

15份不同生境生姜种质资源品质差异性评价

吕金丽^{1,2},罗凯¹,吕树鸣¹,肖艳林³,吴迪¹,张冬莲¹,
岳永贵¹,刘彦¹,胡娟⁴,李伟²

(1.六盘水市农业科学研究院 贵州六盘水 553000; 2.贵州大学农学院·贵州大学蔬菜研究院·贵州省高等学校设施蔬菜工程研究中心 贵阳 550025; 3.贵州省六盘水市气象局 贵州六盘水 553000; 4.安顺市农业技术推广站 贵州安顺 561000)

摘要:以15份不同生境的生姜种质资源为材料,测定姜黄素、6-姜辣素、8-姜辣素、挥发油、粗纤维、水分含量等品质性状,采用聚类分析、主成分分析并结合来源生境情况评价不同资源的品质差异性。结果表明,15份生姜资源的姜黄素、6-姜辣素、8-姜辣素、挥发油、粗纤维和水分含量分别为1.417~3.480 mg·kg⁻¹、0.150%~0.253%、0.022%~0.036%、0.680~1.055 mL·100 g⁻¹、1.383%~1.750%、73.625%~88.606%;小黄姜姜黄素含量普遍高于二黄姜,水城小黄姜的6-姜辣素整体优势突出;相对高海拔、低年均温区域可以提升姜黄素和8-姜辣素积累量,中高海拔多雨黄壤区利于6-姜辣素合成,姜黄素与6-姜辣素含量呈显著正相关,二者均与粗纤维含量呈负相关。水城小黄姜(G2)为综合品质最优资源,齐伯小黄姜(G9)兼具高挥发油与低粗纤维特性;不同生境的水城小黄姜品质差异显著,类型丰富,具有筛选出高品质生姜品种的潜力。

关键词:生姜;品质性状;聚类分析;主成分分析;差异性

中图分类号:S632.5

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)02-152-11

Evaluation of quality differences among 15 ginger germplasm accessions from different habitats

LÜ Jinli^{1,2}, LUO Kai¹, LÜ Shuming¹, XIAO Yanlin³, WU Di¹, ZHANG Donglian¹, YUE Yonggui¹, LIU Yan¹, HU Juan⁴, LI Wei²

(1. Liupanshui Academy of Agricultural Sciences, Liupanshui 553000, Guizhou, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University/Vegetable Research Institute, Guizhou University/Engineering Research Center for Protected Vegetable Crops in Higher Learning Institutions of Guizhou Province, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Meteorological Bureau of Liupanshui, Liupanshui 553000, Guizhou, China; 4. Anshun City Agricultural Technology Extension Station, Anshun 561000, Guizhou, China)

Abstract: Using 15 ginger germplasm accessions from distinct ecological habitats as materials, the content of quality traits such as curcumin, 6-gingerol, 8-gingerol, volatile oil, crude fiber, and moisture content were determined. Cluster analysis (CA) and principal component analysis (PCA) were combined with source habitat information to evaluate the quality differences among the resources. The results showed that the content of curcumin, 6-gingerol, 8-gingerol, volatile oil, crude fiber, and moisture in the 15 ginger germplasm ranged from 1.417 to 3.480 mg·kg⁻¹, 0.150% to 0.253%, 0.022% to 0.036%, 0.680 to 1.055 mL·100 g⁻¹, 1.383% to 1.750%, 73.625% to 88.606%, respectively. The curcumin content of small yellow ginger was generally higher than that of Erhuangjiang (*Zingiber officinale* cv. Erhuang), and the Shuicheng small yellow ginger exhibited prominent overall advantages in 6-gingerol content. Relatively high altitude and low annual temperature significantly promoted the accumulation of curcumin and 8-gingerol, while moderately high altitude rainy yellow soil regions were conducive to 6-gingerol synthesis. Curcumin content was significantly positively correlated with

收稿日期:2025-05-07;修回日期:2025-07-15

基金项目:六盘水山地粮经作物间套(轮)作综合生产能力建设(黔科合服务(2024)010);贵州省高等学校设施蔬菜工程研究中心平台建设项目(黔教技(2022)040号);贵州省农业农村厅生姜小分队(第一批农村产业革命)蔬菜产业发展项目(黔财农(2020)98号);贵州省科学技术协会—2025年贵州省博士创新站;贵州省科技支撑计划定向重点项目(黔科合支撑(2022)重点010号);六盘水山地作物种质资源创新利用重点实验室(52020-2018-0309)

作者简介:吕金丽,女,农艺师,主要从事生姜品质、育种及高产栽培技术研究。E-mail:1348127933@qq.com

通信作者:罗凯,男,高级农艺师,主要从事生姜资源评价及高产栽培技术研究。E-mail:luokai1112@126.com

李伟,男,副教授,主要从事蔬菜及食用菌遗传育种与栽培技术研究。E-mail:wli@gzu.edu.cn

6-gingerol content, while both were negatively correlated with crude fiber content. Shuicheng small yellow ginger G2 was identified as the resource with the best overall quality, while Qibo small yellow ginger G9 exhibited both high volatile oil content and low crude fiber content. The quality of Shuicheng small yellow ginger from different habitats varied significantly, with rich diversity, highlighting the potential for screening high-quality ginger varieties.

Key words: Ginger; Quality trait; Cluster analysis; Principal component analysis; Variation

生姜(*Zingiber officinale* Rosc.)是姜科姜属的多年生草本植物,其根茎具有独特的清新香气和辛辣味,是世界上广泛种植和使用的一种香料作物^[1],同时可用于治疗和缓解多种疾病^[2-3]。

生姜的功能性成分和营养物质丰富,其中挥发油赋予了生姜的香气和部分风味,是评价生姜风味的主要化学指标之一^[4];姜辣素是其主要活性物质,主要包括6-姜辣素、8-姜辣素、10-姜辣素等10余种成分,其中以6-姜辣素居多,占姜辣素类物质的75%左右^[1,4],具有多种药理作用,是评价生姜品质及药理作用的一项客观指标^[5];姜黄素是一种重要的天然色素^[5],具有降脂、降糖、抗炎、抗氧化等药理作用^[6]。此外,生姜还富含可溶性膳食纤维,具有降血压、降血脂、抗氧化、抗衰老以及增强免疫力等功效^[7]。

