

不同产地附子核心种质的初步鉴选与评价研究

文 绒¹, 白勇伟¹, 周 东¹, 赖惠焯¹, 刘 涛¹, 沈 勇¹, 刘家权², 黄忠信³, 徐笑宇^{1*}, 字淑慧^{1*}

1. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201

2. 三江生物开发有限公司, 云南 迪庆 674402

3. 越南太原农林大学, 越南 太原 252160

摘要: **目的** 收集来自云南及周边地区的附子(乌头 *Aconitum carmichaelii* 的子根)种质资源,从遗传多样性、农艺性状、品质成分3个方面进行综合鉴定,初步鉴选出育种和开发利用潜力较高的核心种质材料,为附子在我国西南地区的产业发展提供支撑。**方法** 采用SSR分子标记技术,研究了收集到的25份附子种质资源的遗传多样性,同时系统观测了其在田间生长中的重要农艺性状差异,并通过HPLC等技术分析了成熟附子内的初生(粗蛋白、可溶性糖、多糖、淀粉)和次生(总生物碱、乌头碱、次乌头碱、新乌头碱、苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱)代谢产物含量差异。**结果** 25份附子材料在遗传系数0.75和0.86处可被划分为5个大类群和13个小亚群,表现出了较丰富的遗传多样性,种质间遗传差异明显。附子的总产量与株高、功能叶数量、单株结实率呈显著的正相关关系,却与茎的粗细无明显关系。主成分分析(principal component analysis, PCA)进一步表明来自云南迪庆的材料与其他材料表型差异较明显。在品质特性上,附子的初生代谢成分含量差异总体十分显著,其中蛋白质和可溶性糖的含量变化幅度较高、多糖和淀粉次之;附子药用次生代谢成分含量亦表现出了明显的差异,其中总生物碱含量和乌头碱含量在不同编号中的差异较大。**结论** 最终从25份材料中鉴选出了5份来自云南的附子,编号为D3、L4、D8、D12、D10,可初步作为核心种质资源加以保存和开发利用,为后续低毒、高产、高品质和高适应性的附子良种繁育奠定基础。

关键词: 附子; 核心种质; 遗传多样性; 总生物碱; 乌头碱; 次乌头碱; 新乌头碱; 苯甲酰新乌头原碱; 苯甲酰乌头原碱; 苯甲酰次乌头原碱; 农艺性状

中图分类号: R286 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)10-3677-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.10.025

Initial selection and utilization evaluation of core collections of *Aconiti Lateralis Radix Praeparra* from different origins

WEN Rong¹, BAI Yongwei¹, ZHOU Dong¹, LAI Huixuan¹, LIU Tao¹, SHEN Yong¹, LIU Jiaquan², HUANG Zhongxin³, XU Xiaoyu¹, ZI Shuhui¹

1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China

2. Sanjiang Biological Development Co., Ltd., Diqing 674402, China

3. Thai Nguyen University of Agriculture and Forestry, Thai Nguyen 252160, Vietnam

Abstract: Objective To provide scientific support for the Fuzi (*Aconiti Lateralis Radix Praeparra*) industrial development in Southeast China, assessment of the genetic diversity, agronomic trait and quality component of the Fuzi germplasm resources collected from Yunnan province and surrounding areas have been conducted, aiming to initially select core collections with high breeding and developmental potentials. **Methods** The genetic diversity of 25 collected Fuzi germplasm resources was analyzed by the SSR molecular marker technology, and data of important field agronomic traits was meanwhile gathered. Measurement of the contents of several key primary (crude protein, soluble sugar, polysaccharide, starch) and secondary metabolites (total alkaloids, aconitine, hypaconitine, mesaconitine, benzoylmesaconine, benzoylaconine, benzoylhypaconine) in the mature Fuzi tubers was carried out via HPLC and other techniques. **Results** The 25 Fuzi germplasm resources could be divided into five major groups and 13 subgroups at the genetic coefficients of 0.75

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202302AA310027); 建设面向南亚东南亚科技创新中心专项-云南省国际联合创新平台(202403AP140013); 云南省农业联合专项面上项目(202301BD070001-198)

作者简介: 文 绒(1997—), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 从事药用植物种质资源研究。E-mail: 2257438365@qq.com

*通信作者: 徐笑宇(1990—), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 从事高原特色经济作物种质创新研究。E-mail: 1431740754@qq.com

字淑慧(1971—), 女, 云南大理人, 博士, 教授, 从事中药材栽培与育种研究。E-mail: 258437889@qq.com

and 0.86, respectively, displaying significant genetic diversities and obvious genetic differences among germplasms. Analysis of agronomic trait data showed that the total yield of Fuzi was positively correlated with the plant height, number of functional leaves and seed setting rate per plant, but had no significant correlation with stem thickness. Principal component analysis (PCA) further indicated that the Fuzi materials collected from Diqing were highly distinct from others in the field performance. In terms of the quality components, primary metabolites demonstrated significant content differences among the 25 Fuzi germplasm resources, of which the protein and soluble sugar had showed higher variations relative to the polysaccharide and starch. Likewise, the contents of medicinal secondary metabolites also demonstrated obvious discrepancy. Specifically, the content of total alkaloids and aconitine varied most significantly in different Fuzi materials. **Conclusion** A total of five Yunnan Fuzi materials coded as D3, L4, D8, D12, D10, respectively, were selected from the overall 25 germplasm resources, which may harbor the potentials to be preserved and exploited as core collections. These materials could help lay the foundation for the subsequent breeding of low-toxicity, high-yielding, high-quality, highly adaptable Fuzi superior varieties.

Key words: *Aconiti Lateralis Radix Praeparrrka*; core collections; genetic diversity; total alkaloids; aconitine; hyaconitine; mesaconitine; benzoylmesaconine; benzoylaconine; benzoylhyaconine; agronomic traits

附子 *Aconiti Lateralis Radix Praeparrrka* 是毛茛科植物乌头 *Aconitum carmichaelii* Debx. 的于根^[1], 具有强心、抗心律失常、抗炎镇痛、抗肿瘤等多种药理活性^[2-4], 但同时也具有心血管系统和神经系统毒性, 其主要毒性及活性成分为二萜生物碱^[5], 以双酯型(乌头碱、次乌头碱等)和单酯型二萜生物碱(苯甲酰乌头原碱等)为主^[6]。除此之外, 附子中还含有多糖、有机酸、有机碱、蛋白质、淀粉等多种功能性活性物质^[7]。附子以野生资源居多, 栽培种总体占比较低, 不到 30%^[8]。近年来, 随着中国生物医药经济产业的高速发展, 西南地区正逐步成为中国附子的优质原产地, 2023 年云南省附子种植面积约 18 000 亩 (1 亩 = 0.066 7 hm²), 为当地带来了较可观的经济收益, 有效带动了地方农业和中药材事业的发展, 促进了乡村振兴^[9]。

尽管附子已有 2000 多年的药用历史和 1 300 多年的栽培历史, 目前对附子的种质资源却还相对缺乏适用性较强的评价标准, 导致附子生产编号的种质类型混杂, 变异类型多样, 制约着附子的育种和推广^[10]。一方面, 这是由于乌头属植物基原复杂, 编号区分度差, 在实际生产中大多通过无性繁殖, 导致种源较难纯化, 而且种内存在的较多变异也致使不同生境下的同种种质易出现严重的表型分化, 采用常规的形态特征和谱系来源难以对其开展明确的分类和遗传鉴别。另一方面, 因过度采挖和生态破坏而造成的野生中药材资源濒危使得乌头类植物的生物多样性极大减少, 由于产品和质量不齐, 已严重影响了附子药材的稳定性和下游的药品生产与临床应用^[11]。同时, 附子属于有毒植物, 其种质资源的收集利用要较其他作物严格, 生产应用也需要遵守相关法律法规和采收规范以确保安全性^[12]。因此, 逐步建立高效安全的附子种质

