

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6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.003

论文标题： 中国北方不同种源文冠果种子表型性状差异性研究

作　　者： 武龙庆，赵　明，王艺林，等

收稿日期： 2025-06-17

引文格式： 武龙庆,赵明,王艺林,等.中国北方不同种源文冠果种子表型性状差异性研究[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):25-33,55.

WU L Q, ZHAO M, WANG Y L, et al. Study on differences in seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances in northern China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):25-33,55.

相关论文推荐

Recommended articles

基于GRA的干旱半干旱区文冠果新种质综合评价

Comprehensive evaluation of *Xanthoceras sorbifolia* new germplasm in arid and semi-arid area based on GRA

配方施肥对文冠果苗木生长的影响

The effect of NPK proportional fertilization on the growth of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings

内蒙古翁牛特旗文冠果优良单株的选择

Superior individual selection of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge in Inner Mongolia Wengniute Banner

NaCl胁迫对文冠果幼苗生长性状的影响

Effects of NaCl stress on growth properties of *Xanthoceras sorbifolia*

基于AHP的干旱半干旱区丰产型文冠果优良单株选择

Effects of different substrates and different rooting accelerators on softwood cutting of *Tilia amurensis*

新疆奇台地区不同水肥条件下文冠果种实性状的差异

Differences of fruit traits of yellow horn under different water and fertilizer conditions in Qitai region of Xinjiang

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.003
http: //qks.csuft.edu.cn

中国北方不同种源文冠果种子表型性状差异性研究

武龙庆，赵　明，王艺林，赵玉红，郭彩霞
（甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000）

摘　要：【目的】系统分析不同种源文冠果种子的表型性状特征，构建科学的种质评价体系，为文冠果遗传改良、种质创新及产业化开发提供理论依据。【方法】以中国北方的甘肃、山西和山东等 12 个种源种子为试验材料，测定其种子长、种子宽和单粒质量等 10 项指标，通过单因素方差分析、Pearson 相关性分析、聚类分析和主成分分析等多方法联合分析，揭示种源间表型性状的差异、内在关联及综合优劣。【结果】不同种源文冠果种子在表型性状上存在显著差异（$P < 0.05$），其中单粒质量的变异程度最大，种形指数的变异程度最小。百粒质量与种子宽、种子长、种仁质量及单粒质量显著正相关（$P < 0.05$），而种子体积与出仁率显著负相关（$P < 0.05$）。基于聚类分析将种源划分为 3 个类群，类群Ⅰ（种源 2、3、9、11、12）为“小粒低重”型，类群Ⅱ（种源 1、7、8、10）为“中粒中重”型，类群Ⅲ（种源 4、5、6）为“大粒高重”型。主成分分析结果表明，前 3 个主成分累计贡献率达 74.05%，其中种源 4 综合得分最高（164.89 分），表现出最优的种质特性。【结论】本研究构建的“形态性状分析 - 统计模型构建 - 种质资源分类”三级评价体系，可为文冠果种质资源的科学评价和遗传改良提供新思路。种源 4 因其综合表现优异，可作为抗逆育种的优良亲本材料。

关键词：种源；文冠果；表型性状；表型变异
中图分类号：S718.46；S727.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0025-09

Study on differences in seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances in northern China

WU Longqing, ZHAO Ming, WANG Yilin, ZHAO Yuhong, GUO Caixia

(Gansu Province Academy of Water Resources Conservation Forest of the Qilian Mountains, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to systematically analyze the phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* seeds from different provenances, to construct a scientific germplasm evaluation system, and to provide a theoretical basis for genetic improvement, germplasm innovation, and industrial development of *Xanthoceras sorbifolium*.【Method】Seeds from 12 provenances (including Gansu, Shanxi, Shandong, etc.) were used as experimental materials. Ten traits, including longitudinal diameter, transverse diameter, and single seed weight, were measured. Multivariate analyses, including one-way ANOVA, Pearson correlation analysis, cluster analysis, and principal component analysis (PCA), were combined to reveal differences in phenotypic traits, internal correlations, and comprehensive performance among provenances.【Result】Significant differences in seed phenotypic traits were observed among provenances ($P < 0.05$). Single seed weight showed coefficient of variation, while seed shape index exhibited the lowest. 100-seed weight was significantly and positively correlated with transverse diameter, longitudinal diameter, kernel weight, and single seed weight ($P < 0.05$), whereas seed volume was significantly negatively correlated with kernel rate ($P < 0.05$). Cluster analysis divided the provenances into three groups: Group I (provenances 2, 3, 9, 11, 12), termed the “small-seed low-weight type”; Group II (provenances 1, 7, 8, 10), the “medium-seed medium-weight type”; and Group III (provenances 4, 5, 6), the “large-seed high-weight type”. PCA indicated that the first three principal components explained 74.05% of the cumulative variance, with provenance 4 achieving the highest comprehensive score (164.89 points), demonstrating the most superior germplasm characteristics.【Conclusion】The established “morphological trait analysis—statistical model construction—germplasm classification” three-level evaluation system provides a new framework for scientific evaluation and genetic improvement of *Xanthoceras sorbifolium* germplasm. Due to its outstanding comprehensive performance, Provenance 4 is recommended as an excellent parental material for stress-resistant breeding.