前人对生姜的研究主要集中在栽培、药理作用及成分提取等方面,关于生姜的品质评价、加工特性等方面的研究较少;鲜有生姜品质与生境的相关机制研究,可能导致某些高价值的种质资源未能开发利用或流失。贵州省中西部地区位于喀斯特山区,地貌复杂,生境异质性高、气候环境多变^[8],土壤养分的分布和变化对植物生长发育影响较大^[9],因此,境内生姜可能形成多种品质差异的种质类型。张宏志等^[10]对比分析了水城小黄姜与广西、海南、四川、山东等地的生姜精油和姜辣素含量,认为水城小黄姜与印度生姜、牙买加生姜等同为高品质生姜品种;谭金霞等^[11]分析了山东地区主栽生姜品种成分差异,认为不同的生姜品种间的辣味差别较为显著;田红梅等^[12]对比分析来自贵州等省(区)的9份地方生姜种质资源的品质,发现贵州生姜的粗纤维、干物质以及蛋白质含量均较高;侯颖辉等^[13]研究表明,贵州省内小黄姜资源精油得率显著高于从省外引种的资源,10份省外生姜资源精油含量的变化趋势与来源地区纬度变化趋势相反,随着来源地区纬度的降低,精油含量呈上升趋势。本研究以15份不同生境的生姜种质资源作为研究材料,测定姜黄素、6-姜辣素、8-姜辣素、挥发油、粗纤维、水分含量等6个指标,并通过聚类分析、主成分分析评价不同生境来源生姜资源的品质差异性,以期为生姜地方种质资

源的品质评价、保护及开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

以连续4年(2017—2021年)种植于六盘水市农业科学研究院岩脚综合科研基地的15份不同生境来源的生姜种质资源为研究对象,于2021年10月底至11月初采收时对15份资源进行取样用于品质检测。试验基地海拔1200 m左右,多年平均气温13.5 °C,年平均日照时数1252 h,年均降水量1350 mm,年平均无霜期330 d。试验区土壤肥力水平如下:pH 6.0~7.5,有机质含量(w,后同)5%左右,全氮、全磷、全钾含量分别为2.66、0.95、13.00 g·kg⁻¹,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为78.00、9.49、61.00 mg·kg⁻¹。15份生姜种质资源详细信息见表1。由于样本采集地区位于复杂山地,海拔跨度约800~1600 m,立体气候显著,为探究其内部的资源变异,笔者在空间隔离良好、生境特征明显不同的区域进行了独立采样。表中“海拔”“年均温”等环境数据引自样本所属县或乡镇气象站的公开基准数据,用于标示其宏观地理区位,不直接等同于各样本点的实际微环境数据,采集自相同行政村的生姜如G1、G4、G6等,实际采样点的海拔并不相同。

1.2 测定方法

姜黄素、6-姜辣素、8-姜辣素含量按《中华人民共和国药典》2020版^[14]高效液相色谱法(通则0512)测定;挥发油含量按《中华人民共和国药典》2020版^[15]挥发油测定法(通则2204甲法)测定;粗纤维含量参考GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》^[16]描述的方法测定;水分含量参考GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》^[17]描述的方法测定。

干物质含量/%=100%—水分含量。

1.3 数据处理

利用Excel整理数据,利用SPSS 21进行单因素方差分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析;采用Duncan法进行方差分析和多重比较,采用欧式距离进行聚类分析。

表1 15份生姜材料来源
Table 1 Geographical origins of 15 ginger accessions

编号 Number	资源名称 Source name	资源来源 Resource origins	资源来源乡镇气象数据(近24年) Resource source Township meteorological data (nearly 24 years)										姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers
			栽培历史 Cultivated history	经度 Longitude/ itudes/ (°)	纬度 Latitude/ (°)	海拔 m	日照时数 Average annual sunshine hours in counties/h	年均温 °C	年均温 The average temperature/ sunshine hours in counties/h	年降水量 mm	土壤类型 Soil type	成土母质 Parent material	
G1	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow	贵州省六盘水市水城区营盘乡高峰村 Gaofeng Village, Yingpan Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.73	26.17	1 491.0	1 307.6	16.4	1 246.2	黄壤 Yellow soil	玄武岩 Basalt	小黄姜 Small Yellow Ginger	
G2	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow	贵州省六盘水市水城区营盘乡红德村 Hongde Village, Yingpan Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.73	26.17	1 491.0	1 307.6	16.4	1 246.2	黄壤 Yellow soil	玄武岩 Basalt	小黄姜 Small Yellow Ginger	
G3	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow	贵州省六盘水市水城区都格镇新 盘村马家寨组 Fengjiazhai Formation, Xipan Village, Duge Town, Shuicheng District, Liu panshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.70	26.37	952.0	1 307.6	19.8	1 179.2	黄红壤 Yellow-red soil	第四纪洪积物 Quaternary diluvium	小黄姜 Small Yellow Ginger	
G4	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow	贵州省六盘水市水城区营盘乡高峰村 Gaofeng Village, Yingpan Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.73	26.17	1 491.0	1 307.6	16.4	1 246.2	黄壤 Yellow soil	玄武岩 Basalt	小黄姜 Small Yellow Ginger	
G5	盘州生姜 Pangzhou Ginger	贵州省六盘水市盘州市竹海镇珠东 村 Zhudong, Zuhai Town, Panzhou City, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.76	25.66	1 882.2	1 651.2	13.9	1 085.9	山地黄棕壤 Mountain yellow-brown soil	白云质灰岩 Dolomitic limestone	二黄姜 Erhuang Ginger	
G6	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow	贵州省六盘水市水城区营盘乡高峰村 Gaofeng Village, Yingpan Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.73	26.17	1 491.0	1 307.6	16.4	1 246.2	黄壤 Yellow soil	玄武岩 Basalt	小黄姜 Small Yellow Ginger	
G7	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow	贵州省六盘水市水城区新街乡大营村 彭家寨小组 Pengjiashai Group, Daying Village, Xinjie Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.76	26.23	1 623.0	1 307.6	18.9	1 135.8	黄壤 Yellow soil	黄色砂页岩 Yellow sandstone and shale	小黄姜 Small Yellow Ginger	

表1 (续)
Table 1 (Continued)