资源利用评价体系, 将对附子的资源保护利用和高质量生产开发具有重要意义^[13]。

核心种质 (core collection) 能够以最小的样本量最大限度地代表物种的遗传多样性, 为作物育种提供丰富的基因源, 有助于培育高产、优质、抗逆的作物新品种, 满足人们对高品质物品的需求^[14]。遗传多样性分析是核心种质鉴选的第一步^[15-16]。中国是世界乌头属植物起源、驯化和多样性分布的中心之一^[17]。附子作为乌头的侧根, 在遗传进化上与乌头保持一致^[18], 因此针对附子的遗传多样性 DNA 指纹图谱研究多以乌头开展, 利用分子标记技术是一种快捷有效的手段^[19]。侯大斌等^[20]使用随机扩增多态性 DNA 标记 (polymerase chain reaction, RAPD) 技术分析了四川盐源、重庆城口、陕西勉县、湖北竹山中 16 个野生乌头种群的遗传变异, 24 对引物共检测到 643 个标记位点, 其中多态性位点达 602 个, 显现出了较高的遗传分化水平, 各野生种群间不仅等位变异丰富同时还具有一定的特异性。杨恒等^[21]利用 Illumina 高通量测序平台开发了乌头的微卫星文库, 通过在其中筛选有效的微卫星片段作为简单重复序列 (SSR) 标记, 对 4 个乌头群体的 80 份样本 DNA 进行扩增后挖掘到了 5 对特异性较高的引物, 可有效应用于鉴别乌头的遗传特征。也有专家对附子特有生物碱和其他品质成分研究的化学指纹图谱来分析不同附子种源的品质差异, 为附子良种选育和分子育种提供参考^[22-24]。

本研究通过收集来自云南及周边地区的 25 份附子种质资源, 开展基于 SSR 分子标记技术的遗传多样性分析和田间农艺性状及品质检测, 从中鉴选出了 5 份遗传变异丰富、农艺性状表现较佳、品质特性较优的附子材料, 可作为附子的初步核心种质资源加以保存和开发利用, 以期云南附子产业的高品质良种

繁育和分子改良提供支撑。

1 材料与仪器

1.1 材料

所选用的附子种质资源为泥附子，主要收集自云南省（香格里拉市、丽江市、大理州、曲靖市、楚雄州等地），少部分来源于四川省（江油市、绵阳市等地）提供，共有 25 份材料。原植物由中国科学院昆明植物研究所植物资源调查评估与鉴定中心杨文光研究

员鉴定为毛茛科乌头属乌头 *A. carmichaelii* Debx. 的子根，具体形态和信息见表 1 和图 1)。对照品新乌头碱（批号 112029-202302）、次乌头碱（批号 112029-202302）、乌头碱（批号 112029-202302）、苯甲酰新乌头原碱（批号 111795-201805）、苯甲酰次乌头原碱（批号 111796-202207）、甲酰乌头原碱（批号 111794-202307）均购自中国食品药品检定研究院，质量分数分别为均大于 98%。

表 1 25 份附子材料的来源信息和基本性状统计

Table 1 Source information and basic trait statistics of 25 *Aconiti Lateralis Radix Praeparrrka*

| 序号编号 | 取样地 | 块茎长度/cm | 块茎高度/cm | 块茎鲜质量/g | 海拔/m | 地理位置 |
|--------|--------------------|---------|---------|-------------|-------|---------------------|
| 1 D1 | 云南省香格里拉市上江乡 | 2.9~5.0 | 2.0~3.0 | 5.87~20.00 | 1 920 | E:99.46°/N:27.36° |
| 2 D2 | 云南省香格里拉市（四川江油大康镇） | 3.5~6.5 | 2.1~4.1 | 5.47~37.71 | 3 226 | E:99.94°/N:27.31° |
| 3 D3 | 云南省香格里拉市虎跳峡镇礼仁村 | 4.7~6.8 | 2.2~2.6 | 8.84~19.95 | 3 226 | E:99.94°/N:27.31° |
| 4 D4 | 云南省迪庆州维西县塔城镇海尼村川处组 | 3.7~6.0 | 2.3~3.8 | 15.51~70.54 | 2 400 | E:99.18°/N:27.18° |
| 5 D5 | 云南省香格里拉市虎跳峡镇东坡村 | 4.0~7.0 | 1.8~2.7 | 5.32~13.48 | 2 600 | E:99.55°/N:27.20° |
| 6 D7 | 云南省香格里拉市虎跳峡镇红旗村层冷组 | 2.9~6.1 | 1.9~2.2 | 3.52~19.91 | 1 800 | E:99.43°/N:27.08° |
| 7 D8 | 云南省香格里拉市虎跳峡镇海巴洛 | 2.5~5.5 | 2.1~4.6 | 4.03~30.82 | 2 600 | E:99.55°/N: 27.20° |
| 8 D10 | 云南省香格里拉市三坝纳西族哈巴村 | 5.1~6.6 | 2.7~4.5 | 10.16~35.61 | 2 600 | E:100.09°/N: 27.27° |
| 9 D12 | 云南省香格里拉市虎跳峡镇宝山村 | 2.8~6.0 | 1.7~3.4 | 3.31~22.72 | 3 226 | E:99.94°/N:27.31° |
| 10 D13 | 云南省香格里拉市虎跳峡镇老药山 | 2.8~4.4 | 2.0~4.1 | 6.39~19.81 | 3 200 | E:100.01°/N: 27.30° |
| 11 L1 | 云南省丽江市玉龙县鲁甸乡太平村 | 3.3~5.5 | 2.1~2.7 | 6.97~20.00 | 2 800 | E:99.46°/N: 27.19° |
| 12 L2 | 云南省丽江市玉龙县石鼓镇 | 3.0~5.0 | 2.8~3.8 | 4.52~16.51 | 1 859 | E:99.96°/N: 26.87° |
| 13 L3 | 云南省丽江市玉龙县鲁甸乡泰安村 | 3.6~7.7 | 2.5~3.5 | 11.29~22.41 | 2 570 | E:103.3°/N: 27.1° |
| 14 L4 | 云南省丽江市玉龙县鲁甸乡安乐村 | 6.2~8.0 | 2.5~3.3 | 8.88~20.92 | 2 900 | E:99.50°/N: 27.15° |
| 15 L5 | 云南省丽江市玉龙县九河乡 | 3.7~5.2 | 1.9~2.5 | 4.43~13.20 | 2 900 | E:99.50°/N: 27.15° |
| 16 L6 | 云南省丽江市玉龙县鲁甸乡拉美荣村 | 4.7~7.5 | 2.0~3.4 | 7.07~24.23 | 2 800 | E:99.5°/N:27.22° |
| 17 L7 | 云南省丽江市玉龙县鲁甸乡鲁甸村甸东 | 6.2~8.7 | 1.7~3.7 | 5.18~27.36 | 2 700 | E:103.3°/N: 27.1° |
| 18 L8 | 云南省丽江市玉龙县泰安乡泰安村 | 7.0~8.1 | 3.4~4.0 | 26.68~60.49 | 1 550 | E:100.43°/N: 26.33° |
| 19 E1 | 云南省大理州鹤庆县草海镇新峰村 | 6.4~8.1 | 3.5~4.7 | 18.01~31.38 | 2 190 | E:100.11°/N: 26.30° |
| 20 E2 | 云南省大理州鹤庆县马厂村 | 4.2~8.0 | 2.4~2.7 | 7.64~20.47 | 3 000 | E:100.01°/N: 27.30° |
| 21 Q2 | 云南省曲靖市会泽县大桥乡 | 6.5~8.5 | 2.5~3.2 | 6.24~18.64 | 3 100 | E:26.42°/N: 103.16° |
| 22 Q3 | 云南省曲靖市马龙区月望乡沙坡笼村委会 | 2.7~5.7 | 2.5~3.9 | 4.55~13.48 | 2 102 | E:103.34°/N: 25.19° |
| 23 C1 | 云南省楚雄州武定县插甸镇增益村 | 4.9~6.5 | 2.2~3.5 | 8.97~22.21 | 2 200 | E:102.19°/N: 25.38° |
| 24 S1 | 四川省江油市太平村 | 4.5~6.7 | 2.4~4.1 | 6.66~23.28 | 1 860 | E:104.12°/N: 30.25° |
| 25 S2 | 四川省绵阳市北川县小坝乡 | 5.2~7.6 | 2.5~2.6 | 10.15~24.09 | 1 199 | E:104.03°/N: 32.04° |



图 1 25 份云南及周边地区的附子形态

Fig. 1 Morphological characteristics of 25 *Aconiti Lateralis Radix Praeparrrka* from Yunnan and surrounding regions

1.2 仪器

LX-200 型小型离心机（北京佳航博创科技有限公司）；IS09001 型电子天平（北京赛多利斯天平有限公司）；LC-6AD 型高效液相色谱仪（日本岛津公司）；HWS-24 电热恒温水浴锅（上海齐欣科学仪器有限公司）；DYCZ-30C 型聚丙烯电泳仪（北京六一生物科技有限公司）。

2 方法

2.1 遗传多样性分析

从文献中收集到 20 对已报道多态性较好的乌头 SSR 引物（表 2）用于开展遗传多样性研究^[25-26]。参照姚春鹏等^[27]研究方法进行附子块茎 DNA 提取、PCR 扩增和聚丙烯酰胺凝胶电泳分析^[28]。

