、热那亚罗勒、紫黑蛋白石罗勒、红鲁宾罗勒以及紫夜罗勒划分为一类,并以丁香酚(B42)及芳樟醇(B34)为主要成分。第二类为甜罗勒、泰国罗勒、茴香罗勒及暹罗皇后罗勒,以 4-烯丙基苯甲醚(B53)为主要成分。第三类为冥王星罗勒、大叶罗勒及托斯卡纳罗勒,以 3,7,11-三甲

基-1,3,6,10-十二碳-四烯(B23)、2-甲氧基-5-丙-2-烯基苯酚(B41)为主要成分。第四类为丁香罗勒及柠檬罗勒,以柠檬醛(B38)和顺式-柠檬醛(B37)为主要成分。第五类为肉桂罗勒,主要成分为肉桂酸甲酯(B45)。结果表明,不同罗勒种质的挥发性物质组成差异显著。

2.5 不同罗勒种质挥发性成分及表型性状聚类分析

植物学性状和化学成分的组成一直是研究植物种质资源多样性的主要技术指标。由于罗勒的整体香气除含量外,还取决于单体成分的香气阈值,即使含量低的挥发性物质,如果香气阈值较低,也会对罗勒整体香气贡献较大,因此本研究对供试材料检测到的所有挥发性成分以及表型性状进行系统聚类分析(图 4)。其中,基于挥发性成分的聚类分析表明(图 4A),当欧氏距离为 20 时,可将 15 份种质分为 3 个大类,第 I 类由泰国罗勒、茴香罗勒、暹罗皇后罗勒及甜罗勒组成,该类以 4-烯丙基苯甲醚为主要化合物;肉桂罗勒单独聚为第 III 类,该种质中肉桂酸甲酯含量最高,而其他罗勒种质中均不含该化合物;其余罗勒种质全部聚为第 II 大类。当距离为 10 时,可进一步将第 II 大类分为 3 个亚类,其中九层塔罗勒、热那亚罗勒、红鲁宾罗勒、紫夜罗勒和紫黑蛋白石罗勒聚为 I 亚类,该组种质中的芳樟醇和丁香酚含量较高;柠檬罗勒和丁香罗勒聚为 II 亚类该组种质中的柠檬醛含量较高;其余 3 份种质聚为 III 亚类,这组种质中的烷烃类含量较高。该结果与主成分分析结果基本一致。

植物学表型性状聚类分析表明(图 4B),当欧氏距离为 10 时,15 份罗勒种质可分为 3 大类,第 I 类为冥王星罗勒,该种质叶片小,植株矮小,显著小于其他罗勒种质;第 II 类为丁香罗勒、茴香罗勒以及紫黑蛋白石罗勒,该组种质的株高、株幅及分枝数较高,但叶长和叶宽较小;其余 11 份种质聚为第 III 类。当距离为 5 时,可将第 III 大类进一步分为 3 个亚类,泰国罗勒聚为 I 亚类,该种质株幅、叶长、叶宽及茎粗均较小;大叶罗勒和肉桂罗勒被聚为 II 亚类,该组种质的株高显著高于其他种质;其余 8 份种质被聚为 III 亚类,该组种质的植物学性状整体介于泰国罗勒、大叶罗勒以及肉桂罗勒之间。结果表明,不同罗勒资源间存在丰富的遗传多样性,可以通过植物学性状和活性成分将其进行区分。但由于分类的角度