编号 Number	资源名称 Source name	资源来源 Resource origins	资源来源乡镇气象数据(近24年) Resource source Township meteorological data (nearly 24 years)												栽培历史 Cultivated history			经度 Longitudes/ (°)			纬度 Latitude/ (°)			海拔 Altitude/ m			年均温 The average temperature/ °C			年均降 水量 Mean annual precipitation/ mm			土壤类型 Soil type			成土母 质 Parent material			姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers		
G8	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow Ginger	贵州省六盘水市水城区都格镇新盘村 Xinpan Village, Duge Town, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.70	26.37	952.0	1 307.6	19.8	1 179.2	黄红壤 Yellow-red soil	第四纪洪积物 Quaternary diluvium	小黄姜 Small Yellow Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G9	齐伯小黄姜 Qibai Small Yellow Ginger	贵州省安顺市平坝区齐伯镇 Qibai Town, Pingba District, Anshun Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	106.18	26.55	1 302.5	1 128.4	14.7	1 272.4	石灰土 Limestone soil	石灰岩 Limestone	小黄姜 Small Yellow Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G10	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow Ginger	贵州省六盘水市水城区发耳镇江西村 Jiangxi Village, Fa'er Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.75	26.30	1 245.0	1 307.6	17.6	1 113.1	钙质紫色土 Calcareous purple soil	紫色砂岩 purple sandstone	小黄姜 Small Yellow Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G11	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow Ginger	贵州省六盘水市水城区营盘乡高峰村 Gaofeng Village, Yingpan Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.73	26.17	1 491.0	1 307.6	16.4	1 246.2	黄壤 Yellow soil	玄武岩 Basalt	小黄姜 Small Yellow Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G12	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow Ginger	贵州省六盘水市水城区龙场乡 Longchang Township, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.81	26.11	1 889.0	1 307.6	13.2	1 211.6	黄壤 Yellow soil	玄武岩 Basalt	小黄姜 Small Yellow Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G13	水城小黄姜 Shuicheng Small Yellow Ginger	贵州省六盘水市水城区都格镇新盘 村岩脚组 Yanjiao Formation, Xinpan Village, Duge Town, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.70	26.37	952.0	1 307.6	19.8	1 179.2	黄红壤 Yellow-red soil	第四纪洪积物 Quaternary diluvium	小黄姜 Small Yellow Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G14	保田生姜 Baotian Ginger	贵州省六盘水市保田镇上保田村 Shangbaotian Village, Baotian Town, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	104.73	25.42	1 590.9	1 651.2	15.1	1 041.1	石灰土 Limestone soil	石灰岩 Limestone	二黄姜 Erhuang Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												
G15	六枝生姜 Liuizi Ginger	贵州省六盘水市六枝特区木岗镇 小黄桷村 Xiaohuangjue Village, Mugang Town, Liuizi Special Zone, Liupanshui City, Guizhou Province	农户长期栽培,自繁自用 Farmers long-term cultivation, self-reproduction and self-use	105.64	26.20	1 303.0	1 103.6	16.0	1 099.6	石灰土 Limestone soil	硅质白云岩 Siliceous dolomite	二黄姜 Erhuang Ginger	姜农习惯 性分类 Habitual classification of ginger farmers																												

2 结果与分析

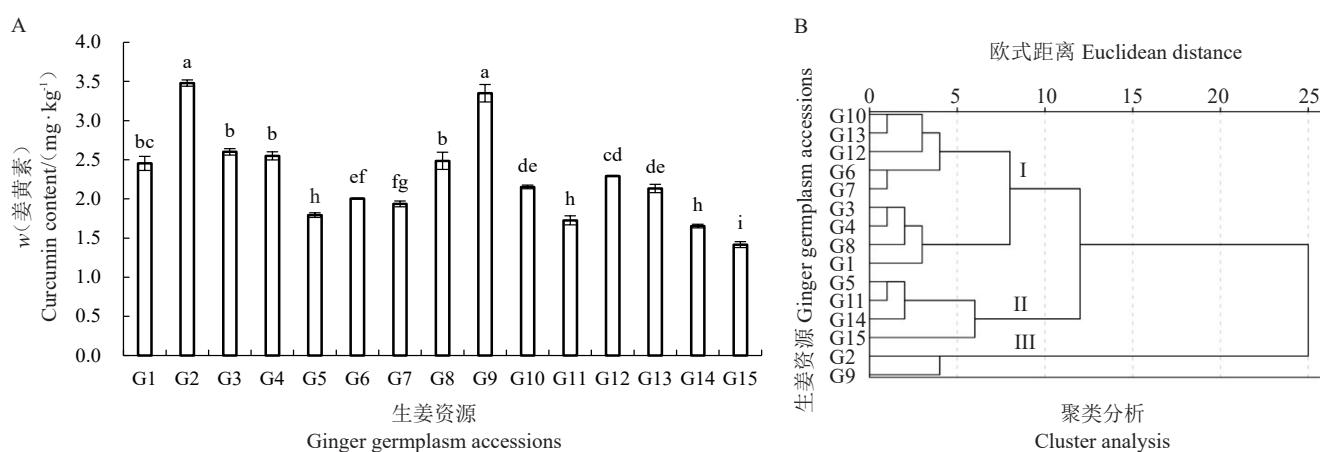
2.1 15份生姜资源姜黄素含量与聚类分析

15份资源的姜黄素含量存在显著差异(图1-A),其中,G2、G9的姜黄素含量分别为3.48、3.35 mg·kg⁻¹,均显著高于其余资源;G15的含量最低,仅为1.417 mg·kg⁻¹,显著低于其余资源。基于姜黄素含量聚类分析(图1-B),当欧式距离为9时,15份资源可划分为3个类群,高姜黄素含量类群包含G2和G9,该类群姜黄素含量显著高于其他类群,是潜在的高值资源;中姜黄素含量类群包含G10、G13、G12、G6、G7、G3、G4、G8、G1,这些资源的姜黄素含量处于中等水平;低姜黄素含量类群包含G5、G11、G14、G15,该类群的姜黄素含量显著低于前两类。结合各资源来源生境分析,高含量类群的资源均来源于相对高海拔、较低年均温区域,低含量类

群中的低值资源G5、G14虽然也分布在较高海拔处,但G5、G14属于“二黄姜”。所有高含量类群和大部分中含量类群资源为“小黄姜”,而低含量类群中的G5、G14、G15为“二黄姜”,这表明“小黄姜”类型可能具有相对更高的姜黄素合成潜力,品种本身的遗传背景可能是决定姜黄素基础含量的关键因素。水城小黄姜在3个类群均有分布,这反映出同一区域内(如六盘水市)也存在显著的种内变异,这种变异可能由微环境差异(小气候、土壤)、栽培管理或细微的遗传差异所导致。

2.2 15份生姜资源6-姜辣素含量与聚类分析

15份资源6-姜辣素含量存在显著差异(图2-A),G2的6-姜辣素含量最高,达0.253%,显著高于其余资源;G3次之,为0.240%;G15最低,仅为0.150%,显著低于其余资源。聚类分析显示(图2-B),当Euclidean距离约为14时,可将15份资源