2.2 附子的主要品质分析

参照杨勤等^[29-31]方法分析附子多糖含量。参照祝义伟等^[32-33]方法分析附子可溶性糖含量。参照 Deng 等^[34]方法分析淀粉含量。参照半微量凯氏法^[35]分析粗蛋白含量。

2.3 附子生物碱含量分析

参照《中国药典》2010 年版酸碱滴定法对附子的总生物碱进行检测^[36]。参照《中国药典》2020 年版对附子单酯型生物碱（苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、苯甲酰新乌头原碱）、双酯型生物碱（乌头碱、次乌头碱、新乌头碱）等进行 HPLC 检测分析，样品前处理均涉及有机溶剂提取、过滤、浓缩等步骤，HPLC 分析使用 C₁₈ 色谱柱，检测波长 235 nm^[37-38]。

表 2 使用的 20 对 SSR 引物信息

Table 2 Information of the 20 pair SSR primers used

| 编号 | 引物序列 (5'-3') | 退火温度/°C | 最大多态性条带数 |
|-----|--|---------|----------|
| Y1 | F: TTCATATAAATAGGGGTGCAT R: TGCTCCATATATTTGTCAC | 50 | 16 |
| Y2 | F: ATTATAAGGAAAACACGAGGT R: ATCTCTGAAACTGCAACCAAG | 52 | 6 |
| Y3 | F: GACTCTTCTCTCCGCTGT R: ATAGGGTTCTTACACGGTTTG | 55 | 6 |
| Y4 | F: GACTGTTTTTCACATGCCACA R: GAACCTCCTCTTCCTCCTCCT | 57 | 12 |
| Y5 | F: TACCGCTTCTACGACAGCTC R: CCGAATCTCAGGAAAAGCGAT | 57 | 14 |
| Y6 | F: ATACCGAATTAGAAACCCAAG R: CCCCTCTCCAAATTCCAC | 56 | 9 |
| Y7 | F: GAATCCTTTGTTGAACCGAAG R: GGTGTTCTTCATCTTCTTCT | 53 | 10 |
| Y8 | F: CGAAGAACAACCTTAATGCG R: CTCCTCCCCTCTTACCAT | 57 | 10 |
| Y9 | F: GCACACCGACTTCATAGAACG R: CTAGAAGAAGAAGAAGAGTT | 54 | 7 |
| Y10 | F: CTAGTAGTGTCTGATGGTTC R: TCCAGAAGATAAAGCCGTT | 54 | 10 |
| Y11 | F: CTCTAAGCTGCTTCCTGGCA R: CTCGGGAAGCTGAGGGATTTC | 59 | 13 |
| Y12 | F: CCGAGAAGCGCTGACGATAT R: ACTACACTGCAACGTTTCGCT | 57 | 17 |
| Y13 | F: GGACGTGTGCAATATCATAAC R: GGTACAGGTGGTIGTTTGAC | 55 | 17 |
| Y14 | F: AAAGGCTGCAAGTCGTATCCTCTCA R: AGGCAGTACATCAGGCAGAGGAGGT | 62 | 13 |
| Y15 | F: CATTGAGCCACCCATAGA R: GCAACAATCCTGGTAGTGA | 55 | 14 |
| Y16 | F: TGGGCCCTACAAGTGATGATATTCC R: ATGGAATCCAGGTTTGTGAATGTGA | 59 | 10 |
| Y17 | F: GTCACCGTCGTCTTCATC R: CTGGACCATATTTCTGTTGTATG | 55 | 15 |
| Y18 | F: GGCGTCTTTGTGTGAAAGAACT R: GAGCAAGGCAATCTACATTCTACAC | 58 | 6 |
| Y19 | F: GTTATCATGTAGTCCCTCAAACACC R: TTTAGTCATGTGCCCTCCT | 57 | 13 |
| Y20 | F: CATACTCCATCATGATGCTGCTGT R: ATGAAGGCTCAGTAAGAACCTCGGA | 61 | 11 |

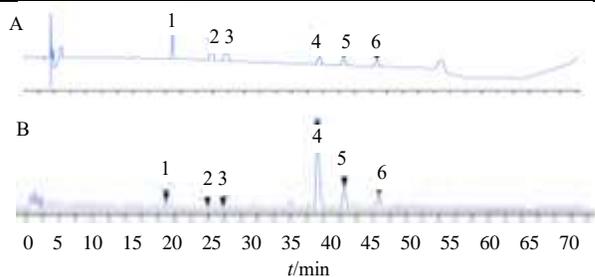
2.3.1 混合对照品的制备 取对照品新乌头碱、次乌头碱、乌头碱、苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱适量，精密称定，加异丙醇-二氯甲烷（1：1）混合溶液制成的混合溶液，即得含 6.156 μg/mL 新乌头碱、5.781 μg/mL 次乌头碱、6.118 μg/mL 乌头碱、9.962 μg/mL 苯甲酰新乌头原碱、11.35 μg/mL 苯甲酰乌头原碱、10.22 μg/mL 苯甲酰次乌头原碱的混合对照品溶液。

2.3.2 供试品溶液的制备 取本品粉末（过三号筛）约 2.0 g，精密称定，置具塞锥形瓶中，加氨试液 3 mL，精密加入异丙醇-醋酸乙酯（1：1）混合溶液 50 mL，称定质量，超声处理（功率 300 W，频率 40 kHz，水温 25 °C 以下）30 min，放冷，再称定质量，用异丙醇-醋酸乙酯（1：1）混合溶液补足减失的质量，摇匀，滤过。精密量取续滤液 25 mL，40 °C 以下减压回收溶剂至干，残渣精密加入异丙醇-二氯甲烷（1：1）混合溶液 3 mL 溶解，滤过，取续滤液，即得。

2.3.3 色谱条件 以十八烷基硅烷键合硅胶为填充剂；以乙腈-四氢呋喃（25：15）为流动相 A，以 0.1 mol/L 醋酸铵溶液（每 1 000 mL 加冰醋酸 0.5 mL）为流动相 B，按表 3 中的规定进行梯度洗脱，检测波长为 235nm。理论板数按苯甲酰新乌头原碱峰计算应不低于 3 000（表 3），色谱图见图 2。

表 3 色谱条件

| Table 3 Chromatographic conditions | | |
|------------------------------------|---------|---------|
| t _R /min | 流动相 A/% | 流动相 B/% |
| 0~48 | 15~26 | 85~74 |
| 48~49 | 26~35 | 74~65 |
| 49~58 | 35 | 65 |
| 58~65 | 35~15 | 65~85 |



1-苯甲酰新乌头原碱；2-苯甲酰乌头原碱；3-苯甲酰次乌头原碱；4-新乌头碱；5-次乌头碱；6-乌头碱。
1-benzoylmesaconine; 2-benzoylaconine; 3-benzoylhypaconitine; 4-mesaconitine; 5-hypaconitine; 6-aconitine.

图 2 混合对照品 (A) 和供试品溶液 (B) 色图

Fig. 2 Spectrum of reference substance (A) and the test sample (B)

2.3.4 线性方程的绘制 取 1 g 附子粉末加入已分别吸取混合对照品溶液 1、2、4、6、8 和 10 mL 的 10 mL 量瓶中，用乙腈稀释至刻度，摇匀。吸取各质量浓度混合对照品溶液，按照“2.3.3”项色谱条件及浓度梯度测定对照品峰面积，以峰面积为纵坐标 (Y)，对照品质量浓度为横坐标 (X)，进行回归性分析，计算线性回归方程及相关系数，见表 4。

表 4 6 种生物碱回归方程及相关系数

Table 4 Regression equations and correlation coefficients of six alkaloid

| 生物碱 | 回归方程 | R ² |
|----------|--------------------|----------------|
| 乌头碱 | Y=382 802 X-30 174 | 0.999 6 |
| 次乌头碱 | Y=397 282 X-12 430 | 0.999 9 |
| 新乌头碱 | Y=616 107 X-44 228 | 0.999 5 |
| 苯甲酰乌头原碱 | Y=410 606 X+11 974 | 0.999 6 |
| 苯甲酰次乌头原碱 | Y=521 306 X+21 658 | 0.999 6 |
| 苯甲酰新乌头原碱 | Y=519 780 X-24 844 | 0.999 7 |

2.3.5 稳定性、重复性、精密度、加样回收率结果 本研究通过稳定性、重复性、精密度和加样回收率试验证实，供试品溶液中 6 种乌头类生物碱在室温下 12 h 内稳定，方法重复性良好，仪器精密度合格，且平均回收率在 96.54%~99.01%，RSD 均低于 3.22%，表明分析方法可靠。