Keywords: provenance; *Xanthoceras sorbifolium* Bunge; phenotypic traits; phenotypic variation

收稿日期（Received）：2025-06-17　　**修订日期**（Revised）：2025-09-23
基金项目：甘肃省林草科技计划项目（2024kj105）；2023 年中央林业草原改革发展资金项目（GSSH202308-001）；甘肃省科技计划项目（25JRRG044）。
第一作者：武龙庆（wlq88923@163.com），硕士，工程师。　　**通信作者：**王艺林（wangyilin1973@163.com），正高级工程师。
引文格式：武龙庆 , 赵明 , 王艺林 , 等 . 中国北方不同种源文冠果种子表型性状差异性研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):25-33,55.
WU L Q, ZHAO M, WANG Y L, et al. Study on differences in seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances in northern China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):25-33,55.
* 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.

文冠果 *Xanthoceras sorbifolium* Bunge 是无患子科中极具特殊性的单型属植物，其所在的分类位置非常特别，整个属只包含文冠果这一个现存种，在无患子科演化树中占据着基部位置，为我国北方独有的灌木或落叶乔木。文冠果凭借深根系和渗透调节物质积累，能在年均温达到 -41.4 ℃极端低温的哈尔滨地区、年降水量仅有 250 mm 的干旱多石山区以及海拔处于 4 ～ 2 260 m 这个垂直梯度生境当中存活 [1-3]。它具备根系固土能力强劲、生命周期长久等特性，在黄土高原、西北荒漠这些生态环境非常脆弱的区域，发挥着极为重要的水土保持与防风固沙作用，称得上是这类生境中的先锋树种。文冠果树体形态颇为优雅，花期大概能持续 20 d，花瓣上分布着独特的紫晕斑纹，在庭院绿化以及景观营造方面有着较高的观赏价值。文冠果还是重要的木本油料植物，其种仁油脂中不饱和脂肪酸含量占了大约 90.9%，主要成分是油酸和亚油酸，蛋白质含量多，而且氨基酸组成也较为均衡，种仁蛋白的乳化性与发泡性能够契合食品工业的需求，被称作“北方油茶”[4]。

表型性状是遗传信息和环境相互作用所呈现出的一种直观体现形式，研究种子表型变异规律是林木遗传改良的重要基础所在 [5]。种子作为植物繁殖过程中最重要的部分，它的种子长、种子宽以及单粒质量等诸多性状相较于营养器官而言具备更为突出的遗传稳定性，所以这些性状也就成为种质资源评价中极为关键的指标 [6]。以往所开展的诸多研究均表明，文冠果在山西、内蒙古等集中分布的区域范围之内，其表型变异幅度明显高于不同区域之间所存在的差异，并且像种子出苗率、苗高以及地径等各类性状，在不同种源之间也都存在显著差异 [7-9]。就目前的实际情况来看，现有的诸多研究往往更多地将目光聚焦在单一区域或者仅仅是少量的种源之上，对于华北、西北以及东北等这些主要产区缺乏较为系统全面的涵盖，而且针对种仁质量、出仁率等和产量紧密相关的性状，在遗传解析方面做得还不够到位，这无疑制约了文冠果优良种质精准筛选以及高效利用的进程。

鉴于此，本研究选取中国北方的甘肃、山西和山东等 12 个地理种源的文冠果种子作为试验材料，测定其种子长、种子宽和单粒质量等共计 10 项关键的表型指标，运用单因素方差分析的方法来揭示不同种源之间变异的显著程度，同时借助 Pearson 相关分析解析性状之间的关联机制；采用聚类分析构建种质分类体系，并通过主成分分析建立多维度的评价模型。本研究目的在于清晰明确不同种源的文冠果种子表型性状的变异幅度以及分布特征，从中筛选出和产量、品质有着紧密关联的核心性状，进而识别出综合性状较为优良的种源群体，为文冠果的遗传改良、种质创新及产业化开发提供理论依据以及实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 2023 年 8 月采自甘肃、山西和山东等 12 个地理种源的文冠果种子（表 1）。采样点涵盖了中国北方文冠果的主要分布区域，包括甘肃靖远、张掖，陕西靖边等地，囊括了从东到西、从南到北的各个关键产区。在每个选定的种源地，选取 10 株生长健康、发育成熟的母树作为采样对象，以确保样本的代表性和可靠性。待种子充分成熟、果皮呈现油亮黑色时，从每株母树树冠的不同方位采集种子，每株采集量约为 2 kg。采集后的种子经过混合均匀、自然阴干至种皮变为暗褐色，剔除杂质后进行密封保存，以确保试验材料的纯度和生理活性。

为全面了解种源地的环境特征，本研究采用 GPS 技术记录采样点地理坐标，并同步调查了海拔、年均温、年降水量及无霜期等关键环境因子（表 1）。从表 1 可以看出，海拔、年均温、年降水量及无霜期变化范围依次为 50 ～ 1 600 m、5.0 ～ 13.5 ℃、130 ～ 650 mm、150 ～ 200 d，基本上覆盖了文冠果在我国北方的主要生态分布范围，充分体现了种源地生境的多样性特征，可为后续研究种子表型与环境关系奠定基础。

1.2 性状测定

从各个来源的种子混合体中随机挑选 100 粒长得好的种子，每个处理设置 3 个重复组，所有数据均以平均数计算。具体检测方法按照 GB/T 2772—1999《林木种子检验规程》的相关要求执行 [10]。使用精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺测量种子的长度（纵向最长距离）、宽度（与种子长垂直方向的最宽距离）和厚度（垂直于种子长与种子宽平面的最大厚度），根据测定指标计算种形指数（种子长 / 种子宽，精度保留 2 位小数）。