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图1 15份生姜资源姜黄素含量和聚类分析

Fig. 1 Curcumin content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

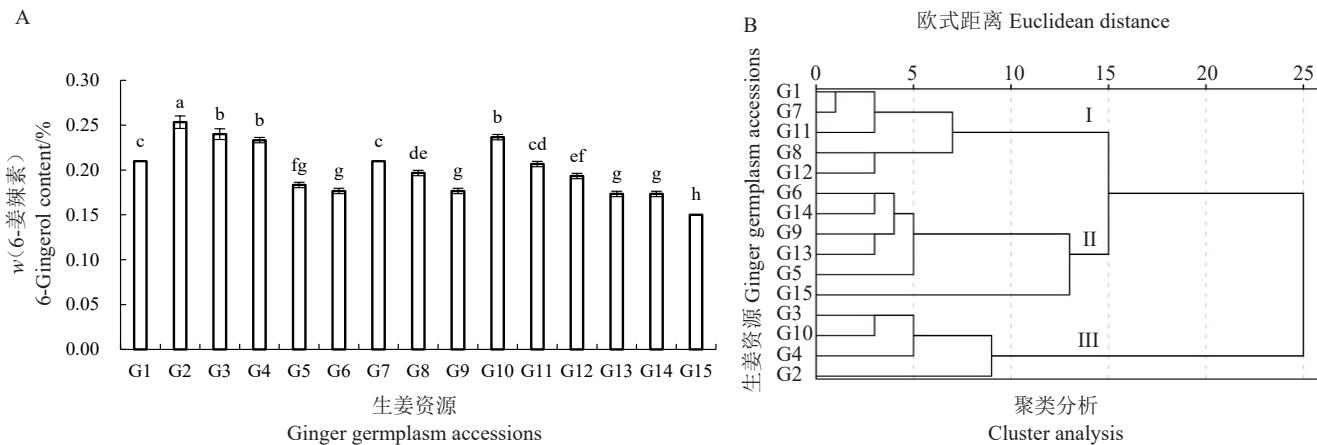


图2 15份生姜资源6-姜辣素含量和聚类分析

Fig. 2 6-Gingerol content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

划分为高(G2、G3、G4、G10)、中(G1、G7、G8、G11、G12)、低(G5、G6、G9、G13、G14、G15)3个含量差异显著类群。除G6、G13外,所有水城小黄姜6-姜辣素含量均高于周边资源。高、中含量类群主体集中分布于水城区,其中相对高海拔、年均温适中、降雨充沛、黄壤/黄红壤的生境特征有利于6-姜辣素积累。

2.3 15份生姜资源8-姜辣素含量与聚类分析

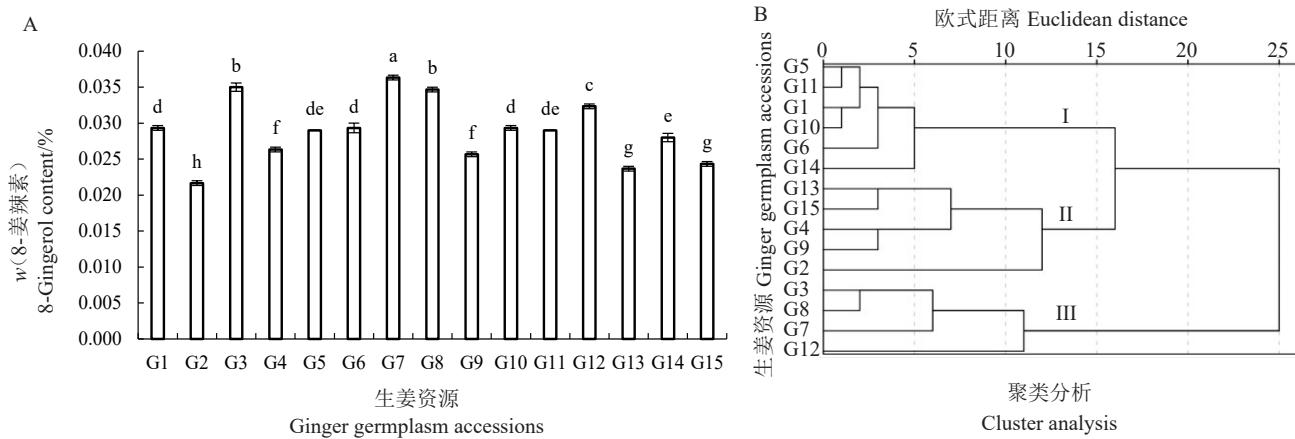


图3 15份生姜资源8-姜辣素含量和聚类分析

Fig. 3 8-gingerol content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

著(除G5、G11外)。高含量类群集中来源于水城区高海拔、低年均温,土壤以玄武岩母质发育的黄壤为主的区域;中低含量类群生境异质性更高,如中含量类群的G5和G14来源于高海拔、低年均温、山地黄棕壤和石灰土区域,低含量类群的G9和G15均分布于石灰土区域。而高含量类群中的G7来源于黄壤、较高年均温区域。

2.4 15份生姜资源挥发油含量与聚类分析

15份资源挥发油含量见图4-A, G11的挥发油

15份资源8-姜辣素含量见图3-A, G7的8-姜辣素含量最高,为0.036%,显著高于其余资源;G3含量次之,为0.035%;G2含量最低,仅为0.022%,显著低于其余资源。聚类分析显示(图3-B),当Euclidean距离为15时,可将15份资源分为高、中、低含量3个类群,G3、G7、G8、G12为高含量类群,G1、G5、G6、G10、G11、G14为中含量类群,G2、G4、G9、G13、G15为低含量类群,不同类群间8-姜辣素含量差异显

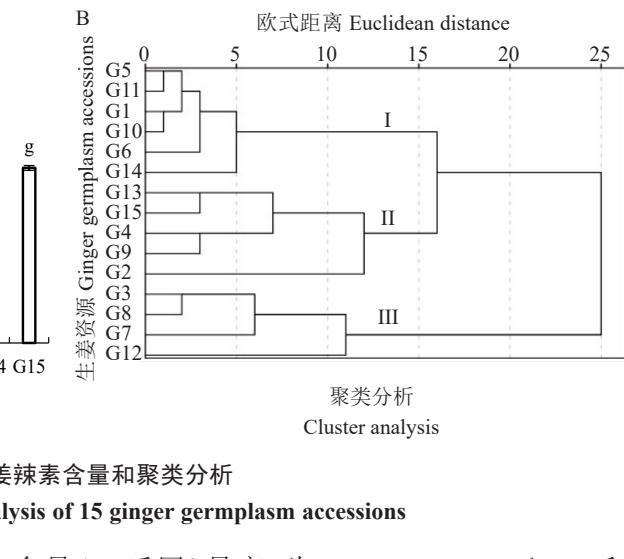


图3 15份生姜资源8-姜辣素含量和聚类分析

Fig. 3 8-gingerol content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

含量(b,后同)最高,为1.055 mL·100 g⁻¹,G2和G8含量次之,均为1.000 mL·100 g⁻¹;G1的含量最低,仅为0.680 mL·100 g⁻¹,显著低于其余所有资源(除G3外)。基于聚类分析(图4-B),当Euclidean距离约为15时,可将15份资源划分为高(G2、G5、G6、G7、G8、G9、G11、G12、G13、G15)、中(G4、G10、G14)、低(G1、G3)3个含量类群。结合生境分析,挥发油合成与积累受海拔、年均温、年降水量以及土壤类型与成土母质的共同作用。