表 4 15 份罗勒种质挥发性物质的 ROAV 值

Tab. 4 ROAV values for volatiles from 15 *O. basilicum* germplasms

序号 No.	挥发性成分 Volatile component	阈值 ^[15] Threshold value/ (mg·kg ⁻¹)	气味描述 Smell description	ROAV 值														
				九层塔 罗勒 Jiucengta basil	肉桂罗勒 Cinnamon basil	大叶罗勒 Italian large leaf basil	热那亚 罗勒 Genovese basil	柠檬 罗勒 Lemon basil	甜罗勒 Sweet basil	泰国 罗勒 Thai basil	托斯卡 纳罗勒 Tuscan basil	红鲁宾 罗勒 Red rubin basil	紫黑蛋白 石罗勒 Purple dark opal basil	丁香 罗勒 Clove scented basil	冥王 星罗勒 Pluto basil	暹罗皇 后罗勒 Siam queen basil	紫夜 罗勒 Purple ruffles basil	茴香 罗勒 Anise basil
1	冰片	0.001	-	-	-	17.72	0.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	β-石竹烯	0.064	辛辣味	<0.10	-	0.64	0.04	0.04	0.26	0.07	-	-	-	<0.10	-	-	-	0.09
3	α-芹子烯	0.001	丁香、泥土香	-	-	15.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33.87
5	α-律草烯	0.160	-	-	-	-	-	<0.10	-	-	0.41	-	-	-	0.12	-	-	-
6	β-罗勒烯	0.034	柑橘香、甜香	-	-	-	-	-	-	0.47	-	-	-	0.06	-	100	-	-
7	γ-松油烯	1.000	-	-	-	-	-	-	-	<0.10	0.22	-	-	-	-	-	<0.10	<0.10
8	樟脑	4.600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.31	-	-
9	罗勒烯	0.034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.56	-
10	桉叶油醇	0.0011	松油香、草药味、樟脑气息	4.04	-	52.84	5.16	-	40.70	-	-	-	11.06	-	28.51	-	-	-
11	芳樟醇	0.0024	花木香、甜香	6.88	100	100	8.23	-	100	100	100	7.52	31.42	-	-	-	15.37	65.27
12	4-萜烯醇	1.200	胡椒香、淡泥土香	-	<0.10	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-
13	松油醇	1.200	丁香花香	-	-	0.02	-	-	<0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	反式-肉桂酸甲酯	0.120	-	-	12.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	顺式-柠檬醛	0.00015	柠檬香气	-	-	-	-	100	-	85.43	-	-	-	100	-	-	-	100
16	柠檬醛	0.040	柠檬香气	-	-	-	-	0.47	-	0.36	-	-	-	0.46	-	-	-	0.44
17	2,4-二叔丁基酚	0.500	-	-	<0.10	0.19	-	-	<0.10	<0.10	0.29	<0.10	<0.10	-	<0.10	4.74	<0.10	<0.10
18	丁香酚	0.00071	花木香	100	-	-	100	-	84.35	-	-	100	100	-	100	-	100	-
19	甲基丁香酚	0.068	甜香、青草香	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.79	46.10	-	-
20	棕榈酸甲酯	4.000	-	-	<0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	4-烯丙基苯甲醛	7.500	青草香	-	-	-	-	-	0.13	0.20	0.18	-	-	-	-	38.07	-	0.24
22	正十六烷	0.500	-	-	<0.10	0.14	<0.10	-	<0.10	<0.10	-	<0.10	<0.10	-	<0.10	4.26	<0.10	<0.10
23	十四烷	1.000	-	-	-	<0.10	-	-	<0.10	<0.10	-	-	-	-	-	-	<0.10	-
24	正十二烷	10.000	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-
25	紫	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00	-	-	-

注：-表示未查询到该香气化合物阈值及其类型。
Note: - means that the threshold and type of aroma compounds are not found.

不同，聚类的结果有所差异，外观性状相似的品种，其活性成分也可能存在较大差异。因此，通过外观性状作为指标较难筛选特殊活性成分的罗勒种质。

表 5 主成分特征值及方差贡献率
Tab. 5 Eigenvalues and variance contribution of principal components

主成分 Principal components	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%
1	1175.84	52.83	52.83
2	414.29	18.61	71.44
3	302.71	13.60	85.04

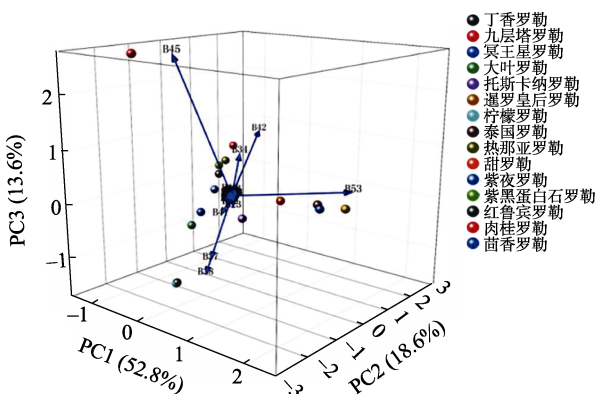
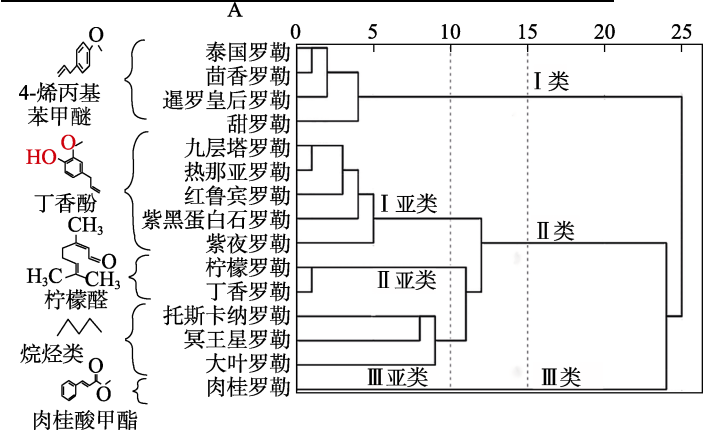