使用精度为 0.01 g 的电子天平称量单粒质量、百粒质量、种仁质量和种皮质量；种皮厚通过种子厚度（0.01 mm 精度）与种仁厚度（0.01 mm 精度，解剖镜下测量）的差值估算，精度为 0.01 mm；出仁率（种仁质量 / 单粒质量 ×100%）精度保留 2 位小数。所有这些指标的测定工作，全部由同一组经过标准化培训的人员来完成，目的是减少因为人为操作而可能产生的误差。原始数据采用 WPS 2024 表格软件进行记录，以确保数据具备可追溯性和准确性。

表 1　文冠果种子种源采集地情况

Table 1　Information on provenance collection sites of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seeds

序号 No.	种源地 Provenance site	纬度 Latitude N	经度 Longitude E	海拔 Altitude/m	平均温度 Mean temperature /℃	年降水量 Annual precipitation /mm	无霜期 Frost-free period /d
1	甘肃白银靖远县	35°33′	103°33′	1 600	7.9	197	192
2	甘肃张掖甘州区	38°55′	100°27′	1 500	8.0	130	150
3	甘肃平凉崆峒区	35°12′	106°25′	1 540	9.4	493	178
4	陕西榆林靖边县	36°58′	108°17′	1 350	9.4	404	173
5	山东淄博临淄区	35°55′	117°32′	50	13.5	650	200
6	甘肃庆阳西峰区	35°15′	106°25′	1 422	10.0	500	160
7	辽宁阜新彰武县	42°01'	121°40'	146	7.6	481	150
8	新疆沙湾市	43°34′	85°07′	480	5.0	200	175
9	内蒙古赤峰翁牛特旗	41°17′	116°21′	1 000	7.8	400	160
10	山西吕梁方山县	36°43′	110°22′	1 300	8.9	520	165
11	陕西杨陵区	34°27′	108°08′	860	10.0	646	190
12	河北张家口蔚县	39°30′	113°50′	860	9.0	440	176

1.3　数据处理

采用 SPSS 29.0 软件对不同种源文冠果种子的表型性状数据进行单因素方差分析，应用 Pearson 相关分析法分析不同种源间表型性状的差异显著性，并借助 LSD 法进行多重比较。基于欧氏距离平方和的组间平均联接法进行系统聚类分析，对不同种源进行遗传相似性分类，构建种质资源聚类树状图。通过主成分分析（PCA）提取主成分并确定关键性状指标，再根据主成分的特征值和贡献率计算综合得分，最终依据综合得分对种源进行排序和优劣评价。使用 Origin 2022 软件绘制性状相关性矩阵热图，分析性状间的正负相关关系及显著程度。在开展数据处理前，预先对原始数据进行 Z-score 标准化处理，消除量纲差异可能对分析结果产生的影响。

2　结果与分析

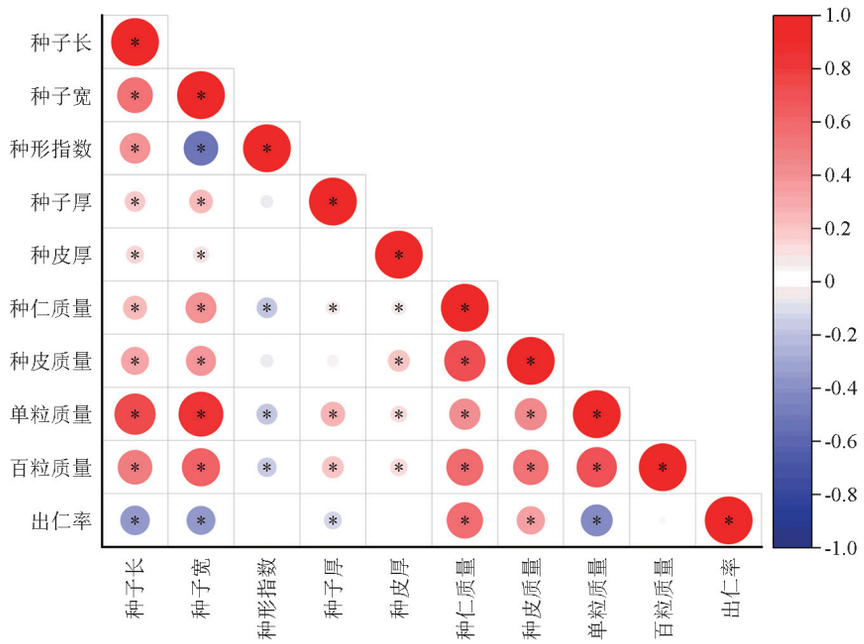
2.1　不同种源文冠果种子表型性状相关性分析

对 12 个种源文冠果种子的 10 项表型性状进行 Pearson 相关性分析（图 1），结果表明，种子长、种子宽均与单粒质量呈显著正相关（$P < 0.05$），种子长、种子宽、种仁质量、单粒质量均与百粒质量呈显著正相关（$P < 0.05$），说明在不同种源中，种子越大通常越重。然而，种形指数与百粒质量呈显著负相关（$P < 0.05$），出仁率与种子长、种子宽、单粒质量呈显著负相关（$P < 0.05$），这是因为较大体积的种子种皮比例较高，导致出仁率相对较低。此外，种皮厚与种仁质量、种皮质量呈显著正相关（$P < 0.05$），表明种皮的发育程度与种仁的充实程度之间存在密切关系。