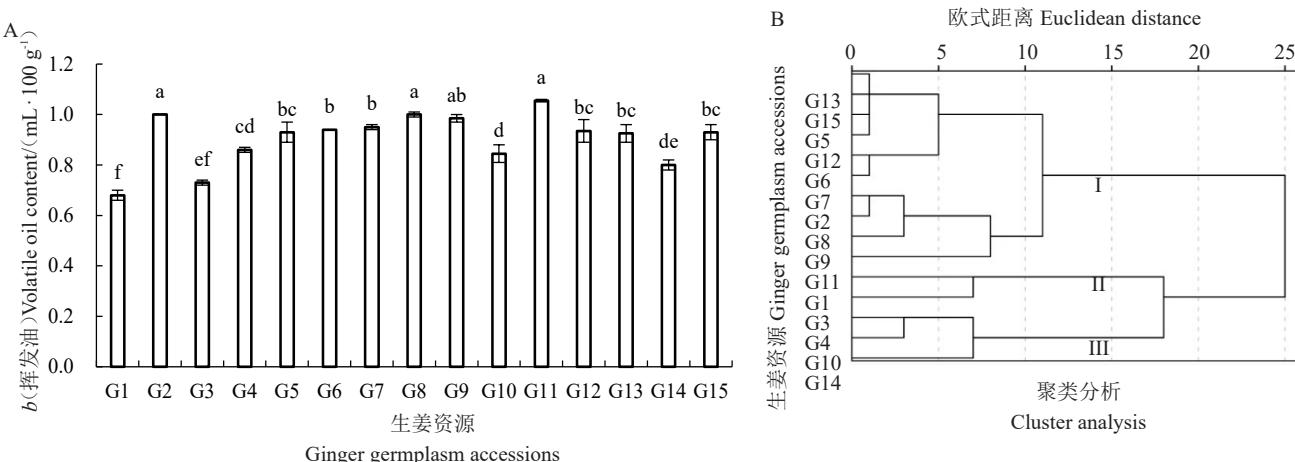


图4 15份生姜资源挥发油含量和聚类分析

Fig. 4 Volatile oil content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

2.5 15份生姜资源粗纤维含量与聚类分析

15份资源的粗纤维含量差异显著(图5-A),G14的粗纤维含量最高,为1.750%,显著高于其余资源,G8次之,为1.660%,G2最低,仅为1.383%,显著低于其余所有资源。聚类分析结果显示(图5-B),当Euclidean距离为9时,15份生姜资源可划分为高、中、低3个纤维素含量类群,其中G14为高

粗纤维含量类群,G1、G7、G8为中粗纤维含量类群,G2、G3、G4、G5、G6、G9、G10、G11、G13、G12、G15为低粗纤维含量类群。高粗纤维类群G14来源于样本中海拔最高的区域;中粗纤维类群集中分布于水城区的中海拔区域,其中G7、G8所在的新街乡与都格镇具有第四纪洪积物母质;低粗纤维类群多来自年均温较高的中低海拔区。

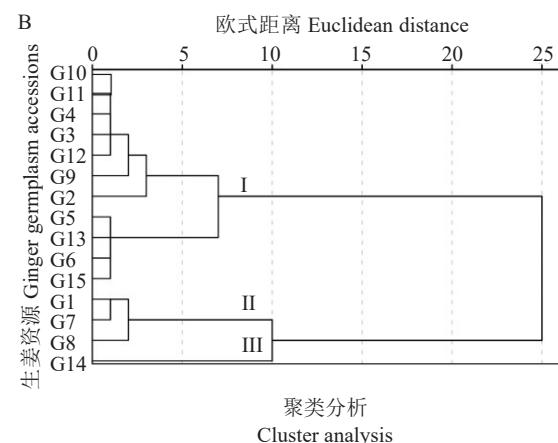
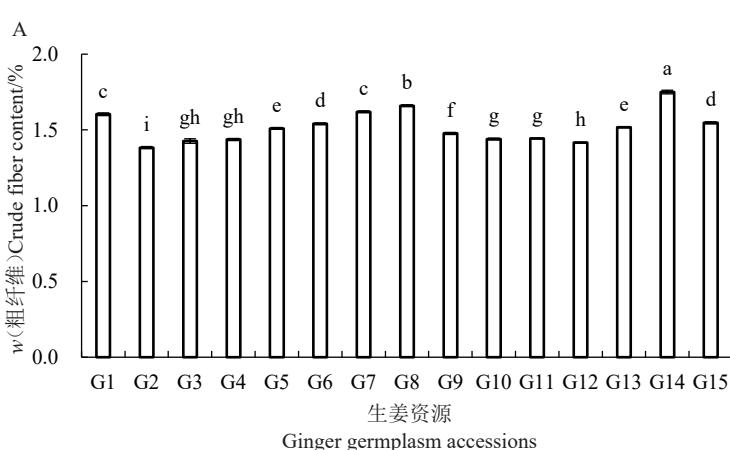


图5 15份生姜资源粗纤维含量和聚类分析

Fig. 5 Crude fiber content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

2.6 15份生姜资源水分含量与聚类分析

15份资源水分含量如图6-A所示,G7水分含量最高,为88.606%,G5次之,为88.514%,G14最小,仅为73.625%,显著低于其余资源。聚类结果如图6-B所示,当Euclidean距离为6.5时,15份资源可划分为高、中、低3个水分含量类群,其中G1、G4、G5、G6、G7、G8、G9、G10、G11、G12、G13、G15水分含量均高于80%,为高水分含量类群;G2、G3水分含量在75%~80%,为中水分含量类群;G14水分含量低于75%,为低水分含量类群。高水分含量类群G5来源于高海拔区但土壤保水性好的山地黄

棕壤/白云质灰岩母质,G9地处多雨生境石灰土;低水分类群G14来源于年均降水量最少且土壤为石灰土生境。水城小黄姜水分含量离散分布,可能源于生境异质性。

2.7 15份生姜资源品质性状的变异系数

15份资源品质性状变异系数如图7所示,不同品质性状的变异系数为6.85%~26.94%,其中,干物质含量、姜黄素含量、6-姜辣素含量、8-姜辣素含量、挥发油含量的变异系数均较大,分别为26.94%、25.88%、15.01%、14.91%和11.64%;纤维素含量变异系数最小,仅为6.85%。

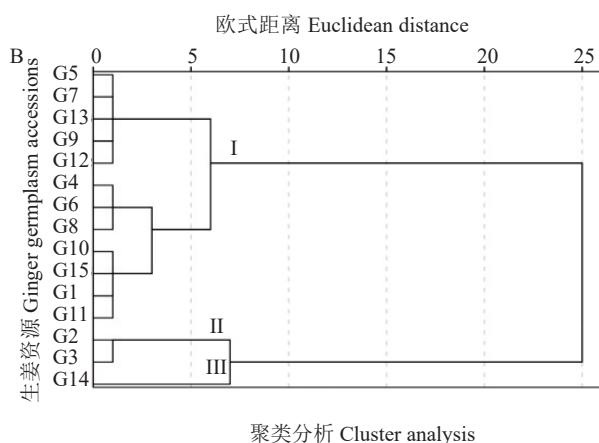
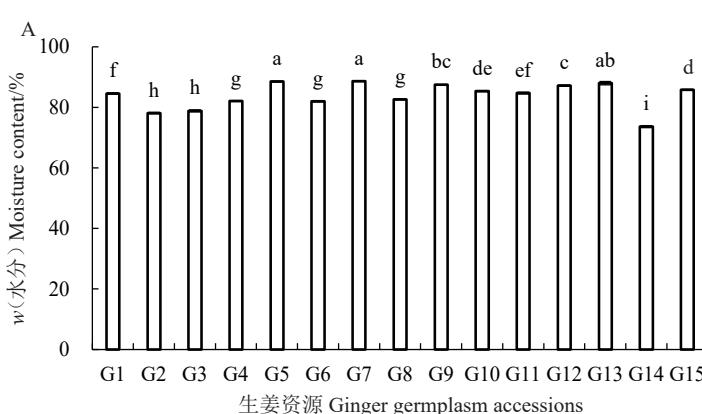