图 3 15 份罗勒种质挥发性成分的 PCA 载荷图
Fig. 3 PCA loadings of volatile components of 15 *O. basilicum* germplasms

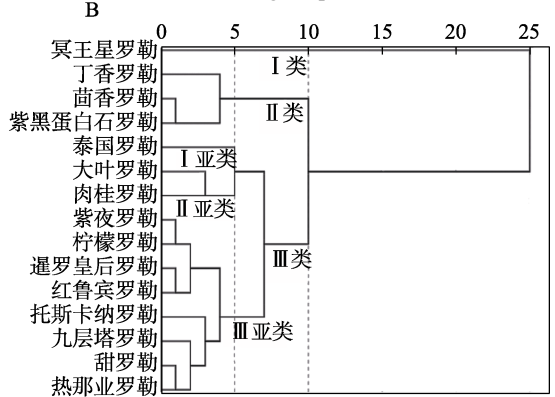


图 4 不同罗勒种质挥发性成分 (A) 及植物学性状 (B) 聚类分析
Fig. 4 Cluster analysis of volatile components (A) and botanical traits (B) of 15 *O. basilicum* germplasms

3 讨论

罗勒分布范围广，应用历史悠久，经过几个世纪的人工栽培，由于种间杂交和多倍体育种等引起了遗传结构的改变，并且随着特定地区物候因子的变化，使罗勒在颜色、叶片形状和大小等表型性状上的多样性愈加明显^[16]。本研究通过调查 15 份罗勒种质的主要植物学性状，发现不同罗勒种质的株高、株幅、叶长、叶宽及茎粗存在显著差异，这与 ERUM 等^[17]和 PATEL 等^[5]的研究结果一致。本研究中供试材料的叶片形状大多为卵状披针形或卵形，颜色有绿色和翠绿色。红鲁宾罗勒、紫黑蛋白石罗勒和紫夜罗勒的叶脉颜色为紫色，极具观赏价值。此外，托斯卡纳罗勒的叶片表现出明显的褶皱。由此可以看出，供试罗勒种质的植物学性状存在明显的遗传多样性，可以通过自交或杂交手段获得一批药、食、观赏为一体的罗勒品系。

罗勒活性物质的组成受基因型和环境共同作

用。RODRIGUES 等^[18]检测出巴西甜罗勒的挥发性成分主要为 4-烯丙基苯甲醚（60.96%）和芳樟醇（27.27%），与本研究结果基本一致，但引种后其含量略有减少，分别为 48.81%和 11.59%。BEATOVIC 等^[19]研究发现，在塞尔维亚种植的暹罗皇后罗勒的主要挥发性成分为 4-烯丙基苯甲醚（83.60%），引种后其主要成分种类未发生改变，而含量有所增加，达 87.16%，说明甜罗勒和暹罗皇后罗勒的挥发性活性物质的种类和含量主要受基因型控制，环境对其含量略有影响。同时，研究中也发现少量罗勒品种的关键成分受环境影响较大，如丁香罗勒在肯尼亚东部地区检测到的主要挥发性物质为丁香酚（68.81%）和甲基丁香酚（13.21%）^[20]，而本研究中丁香罗勒的主要挥发性化合物为柠檬醛（29.67%）和顺式-柠檬醛（24.40%）。除此之外，本研究中的暹罗皇后罗勒、茴香罗勒、泰国罗勒中含有的 4-烯丙基苯甲醚以及肉桂罗勒含有的肉桂酸甲酯的相对含量均在

