

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.001

论文标题： 不同种源马缨杜鹃种子表型性状分析与优良种源筛选

作　　者： 周 玮，淮钒钰，杨赵婧，等

收稿日期： 2025-09-03

引文格式： 周玮,淮钒钰,杨赵婧,等.不同种源马缨杜鹃种子表型性状分析与优良种源筛选[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):1-9.

Zhou W, Huai F Y, Yang Z J, et al. Analysis of seed traits and selection of superior provenances of *Rhododendron delavayi* from different provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):1-9.

相关论文推荐

Recommended articles

马缨杜鹃不同完整性居群遗传多样性的AFLP分析

Analysis on genetic diversity of different integrity population of *Rhododendron delavayi* by AFLP markers

不同品种安酷杜鹃花粉活力测定及杂交亲和性分析

Determination of pollen viability of different varieties of *Encore*® azalea and analysis of hybridization compatibility

28种杜鹃亲缘关系ISSR分析

The ISSR analysis of 28 native *Rhodohendron*

基于主成分和隶属函数值法的海棠表型分析与观赏性综合评价

Phenotypic analysis and ornamental comprehensive evaluation of *Malus* spp. based on principal component and membership function method

浙南地区木槿品种的分子标记分析及表型性状相关性

Molecular marker analysis and their correlation with phenotypic trait of *Hibiscus* varieties in southern Zhejiang

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.001
http: //qks.csuft.edu.cn

不同种源马缨杜鹃种子表型性状分析与优良种源筛选

周　玮[1a]，淮钒钰[1a]，杨赵婧[1a]，夏国威[1a]，黄玲俊[2]，彭　洋[2]，黄承玲[1b]

（1. 贵州民族大学 a. 生态环境工程学院；b. 民族医药学院，贵州 贵阳 550025；
2. 贵州省国有龙里林场，贵州 龙里 551202）

摘　要：【目的】研究贵州省 6 个种源地马缨杜鹃 *Rhododendron delavayi* 种子表型性状及萌发特性，分析不同种源种子的变异特性及遗传特征，为马缨杜鹃的良种选育提供技术支撑。【方法】对 6 个种源地马缨杜鹃种子的表型性状（种子长度、宽度、厚度、长宽比、扁化率、大小指数及千粒质量）和萌发特性（胚根长、发芽率、发芽势、发芽指数）进行变异分析及遗传力估算、相关性分析、聚类分析，并采用主成分分析法对不同种源地种子质量进行综合评价。【结果】不同种源马缨杜鹃种子的表型性状存在极显著差异（$P < 0.01$），种子表型性状的变异系数均在 10.00% 以上，千粒质量的变异系数最小，大小指数及种子厚度、长宽比的变异系数均达到 30.00% 以上，表型性状的广义遗传力均大于 0.87。不同种源马缨杜鹃种子萌发特性差异显著（$P < 0.05$），百里杜鹃管理区种子拥有最大胚根长（5.17 mm）、最高发芽率（77.50%）及最大发芽势（20.00%）。相关性分析表明，种子长度、长宽比与种子发芽率、发芽势及发芽指数呈显著（$P < 0.05$）或极显著（$P < 0.01$）负相关，种子宽度与胚根长、发芽率及发芽指数呈显著（$P < 0.05$）或极显著（$P < 0.01$）正相关。可将 6 个种源地划分为三大类：第一大类为钟山区、水城区以及百里杜鹃管理区，第二大类为西秀区和赫章县，第三大类为长顺县。综合评价不同种源种子质量，表现为钟山区种源＞水城区种源＞百里杜鹃管理区种源＞赫章县种源＞长顺县种源＞西秀区种源。【结论】马缨杜鹃种子的表型性状主要由遗传因素决定，但不同种源所处的地理环境与生存条件存在差异，使其种子表型特征表现出一定差异性。钟山区、水城区种子表型性状及萌发特性综合质量相对较优，可作为优良种源及繁殖材料开展后续研究。

关键词：马缨杜鹃；种源；表型性状；萌发特性；良种筛选

中图分类号：S718.46　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0001-09

Analysis of seed traits and selection of superior provenances of *Rhododendron delavayi* from different provenances

Zhou Wei[1a], Huai Fanyu[1a], Yang Zhaojing[1a], Xia Guowei[1a], Huang Lingjun[2], Peng Yang[2], Huang Chengling[1b]

(1.a. School of Ecological and Environmental Engineering; b. School of Ethnic Medicine, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Guizhou State-Owned Longli Forest Farm, Longli 551202, Guizhou, China)

Abstract:【Objective】To investigate the morphological characteristics and germination traits of *Rhododendron delavayi* seeds from six provenances in Guizhou Province, analyze the variation and genetic characteristics of seeds from different provenances, and to provide technical support for the breeding of superior varieties.【Method】The morphological traits (seed length, width, thickness, length-to-width ratio, flattening rate, seed dimension index, and thousand-seed weight) and germination traits (radicle length, germination rate, germination potential and germination index) of seeds from the six provenances were subjected to variability and heritability analysis, correlation analysis, and cluster analysis. The seed quality from different provenances was comprehensively evaluated using principal component analysis.【Result】The results showed that the morphological characteristics of *R. delavayi* seeds from different provenances exhibited extremely significant differences ($P < 0.01$). The coefficient of variation for seed morphological traits exceeded 10.00%, with

收稿日期（Received）：2025-09-03　　**修订日期**（Revised）：2025-11-13
基金项目：贵州省科技支撑项目（黔科合支撑〔2023〕一般 035）；国家林业和草原局第三批国家林木种质资源库建设项目（2021GZ01）。
第一作者：周玮（605466767@qq.com），副教授，博士。　　**通信作者：**黄承玲（282148027@qq.com），教授，博士。
引文格式：周玮 , 淮钒钰 , 杨赵靖 , 等 . 不同种源马缨杜鹃种子表型性状分析与优良种源筛选 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):1-9.
Zhou W, Huai F Y, Yang Z J, et al. Analysis of seed traits and selection of superior provenances of *Rhododendron delavayi* from different provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):1-9.
* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。
Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