2.4 田间农艺性状观测

于 2023 年 12 月在迪庆州基地，海拔为 3 226 m，经纬度为 E:99.94°/N:27.31° 进行材料种植。参试的 25 份附子材料，种植期间常规水肥药管理。于 2024 年 10 月中旬附子成熟采收时测定附子的关键生产农艺性状，包括株高、茎粗、功能叶，单株结附子数、单株产量、亩产（1 亩=0.066 7 hm²）等。

2.5 数据统计

SSR 分子标记结果采用 0/1 赋值法^{[39][42]}统计扩增得到的条带，出现条带的位置记为“1”，无条带记为“0”，建立[0,1]二元数列矩阵，采用 NTSYSpc2.0 软件处理分子标记数据，开展遗传聚类作图。农艺性状和品质指标数据用 SPSS 22.0 和 Origin 2021 软件进行统计处理分析和作图。

3 结果与分析

3.1 25 份附子材料的遗传多样性

如图 3 所示，在遗传系数 0.75 处，可将参试的 25 份附子材料划分为 5 大类群，在遗传系数 0.86 处进一步划分为 12 个小亚群。第 I 大类群中有 2 个小亚群，含有编号 D4、L8；第 II 大类群有 2 个小亚群，包含编号 L6、S2；第 III 大类群有 2 个小亚群，包含

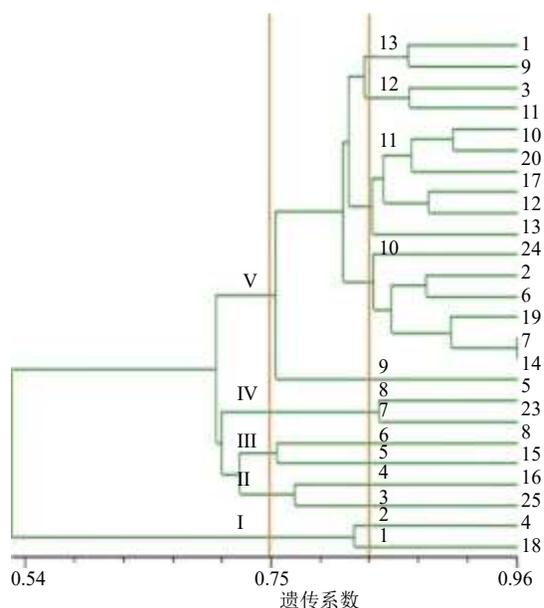


图3 基于 SSR 分子标记的遗传聚类分析
Fig. 3 Genetic cluster analysis based on SSR molecular markers

编号 D10、L5；第IV大类群有 2 个小亚群，包含编号 D5、C1；第 V 大类群包含 5 个小亚群，包含编号 D1、D2、D3、D5、D8、D12、D13、L1 等 17 份材料。可见，参试附子材料总体遗传多样性表现较丰富，遗传距离差异较明显。

3.2 农艺性状差异比较

表 5 中进一步比较了参试的 25 份附子材料的田间农艺性状差异。其中，编号 D3 的株高最高，达到 115.00 cm；编号 D3 的茎也最粗，达到 9.93 mm；D10 编号的功能叶、单株结附子数、单株产量、亩产最高，均显著高于其他材料。结合遗传多样性分析的结果，在聚类的 5 大类群中，第 I 大类群中有 D4 和 L8，在农艺性状上无显著差异；第 II 大类群中有 L6 和 S2，在产量上存在差异，S2 产量是 L6 的 2 倍；第 III 大类群中包括 D10 和 L5，其中 D10 编号的功能叶、单株结附子数、单株产量、亩产显著高于 L5 编号；第 IV 大类有 D5 和 C1，农艺性状无显著差异；第 V 大

表 5 25 份附子材料的农艺性状表型分析 ($\bar{x} \pm s$)

Table 5 Phenotypic analysis of agronomic traits in 25 *Aconiti Lateralis Radix Praeparata* ($\bar{x} \pm s$)

| 编号 | 株高/cm | 茎粗/mm | 功能叶/片 | 单株结附子/个 | 单株产量/g | 亩产/kg |
|-----|----------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| D1 | 86.80±9.14bcde | 9.00±0.42abc | 17.67±2.15ghijk | 7.75±1.53hij | 128.56±15.63dfghi | 1 285.65±156.25dfghi |
| D2 | 67.40±8.81e | 7.93±0.13abcdefg | 15.87±1.05ijk | 7.83±0.58ghij | 108.27±11.56hij | 1 082.73±115.65hij |
| D3 | 115.00±6.44a | 9.93±0.27a | 26.73±2.47bcd | 12.08±0.79ab | 214.43±23.11ab | 2 144.31±231.14ab |
| D4 | 88.60±9.64bcde | 8.87±1.17abcd | 22.80±2.72bcdefghi | 7.75±0.50hij | 108.29±7.76hij | 1 082.87±77.57hij |
| D5 | 84.33±9.47bcde | 8.13±0.29abcdef | 19.73±2.70defghij | 9.58±0.79bcdefgh | 115.42±7.99hi | 1 154.23±79.93hi |
| D7 | 101.87±6.11abc | 8.13±0.29abcdef | 23.00±0.72bcdefgh | 11.42±0.98abcd | 171.90±10.33bcde | 1 718.95±103.27bcde |
| D8 | 101.47±7.96abc | 8.53±0.66abcde | 29.53±0.81ab | 10.58±1.06abcdefg | 145.98±7.50defgh | 1 459.85±74.97defgh |
| D10 | 106.27±4.49ab | 9.80±0.64ab | 34.33±1.31a | 13.25±0.88a | 251.64±19.55a | 2 516.38±195.54a |
| D12 | 87.47±1.73bcde | 8.80±0.72abcd | 19.07±1.04fghij | 9.00±0.5cdefghi | 93.49±5.96ij | 934.91±59.59ij |
| D13 | 85.13±3.17bcde | 9.00±0.40abc | 21.60±1.10cdefghij | 11.25±0.29abcde | 201.53±7.67bc | 2 015.33±76.67bc |
| L1 | 67.60±9.06e | 7.93±0.3abcdefg | 15.27±1.94jk | 7.17±0.68hij | 125.33±10.93fghi | 1 253.27±109.35fghi |
| L2 | 94.33±8.46abcd | 8.80±0.60abcd | 27.87±3.15bc | 11.00±0.14abcdef | 186.30±12.77bcd | 1 862.98±27.71bcd |
| L3 | 72.47±6.03de | 8.53±0.24abcde | 11.53±2.51k | 6.58±0.71ij | 90.76±11.74ij | 907.60±117.36ij |
| L4 | 98.07±5.54abcd | 8.97±0.6abcd | 28.27±2.03abc | 10.83±0.82abcdef | 169.52±26.06cde | 1 695.20±260.59cde |
| L5 | 93.67±9.18abcd | 7.13±0.88cdefg | 19.53±2.49efghij | 8.75±0.58defghij | 118.47±12.50ghi | 1 184.73±125.02ghi |
| L6 | 79.20±7.18cde | 7.07±1.31cdefg | 19.87±2.96defghij | 7.08±0.60hij | 68.76±3.67j | 687.63±36.68j |
| L7 | 100.87±7.51abc | 6.67±0.13efg | 26.20±0.81bcde | 11.83±0.71abc | 212.82±12.67ab | 2 128.22±126.76ab |
| L8 | 97.87±7.67abcd | 6.87±0.29defg | 25.20±1.93bcdef | 10.75±0.63abcdef | 161.36±12.57cdefg | 1 613.61±125.68cdefg |
| E1 | 82.13±8.55bcde | 7.73±0.66bcdefg | 18.53±2.28fghij | 8.25±0.76fghij | 114.34±13.45hi | 1 143.45±134.46hi |
| E2 | 92.87±6.18bcde | 5.93±0.55g | 26.20±1.63bcde | 10.92±0.93abcdef | 202.86±24.56bc | 2 028.57±245.56bc |
| Q2 | 104.20±3.14abc | 8.87±0.59abcd | 27.60±0.42bc | 7.83±1.01ghij | 134.84±9.39efghi | 1 348.39±93.88efghi |
| Q3 | 80.07±8.78cde | 7.73±0.37bcdefg | 21.27±2.84cdefghij | 6.00±0.80j | 97.34±7.59ij | 973.46±75.93ij |
| C1 | 94.80±9.53abcd | 6.13±0.57fg | 24.60±2.81bcdefg | 11.25±1.09abcde | 165.82±14.70cdef | 1 658.25±147.04cdef |
| S1 | 80.33±6.87bcde | 7.07±0.55cdefg | 21.47±2.29cdefghij | 8.50±0.87efghij | 127.76±6.74efghi | 1 277.56±67.41efghi |
| S2 | 78.40±9.45cde | 6.87±0.81defg | 16.47±1.85hijk | 7.17±1.48hij | 108.32±7.90hij | 1 083.17±78.97hij |

同列数据后不同小写字母表示 LSD 检验后各材料间在同一性状上差异显著 ($P < 0.05$)。

The same column of data followed by different lowercase letters indicates significant differences ($P < 0.05$) among materials for the same trait according to LSD test.