图6 15份生姜资源水分含量和聚类分析

Fig. 6 Moisture content and cluster analysis of 15 ginger germplasm accessions

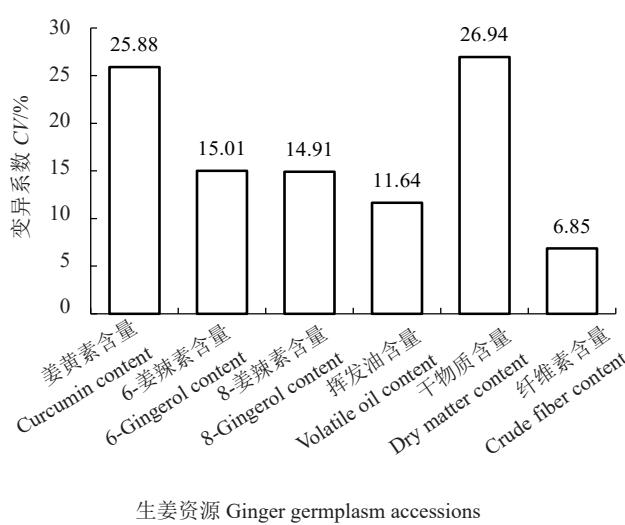


图7 15份生姜资源品质性状的变异系数
Fig. 7 Coefficient of variation of quality traits of 15 ginger resources

表2 生姜资源各品质成分间相关性分析
Table 2 Correlation analysis between quality components in ginger resources

指标 Index	姜黄素含量 Curcumin content	6-姜辣素含量 6-Gingerol content	8-姜辣素含量 8-Gingerol content	挥发油含量 Volatile oil content	粗纤维含量 Crude fiber content	水分含量 Moisture content
姜黄素含量 Curcumin content						
6-姜辣素含量 6-Gingerol content		0.632*				
8-姜辣素含量 8-Gingerol content		-0.014	0.307			
挥发油含量 Volatile oil content		0.025	-0.038	-0.079		
粗纤维含量 Crude fiber content		-0.532*	-0.564*	0.164	-0.056	
水分含量 Moisture content		-0.264	-0.225	0.079	0.187	0.096

注: * 表示在 0.05 水平显著相关。

Note: * indicates the correlation is significant at 0.05 level.

表3 15份生姜资源品质性状主成分分析
Table 3 Principal component analysis (PCA) of quality traits in 15 ginger germplasm accessions

指标 Index	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
姜黄素含量 Curcumin content	0.403	-0.010	-0.073	0.316
6-姜辣素含量 6-Gingerol content	0.399	0.232	0.275	0.083
8-姜辣素含量 8-Gingerol content	-0.126	0.271	0.753	0.419
挥发油含量 Volatile oil content	0.002	-0.496	0.008	0.916
粗纤维含量 Crude fiber content	-0.378	0.258	-0.174	0.423
干物质含量 Dry matter content	0.101	0.436	-0.504	0.493
特征值 Eigenvalue	2.035	1.587	1.072	0.648
贡献率 Contribution rate/%	33.921	26.450	17.872	10.799
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	33.921	60.371	78.243	89.042

但挥发油含量贡献为负;主成分3贡献率第三,代表性物质有8-姜辣素、干物质含量,对生姜综合品质贡献较大,但干物质含量贡献为负;主成分4贡

2.8 不同品质成分相关性分析

15份生姜资源的品质成分相关性分析结果见表2,15份生姜资源不同品质性状中,姜黄素含量与6-姜辣素含量呈显著正相关,与粗纤维含量呈显著负相关;6-姜辣素含量与粗纤维含量呈显著负相关;其他品质间的相关性不显著。

2.9 15份生姜资源品质性状的综合分析

生姜水分含量越高,其干物质含量相对越低,干物质含量越低,生姜越不耐贮藏。主成分分析结果如表3所示,前4个主成分累计贡献率为89.042%,基本包含原始指标的大部分信息;其中,主成分1贡献率最高,姜黄素、6-姜辣素、粗纤维含量载荷较大,对生姜综合品质贡献较大,但粗纤维含量的贡献为负;主成分2贡献率次之,代表性物质为挥发油和干物质,对生姜综合品质贡献较大,

献率最低,挥发油、干物质、粗纤维、8-姜辣素含量主成分载荷较大,对生姜综合品质贡献较大。

以不同主成分特征值的方差贡献率 $\beta_i (i=1, 2, 3, \dots, K)$ 为加权系数,用 $F = \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3 + \dots + \beta_n F_n$ 综合评价函数,得到了15份生姜综合品质评分模型:

$$F = 0.339F_1 + 0.264F_2 + 0.179F_3 + 0.108F_4。$$

15份生姜资源品质综合得分如表4所示,G2品质综合得分最高,G9次之,G11第三,G14最低。15份生姜资源品质排名依次为:G2、G9、G11、G12、G4、G10、G3、G5、G13、G7、G8、G6、G15、G1、G14。

2.10 15份生姜资源多品质性状聚类分析

15份生姜资源多品质性状聚类分析结果如图8所示,当Euclidean距离约为20时,15份生姜资源可划分为3个类群,其中G2、G14各单独为1类,其余资源聚为1类。此时,聚类结果与主成分评分结果一致,即G2综合品质最优,为高综合品质类型;G14综合

表 4 15 份生姜资源品质综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of quality in 15 ginger germplasm accessions

编号 Number	f1	f2	f3	f4	F	排名 Rank
G1	-0.023	0.274	0.010	-0.208	-0.732	14
G2	0.567	-0.061	-0.238	0.139	1.292	1
G3	0.243	0.376	0.163	-0.062	0.023	7
G4	0.248	0.056	-0.046	-0.072	0.435	5
G5	-0.154	-0.155	0.081	-0.086	0.008	8
G6	-0.132	-0.019	-0.063	0.059	-0.338	12
G7	-0.192	0.021	0.313	0.114	-0.079	10
G8	-0.134	0.072	0.099	0.299	-0.236	11
G9	0.140	-0.266	-0.076	0.045	0.694	2
G10	0.151	0.051	0.124	-0.126	0.389	6
G11	-0.011	-0.196	0.064	0.088	0.536	3
G12	0.026	-0.122	0.188	-0.027	0.521	4
G13	-0.095	-0.224	-0.117	-0.129	-0.014	9
G14	-0.328	0.387	-0.332	0.092	-1.908	15
G15	-0.306	-0.194	-0.170	-0.126	-0.590	13