70%以上, 因此可以对这些特异种质进行差异化育种, 为后续罗勒的特殊应用与开发, 以及关键单体活性物质的提取提供参考。

为体现和描述芳香植物的香气类型, 里奥·范海默特^[15]研究发现, 香气成分的含量和阈值是影响人类感知植物香气的2个主要影响因素。目前, 通过计算相对气味活度值(ROAV)来描述植物的具体香气表现已在玫瑰^[21]、茶叶^[22-23]、刺槐^[24]等植物中得以较好的应用。罗勒被誉为“香草皇后”, 但目前尚无香气类型分析的研究报道。本研究通过ROAV分析发现, 大部分罗勒种质的主体香气物质均含有芳樟醇, 具有一定的花木香及甜香气味。此外, 15份罗勒种质的挥发性成分含量较高的化合物其阈值也较低, 对罗勒的香气贡献较大, 总体鉴定出8种香气类型, 如丁香酚/芳樟醇型、丁香酚/芳樟醇/桉叶油醇型以及顺式-柠檬醛型, 为罗勒特异种质在化妆品、食品以及医药等领域的应用提供参考。

基于植物性状和挥发性成分进行聚类分析表明, 2种方式的聚类结果有差异。通过植物学性状聚类把丁香罗勒、茴香罗勒以及紫黑蛋白石罗勒聚为一类, 这些种质具有相似的外观性状, 如株高、株幅以及分枝数较大, 叶长、叶宽较小; 而通过挥发性成分的聚类却将外观性状相似的罗勒种质分别聚在3个不同的大类, 3种罗勒的主要挥发性成分分别为柠檬醛和顺式柠檬醛、4-烯丙基苯甲醚、芳樟醇和丁香酚。究其原因, 主要是由于罗勒属植物易于种间或种内杂交, 外观性状与活性成分连锁不紧密, 因此相似的外观性状可能存在较大的活性成分差异。但总体来看, 不管是基于哪种方法, 都可以把15份种质进行完全区分。结果表明供试罗勒种质的遗传差异较大, 存在丰富的遗传多样性, 可为后期罗勒的杂交育种或聚合育种提供基础材料与理论依据。

参考文献

- [1] PUSHPANGADAN P, BRADU B L. Medicinal and aromatic plants[M]. New Delhi: Malhotra Publishing House, 1995: 627-657.
- [2] PATON A, HARLEY R M, HARLEY M M. Basil: the genus *Ocimum*[M]. The Netherlands: Harwood Academic Publishers, 1999: 11-46.
- [3] 官玲亮, 吴丽芬, 庞玉新, 胡雄飞, 于福来, 张影波, 陈振夏, 谢小丽. 芳香植物罗勒的研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(8): 42-46, 52.
- [4] GUAN L L, WU L F, PANG Y X, HU X F, YU F L, ZHANG Y B, CHEN Z X, XIE X L. Research progress on aromatic plant *Ocimum basilicum* L.[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2013, 33(8): 42-46, 52. (in Chinese)
- [5] BILAL A, JAHAN N, AHMED A, BILAL S N, HABIB S, HAJRA S. Phytochemical and pharmacological studies on *Ocimum basilicum* Linn-a review[J]. International Journal of Current Research and Review, 2012, 4(23): 73-83.
- [6] PATEL R P, SINGH R, RAO B R R, SINGH R R, SRIVASTAVA A, LAL R K. Differential response of genotype $\times$ environment on phenology, essential oil yield and quality of natural aroma chemicals of five *Ocimum* species[J]. Industrial Crops and Products, 2016(87): 210-217.
- [7] LAWRENCE B M. Labiatae oils-mother nature's chemical factory in essential oils[M]. Allured Publishing, Carol Stream, 1993: 188-206.
- [8] GRAYER R J, KITE G C, GOLDSTONE F J, BRYAN F J, PATON S E, PUTIEVSKY E. Intraspecific taxonomy and essential oil chemotypes in sweet basil, *Ocimum basilicum*[J]. Phytochemistry, 1996, 43(5): 1033-1039.
- [9] TANGPAO T, CHUNG H H, SOMMANO S R. Aromatic profiles of essential oils from five commonly used Thai basil[J]. Foods, 2018, 7(11): 175.
- [10] TELCI I, BAYRAM E, YILMAZ G, AVCI B. Variability in essential oil composition of Turkish basil (*Ocimum basilicum* L.)[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2006, 34(6): 489-497.
- [11] 宋佳昱, 谢琳, 张玄兵. 绿罗勒、莴苣罗勒和大叶罗勒的精油成分分析[J]. 广西植物, 2016, 36(3): 373-378.
- [12] SONG J Y, XIE L, ZHANG X B. Chemical components of essential oils from *Ocimum basilicum* 'Green', *O. basilicum* 'Lettuce' and *O. basilicum* var. Majus[J]. Guihaia, 2016, 36(3): 373-378. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. “ROAV” method: a new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370-374. (in Chinese)
- [15] 戴前莉, 朱恒星, 卢敏, 黄飞逸, 陈本文, 陈琴, 尹思琴, 祝元春. 重庆老鹰茶种质资源调查与评价[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(3): 447-456.
- [16] DAI Q L, ZHU H X, LU M, HUANG F Y, CHEN B W, CHEN Q, YIN S Q, ZHU Y C. Investigation and evaluation of *Litsea coreana* germplasm resources in Chongqing[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(3): 447-456. (in Chinese)
- [17] 杨延龙, 马君, 师维军. 引进陆地棉种质资源表型性状遗