类包含多个材料，其中编号 D3 与其他 16 份农艺性状存在显著差异。编号 L4 与其他 16 份亲缘关系相距较远，但在农艺性状上没有显著差异。

图 4-A 显示了 6 个所测定的附子农艺性状指标间的相关性，显然，6 个性状间均主要呈正相关关系，主要体现在与产量对应的性状上，例如产量与

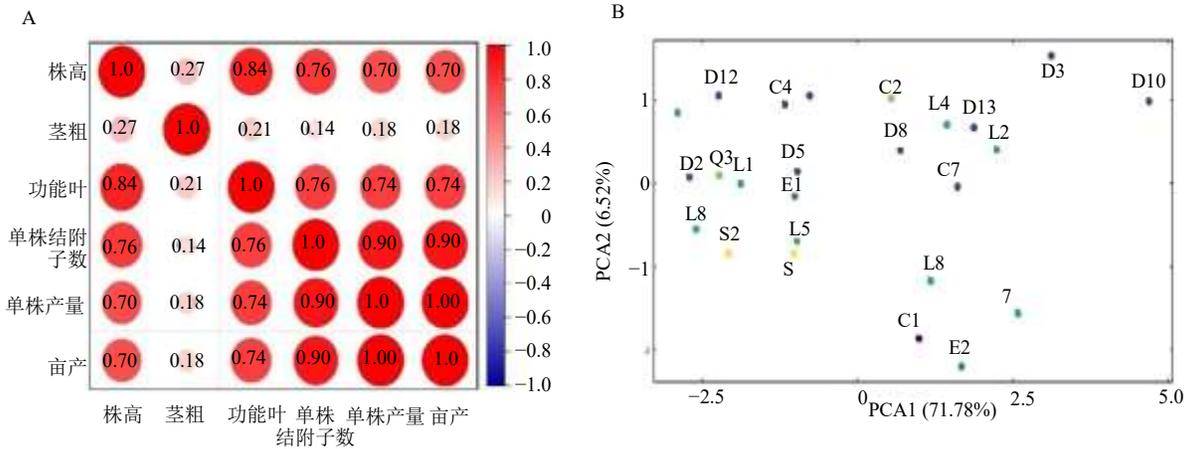


图 4 25 份附子材料的农艺性相关性分析 (A) 和主成分分析 (B)

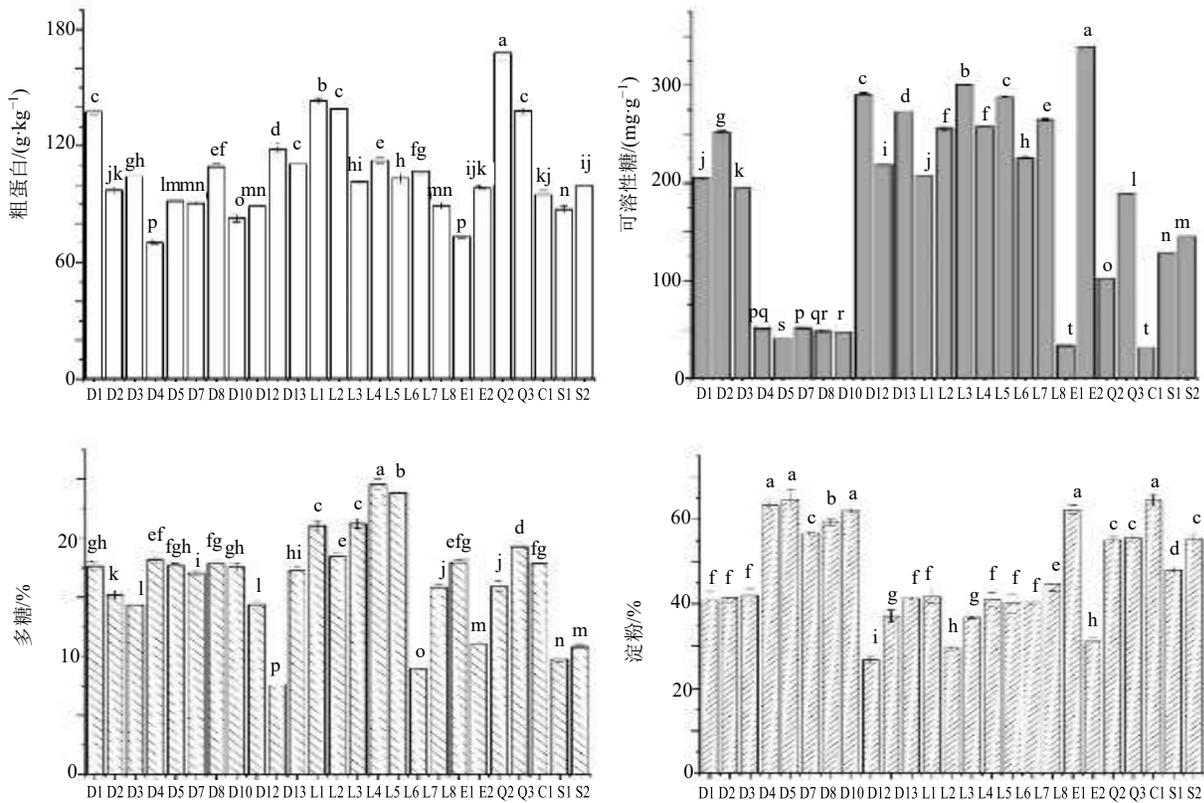
Fig. 4 Agronomic correlation analysis (A) and PCA (B) of 25 *Aconiti Lateralis Radix Praepararka*

株高、单株结附子数的相关性显著，相关系数分别为 0.83 和 0.90。类似地，PCA 反映出大部分参试材料在农艺性状表现上具有一定的趋同性(图 4-B)，这主要与其种植环境和亲本来源有关，但部分来源自迪庆的材料如 D3、D10 等材料则体现出一定的差异。

3.3 初生代谢品质分析

对参试附子材料的主要初生代谢品质进行了测

定，存在不同程度的差异(图 5)。25 份附子的粗蛋白质量分数在 70.18~167.94 g/kg，变化幅度在 98% 左右，其中 Q2 中粗蛋白含量极显著高于其他 24 份材料，质量分数达到 167.94 g/kg；D4 粗蛋白含量最低，质量分数为 74.18 g/kg。可溶性糖含量的变化处于 31.23~340.16 g/kg，变化幅度在 309% 左右，其中 E2 的可溶性糖含量极显著高于其他 24 份材料，质量分数达到 340.16 g/kg；E1、C1 中可溶性糖含量最低，



不同字母表示差异性显著, $P < 0.05$ 。

Different letters indicate significant differences, $P < 0.05$.