the smallest variation observed in thousand-seed weight. The coefficients of variation for seed dimension index, seed thickness, and length-to-width ratio all exceeded 30.00%. The broad-sense heritability of morphological traits was greater than 0.87. The germination traits of seeds from different provenances also showed significant differences ($P < 0.05$). Seeds from the Bailidujuan management area exhibited the longest radicle length (5.17 mm), the highest germination rate (77.50%), and the greatest germination potential (20.00%). Correlation analysis indicated that seed length and length-to-width ratio were significantly ($P < 0.05$) or extremely significantly ($P < 0.01$) negatively correlated with germination rate, germination potential, and germination index. Seed width was significantly ($P < 0.05$) or extremely significantly ($P < 0.01$) positively correlated with radicle length, germination rate, and germination index. The six provenances could be classified into three major categories: the first category included Zhongshan District, Shuicheng District, and Bailidujuan Management Area; the second category included Xixiu District and Hezhang County; and the third category was Changshun County. The comprehensive evaluation of seed quality from different provenances ranked as follows: Zhongshan District > Shuicheng District > Bailidujuan Management Area > Hezhang County > Changshun County > Xixiu District. 【Conclusion】In conclusion, the morphological characteristics of *R. delavayi* seeds are primarily influenced by genetic factors but also exhibit certain variations due to geographical and environmental factors across different provenances. Seeds from Zhongshan District and Shuicheng District were relatively superior and can be further studied as material for breeding and propagation.

Keywords: *Rhododendron delavayi*; provenances; morphological characteristics; germination traits; selection of superior varieties

马缨杜鹃 *Rhododendron delavayi* 为杜鹃属乔木状杜鹃，花冠呈钟形，花色深红，花冠筒长 3 ～ 5 cm、直径 3 ～ 4 cm，其花型硕大、花色艳丽，具有较高的观赏价值与园林利用潜力。种子作为植物重要繁殖材料，其性状受到遗传和环境因素的共同调控 [1-2]。种源间性状差异是种源选择和良种选育的重要基础 [3]。种源试验可揭示树种地理变异及其与生态环境之间的联系 [4]。对不同种源种子性状进行研究，其性状差异不仅体现其对环境的适应能力，还可作为优异种质资源筛选的基础 [5]，对植物优良种源筛选具有重要意义。

近年来，对马缨杜鹃的研究越来越广泛，主要集中在马缨杜鹃的干旱响应、开花特性以及种子萌发特性等方面。如 Cai 等 [6] 研究发现，马缨杜鹃更适合于干旱和光照较好的生境；有研究表明，其结构特性 [7]、叶片特征 [8] 及生理特性 [9] 表现出一定的耐旱性；洪鲲等 [10]、乙引等 [11]、岳保超等 [12] 对马缨杜鹃的花芽分化及花期调控方面进行了相关研究，取得了一定研究成果；程雪梅等 [13] 研究了不同浸种方式对马缨杜鹃种子发芽率的影响；段旭等 [14] 对马缨杜鹃种子进行不同温度、不同贮存方法、温水浸种处理等研究，得出萌发速率以 30 ℃为最高，浸种时间 48 h 种子发芽率较高；周敏 [15-16] 研究了干旱胁迫对马缨杜鹃种子萌发及其生理特性的影响。针对不同种源地马缨杜鹃种子的研究未见报道。因此，本研究选择贵州省 6 个种源区的马缨杜鹃种子进行表型性状以及萌发特性分析，对不同种源地种子进行综合评价，筛选出优良种源，为马缨杜鹃的良种选育提供技术支撑，也为马缨杜鹃的推广应用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材 料

马缨杜鹃种子采自贵州省 6 个县（区），分别为百里杜鹃管理区、赫章县、水城区、安顺市西秀区、长顺县和六盘水市钟山区，种源地的自然概况见表 1。于 2023 年 10—11 月，待马缨杜鹃的蒴果呈绿褐色或黄褐色时进行采种。采收后的果实摊开、晾干，待果皮自然开裂后，取出种子并去除杂质，最后存放在通风且阴凉的地方备用。

表 1 种源地自然概况 †

Table 1 The natural conditions of the provenances

种源地 Provenance	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude /m	年均气温 Annual mean temperature /℃	年均降水量 Annual precipitation /mm	年均日照时数 Annual sunshine /h	无霜期 Frost-free period /d
百里杜鹃管理区 Bailidujuan management area	105°75′	27°13′	1 680	11.5	1 100	950	250
赫章县 Hezhang County	104°56′	26°87′	1 996	12.5	1 025	1 035	268
水城区 Shuicheng District	104°28′	30°38′	1 750	12.3	1 350	1 553	220
西秀区 Xixiu District	105°83′	25°09′	1 500	14.1	1 000	1 142	340
长顺县 Changshun County	106°26′	25°78′	1 415	16.2	1 250	1 039	275
钟山区 Zhongshan District	110°95′	24°32′	2 775	12.9	1 158	1 319	290

† 数据来源于 https://worldclim.org/。The data originate from https://worldclim.org/.

1.2　试验方法

1.2.1　种子性状特征分析

从每个种源地随机选取 10 粒完整饱满的种子，采用电子数显游标卡尺（精确度 0.01 mm）对每粒种子的长度、宽度、厚度进行测量，每个种源重复 3 次，共 30 粒种子。再根据所测的种子长度、宽度、厚度数据，按照丁炳扬等 [17] 的方法，计算大小指数、扁化率以及长宽比。千粒质量的测定采用百粒法，每个处理 10 个重复。

1.2.2　种子萌发特性分析

随机挑选 6 个种源的马缨杜鹃种子 200 粒，用 0.2% 灭菌剂浸泡 3 min，然后用无菌水清洗干净。将种子随机分成 4 份，每 50 粒种子均匀布置于铺有润湿滤纸的培养皿中，共 4 次重复。将放有种子的培养皿置于光照培养箱内，培养条件为：温度 25 ℃（白天）/ 15 ℃（晚上）、湿度 65% ～ 70%、14 h 光照 /10 h 黑暗、光照强度 3 000 lx。每天按时加无菌水数滴以保持湿度。以胚根突破种皮 1 mm 作为种子发芽的判定标准。每天按时监测种子发芽情况，连续 5 d 不发芽视为发芽结束。待发芽试验结束后，于每个培养皿中随机挑选 10 粒种子，测量胚根长度。根据测定结果，参照郭龙琴等 [18] 的方法分别计算发芽势、发芽率、发芽指数及胚根长等指标。