2.2　不同种源文冠果种子表型性状变异分析

对 12 个种源文冠果种子的 10 项表型性状进行方差分析（表 2），结果表明种源间在种子长、种子宽、种形指数、种子厚、种皮厚、种仁质量、种皮质量、单粒质量、百粒质量及出仁率上均存在显著差异（$P < 0.05$）。10 项性状的均值分别为 14.57 mm、13.25 mm、1.09、10.94 mm、0.73 g、0.49 g、0.47 g、1.02 g、96.48 g、50.56%，其中单粒质量变异系数最大，变幅为 0.80 ～ 1.56 g，种形指数变异系数最小，变幅为 1.02 ～ 1.13，表明质量性状的遗传分化程度高于形态性状。种子长变幅为 13.33 ～ 17.21 mm（种源 12 与种源 4 差异显著），百粒质量变幅达 78.32 ～ 133.62 g（种源 12 与种源 4 分别为最低和最高值），出仁率在 37.25% ～ 58.55% 之间波动（种源 4 最低，种源 6

最高）。方差值显示，百粒质量（406.414）和出仁率（40.953）的离散程度最大，进一步印证质量性状是种源间变异的主要指标。综合变异系数与极差分析，单粒质量、百粒质量和种仁质量可作为文冠果优良种源筛选的核心指标，而种形指数因稳定性高，可作为辅助的鉴别指标。



* 表示相关性在 $P < 0.05$ 水平显著相关。* indicates significant correlation at the $P < 0.05$.

图 1 不同种源文冠果种子表型性状相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium Bunge* from different provenances

2.3 不同种源文冠果种子表型性状与环境因子的相关性分析

对 12 个地理种源文冠果表型性状与纬度、经度和海拔等环境因子进行 Pearson 相关性分析（图 2）。结果表明，种子百粒质量与年均温呈显著正相关（$P < 0.05$），种仁质量与年均温呈正相关（$P < 0.05$），说明种子质量受热量供应的显著影响，年均温升高可明显提高百粒质量和种仁质量；而纬度与百粒质量呈显著负相关（$P < 0.05$），表明高纬度地区可能因热量不足影响种子增重。海拔与种子长、种子宽的相关性未达显著水平（$P > 0.05$），但海拔 50 ～ 1600 m 对应的种源间单粒质量变异系数达 23.36%，暗示海拔可能通过影响局部气候间接调控种子发育。年降水量与出仁率呈显著正相关（$P < 0.05$），与种皮质量呈显著负相关（$P < 0.05$），表明湿度条件可能影响种皮发育。无霜期与种子长、种子宽呈显著正相关性（$P < 0.05$），说明生长季长度对种子形态建成有重要影响。

2.4 不同种源文冠果种子表型性状聚类分析

以 10 项表型性状为变量，对 12 个地理种源进行系统聚类分析（图 3），结果将其划分为 3 个特征类群（图 3）。类群 Ⅰ 包含种源 2、9、11、3、12，具有“小粒低重”特征，其种子长、种子宽和百粒质量等指标均较低，出仁率处于中等水平；类群 Ⅱ 包括种源 8、7、1、10，表现为“中粒中重”特征，种子长、种子宽、单粒质量和百粒质量等各项指标居中，但出仁率显著低于类群 Ⅰ 和Ⅲ（$P < 0.05$）；类群Ⅲ由种源 6、5、4 组成，呈现“大粒高重”特征，种子长、种子宽、单粒质量和百粒质量均为最大，其中种源 4 的百粒质量达 133.62 g，显著高于其他类群（$P < 0.05$），但出仁率因种皮较厚而相对较低。方差分析表明（表 3），3 个类群在种子长、种子宽、单粒质量和百粒质量等主要性状在组间存在显著差异（$P < 0.05$），而种形指数和出仁率差异不显著。

2.5 不同种源文冠果种子性状主成分分析

对不同种源文冠果种子 10 项表型指标进行 PCA 处理，筛选出特征值大于 1 的前 3 个主成分，其累计贡献率达 74.05%，有效整合了种子形态、重量及品质的关键表型信息（表 4）。其中第 1 主成分的特征值为 3.96，贡献率为 39.59%，在种子长、种子宽、单粒质量、百粒质量和种仁质量这些方