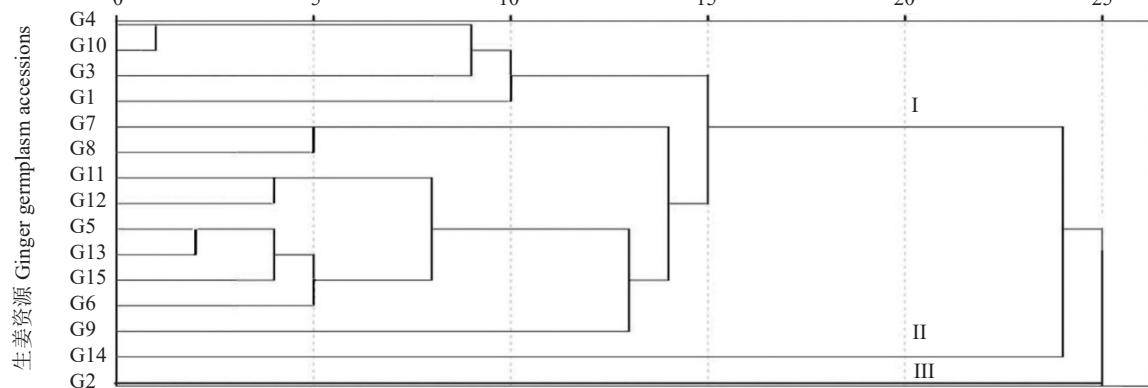


图 8 15 份生姜资源多品质性状聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of multiple quality traits in 15 ginger germplasm accessions

部品质虽有差异,但整体表现中等。例如,同为低温区G5,但因不同土壤(山地黄棕壤)或微气候,品质未如G14般低下,可能是石灰土pH偏高,影响元素吸收或保水保肥性。因此,G2与G14的显著分离除了受品种影响外,可能受生境年均温(低温胁迫)主导,并受到水分状况和多样土壤背景的复杂交互影响,中品质类群则体现了生境多样下的品质居中表现。

3 讨 论

3.1 15份生姜资源品质聚类分析

本研究以15份不同生境的生姜种质资源为材料,测定姜黄素、6-姜辣素、8-姜辣素、挥发油、粗纤维、水分含量等品质性状,对各品质性状进行聚类分析,结合生境进行比较。本研究中的姜黄素含量

品质最差,为低综合品质类群;其余所有资源为中综合品质类群。高优类群(G2)来源于相对温暖(年均温16.4 °C,样本中偏暖)、湿润(年降水1 246.2 mm)区域,土壤为玄武岩母质发育的黄壤,富含铁、镁及微量元素,湿润环境利于有机质积累。这种温湿条件与肥沃土壤的结合,非常有利于生姜矿质养分吸收和品质形成。低综合品质类群(G14)来源于低温区(年均温15.1 °C),尽管降水(1 041.1 mm)与G2接近,但低年均温可能是核心限制因子,低温抑制水分利用效率,降低土壤微生物活性和养分矿化速率,导致有效养分不足,严重制约生姜品质,也可能与品种不同相关。中品质类群生境最为多样,其年均温(13.9~19.8 °C)、年降水量(1 041.1~1 272.4 mm)条件多介于G2与G14之间或更优,土壤类型(黄壤、黄红壤等)和成土母质(玄武岩、石灰岩等)也高度复杂,这种生境的异质性,尤其气候-土壤组合多样,可能导致其内

在1.417~3.480 mg·kg⁻¹,普遍高于多个省份报道的生姜品种^[1,18-20],这可能是品种不同的原因。小黄姜的姜黄素含量普遍高于二黄姜,高含量类群多分布于相对高海拔、较低温区域,不同生境水城小黄姜姜黄素含量有显著差异,这可能与姜黄素代谢受温湿度、土壤肥力等环境因素调控以及可能的适应性进化有关^[21-23]。6-姜辣素含量为0.150%~0.253%,水城小黄姜的6-姜辣素含量普遍高于其他资源,其整体范围低于侯颖辉等^[13]报道的同种资源水城小黄姜(G13)数据,可能是栽培地点土壤、气候、管理水平不同等原因,但显著高于张文焕^[1]报道的多省份生姜含量,这可能是品种不同的原因,与刘琳琪等^[5]结论一致;高、中含量类群主体集中分布在高海拔、年均温适中、降雨充沛、黄壤/黄红壤等生境条件;而低

含量类群多源自高海拔、年均温较低、石灰土/山地黄棕壤或稍低降水量等生境条件。8-姜辣素含量在0.022%~0.036%,高于多数文献报道^[1,24];聚类分析高含量类群稳定分布于水城区高海拔、低年均温、玄武岩母质黄壤区,中低含量类群生境异质性高,与山地黄棕壤和石灰土碱性环境、养分差异关联明显。

挥发油含量为0.680~1.055 mL·100 g⁻¹,低于侯颖辉等^[13]报道的水城小黄姜(G13)挥发油含量,与张宏志等^[10]报道水城小黄姜挥发油含量相当,高于马后军等^[24]报道的小林黄姜1号姜辣素含量。聚类分析显示,海拔、年均温、年降水量以及土壤类型与成土母质共同作用,导致挥发油合成与积累产生差异,这与熊运海等^[25]关于姜科植物挥发油含量受产地(生境)、品种及生长年份影响的结论一致。粗纤维含量1.383%~1.750%,高于马后军等^[24]报道的小林黄姜1号粗纤维含量,低于周洁等^[26]报道的恩施凤头姜等10份生姜资源纤维素含量,高含量资源常与较高海拔、特定土壤(石灰土/硅质白云岩母质)关联,低含量资源则多源自年均温较高的中低海拔区域。水分含量在73.625%~88.606%,水城小黄姜聚类离散,变异受局地气候(降水、温度)与土壤属性(母质、类型、保水性)协同调控,直接影响干物质积累量与贮藏性。

3.2 15份生姜资源不同品质间的相关性分析

相关性分析结果显示,15份生姜资源的姜黄素含量与6-姜辣素含量呈显著正相关,与粗纤维含量呈显著负相关;6-姜辣素含量与粗纤维含量呈显著负相关。与谭金霞等^[11]研究结果不同,可能是研究材料不同所致。姜黄素和6-姜辣素均属于生姜重要的次生代谢产物(酚类化合物),苯丙氨酸解氨酶(PAL)、4-香豆酰辅酶A连接酶(4CL)和肉桂酸-4-羟化酶(C4H)是合成酚类化合物代谢过程中的关键酶^[27-28];据报道,姜辣素是姜黄素的结构类似物,二者有着相同的前体物质阿魏酰辅酶A,通过对不同发育时期生姜的代谢组和转录组分析,发现PKS基因家族的表达模式与姜辣素积累呈正相关,其中PKS1和PKS2的表达量最高,而PKS1和PKS7是合成生姜姜黄素的关键酶^[29]。这可能使得姜黄素和6-姜辣素的代谢合成途径一致性高,积累呈现协同趋势。相关性分析表明,15份生姜资源的品质性状存在一定的相关性,与谭金霞等^[11]报道相似,因此,在进行生姜综合品质分析时,若仅利用单一指标评价,获得的结果可能是片面的。