1.3　数据处理

采用 Excel 2016 软件对试验数据进行处理，并制作表格。用统计软件 SPSS 21.0 对相关数据进行箱线图制作、方差分析和相关性分析。采用系统聚类中的组间连接法，选择欧氏距离进行聚类分析，应用 SPSS 21.0 软件进行主成分分析，并根据主成分分析结果对不同种源的种子进行综合评价。

2　结果与分析

2.1　不同种源马缨杜鹃种子表型性状分析

由图 1 可知，赫章县种子长中位数最大，为 1.80 mm，其次是西秀区（1.60 mm），中位数最

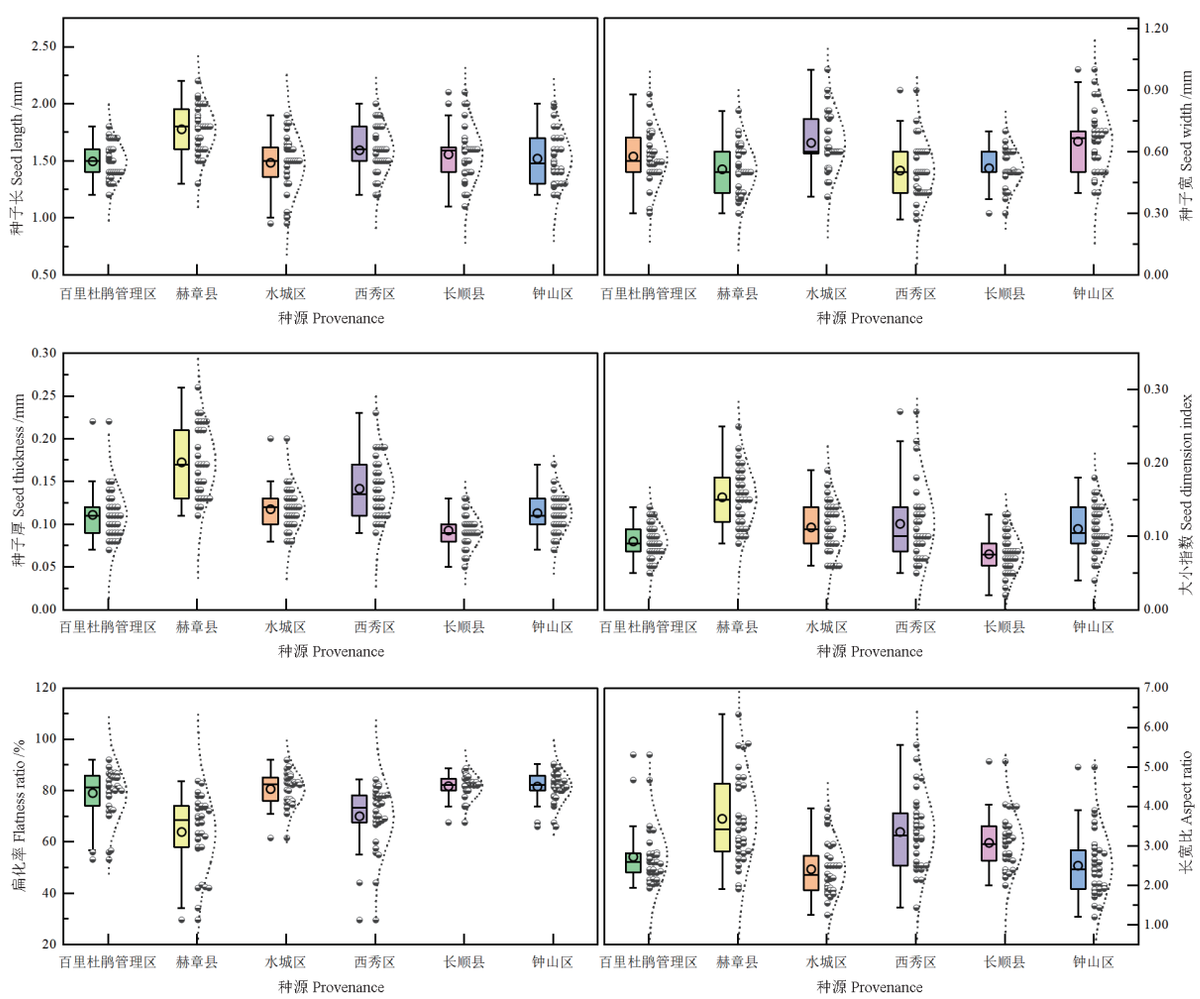


图 1　不同种源地马缨杜鹃种子性状指标

Fig. 1　The morphological characteristics of *Rhododendron delavayi* seeds from different provenances

低的是钟山区，为 1.48 mm，说明赫章县及西秀区马缨杜鹃种子较长，钟山区种子最短。从数据分散情况来看，钟山区种子长较分散，百里杜鹃管理区种子长较集中。长顺县种子长呈明显右偏分布，且发现有 3 个异常值。钟山区种子长集中在较小一侧，存在少数极大值，因此其平均种子长较小。

钟山区种子宽中位数最高，为 0.67 mm，其次是水城区（0.60 mm），2 个地区种子宽呈现不同的分布特征，钟山区呈明显的右偏分布，水城区呈明显的左偏分布，说明钟山区种子宽多集中于较大一侧，而水城区种子宽多集中于较小一侧。中位数最小的是赫章县及西秀区种子，均为 0.50 mm，且相对居中，但分布较分散。长顺县种子宽最集中，呈左偏分布。

种子厚及大小指数在 6 个种源中具有相似的分布特征，表现为赫章县种子厚及大小指数中位数最高，分别为 0.17 mm 及 0.15 mm^3，分布最分散。中位数最小的是长顺县种子，分别为 0.09 mm 及 0.08 mm^3，分布较集中。

赫章县、西秀区种子扁化率中位数低于 80%，分布较分散；其余地区中位数均高于 80%，长顺县种子扁化率分布最集中。每个地区种子扁化率均发现异常值。

赫章县种子长宽比最大，为 3.42，且最分散；其次是西秀区，为 3.27；水城区、钟山区及百里杜鹃管理区种子长宽比相对较小，均低于 3.00，分布较集中。综合种子的性状指标可知，钟山区及水城区种子较饱满，赫章县及西秀区种子较干瘪。