图 5 25 份附子材料的初生代谢品质比较

Fig. 5 Quality comparisons of primary metabolites in 25 *Aconiti Lateralis Radix Praepararka*

质量分数为 31.23、33.25 g/kg。相比之下，多糖和总淀粉含量的变化幅度则相对较小，分别在 8.99~24.56 g/kg(变化幅度在 15.57%左右)和 26.74~64.67 g/kg(变化幅度在 37.93%左右)。材料 L5 的多糖含量极显著高于其他 24 份材料，含量达到 24.56 g/kg。D4、D5、D10、E1、C1 的淀粉含量则极显著高于其他 20 份材料，质量分数最高达到 64.67 g/kg(D5)。显然，不同遗传来源的附子材料在初生代谢品质之间存在较大差异。

3.4 25 份附子材料的生物碱特性分析

如表 6 所示，分析了参试附子在以生物碱为主的次生代谢产物上的差异。样品 D3 的总生物碱含量最高，达 1.75%，其次为 L3、L4 质量分数为 1.58%，样品 D2 最低为 1.02%。其余材料之间差异亦显著。

在附子的总生物碱组成上，所占比例较高的 4 种生物碱为新乌头碱、次乌头碱、乌头碱、苯甲酰新乌头原碱，其中新乌头碱含量所占占比最高，平均为 0.204 8%，在 L4、D8、D10 品种中的含量显著高于其他 22 份材料。乌头碱的含量同样存在显著差异，最高的是 D10，为 0.046 9%，其次是 D8(0.036 3%)，最低的是 E2。相比之下，D10 的次乌头碱含量(0.069 0)也显著高于 D8 品种(0.045 1)，但是 D8 品种和 E2 品种次乌头碱含量无显著差异。

其他生物碱中如苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌

头原碱、苯甲酰次乌头原碱的生物碱合成也展现出了一定的统计学差异，尽管总体含量偏低。例如，苯甲酰新乌头原碱占比区间为 0.004 0%~0.022 9%，最高的是 D13，D4 最低；苯甲酰乌头原碱占比区间为 0~0.003 1%，L4 含量最高(0.003 1%)，而在 D4、D5、D8、E2 中则未检测出；苯甲酰次乌头原碱占比区间为 0~0.007 5%，其中 L4 含量最高，D5 未检测出。上述结果总体反映出附子的生物碱组分及含量在不同遗传来源的材料间差异较大，可能同时受到了基因型和生长环境的影响。

25 份附子的乌头碱含量在 0.013 6%~0.046 9%，变化幅度在 0.033 3%左右，其中最高的是 D10 为 0.046 9%，最低的是 E2 品种为 0.013 6%；次乌头碱质量分数在 0.177 2%~0.029 0%，变化幅度在 0.1482%左右，其中最高的是 S2 品种为 0.177 2%，最低的是 D13 品种为 0.029 0%；新乌头碱含量在 0.292 3%~0.115 9%，变化幅度在 0.176 4%左右，其中最高的是 L4 品种为 0.292 3%，最低的是 D2 品种为 0.115 9%。

3.5 品质成分的相关性分析

附子品质间的相关性分析结果见图 6。从显著性上看，附子总生物碱含量与淀粉含量呈显著负相关，与多糖、粗蛋白、可溶性糖呈显著正相关。附子双酯型生物碱与初生代谢产物的相关性不显著，

表 6 25 份附子材料生物碱含量比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 6 Comparative analysis of alkaloid content in 25 *Aconiti Lateralis Radix Praeparrrka* ($\bar{x} \pm s$)

| 编号 | 质量分数/% | | | | | | |
|-----|-------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 总生物碱 | 乌头碱 | 次乌头碱 | 新乌头碱 | 苯甲酰新乌头原碱 | 苯甲酰乌头原碱 | 苯甲酰次乌头原碱 |
| D1 | 1.43±0.01d | 0.028 5±0.000 2def | 0.061 7±0.000 3gh | 0.226 8±0.000 7bcde | 0.019 6±0.000 1c | 0.001 9±0.000 1d | 0.005 7±0.000 2b |
| D2 | 1.07±0.01m | 0.017 8±0.000 3ij | 0.117 6±0.000 6c | 0.115 9±0.001 0k | 0.012 2±0.000 1f | 0.001 5±0.000 1f | 0.004 1±0.000 2g |
| D3 | 1.75±0.02a | 0.034 6±0.001 3bc | 0.018 4±0.000 7o | 0.246 6±0.008 8b | 0.021 7±0.000 6b | 0.002 9±0.000 1a | 0.005 0±0.000 2c |
| D4 | 1.12±0.00l | 0.021 0±0.000 1hi | 0.053 8±0.000 2i | 0.228 7±0.000 6bcd | 0.004 0±0.000 1n | 0.000 0±0.000 0i | 0.000 5±0.000 1n |
| D5 | 1.12±0.01l | 0.030 1±0.014 7de | 0.029 5±0.014 4n | 0.185 6±0.090 9ghi | 0.005 8±0.002 9lm | 0.000 0±0.000 0i | 0.000 0±0.000 0o |
| D7 | 1.29±0.01g | 0.033 8±0.000 1bc | 0.082 0±0.000 4e | 0.206 8±0.001 4defg | 0.006 5±0.000 1kl | 0.001 0±0.000 2g | 0.000 7±0.000 1m |
| D8 | 1.48±0.02c | 0.036 3±0.000 2b | 0.045 1±0.000 2kl | 0.290 7±0.000 6a | 0.010 0±0.000 1h | 0.000 0±0.000 0i | 0.001 0±0.000 2l |
| D10 | 1.42±0.02d | 0.046 9±0.000 1a | 0.069 0±0.000 5f | 0.286 5±0.000 3a | 0.008 5±0.000 0i | 0.001 0±0.000 1g | 0.000 8±0.000 1m |
| D12 | 1.47±0.01c | 0.032 3±0.000 6cd | 0.041 5±0.000 9l | 0.242 8±0.003 2b | 0.014 6±0.000 1e | 0.001 8±0.000 1de | 0.005 5±0.000 1b |
| D13 | 1.21±0.01j | 0.016 3±0.000 1j | 0.029 0±0.000 1n | 0.167 4±0.000 5ij | 0.022 9±0.000 4a | 0.002 3±0.000 1c | 0.003 7±0.000 0h |
| L1 | 1.28±0.01g | 0.029 9±0.000 3de | 0.044 6±0.000 3kl | 0.203 6±0.001 6efg | 0.019 0±0.000 3c | 0.002 6±0.000 1b | 0.004 7±0.000 3e |
| L2 | 1.25±0.02h | 0.023 9±0.000 2gh | 0.049 8±0.000 2j | 0.175 8±0.000 5hi | 0.015 2±0.000 1e | 0.001 6±0.000 1ef | 0.003 5±0.000 1i |
| L3 | 1.58±0.02b | 0.026 8±0.000 1efg | 0.064 7±0.000 2g | 0.235 5±0.000 7bc | 0.014 6±0.000 2e | 0.001 6±0.000 1ef | 0.005 0±0.000 1c |
| L4 | 1.58±0.01b | 0.031 5±0.000 1cd | 0.071 9±0.000 2f | 0.292 3±0.001 2a | 0.021 3±0.000 1b | 0.003 1±0.000 1a | 0.007 5±0.000 1a |
| L5 | 1.21±0.01j | 0.026 4±0.000 1efg | 0.034 2±0.000 1m | 0.205 4±0.000 9defg | 0.007 9±0.000 4ij | 0.001 5±0.000 1f | 0.004 4±0.000 3f |
| L6 | 1.34±0.02f | 0.029 9±0.000 1de | 0.058 8±0.000 2h | 0.208 7±0.000 6defg | 0.012 5±0.001 0f | 0.001 9±0.000 0d | 0.004 8±0.000 1de |
| L7 | 1.38±0.02e | 0.016 8±0.000 1j | 0.035 1±0.000 1m | 0.171 7±0.000 6ij | 0.018 9±0.000 3c | 0.002 3±0.000 2c | 0.003 3±0.000 1i |
| L8 | 1.16±0.01k | 0.016 5±0.000 1j | 0.010 8±0.000 2p | 0.151 5±0.000 7j | 0.015 1±0.000 6e | 0.001 8±0.000 3d | 0.001 2±0.000 1l |
| E1 | 1.22±0.01ij | 0.027 4±0.000 1efg | 0.043 6±0.000 1l | 0.173 1±0.000 5ij | 0.005 4±0.000 1m | 0.000 7±0.000 1h | 0.000 6±0.000 1mn |
| E2 | 1.24±0.01hi | 0.013 6±0.000 1k | 0.047 8±0.000 1jk | 0.188 1±0.000 6ghi | 0.015 1±0.000 7e | 0.000 0±0.000 0i | 0.005 0±0.000 1cd |
| Q2 | 1.24±0.01h | 0.017 3±0.000 1ijk | 0.036 4±0.000 5m | 0.206 3±0.001 1defg | 0.008 3±0.000 5i | 0.001 5±0.000 2f | 0.001 7±0.000 0jk |
| Q3 | 1.30±0.00g | 0.015 0±0.000 1j | 0.035 0±0.000 5m | 0.125 0±0.000 6k | 0.007 5±0.000 2j | 0.001 5±0.000 7f | 0.001 8±0.000 1j |
| C1 | 1.11±0.00l | 0.025 5±0.000 2fg | 0.099 1±0.000 5d | 0.169 3±0.000 9ij | 0.007 1±0.000 1jk | 0.000 9±0.000 1g | 0.001 6±0.000 1k |
| S1 | 1.20±0.03j | 0.018 6±0.000 1ij | 0.157 9±0.000 5b | 0.215 0±0.000 7cdef | 0.017 4±0.000 2d | 0.001 8±0.000 1d | 0.004 5±0.000 1f |
| S2 | 1.17±0.01k | 0.017 1±0.000 1j | 0.177 2±0.000 7a | 0.198 3±0.001 0fgh | 0.011 0±0.000 3g | 0.001 5±0.000 1f | 0.005 0±0.000 4c |