表 2 不同种源文冠果种子表型性状方差分析 †

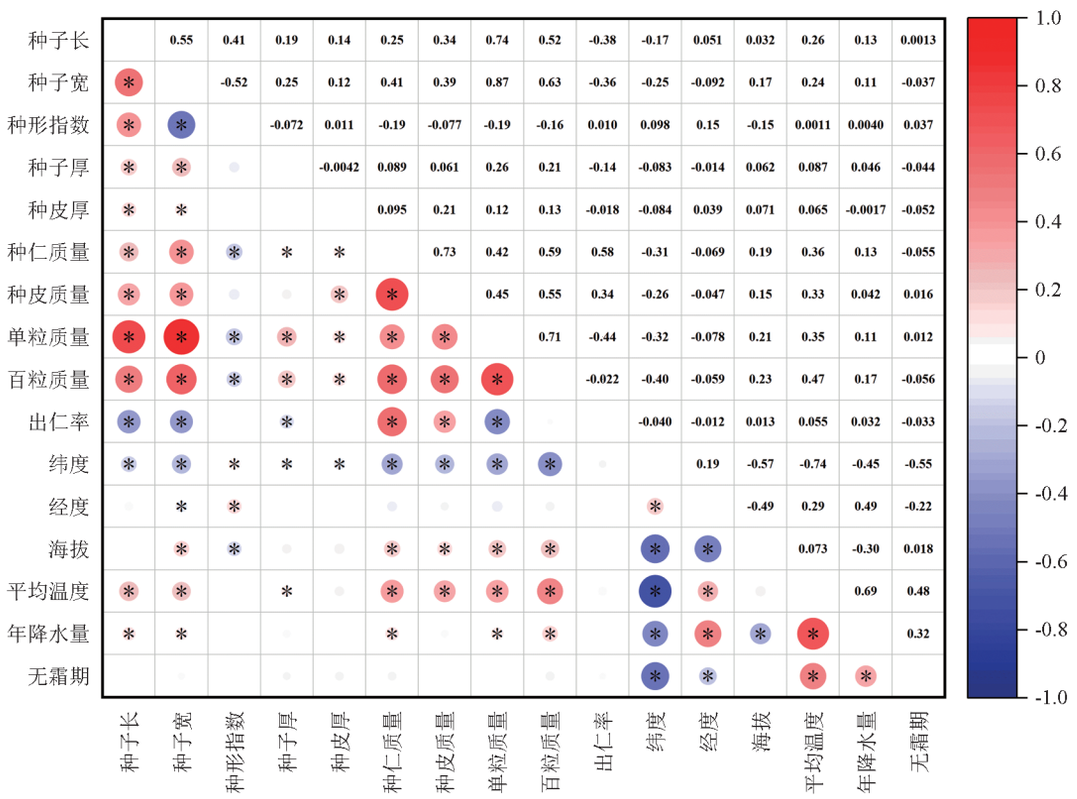
Table 2 Variance analysis of seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances

种源 Provenances	种子长 Longitudinal diameter /mm	种子宽 Transverse diameter /mm	种形指数 Seed shape index	种子厚 Seed thickness /mm	种皮厚 Seed coat thickness /mm	种仁质量 Kernel weight /g	种皮质量 Seed coat weight /g	单粒质量 Single grain weight/g	百粒质量 100-grain weight /g	出仁率 Kernel rate /%
1	13.89±1.18 de	12.95±1.16 d	1.08±0.12 bcd	10.70±0.48 bc	0.76±0.11 a	0.47±0.08 de	0.48±0.08 c	0.98±0.17 d	93.99±0.18 e	49.60±10.89 cd
2	13.52±1.25 ef	12.06±1.31 e	1.13±0.11 b	9.73±0.88 c	0.76±0.11 a	0.47±0.10 def	0.48±0.08 c	0.85±0.17 de	81.77±0.18 j	57.13±15.89 ab
3	13.48±1.37 ef	12.07±1.18 e	1.12±0.13 ab	10.16±0.92 bc	0.70±0.12 bc	0.37±0.10 h	0.38±0.09 f	0.85±0.17 ef	79.64±0.19 k	46.43±16.90 de
4	17.21±1.36 a	15.67±1.18 a	1.10±0.09 abc	12.39±1.21 ab	0.78±0.12 a	0.57±0.14 c	0.59±0.12 a	1.56±0.25 a	133.62±0.18 a	37.25±11.59 f
5	15.96±1.07 b	14.22±1.12 bc	1.13±0.11 a	11.84±1.05 abc	0.74±0.09 ab	0.67±0.14 b	0.61±0.10 a	1.32±0.23 b	126.06±0.15 b	52.20±11.96 cd
6	16.88±1.13 c	14.60±1.09 b	1.02±0.12 e	13.01±1.52 a	0.75±0.10 ab	0.72±0.16 a	0.55±0.11 b	1.28±0.25 b	125.95±0.15 c	58.55±18.84 a
7	14.21±1.13 d	12.68±0.91 d	1.13±0.12 ab	10.67±0.73 bc	0.73±0.11 ab	0.43±0.08 fg	0.41±0.06 ef	0.87±0.13 ef	88.85±0.17 f	50.09±12.22 bcd
8	13.73±1.22 def	13.12±1.07 d	1.05±0.13 cde	10.52±0.89 bc	0.67±0.16 c	0.43±0.13 efg	0.41±0.08 ef	0.90±0.16 de	85.40±0.19 g	49.33±18.31 cd
9	13.72±1.4 def	13.12±1.11 d	1.05±0.12 de	10.72±0.98 bc	0.73±0.12 ab	0.51±0.08 d	0.49±0.08 c	0.91±0.16 de	82.13±0.18 i	57.19±11.88 ab
10	15.16±1.54 c	13.87±0.88 c	1.10±0.12 abcd	11.37±0.88 abc	0.73±0.12 ab	0.44±0.11 efg	0.45±0.08 cd	1.08±0.19 c	96.77±0.18 d	41.70±12.93 ef
11	13.80±1.49 def	12.75±1.40 d	1.09±0.13 abcd	10.29±1.03 bc	0.73±0.11 ab	0.45±0.12 ef	0.43±0.10 de	0.88±0.21 e	85.31±0.15 h	54.79±22.07 abc
12	13.33±1.19 f	11.85±1.05 e	1.13±0.11 a	9.86±0.98 c	0.70±0.10 bc	0.40±0.11 gh	0.39±0.08 f	0.80±0.17 f	78.32±0.18 l	52.45±18.23 abcd
均值 Mean	14.57	13.25	1.09	10.94	0.73	0.49	0.47	1.02	96.48	50.56
变幅 Range	13.33 ～ 17.21	11.85 ～ 15.67	1.02 ～ 1.13	9.73 ～ 13.01	0.67 ～ 0.78	0.37 ～ 0.72	0.38 ～ 0.61	0.8 ～ 1.56	78.32 ～ 133.62	37.25 ～ 58.55
变异系数 CV	0.09	0.09	0.03	0.09	0.04	0.22	0.16	0.23	0.21	0.13
方差值 Variance value	1.912	1.316	0.001	1.036	0.001	0.011	0.006	0.057	406.414	40.953

† 表中同列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著，相同小写字母表示差异不显著。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the $P < 0.05$ level, while the same lowercase letters indicate no significant difference.