2.2 不同种源马缨杜鹃千粒质量比较

种子千粒质量是评价种子质量的重要指标。由表 2 可知，种子千粒质量最大的是水城区，为 96.20 mg，其次是长顺县（94.50 mg），2 个地区千粒质量最小值均高于 90.00 mg，极差分别为 6.00、9.00 mg，变异系数较小，分别为 2.89%、2.19%。钟山区种子千粒质量居中，平均值为 86.60 mg，变异系数为 2.32 %，极差较小，仅为 6.00 mg。西秀区种子千粒质量均值最小，仅为 73.50 mg，极差为 12.00 mg，而变异系数最大，为 4.81%。

表 2 不同种源种子千粒质量

Table 2 The thousand-seed weight from provenances

种源 Provenance	最大值 Maximum /mg	最小值 Minimum /mg	均值 Mean /mg	极差 *R* /mg	变异系数 CV /%
百里杜鹃管理区 Bailidujuan management area	81.00	75.00	78.00	6.00	2.63
赫章县 Hezhang County	82.00	77.00	79.50	5.00	1.80
水城区 Shuicheng District	99.00	90.00	96.20	9.00	2.89
西秀区 Xixiu District	81.00	69.00	73.50	12.00	4.81
长顺县 Changshun County	97.00	91.00	94.50	6.00	2.19
钟山区 Zhongshan District	90.00	84.00	86.60	6.00	2.32

2.3 不同种源马缨杜鹃种子表型性状变异性及遗传力分析

6 个种源间马缨杜鹃种子表型性状均存在极显著差异（$P < 0.01$）（表 3）。各指标中，大小指数变异系数最大，为 36.36%；其次是种子厚及长宽比，分别为 33.33%、32.77%；变异系数较小的是种子长及扁化率，分别为 15.29% 和 15.28%；种子千粒质量的变异系数最小，为 10.32%。这说明在不同环境条件下马缨杜鹃种子发生显著表型变异，在形态及质量方面表现出多样性变化。马缨杜鹃种子性状指标的广义遗传力均高于 0.87，属于较高遗传力水平，说明种子性状主要受遗传因素影响，但受不同地理环境及生境条件的影响，马缨杜鹃种子性状仍产生一定表型差异，最终呈现出丰富的性状分化与生物多样性特征。

2.4 不同种源马缨杜鹃种子萌发特性分析

不同种源马缨杜鹃种子发芽试验结果见表 4。方差分析结果表明，不同种源马缨杜鹃种子萌发特性差异显著（$P < 0.05$）。其中百里杜鹃管理区种子胚根长及发芽率最大，分别为 5.17 mm 及 77.50%；其次是钟山区种子，分别为 4.59 mm 及 76.50%；长顺县种子胚根长及发芽率均最小，仅为 2.40 mm 及 30.00%。百里杜鹃管理区种子发芽势最高，为 20.00%；最低的是长顺县及赫章县种子，均为 11.50%。钟山区种子发芽指数最高，为 37.49；其次是水城区，为 33.32；发芽指数最低的是赫章县种子，仅为 16.73。因此，百里杜鹃管理区种子具有最高的发芽率、发芽势及胚根长，长

表 3　不同种源间种子性状差异性分析 †
Table 3　The analysis of seed morphological variation among provenances

项目 Item	种子长 Seed length /mm	种子宽 Seed width /mm	种子厚 Seed thickness /mm	大小指数 Seed dimension index	扁化率 Flatness ratio /%	长宽比 Aspect ratio	千粒质量 Thousand seed weight /mg
平均值 Mean	1.57	0.57	0.12	0.11	76.2	2.96	84.66
变异范围 Range	1.20 ～ 2.10	0.30 ～ 1.00	0.06 ～ 0.23	0.02 ～ 0.27	29.73 ～ 92.05	1.20 ～ 6.33	69.00 ～ 99.00
变异系数 CV /%	15.29	24.56	33.33	36.36	15.28	32.77	10.32
F 值 *F* value	7.518**	7.450**	26.691**	15.027**	18.144**	10.272**	154.604**
遗传力 Heritability	0.87	0.87	0.96	0.93	0.94	0.90	0.99

† ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著。** indicate significant differences at the $P < 0.01$ levels.

表 4　不同种源马缨杜鹃种子萌发特性 †
Table 4　The germination characteristics of different provenances of *R. delavayi* seeds

种源 Provenance	胚根长 Radicle length /mm	发芽率 Germination rate /%	发芽势 Germination energy /%	发芽指数 Germination index
百里杜鹃管理区 Bailidujuan management area	5.17±0.37 a	77.50±1.71 a	20.00±1.83 a	27.85±1.57 a
赫章县 Hezhang County	3.79±0.19 b	53.50±9.32 b	11.50±1.71 b	16.73±3.22 b
水城区 Shuicheng District	3.05±0.29 bc	64.50±1.50 ab	15.00±1.73 ab	33.32±3.02 a
西秀区 Xixiu District	2.68±0.18 c	58.50±2.50 b	16.00±1.83 ab	27.59±4.85 ab
长顺县 Changshun County	2.40±0.20 c	30.00±9.42 c	11.50±3.40 b	17.37±7.72 b
钟山区 Zhongshan District	4.59±0.28 a	76.50±2.75 a	13.50±1.26 b	37.49±3.23 a

† 同列不同小写字母表示在 LSD 检验 $P < 0.05$ 水平上差异显著。
Different lowercase letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$ according to the LSD test.

顺县种子具有最低的发芽率、发芽势及胚根长，仅发芽指数略高于赫章县。

2.5　马缨杜鹃种子表型性状与萌发特性间相关性分析

马缨杜鹃种子萌发特性与种子性状密切相关，相关分析结果（表 5）表明，种子长与发芽率、发芽势、发芽指数呈显著负相关（$P < 0.05$），说明马缨杜鹃种子越长，种子萌发特性越差。种子宽与胚根长、发芽率及发芽指数均呈显著（$P < 0.05$）或极显著（$P < 0.01$）正相关，说明种子宽越大，种子萌发特性越好。长宽比与种子发芽率、发芽指数呈极显著负相关（$P < 0.01$），与发芽势呈显著负相关（$P < 0.05$）。