3.3 15份生姜资源综合品质对比分析

15份生姜资源综合品质排名依次为:G2、G9、G11、G12、G4、G10、G3、G5、G13、G7、G8、G6、G15、G1、G14。多品质性状聚类分析结果显示,当Euclidean距离为20时,15份生姜资源可划分为3个类群,与综合品质排名结果一致,其中,G2单独为1类,为高综合品质类群;G14单独为1类,为低综合品质类群;其余资源聚为1类,为中综合品质类群。主成分分析法是一种降维的统计分析方法,通常与聚类分析结合,评价农产品的综合品质^[11,30-31]。张文焕^[1]研究认为,土壤类型是生姜营养品质差异的影响因素之一,但本研究的15份生姜资源连续4a栽培的生境条件均一致,其品质的差异可能是受基因型影响,而基因型的变异可能受长期不同生境特征的选择。

4 结 论

本研究通过对15份生姜资源的系统分析,揭示水城小黄姜姜辣素(6-姜辣素、8-姜辣素)和粗纤维含量具有显著种内差异,其品质性状受品种遗传背景与生境因子协同调控。具体而言,从品种效应看,小黄姜姜黄素含量普遍高于二黄姜,水城小黄姜的6-姜辣素整体优势突出;从生境适配方面看,相对高海拔、低年均温区域可提升姜黄素和6-姜辣素积累量,中高海拔多雨黄壤区利于6-姜辣素合成,不同生境来源的水城小黄姜品质有显著差异,类型丰富,具有选择出高品质生姜品种的潜力;从成分互作来看,姜黄素与6-姜辣素含量呈显著正相关,二者均与粗纤维含量呈负相关。水城小黄姜G2为综合品质最优资源,齐伯小黄姜G9兼具高挥发油与低粗纤维含量特性。本研究结果强调,在生姜资源评价和优质产区规划中应充分考虑特定生境条件(特别是热量资源)的重要性,为贵州地区“因地选种、定向育种”提供了理论依据,后续需结合基因组学深入解析遗传机制。

参考文献

- [1] 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.
- [2] MA R H, NI Z J, ZHU Y Y, et al. A recent update on the multi-faceted health benefits associated with ginger and its bioactive components[J]. Food Function, 2021, 12(2):519-542.
- [3] SANG S M, SNOOKS H D, TAREQ F S, et al. Precision research on ginger: The type of ginger matters[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(32):8517-8523.
- [4] 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.
- [5] 刘琳琪,刘玉环,赵晨曦,等.不同产地生姜主要活性成分的比较分析[J].天然产物研究与开发,2015,27(6):1016-1021.
- [6] 高晓东,王秋英,乔旭光,等.多种生姜有效成分联合提取工艺[J].食品与发酵工业,2013,39(1):203-207.
- [7] 陈艳,杜红霞.生姜营养价值及加工应用研究进展[J].中国果菜,2018,38(12):36-38.
- [8] 杜娇艳,蔡国俊,张红玉,等.贵州喀斯特地区植物叶片C、N、P化学计量特征对气候环境和土壤养分的响应[J].生态环境学报,2023,32(12):2154-2165.
- [9] 亢丽玲.喀斯特生境异质性对植物叶片功能性状及土壤养分的影响[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [10] 张宏志,管正学,王建立,等.贵州生姜资源的应用研究[J].资源科学,2001(5):90-94.
- [11] 谭金霞,李萌,韩太利,等.基于主成分和聚类分析评价山东地区生姜品质[J].食品研究与开发,2021,42(14):14-20.
- [12] 田红梅,严从生,贾利,等.我国生姜地方资源品质比较研究[J].安徽农学通报,2016,22(24):58-59.
- [13] 侯颖辉,李德文,王少铭,等.10份黔引生姜资源农艺性状及活性成分的分析评价[J].中国瓜菜,2024,37(4):94-102.
- [14] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:2020年版.三部[M].北京:中国医药科技出版社,2020.
- [15] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:2020年版.四部[M].北京:中国医药科技出版社,2020.
- [16] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.植物类食品中粗纤维的测定:GB/T 5009.10—2003[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [18] 王春勇,李贺,王耐红,等.生物肥料基肥对生姜生长及姜黄素、姜辣素成分含量的影响[J].中国瓜菜,2023,36(7):111-116.
- [19] 窦昂洋,程艳,涂书新.有机无机肥料配施对生姜养分吸收和产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2024(1):122-128.
- [20] 陈建民,陈毓亨,余竟光.我国姜黄属植物的研究(IV)姜黄属根茎和块根中姜黄素类化合物的含量测定[J].中草药,1983,14(2):11-15.
- [21] 段磊,陈红锋.基于全基因组的植物适应性进化研究取得新进展:藻苔属对青藏高原极端环境的适应[J].中国科学:生命科学,2024,54(8):1491-1492.
- [22] 李青苗,杨文钰,唐雪梅,等.姜黄素类化合物在不同品系姜黄根茎内积累规律研究[J].中国中药杂志,2014,39(11):2000-2004.
- [23] 杨秀娟,何建桥,郭晶晶,等.基于指纹图谱和化学计量学的生姜及其炮制品的质量评价[J].中药新药与临床药理,2024,35(10):1593-1599.
- [24] 马后军,徐建荣,贾芬花,等.生姜新品种小林黄姜1号的选育[J].中国蔬菜,2022(7):104-107.
- [25] 熊运海,彭小平.不同产地生姜挥发油共有成分的气-质联用及化学计量学分析[J].食品科学,2013,34(16):288-292.
- [26] 周洁,覃竹山,吴金平,等.生姜品质成分及姜辣素的比较[J].中国调味品,2021,46(12):151-154.
- [27] 刘建福,王明元,唐源江,等.光质对姜黄生理特性及根茎次生代谢的影响[J].植物生理学报,2014,50(12):1871-1879.
- [28] 周应娟,李想,盛建军,等.植物酚类化合物对UV-B辐射增强的响应[J].植物生理学报,2020,56(6):1155-1164.
- [29] 田舒铭.生姜种质资源姜辣素含量评价及其关键合成基因功能鉴定[D].重庆:重庆三峡学院,2023.
- [30] 张帆,付锦涛,陈梦茹,等.基于主成分分析和聚类分析的14份马铃薯种质资源的品质评价[J].种子,2022,41(12):85-92.
- [31] 齐亭亭,张智锋,杨新宇,等.基于主成分分析对不同品种红枣发酵果醋品质的综合评价[J].食品科学,2024,45(24):170-177.