- 传多样性分析[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(2): 310-319.
- YANG Y L, MA J, SHI W J. Analysis of genetic diversity of phenotypic characters of upland cotton germplasm resources imported[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(2): 310-319. (in Chinese)
- [14] 李根, 邓凤彬, 金强, 赵振坤, 武鹏雨, 付嘉智, 刘春花, 张锐. 基于坚果表型性状的新疆老龄核桃种质资源多样性分析[J]. 中国果树, 2021, 213(7): 33-38.
- LI G, DENG F B, JIN Q, ZHAO Z K, WU P Y, FU J Z, LIU C H, ZHANG R. Diversity and comparison of germplasm resources of aged walnut in Xinjiang based on phenotypic traits of nuts[J]. China Fruits, 2021, 213(7): 33-38. (in Chinese)
- [15] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- VAN GEMERT L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [16] PATEL R P, SINGH R, LAL R K, GUPTA P, KESARWANI A, GOYAL N. Genetic variability of agronomic traits and biodiversity in the genus *Ocimum*[J]. Trends in Phytochemical Research, 2018, 2(2): 103-110.
- [17] ERUM S, NAEEMULLAH M, MASOOD S, KHAN M I. Genetic variation in the living repository of *Ocimum* germplasm[J]. Pakistan Journal of Agricultural Research, 2011(24): 1-4.
- [18] RODRIGUES L B, MARTINS A B P B, CESÁRIO F R A S, CASTRO F F E, ALBUQUERQUE T R D, FERNANDES M N M, SILVA B A F D, JÚNIOR L J Q, COSTA J G M D, COUTINHO H D M, BARBOSA R, MENEZES I R A D. Anti-inflammatory and antiedematogenic activity of the *Ocimum basilicum* essential oil and its main compound estragole: *in vivo* mouse models[J]. Chemico-biological Interactions, 2016(257): 14-25.
- [19] BEATOVIĆ D, KRSTIĆ-MILOSEVIĆ D, TRIFUNOVIĆ S, ŠILJEGOVIĆ J, GLAMOČLIJA J, RISTIĆ M, JELAČIĆ S. Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oils of twelve *Ocimum basilicum* L. cultivars grown in Serbia[J]. Records of Natural Products, 2015, 9(1): 62-75.
- [20] MATASYOH L G, MATASYOH J C, WACHIRA F N, KINYUA M G, MUIGAI A W T, MUKIAMA T K. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Ocimum gratissimum* L. growing in eastern Kenya[J]. African Journal of Biotechnology, 2007, 6(6): 760-765.
- [21] 安皓南, 张凤梅, 李振杰, 桑应华, 刘春波, 张玲, 徐俊驹. 玫瑰提取物特征香气成分分析及其在卷烟中的应用[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2023, 32(5): 563-568.
- AN H N, ZHANG F M, LI Z J, SANG Y H, LIU C B, ZHANG L, XU J J. Analysis of characteristic aroma components of extracts from *Rosa centifolia* and its application in cigarettes[J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2023, 32(5): 563-568. (in Chinese)
- [22] 张锦程, 余佶, 麻成金, 姚茂君, 吴竹青. 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, YAO M J, WU Z Q. 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. (in Chinese)
- [23] 徐梦婷, 邵淑贤, 陈静, 田洪武, 谢微微, 陈潇敏, 叶乃兴, 高水练. 不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 281-290.
- XU M T, SHAO S X, CHEN J, TIAN H W, XIE W W, CHEN X M, YE N X, GAO S L. Analysis of volatile components and key aroma components in congou black tea of different tea varieties[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 281-290. (in Chinese)
- [24] 王永瑞, 张雪艳, 肖何, 姬华. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 法对新疆刺槐花香气成分的研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(7): 176-181.
- WANG Y R, ZHANG X Y, XIAO H, JI H. Analysis of aroma components in *Sophora japonica* L. of Xinjiang by HS-SPME-GC-MS and ROAV[J]. China Food Additives, 2018(7): 176-181. (in Chinese)