2.6　不同种源马缨杜鹃种子聚类分析

根据马缨杜鹃种子的表型性状及萌发特性，采用欧氏距离法对 6 个种源地的种子进行聚类，分析结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，取距离值为 10 可以将 6 个种源马缨杜鹃种子分为三大类：第一大类为钟山区、水城区以及百里杜鹃管理区，其种子长相对较小，宽度较大，种子扁化率较高，变异范围较小，种子相对较饱满，且具有相对较高的发芽率及发芽指数；第二大类为西秀区和赫章县，其种子长较大，宽度较小，扁化率较低，表型性状较分散，且种子相对干瘪，萌发特性最差；第三大类是长顺县，其表型性状及萌发特性均介于前两类之间。

表 5　马缨杜鹃种子表型性状与萌发特性相关分析 †
Table 5　The correlation analysis between phenotypic characteristics and germination characteristics of *R. delavayi* seeds

性状指标 Characteristics index	胚根长 Radicle length	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination energy	发芽指数 Germination index
种子长 Seed length	−0.079	−0.378*	−0.410*	−0.449*
种子宽 Seed width	0.363*	0.499**	0.193	0.471*
种子厚 Seed thickness	0.018	−0.036	−0.294	−0.286
大小指数 Seed dimension index	0.120	0.055	−0.290	−0.187
扁化率 Flatness ratio	0.080	0.173	0.305	0.376*
长宽比 Aspect ratio	−0.258	−0.480**	−0.381*	−0.526**
千粒质量 Thousand seed weight	−0.316	−0.289	−0.245	0.076

† * 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上差异显著。n=24。
* and ** indicate significant differences at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. n=24.

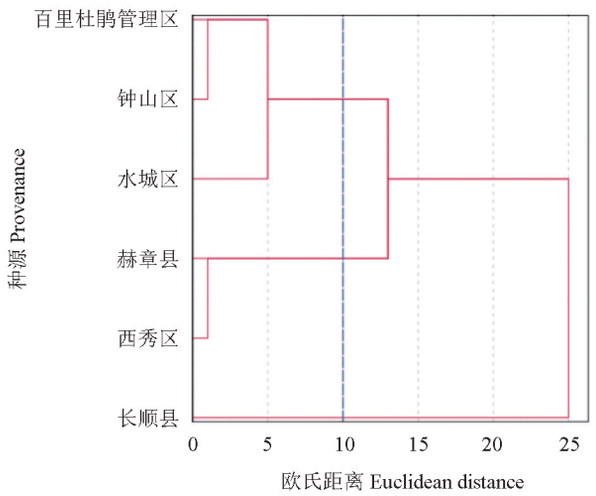


图 2 不同种源马缨杜鹃种子聚类分析
Fig. 2 The cluster analysis of *R. delavayi* seeds from different provenances

2.7 不同种源马缨杜鹃种子主成分分析及综合评价

对马缨杜鹃种子的表型性状及萌发特性进行主成分分析并提取 3 个主成分，结果（表 6）表明，成分 1（F_1）为种子的表型性状指标，种子厚及大小指数在成分矩阵中的值最高，分别为 0.935 和 0.923，成分 1 的贡献率为 46.08%；成分 2（F_2）为种子的萌发特性，发芽率在成分矩阵中值为 0.948，贡献率为 24.62%；成分 3（F_3）为种子的千粒质量，贡献率为 11.41%。前 3 个主成分的累计贡献率为 82.11%。参考周桂梅等 [19] 及李玛等 [20] 的主成分分析法对马缨杜鹃种子进行综合评价，根据各指标的得分系数，将各指标的标准化数据乘以得分系数，计算出各性状的得分，同时将各性状得分乘以权重并求和，即各种源种子性状综合得分（F），F=0.742F_1+0.212F_2+0.046F_3。由种子的综合得分结果（表 7）可知，马缨杜鹃种子最优种源为钟山区，综合评分为 1.00，水城区（0.86）排第二，在以后的育种选择中可优先选择钟山区及水城区种子。最差的种源地是西秀区，综合评分为 0.11。

表 6 不同种源马缨杜鹃种子主成分分析
Table 6 The principal component analysis of *R. delavayi* seeds from different provenances

指标 Indicator	不同主成分的载荷 Principal component loadings		
	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	成分 3 Component 3
种子长 Seed length	0.791	−0.299	0.193
种子宽 Seed width	−0.281	0.569	0.721
种子厚 Seed thickness	0.935	−0.062	−0.132
大小指数 Seed shape index	0.923	0.088	0.279
扁化率 Flatness ratio	−0.867	0.218	0.354
长宽比 Aspect ratio	0.719	−0.497	−0.390
千粒质量 Thousand seed weight	−0.575	−0.298	0.619
胚根长 Radicle length	0.160	0.761	0.033
发芽率 Germination rate	−0.034	0.948	−0.089
发芽势 Germination energy	−0.337	0.584	−0.468
发芽指数 Germination index	−0.303	0.738	0.047
贡献率 Contribution rate /%	46.08	24.62	11.41
特征根 Eigenvalue	5.530	2.955	1.369
权重 Weight	0.742	0.212	0.046

3 讨 论

3.1 不同种源马缨杜鹃种子表型性状分析

种子繁殖是对野生杜鹃特别是高山杜鹃进行低海拔驯化和种质资源保存、利用所采用的主要方法 [21]。种子作为植物最重要的繁殖器官，其表型性状受基因型和环境因子共同作用 [22]。6 个种源马缨杜鹃种子表型性状的广义遗传力均在 0.87 以上，说明其性状主要受遗传特性影响，这也证明植物种子的表型性状与结构特征属于植物稳定遗传的性状 [23]。马缨杜鹃种子表型性状存在显著的种源变异特征，其各项表型性状变异系数均超过 10.32%，其中种子大小指数变异系数高达 36.36%，这说明为适应不同的生长环境，种子表型性状表现出一定的多样性特征。种子大小的变

表 7 不同种源马缨杜鹃种子综合评分
Table 7 The comprehensive evaluation of *R. delavayi* seeds from different provenances

种源 Provenance	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	成分 3 Component 3	综合评分 Score	排序 Rank
百里杜鹃管理区 Bailidujuan management area	0.395	0.155	0.057	0.60	3
赫章县 Hezhang County	−0.310	0.150	0.312	0.15	5
水城区 Shuicheng District	0.394	0.060	0.403	0.86	2
西秀区 Xixiu District	−0.027	0.121	0.020	0.11	6
长顺县 Changshun County	0.079	−0.067	0.191	0.20	4
钟山区 Zhongshan District	0.483	0.144	0.413	1.00	1