面的载荷表现得很显著，在很大程度上主导着种子体积与质量性状的变异情况，将其定义为“种子大小 - 质量因子”；第 2 主成分的特征值为 2.02，贡献率为 20.23%，在种仁质量和种皮质量这 2 项上有着比较高的载荷，能够反映出种仁充实度与种皮发育之间所存在的协同关系，将其定义为“种仁 - 种皮发育因子”；第 3 主成分的特征值为 1.42，贡献率为 14.23%，种形指数和种子长载荷相当突出，很好地体现了种子形态比例方面的特征，将其定义为“种形指数因子”。



* 表示相关性在 $P < 0.05$ 水平显著相关。* indicates significant correlation at the $P < 0.05$.

图 2 文冠果种子表型性状与环境因子的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge and environmental factors

基于主成分得分矩阵构建综合评价模型，公式为：

$F=(F1\times 39.59\%+F2\times 20.23\%+F3\times 14.23\%)/74.05\%$

式中：$F1=0.35ZX_1+0.44ZX_2-0.12ZX_3+0.15ZX_4+0.11ZX_5+0.34ZX_6+0.34ZX_7+0.46ZX_8+0.44ZX_9-0.07ZX_{10}$；$F2=-0.27ZX_1-0.16ZX_2-0.09ZX_3-0.15ZX_4+0.04ZX_5+0.48ZX_6+0.37ZX_7-0.22ZX_8+0.08ZX_9+0.67ZX_{10}$；$F3=0.46ZX_1-0.3ZX_2+0.79ZX_3-0.1ZX_4+0.17ZX_5+0.03ZX_6+0.15ZX_7-0.02ZX_8+0.03ZX_9+0.08\ ZX_{10}$，$ZX_i$ 为各性状 X_i 的标准化值。

从表 5 的综合得分看，种源 4 以 164.89 分排第 1，其种子长达到了 17.21 mm，种子宽为 15.67 mm，单粒质量是 1.56 g，百粒质量更是多达 133.62 g，表明其种子大小以及质量性状极为显著的。种源 5 和种源 6 分别以 163.16 分和 146.41 分紧随种源 4 之后，它们都被归入类群Ⅲ。而种源 3 的得分仅有 -115.47 分，种源 12 是 -105.73 分，2 个种源得分处于最低水平，它们的种子形态偏小，并且质量也偏轻，综合表现较差。

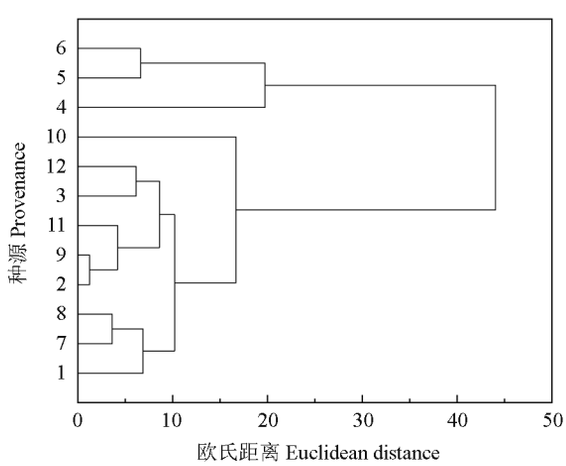


图 3 文冠果种子表型性状聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of seed phenotypic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge

表 3　不同类群文冠果种子性状特征
Table 3　Trait characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seeds traits in different groups

性状 Traits	类群Ⅰ Group Ⅰ	类群Ⅱ Group Ⅱ	类群Ⅲ Group Ⅲ	*F* 值 *F* value
种子长 Longitudinal diameter /mm	16.02±1.17 a	13.57±0.19 b	14.25±0.64 b	12.527
种子宽 Transverse diameter /mm	14.83±0.75 a	12.37±0.54 b	13.16±0.51 b	16.616
种形指数 Seed shape index	1.08±0.06 b	1.10±0.03 b	1.09±0.03 a	0.325
种子厚 Seed thickness /mm	12.41±0.59 a	10.15±0.39 b	10.82±0.38 c	25.167
种皮厚 Seed coat thickness /mm	0.75±0.02 a	0.72±0.03 b	0.72±0.04 c	1.229
种仁质量 Kernel weight /g	0.65±0.08 a	0.44±0.05 b	0.44±0.02 b	17.295
种皮质量 Seed coat weight /g	0.58±0.03 a	0.43±0.05 b	0.44±0.03 b	15.299
单粒质量 Single grain weight /g	1.39±0.15 a	0.86±0.04 b	0.96±0.09 b	30.793
百粒质量 100-grains weight /g	128.54±4.40 a	81.43±2.67 b	91.25±5.10 c	134.087
出仁率 Kernel rate /%	49.33±10.94 a	53.60±4.46 b	47.68±4.00 b	1.030

表 4　不同种源文冠果种子性状主成分分析
Table 4　Principal component analysis of seed traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances

指标 Traits	主成分 Principal component			特征值转换计算变量 Eigenvalue transformation calculated variable		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
种子长 Longitudinal diameter X1	0.70	-0.39	0.55	0.35	-0.27	0.46
种子宽 Transverse diameter X2	0.87	-0.23	-0.35	0.44	-0.16	-0.30
种形指数 Seed shape index X3	-0.23	-0.13	0.95	-0.12	-0.09	0.79
种子厚 Seed thickness X4	0.31	-0.21	-0.12	0.15	-0.15	-0.10
种皮厚 Seed coat thickness X5	0.22	0.05	0.20	0.11	0.04	0.17
种仁质量 Kernel weight X6	0.67	0.68	0.04	0.34	0.48	0.03
种皮质量 Seed coat weight X7	0.68	0.53	0.18	0.34	0.37	0.15
单粒质量 Single grain weight X8	0.92	-0.31	-0.03	0.46	-0.22	-0.02
百粒质量 100-grain weight X9	0.87	0.12	0.03	0.44	0.08	0.03
出仁率 Kernel rate X10	-0.14	0.95	0.09	-0.07	0.67	0.08
贡献率 Contribution rate /%	39.59	20.23	14.23			
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	39.59	59.82	74.05			

表 5　不同种源文冠果种子性状综合评价
Table 5　Comprehensive evaluation of seed traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge from different provenances

种源 Provenances	主成分 Principal component			综合得分 Comprehensive score	得分排名 Score ranking
	F1	F2	F3		
1	-0.35	0.12	-0.29	-15.45	5
2	-1.68	1.21	1.06	-27.15	7
3	-2.50	-0.95	0.19	-115.47	12
4	4.87	-1.97	0.84	164.89	1
5	3.23	0.77	1.39	163.16	2
6	3.38	1.70	-1.53	146.41	3
7	-1.34	-0.43	0.69	-51.81	9
8	-1.33	-0.40	-1.56	-83.18	10
9	-0.63	1.19	-1.03	-15.54	6
10	0.50	-1.63	-0.02	-13.43	4
11	-1.34	0.45	-0.18	-46.70	8
12	-2.80	-0.05	0.44	-105.73	11

3　讨　论

3.1　不同种源文冠果种子性状的差异机制与生态适应性

本研究选取 12 个不同产地的文冠果种子，对其 10 项表型性状进行了系统分析，结果显示所有性状均存在显著差异（$P < 0.05$），其中单粒质量的变异系数高达 23.36%，表明质量相关性状在区分种源遗传特性方面具有重要作用[11]。研究区域的海拔范围为 50 ～ 1 600 m，年平均温度介于 5.0 ～ 13.5 ℃，这种显著的环境梯度可能对种群的种子大小和质量产生了选择压力，而这与文冠果的生长周期密切相关，其种子发育始于花期后 30 ～ 40 d，需经历约 20 d 的细胞分裂期和 40 d 的物质积累期，无霜期延长可通过增加热量积累延长细胞分裂期并为物质积累提供更充足的时间，从而促进种子长和种子宽增大。如高海拔地区（如

甘肃靖远）因无霜期短、热量不足，种子细胞分裂和物质积累受限，趋向于较小尺寸以确保成熟；而低海拔温暖地区（如山东临淄）则因热量充足使种子积累更多生物量，表现为更大尺寸，这种变异与文冠果广泛的生态幅相关 [12]，且年平均温度与百粒质量的显著正相关（$P < 0.05$），一定程度上印证了温暖气候通过提升热量积累效率促进种子质量增加 [13]。

本研究结果表明，种子的出仁率与种子长、种子宽呈显著负相关（$P < 0.05$），即种子越大，出仁率越低。这种现象可能源于植物在种皮发育过程中采取的资源分配策略 [14]。较大的种子通常具有更厚的种皮，这可能是适应性进化的结果，旨在增强种子在恶劣环境中的生存能力，如减少水分蒸发或抵御外界侵害。然而，种皮增厚的代价是种仁比例的降低，从而导致出仁率下降。在油桐 *Verniciafordii* 等木本油料作物中也有类似现象，提示在选育高产种质时，需在种子体积与出仁率之间进行权衡 [15]。

聚类分析把种源划分为类群Ⅰ“小粒低重”、类群Ⅱ“中粒中重”和类群Ⅲ“大粒高重”三类，说明不同种源在大小和质量特征之间有关联性变化 [16]。类群Ⅲ里面的种源 4、5、6 虽出仁率比较低，但其单粒质量和百粒质量却有着显著的优势，很可能蕴含着比较高的储能潜力，适合用来做抗逆性育种的材料；而类群Ⅰ中的部分种源，如种源 2、9 的出仁率超 57%，可以当作高含油率的备选材料，为文冠果育种群体划分提供了直观的分类依据。

3.2 种子性状综合评价的科学性与育种实践意义

本研究基于主成分分析构建了一个综合评价体系，整合了种子大小与质量、种仁与种皮和种形指数等关键因子。该体系能够解释 74.05% 的表型变异，有效概括了种子在形态、质量及品质方面的核心特征。具体而言，第 1 主成分主要反映种子大小和质量，与种子的繁殖能力密切相关。较大的种子通常能够为幼苗提供更多的储备资源，从而提高其在逆境条件下的存活率 [17]，这一发现也与类群Ⅲ种源多分布于干旱区域的调查结果相吻合。第 2 主成分揭示了种仁质量与种皮质量之间的协同关系，表明种皮的发育可能与种仁的充实度存在关联，这种关联可能受到油脂合成代谢通路的影响，未来可以通过转录组学方法进一步分析相关基因的表达情况 [18]。第 3 主成分则突出了种形指数的重要性，其较低的变异系数表明该指标具有较高的稳定性，不仅可用于种质鉴定，还能在育种过程中与其他性状结合，筛选出具有特定形态特征和产量潜力的种质资源。