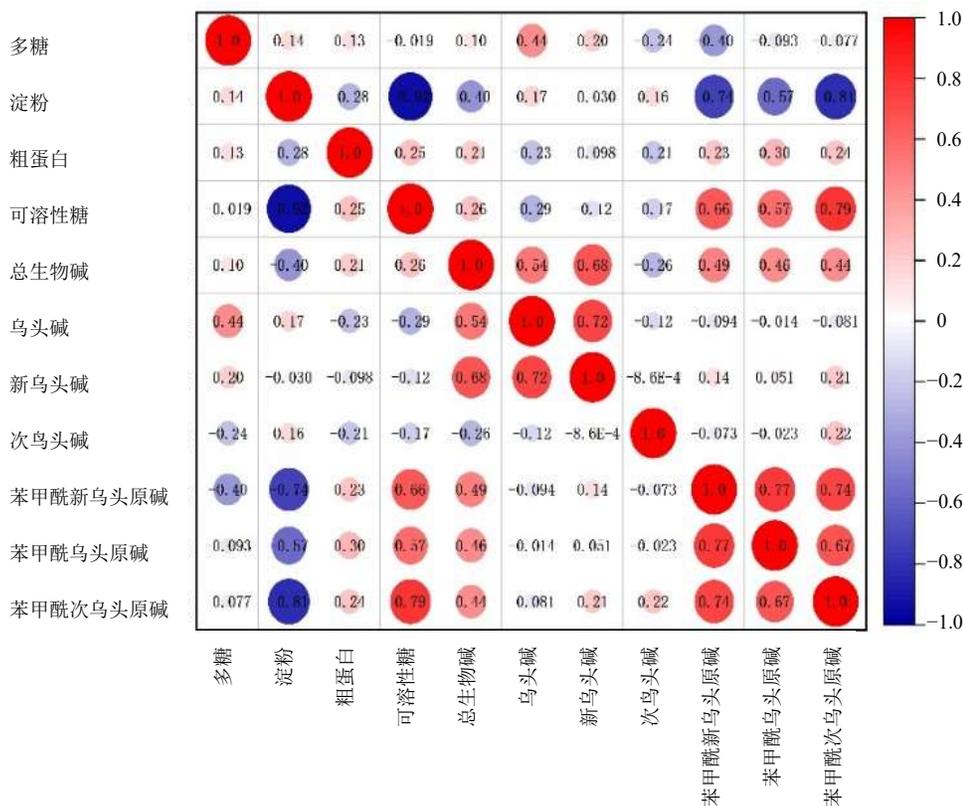


图 6 基于皮尔森相关系数的附子主要品质成分相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of principal quality components in *Aconiti Lateralis Radix Praeparata* based on Pearson correlation coefficient

但单酯型生物碱与淀粉含量存在极显著负相关（相关系数为-0.81），与可溶性糖含量存在极显著正相关（相关系数为 0.79）。总生物碱与次乌头碱呈负相关（相关系数为-0.26），与其他生物碱呈正相关，单酯型生物碱与双酯型生物碱呈负相关。说明，各类生物碱的合成可能具有一定的独立性。

4 讨论

4.1 SSR 分子标记分析遗传多样性

SSR 分子标记技术现已被广泛应用于中药材的遗传多样性和遗传图谱构建研究，在重要基因资源挖掘和遗传育种开发等多个方面发挥了重要作用^[21]。本研究从文献中检索到了 20 对已报道的多态性较好的乌头 SSR 引物开展分子标记，有效揭示了不同来源的 25 份附子材料间的遗传差异，在遗传系数 0.75 和 0.86 处可将 25 份附子材料分为 5 个大类群和 13 个小亚群，为种质资源的遗传鉴定提供了有效参考（图 3）。在此基础上，对 6 个关键的生产农艺性状（株高、茎粗、功能叶、单株结附子数、单株产量、亩产）差异开展比较后发现，同一类群中的附子材料虽然具有相似的遗传来源，但是依然会在株高、

单株结附子数、产量上表现出较显著的相关性差异（图 4），一定程度上反映出栽培环境对附子生长发育的影响^[44]。

4.2 附子品质特性鉴定

对 25 份附子种质资源继续开展了初生代谢与次生代谢的品质特征鉴定，结果显示参试的附子材料中多糖、淀粉、蛋白质、可溶性糖含量均差异较大，尤其是淀粉和蛋白质的含量（图 5）。生物碱是附子重要的次生代谢成分，药用价值高，应用领域广泛^{[43][44]}。本研究结果显示附子生物碱含量最高 4 种生物碱是新乌头碱、次乌头碱、乌头碱、苯甲酰新乌头原碱^{[43][44]}，其中新乌头碱含量最多，但在不同的材料的不同生物碱含量的分配上还是存在着较大的差异，总生物碱含量最高的是 D3，其次是 L3、L4，但是在 D3 中的新乌头碱含量低于 L4。

尽管以乌头碱为代表的生物碱合成代谢机制已在部分药用植物资源中有一定的报道^{[43][44]}，但在附子中的研究依然少有。本研究结果显示，附子的初生代谢品质与生物碱特性存在一定的关联，单酯型生物碱与淀粉呈极显著负相关、与可溶性糖呈极

显著正相关,但多糖、淀粉、可溶性糖、粗蛋白与总生物碱含量和双酯型生物碱含量之间均不显著(图6),表明附子生物碱的生物合成具有一定的独立性^{[43][44]}。

此外,多糖作为附子的功能性成分之一,具有促进免疫调节、抗肿瘤、抗病毒、降血糖等多种功效,研究价值较高,因此多糖或许同样可作为评价附子品质的一个重要参考依据。例如,在本研究中L5编号中的多糖含量最高,比最低的D13要高出15.56%,但是D13的遗传多样性和农艺性状要优于L5(图3、表5),而且D13和L5总生物碱含量一致,值得深入探索。

未来的研究将需要进一步结合代谢组学或者多组学联合分析手段来深刻解析影响附子生态适应性和产量、品质形成等的分子调控机制^[52],挖掘到更多的优良基因和能够有助于快速鉴别区分种源的代谢标记物,加速乌头属植物资源的分子育种研究进程。

4.3 核心种质资源初步筛选

探究不同附子种质资源的开发价值,筛选育种改良潜力较高的核心种质材料,将有利于提高附子的生产潜能,进一步扩大产业效益,促进企业和农户增收。本研究采用SSR分子标记技术,评价了25份附子(乌头)种质资源的遗传多样性,同时对附子的田间农艺性状展开了观察比较,鉴定了关键的品质特性。综合上述分析结果,从所有参试材料中筛选出了5份来自云南的附子材料,分别为D3、L4、D8、D12、D10。相比之其他材料,这5份材料同时具有遗传多样性丰富、关键药用生物碱含量高和田间农艺性状表现较佳的优势,可作为初步的附子核心种质资源。

云南省气候多样、地形复杂,附子种植区较分散,优质低毒的高适应性附子更为符合云南省的生境生产要求^[53]。然而目前国内附子的种源还依然呈较混杂的状态^[54],不利于长线开发,因此开展附子(乌头)种质资源收集与利用评价研究,筛选出能够满足附子多样化育种目标的核心种质加以保存和开发利用,将对以云南省为代表的西南地区中药材产业的发展提供有效助力,促进区域生物医药经济的高质量可持续循环。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 杨恒,王岚. 附子的分子生物学研究进展 [J]. 特种经

济动植物, 2015, 18(8): 34-36.