异反映了种子对环境的适应性，并在一定程度上抵御未来环境风险 [24]。种子的表型变异能提高种子萌发的多样性，并赋予植株一定的适应弹性，以维持种群的稳定性 [25]。有研究发现，大种子有助于提高后代在群落中的存活能力和种群多样性 [26]。邓毅晖等 [21] 研究表明，杜鹃花属种子中较小种子在萌发活力方面存在优势。杨阳等 [27] 研究表明，树枫杜鹃同一母株上种子大小产生连续性变异，且种子形态变异是其种子萌发特性的最大影响因素。郑雷等 [28]、逄宏扬等 [29] 及刘舒等 [30] 对不同种源地种子的研究结果表明，同一物种种子性状在不同环境中均存在差异。因此，植物种子特性可反映群体的遗传规律和变异程度，被广泛应用于优良种源的筛选和良种选育工作中 [31-32]。

3.2　不同种源马缨杜鹃种子萌发特性分析

萌发特性的差异可揭示种子在不同生态环境中的生存策略 [33]。本研究结果表明，6 个种源地种子的发芽率、发芽势、发芽指数等萌发特性均表现出显著差异（$P < 0.05$），百里杜鹃管理区种子具有最高的发芽率、发芽势及胚根长，长顺县种子具有最低的发芽率、发芽势及胚根长，以及较低的发芽指数。相关性分析结果表明，种子长及长宽比与发芽率、发芽势及发芽指数呈显著负相关（$P < 0.05$），种子宽与发芽率、发芽指数呈显著正相关（$P < 0.05$），该研究结果与李识君等 [34] 的研究结果存在差异，主要原因是本研究中 6 个种源地的海拔、气候及土壤等条件均存在明显差异，对研究结果有一定影响。邓毅晖等 [21] 对 12 个杜鹃花属种子形态与发芽特性进行研究，发现杜鹃发芽指数与种子的长、宽均存在极显著相关性。郭龙琴等 [18] 对不同种源百合花杜鹃种子萌发特性的研究也证明，杜鹃种子的形态特性与种子萌发特性密切相关，可通过种子的表型性状初步判断其萌发特性。但相关性分析结果存在差异，可能是由于不同杜鹃种子的表型性状及萌发特性本身存在差异，使得种子性状与萌发特性间的相关性存在差异。

3.3　不同种源马缨杜鹃种子综合评价与良种筛选

聚类分析可以体现各种源间的亲缘相关性 [35]。本研究通过聚类分析将 6 个种源地马缨杜鹃种子分成三大类：第一大类为贵州省的水城区、钟山区以及百里杜鹃管理区，这 3 个地区的海拔较高，年降水量较多，属于贵州省西部高中山地区，其亲缘关系较近，该类种子长较小，种子宽相对较大，长宽比小于 3.0，相对饱满，具有相对较高的发芽指数及发芽率；第二大类为西秀区及赫章县，2 个地区种子亲缘关系较近，该类种子长较大，种子宽较小，扁化率及长宽比较大，种子相对干瘪，种子的发芽指数较低；第三大类为长顺县，这是 6 个种源地中海拔最低的分布区，且年均气温相对高于其他地区，与其他 5 个种源亲缘关系较远。从分类结果看，马缨杜鹃种子分类具有一定的地理分异性，这与董胜君等 [36] 对东北杏的分类结果类似，可能与种源地的地形、土壤条件以及植被类型差异等有关 [37-39]。郭龙琴等 [18] 对百合花杜鹃的研究结果也表明，纬度、年平均气温、年均降水量、年均日照时数和无霜期等可作为贵州省内选择百合花杜鹃优质种源的环境因子指标。马缨杜鹃种子在不同的种源地表现出明显差异，要在这些种源中筛选优良种源，需要对种子的各项指标进行综合分析。本研究将马缨杜鹃种子的表型性状与萌发特性相结合，通过主成分分析法将各指标归为 3 类，第 1 主成分为种子的表型性状指标，第 2 主成分为种子的萌发特性，第 3 主成分为种子的质量指标，其累计贡献率达到 82.11%，能够代表绝大多数种子的特性。通过综合评价，得出马缨杜鹃种子的优良程度表现为钟山区种源＞水城区种源＞百里杜鹃管理区种源＞赫章县种源＞长顺县种源＞西秀区种源，其中钟山区及水城区种源优于其他种源区种子，该区域马缨杜鹃种子具备进一步深入研究的价值，可优先开展良种选育与推广应用，而长顺县与西秀区则需重点加强种质资源保护工作，以此维系其种群遗传多样性，实现马缨杜鹃种质资源的合理开发与有效保育。

4　结　论

通过分析 6 个种源马缨杜鹃种子的表型性状以及萌发特性，得出不同种源马缨杜鹃种子表型性状多受遗传因素的影响，但在不同的种源地表现出一定的差异性。不同种源种子萌发特性差异显著，且与种子的表型性状相关，通过综合评价分析，得出 6 个种源种子综合评分为钟山区种源＞水城区种源＞百里杜鹃管理区种源＞赫章县种源＞长顺县种源＞西秀区种源，钟山区、水城区马缨杜鹃可作为优良种源开展进一步筛选。

参考文献：

[1]　田瑞杰 , 巩合德 , 雷晨雨 , 等 . 不同种源高山栲种子性状特征及其变异 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(9):88-95,126.
Tian R J, Gong H D, Lei C Y, et al. Characteristic and variation in

seed traits of *Castanopsis delavayi* from various provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(9):88-95,126.

[2] 魏胜利 , 王文全 , 秦淑英 , 等 . 甘草种源种子形态与萌发特性的地理变异研究 [J]. 中国中药杂志 ,2008,33(8):869-873.
Wei S L, Wang W Q, Qin S Y, et al. Study on geographical variation of morphologic and germination characteristic of different *Glycyrrhiza uralensis* provenance seeds[J]. China Journal of Chinese Materia Medica,2008,33(8):869-873.

[3] 常恩福 , 张清 , 肖桂英 , 等 . 铁橡栎不同种源及家系种子的形态特征及变异 [J]. 种子 ,2020,39(6):53-58.
Chang E F, Zhang Q, Xiao G Y, et al. Morphological characteristics and variation analysis of seeds from different provenances and families of *Quercus cocciferoides*[J]. Seed, 2020,39(6):53-58.

[4] 王红 , 段爱国 , 张建国 . 不同种源树木径向生长对气候变化响应研究进展 [J]. 林业科学研究 ,2023,36(5):198-204.
Wang H, Duan A G, Zhang J G. Response of radial growth of different provenances to climate change: a review[J]. Forest Research,2023,36(5):198-204.

[5] 张鹤山 , 吴新江 , 田宏 , 等 . 不同种源狼尾草表型性状多样性分析及优异种源筛选 [J]. 南方农业学报 ,2024,55(7):2090-2099.
Zhang H S, Wu X J, Tian H, et al. Diversity analysis of phenotypic traits and screening of excellent germplasm resources on different *Pennisetum alopecuroides* provenances[J]. Journal of Southern Agriculture,2024,55(7):2090-2099.

[6] Cai Y F, Li S F, Li S F, et al. How do leaf anatomies and photosynthesis of three *Rhododendron* species relate to their natural environments?[J]. Botanical Studies,2014,55:36.

[7] 蔡艳飞 . 干旱胁迫下马缨杜鹃的生理生态响应及基因表达分析 [D]. 昆明 : 云南大学 ,2018:15-17.
Cai Y F. Physiological responses and gene express to drought stress of *Rhododendron delavayi* Franch[D]. Kunming: Yunnan University,2018:15-17.

[8] 李苇洁 , 陈训 . 百里杜鹃森林公园马缨杜鹃种群结构与更新初步研究 [J]. 贵州科学 ,2005,23(3):46-49.
Li W J, Chen X. A preliminary study on structure and regeneration of *Rhododendron delavayi* population in Baili Azalea Forest Park[J]. Guizhou Science,2005,23(3):46-49.

[9] 蔡艳飞 , 彭绿春 , 宋杰 , 等 . 不同生长时期马缨杜鹃光合特性的变化及其主要影响因素 [J]. 广西植物 ,2022,42(4):617-627.
Cai Y F, Peng L C, Song J, et al. Variations of photosynthetic characteristics of *Rhododendron delavayi* in different growth phases and influencing factors[J]. Guihaia,2022,42(4):617-627.

[10] 洪鲲 , 张习敏 , 乙引 , 等 . 营养元素对马缨杜鹃花芽发育和花期的影响 [J]. 北方园艺 ,2010(21):84-86.
Hong K, Zhang X M, Yi Y, et al. Effect of nutrient elements on bud development and florescence of *Rhododendron delavayi* Franch[J]. Northern Horticulture,2010(21):84-86.

[11] 乙引 , 张习敏 , 陈训 . 一种延迟野生马缨杜鹃开花时间的药液及其喷洒方法 : CN102197814A[P].2011-09-28.
Yi Y, Zhang X M, Chen X. A liquid agent for delaying the flowering time of wild *Rhododendron delavayi* and its spraying method: CN102197814A[P]. 2011-09-28.

[12] 岳保超 , 汪蓉 , 钟灵 , 等 . 植物生长调节剂对马樱杜鹃开花调控的影响 [J]. 仲恺农业工程学院学报 ,2016,29(1):1-5.
Yue B C, Wang R, Zhong L, et al. Effects of plant growth regulators on blooming of *Rhododendron delavayi*[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering,2016,29(1): 1-5.

[13] 程雪梅 , 何承忠 , 周敏 , 等 . 不同浸种方式对马缨杜鹃种子发芽率的影响 [J]. 北方园艺 ,2008(10):106-109.
Cheng X M, He C Z, Zhou M, et al. Effects of different soaks on seed germination rate of *Rhododendron delavayi* Franch[J]. Northern Horticulture,2008(10):106-109.

[14] 段旭 , 陈训 , 赵洋毅 . 马缨杜鹃种子萌发研究 [J]. 安徽农业科学 ,2007,35(29):9199-9200.
Duan X, Chen X, Zhao Y Y. Study on the seed germination of *Rhododendron delavayi*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2007,35(29):9199-9200.

[15] 周敏 . 干旱胁迫下外源钙对马缨杜鹃种子萌发生理特性的影响 [J]. 北京农业 ,2014(21):11-12.
Zhou M. Effects of exogenous calcium on physiological characteristics of *Rhododendron camelliforme* seed germination under drought stress[J]. Beijing Agriculture,2014(21):11-12.

[16] 周敏 . 干旱胁迫下外源钙对伞花木和马缨杜鹃杜鹃种子萌发的影响 [J]. 中国农业信息 ,2014,26(17):27-28.
Zhou M. Effects of exogenous calcium on seed germination of umbrella and *Rhododendron macranthoides* under drought stress[J]. China Agricultural Information,2014,26(17):27-28.

[17] 丁炳扬 , 吴欢笑 , 张慧明 , 等 . 浙江杜鹃花属植物种子形态及其分类学意义 [J]. 西北植物学报 ,1995,15(6):36-42.
Ding B Y, Wu H X, Zhang H M, et al. Seed morphology of *Rhododendron* L. (Ericaceae) from Zhejiang and its taxonomic significance[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,1995, 15(6):36-42.

[18] 郭龙琴 , 姜晓涵 , 淮钒钰 , 等 . 不同种源百合花杜鹃种子性状和萌发特性差异研究 [J]. 种子 ,2024,43(4):111-116.
Guo L Q, Jiang X H, Huai F Y, et al. Study on the difference of seed traits and germination characteristics of *Rhododendron liliiflorum* from different provenances[J]. Seed,2024,43(4):111-116.

[19] 周桂梅 , 陈琳 , 刘振兴 , 等 . 小豆种质资源农艺性状鉴定与综合评价 [J]. 江苏农业科学 ,2023,51(21):44-49.
Zhou G M, Chen L, Liu Z X, et al. Identification and comprehensive evaluation of agronomic traits of adzuki bean germplasm resources[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2023,51(21):44-49.

[20] 李玛 , 谭淑文 , 张怀辉 , 等 . 不同种源珠子参种子性状分析及综合评价 [J]. 时珍国医国药 ,2025,36(12):2293-2296.
Li M, Tan S W, Zhang H H, et al. Comprehensive evaluation of seed traits and provenance-associated trait differences in *Panax japonicas*[J]. Journal of Li-Shizhen Traditional Chinese

Medicine,2025,36(12):2293-2296.