- [2] 唐梅,赵立春,徐敏,等. 附子化学成分和药理作用研究进展 [J]. 广西植物, 2017, 37(12): 1614-1627.
- [3] 考玉萍,刘满军,袁秋贞. 附子化学成分和药理作用 [J]. 陕西中医, 2010, 31(12): 1658-1660.
- [4] 熊秋韵,李梦婷,缪璐琳,等. 附子不同炮制品抗炎、镇痛和提高免疫功能作用的比较研究 [J]. 中药药理与临床, 2017, 33(1): 123-127.
- [5] 秦凯华,宋健平,叶俏波. 附子功效的本草考证 [J]. 中药材, 2015, 38(1): 185-187.
- [6] 蒲婷婷,刘杰,周忠瑜,等. 采用傅里叶变换红外光谱和 HPLC 法分析附子炮制品黑顺片和白附片差异 [J]. 中草药, 2024, 55(2): 596-604.
- [7] 考玉萍,刘满军,袁秋贞. 附子化学成分和药理作用 [J]. 陕西中医, 2010, 31(12): 1658-1660.
- [8] 陈勇,徐斌,李权林. 云南省中药材产业高质量发展分析与对策 [J]. 云南农业大学学报: 社会科学, 2023, 17(5): 82-87.
- [9] 杨能,文绒,管婷婷,等. 附子生产利用研究进展及其在西南地区产业发展探讨 [J/OL]. 中成药, [2024-08-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1470.s.2024.1115.1329.004.html>.
- [10] 夏燕莉,舒光明,胡平,等. 附子新品种中附1号、中附2号多点品比试验研究 [J]. 中药材, 2014, 37(8): 1331-1336.
- [11] 刘洪,钟凌云,邓延文,等. 不同附子炮制品四逆汤化学成分及毒性差异分析 [J]. 中草药, 2023, 54(5): 1397-1410.
- [12] 郝丽丽,梁国欣,魏洪鑫,等. 中药附子的毒理学安全性研究进展 [J]. 毒理学杂志, 2020, 34(6): 435-440.
- [13] 李政,李红钰,张志东,等. 基于简化基因组测序的四种乌头的遗传多样性分析 [J/OL]. 分子植物育种, [2025-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1470.s.20241115.1329.004.html>.
- [14] 刘强,朱彦西,徐钰惟,等. 江油附子病害情况调研报告 [J]. 四川农业科技, 2021(2): 28-29.
- [15] 周天华,黎君,杨恒. 乌头及其同属近缘种的 SSR 指纹图谱研究 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(12): 2378-2388.
- [16] 尹明宇,吴波,乌云塔娜,等. 基于表型性状和 SSR 标记的樟子松核心种质构建 [J/OL]. 中南林业科技大学学报, [2025-05-08]. <http://kns.cnki.net/koms/detail/46.1068.S.20220618.0915.002.html>.
- [17] 张颢,伍汉斌,程勇,等. 杉木育种群体遗传多样性评价及核心种质构建 [J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(9): 118-126.
- [18] 杨欣,贺亚男,侯寓森,等. 基于专利视角的附子炮制减毒方法现状分析与评述 [J]. 中草药, 2024, 55(9): 3168-3178.

- [19] 党珏, 赵梦杰, 袁岸, 等. 附子道地性的影响因素 [J]. 时珍国医国药, 2016, 27(11): 2744-2746.
- [20] 侯大斌, 任正隆, 舒光明. 附子野生资源群体遗传多样性的 RAPD 分析 [J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1833-1841.
- [21] 杨恒, 周天华. 乌头微卫星引物开发及遗传多样性研究 [J]. 农业生物技术学报, 2017, 25(1): 58-66.
- [22] 崔颢, 景志贤, 周华. 基于 MaxEnt 模型附子的全国药材生态适应性区划研究 [J]. 西南农业学报, 2022, 35(8): 1920-1928.
- [23] 丁梦磊, 蔡淑慧, 张丹, 等. 附子水煎液指纹图谱及多元统计分析评价 [J]. 中华中医药杂志, 2022, 37(10): 5918-5922.
- [24] 胡漪文, 书剑琴, 高静, 等. 乌头母根生物碱含量差异的比较转录组学研究 [J]. 植物生理学报, 2024, 60(4): 685-696.
- [25] 陈名红, 李玉, 黄相中, 等. 分子标记技术在药用植物研究中的应用前景 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39(2): 19-22.
- [26] 周天华, 黎君, 杨恒. 乌头及其同属近缘种的 SSR 指纹图谱研究 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(12): 2378-2388.
- [27] 姚春鹏, 张晓爱, 吴廷全, 等. 用于长绿 2 号苦瓜种子纯度鉴定的 SSR 分子标记的开发 [J]. 分子植物育种, 2019, 17(11): 3660-3664.
- [28] 金庆敏, 林毓娥, 吴廷全, 等. 50 份黄瓜核心种质的 SSR 标记筛选与聚类分析 [J]. 广东农业科学, 2023, 50(9): 39-48.
- [29] 杨勤, 谷文超, 周浓, 等. 苯酚-硫酸法与蒽酮-硫酸法测定地参多糖的比较研究 [J]. 食品科技, 2020, 45(1): 343-350.
- [30] Masuko T, Minami A, Iwasaki N, *et al.* Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format [J]. *Anal Biochem*, 2005, 339(1): 69-72.
- [31] Tamboli F A, More H N, Bhandugare S S, *et al.* Estimation of total carbohydrate content by phenol sulphuric acid method from *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms [J]. *Asian J Res Chem*, 2020, 13(5): 357-359.
- [32] 祝义伟, 周令国, 叶宸志, 等. 香菇柄中可溶性糖的测定 [J]. 农产品加工: 下, 2015(3): 43-45.
- [33] Wang T L, Li Y C, Lin C S, *et al.* Comprehensive analysis of natural polysaccharides from TCMs: A generic approach based on UPLC-MS/MS [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 277: 118877.
- [34] Deng F, Li Q P, Chen H, *et al.* Relationship between chalkiness and the structural and thermal properties of rice starch after shading during grain-filling stage [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 252: 117212.
- [35] 谷类、豆类作物种子粗蛋白质测定法 (半微量凯氏法: GB 2905—1982 [S]. 2010.
- [36] 中国药典 [S]. 一部. 2010: 150.
- [37] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 11-12.
- [38] 邱浩. 微肥及炭肥对附子生长及生物碱积累的影响研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2022.
- [39] 高慧, 王鹏伟, 刘杰, 等. 19 份马铃薯品种的 SSR 分析 [J]. 种子, 2020, 39(1): 26-32.
- [40] 付阳云, 文晓鹏. 菜豆 EST-SSR 分子标记开发及部分种质分子身份证构建 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2024, 46(6): 63-73.
- [41] 向依, 潘金卫, 李慧琳, 等. 基于 SSR 分子标记的紫苏种质资源遗传多样性及群体结构分析 [J]. 种子, 2024, 43(5): 40-47.
- [42] 林开勤, 李悦欣, 魏杰, 等. 基于 SSR 分子标记分析石阡茶树资源遗传多样性 [J]. 西南农业学报, 2024, 37(7): 1435-1441.
- [43] 赖强龙, 戴维, 叶坤浩, 等. 江油附子三种栽培模式简介及大田对比 [J]. 四川农业科技, 2022(9): 25-28.
- [44] 纪彦鸿, 杨志宏, 王春龙. 附子高产栽培技术 [J]. 西北园艺: 综合, 2021(5): 42-43.
- [45] 金城, 喻松霞, 赵凡, 等. 制附子总生物碱抗小鼠溃疡性结肠炎的作用及其机制研究 [J]. 中国药学杂志, 2024, 59(17): 1573-1580.
- [46] 刘杰, 林巧, 周勤梅, 等. 附子中 1 个新的苯基异喹啉生物碱及其心肌保护活性 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(12): 3265-3269.
- [47] 何江蕊, 徐灿, 吕丹, 等. 维西乌头二萜生物碱研究 [J]. 中成药, 2023, 45(4): 1161-1166.
- [48] 罗启鹏, 杨崇康, 张莲, 等. 黄草乌地上部分化学成分的研究 [J]. 中成药, 2022, 44(1): 108-113.
- [49] Li S L, Yu L Q, Shi Q, *et al.* An insight into current advances on pharmacology, pharmacokinetics, toxicity and detoxification of aconitine [J]. *Biomed Pharmacother*, 2022, 151: 113115.
- [50] Zhou W, Liu H, Qiu L Z, *et al.* Cardiac efficacy and toxicity of aconitine: A new frontier for the ancient poison [J]. *Med Res Rev*, 2021, 41(3): 1798-1811.
- [51] 胡漪文, 书剑琴, 高静, 等. 乌头母根生物碱含量差异的比较转录组学研究 [J]. 植物生理学报, 2024, 60(4): 685-696.
- [52] Zhang T, Zhang Y H, Yang J X, *et al.* Transcriptome and targeted metabolome analysis revealed the effects of combined red and blue light on the growth and secondary metabolism of *Scutellaria baicalensis* Georgi [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 188: 115598.
- [53] 张美华, 谭奕为, 李伟强, 等. 不同海拔栽培附子的毒性指标和药效指标比较分析 [J]. 农业研究与应用, 2023, 36(2): 13-18.
- [54] 贺亚男, 张定堃, 许润春, 等. 附子品质评价方法的研究进展 [J]. 中成药, 2017, 39(12): 2568-2572.

[责任编辑 时圣明]