[21] 邓毅晖 , 罗婵 , 刘宏 , 等 . 杜鹃花属植物种子性状及萌发特性 [J]. 种子 ,2022,41(11):125-129,143.
Deng Y H, Luo C, Liu H, et al. Seed characters and germination characteristics of *Rhododendron* species[J]. Seed, 2022,41(11):125-129,143.

[22] 李赢 , 刘海翠 , 石晓旭 , 等 .398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报 ,2023,24(5):1311-1320.
Li Y, Liu H C, Shi X X, et al. Phenotypic diversity analysis of 398 naked barley germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(5):1311-1320.

[23] 刘佳哲 , 余小红 , 陈乃健 , 等 . 濒危植物膝柄木果实特征和种子萌发特性 [J]. 种子 ,2024,43(3):90-95.
Liu J Z, Yu X H, Chen N J, et al. Fruit characters and seed germination characteristics of endangered plant *Bhesa robusta*[J]. Seed,2024,43(3):90-95.

[24] Venable D L, Brown J S. The selective interactions of dispersal, dormancy, and seed size as adaptations for reducing risk in variable environments[J]. The American Naturalist, 1988,131(3):360-384.

[25] 董鸣 . 生态学透视 : 种群生态学 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2016:68-82.
Dong M. Ecological perspective: population ecology[M]. Beijing: Science Press,2016:68-82.

[26] Coomes D A, Grubb P J. Colonization, tolerance, competition and seed-size variation within functional groups[J]. Trends in Ecology & Evolution,2003,18(6):283-291.

[27] 杨阳 , 王海洋 , 马立辉 . 濒危植物树枫杜鹃的结实及种子萌发特性 [J]. 林业科学 ,2020,56(10):173-183.
Yang Y, Wang H Y, Ma L H. Characteristics of fruiting and seed germination of endangered plant, *Rhododendron changii*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2020,56(10):173-183.

[28] 郑雷 , 王化东 , 崔丽 , 等 . 不同种源栝楼种子性状分析 [J]. 中国农业科技导报 ,2023,25(8):88-95.
Zheng L, Wang H D, Cui L, et al. Analysis on seed traits of *Trichosanthes kirilowii* Maxim. from different provenances[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023,25(8): 88-95.

[29] 逄宏扬 , 李雪 , 李红莉 . 不同种源毛榛果实表型性状多样性分析与评价 [J]. 分子植物育种 ,2025,23(7):2330-2337.
Pang H Y, Li X, Li H L. Analysis and evaluation on diversity of fruit phenotypic traits of *Corylus mandshurica* from different provenances[J]. Molecular Plant Breeding,2025,23(7): 2330-2337.

[30] 刘舒 , 马正兵 , 于晓丽 , 等 . 不同种源桃金娘表型性状多样性研究 [J]. 广西植物 ,2023,43(10):1932-1940.
Liu S, Ma Z B, Yu X L, et al. Diversity of phenotypic traits of *Rhodomyrtus tomentosa* from different provenances[J]. Guihaia, 2023,43(10):1932-1940.

[31] 哈雪 , 张金青 , 宋于笑 , 等 .5 份草地早熟禾种子产量性状相关指标综合评价与分析 [J]. 中国草地学报 ,2023,45(12):61-71.
Ha X, Zhang J Q, Song Y X, et al. Comprehensive evaluation of seed yield traits in five varieties of Kentucky bluegrass[J]. Chinese Journal of Grassland,2023,45(12):61-71.

[32] 李天翔 , 肖亚琴 , 杨骏 , 等 . 不同种源花榈木种子表型性状变异分析 [J]. 湖南林业科技 ,2024,51(1):50-55.
Li T X, Xiao Y Q, Yang J, et al. Variation analysis on seed phenotypic traits of *Ormosia henryi* from different provenances[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2024, 51(1):50-55.

[33] 美朵卓嘎 , 沈思凡 , 曹福亮 , 等 . 不同种源江孜沙棘种子表型及萌发特性研究 [J]. 种子 ,2024,43(9):40-47.
Meiduozhuoga, Shen S F, Cao F L, et al. Study on seed phenotype and germination characteristics of different provenances of *Hippophae gyantsensis*[J]. Seed,2024,43(9): 40-47.

[34] 李识君 , 张瑶瑶 , 汪月凤 , 等 . 不同杜鹃属植物种子形态特征对萌发的影响 [J]. 山地农业生物学报 ,2024,43(6):77-86.
Li S J, Zhang Y Y, Wang Y F, et al. Effects of seed morphological characteristics of different *Rhododendron* species on germination[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2024,43(6):77-86.

[35] 李颖 , 张树航 , 郭燕 , 等 .211 份板栗种质资源花序表型多样性和聚类分析 [J]. 中国农业科学 ,2020,53(22):4667-4682.
Li Y, Zhang S H, Guo Y, et al. Catkin phenotypic diversity and cluster analysis of 211 Chinese chestnut germplasms[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020,53(22):4667-4682.

[36] 董胜君 , 王若溪 , 张皓凯 , 等 . 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析 [J]. 植物资源与环境学报 ,2020,29(6):42-50.
Dong S J, Wang R X, Zhang H K, et al. Analysis on diversity of fruit phenotypic characters of *Armeniaca mandshurica* from different provenances[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2020,29(6):42-50.

[37] 张翠琴 , 姬志峰 , 林丽丽 , 等 . 五角枫种群表型多样性 [J]. 生态学报 ,2015,35(16):5343-5352.
Zhang C Q, Ji Z F, Lin L L, et al. Phenotypic diversity of *Acer mono* Maxim population[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(16): 5343-5352.

[38] 高张莹 , 张海峰 , 陈国平 , 等 . 核桃楸种群果核形态及地理变异 [J]. 应用与环境生物学报 ,2017,23(4):609-615.
Gao Z Y, Zhang H F, Chen G P, et al. Fruit stone morphology and geographic variation in *Juglans mandshurica* populations[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology,2017,23(4): 609-615.

[39] 李鸿雁 , 李俊 , 黄帆 , 等 . 内蒙古 78 份葱属野生种表型遗传多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报 ,2017,18(4):620-628.
Li H Y, Li J, Huang F, et al. Phenotypic diversity of 78 accessions of wild *Allium* species in Inner Mongolia[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2017,18(4):620-628.

[本文编校：谢荣秀]