综合得分排名情况表明，种源 4 属于最优的种质。其各项指标包括种子长、种子宽以及单粒质量等指标全都排在首位，这无疑从侧面印证了质量性状在育种环节当中所处的核心地位，但是该种源的出仁率仅有 37.25%，这样的出仁率情况很可能会对其油脂产量形成一定的限制。所以实际用的时候要根据不同目标来选择，如是以生态修复作为导向的话，那么类群Ⅲ所具备的抗逆性优势就会显得更为突出一些；以油用作为目标的话，还需要进一步筛选出仁率和质量性状能够协同达到优化状态的单株。除此之外，种源 6 的百粒质量相比种源 4 来说略低，然而它的出仁率能够达到 58.55%，属于“高产 - 优质”平衡型种质的一个典型代表 [19]，可以作为特异性状选育的重要材料。

3.3 研究启示与未来方向

本研究涉及华北、西北和东北等文冠果的主要产区，发现不同来源的种子特征会随着地理位置改变出现变化，这解决了之前研究只集中在个别地区存在的问题。所构建的“形态性状 - 统计分析 - 聚类分组”三级筛选模型，给木本油料作物的种质评估提供了参考，在遗传背景比较复杂、表型鉴定成本偏高的物种方面（如油橄榄、核桃）尤其适用 [20]。不过文冠果表型变异的遗传基础仍不明确，后续的研究可以把简单重复序列（SSR）、单核苷酸多态性（SNP）等这类分子标记结合起来 [21-22]，对单粒质量、出仁率等性状的数量性状位点（QTL）加以解析，达成分子标记辅助选择（MAS）。另外，从环境因素分析结果看，无霜期、年降水量对于种子形态建成的影响要通过控制试验进行验证，所以建议开展同质园试验，把遗传和环境效应剥离开，更加精准地找出适应性性状的驱动因素 [23-24]。

从产业实际应用方面来看，本研究筛选出的种源 4、种源 5 以及种源 6 等能够优先被应用到区域性良种繁育基地建设工作当中。并且要针对黄土高原干旱地区、东北风沙地区等各不相同的生境，有针对性地去进行推广。与此同时，要进一步强化种源和栽培措施之间相互作用的研究，如可以借助水肥方面的调控举措来提升那些大粒种源的出仁率；或运用矮化技术手段让类群Ⅲ的幼年期缩短，进而加快育种的速度 [25]。总体来讲，本研究一方面为文冠果的遗传改良奠定了相应的

理论基础，另一方面通过构建起多维度的评价体系，促使木本油料作物种质资源研究实现了从“单一性状描述”朝着“系统遗传解析”的范式转变。

参考文献：

[1] 郑保砼 , 于丝浓 , 王改萍 , 等 . 配方施肥对文冠果苗木生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(2):101-111.
ZHENG B T, YU S N, WANG G P, et al. The effect of NPK proportional fertilization on the growth of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(2):101-111.

[2] 谢志玉 , 张文辉 , 刘新成 . 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响 [J]. 西北植物学报 ,2010,30(5):948-954.
XIE Z Y, ZHANG W H, LIU X C. Growth and physiological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings under soil drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010,30(5):948-954.

[3] 吴丹 , 徐海涛 , 姜春君 , 等 . 文冠果种质资源调查研究进展 [J]. 植物学研究 ,2022,11(6):622-629.
WU D, XU H T, JIANG C J, et al. Research progress on germplasm resources of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge[J]. Botanical Research,2022,11(6):622-629.

[4] ZANG E H, QIU B, CHEN N, et al. *Xanthoceras sorbifolium* Bunge: a review on botany, phytochemistry, pharmacology, and applications[J]. Frontiers in Pharmacology,2021,12:708549.

[5] LARIOS E, MAZER S J. Genotype×environment interaction obscures genetic sources of variation in seed size in *Dithyrea californica* but provides the opportunity for selection on phenotypic plasticity[J]. American Journal of Botany,2022,109: 1847-1860.

[6] JIANG A H, LIU J Q, GAO W R, et al. Construction of a genetic map and QTL mapping of seed size traits in soybean[J]. Frontiers in Genetics,2023,14:1248315.

[7] 张毅 , 敖妍 , 刘觉非 , 等 . 不同群体文冠果种实性状变异特征 [J]. 浙江农林大学学报 ,2019,36(5):1037-1043.
ZHANG Y, AO Y, LIU J F, et al. Variable fruit and seed characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* indifferent populations[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2019,36(5): 1037-1043.

[8] 王天斌 , 汪智军 , 靳开颜 , 等 . 新疆奇台地区不同水肥条件下文冠果种实性状的差异 [J]. 经济林研究 ,2024,42(4):109-116.
WANG T B, WANG Z J, JIN K Y, et al. Differences of fruit traits of yellow horn under different water and fertilizer conditions in Qitai region of Xinjiang[J]. Non-wood Forest Research,2024, 42(4):109-116.

[9] 张维胜 , 赵珊珊 , 张天祥 , 等 . 赤峰文冠果引种种源苗期初步选择研究 [J]. 中国农学通报 ,2015,31(28):18-22.
ZHANG W S, ZHAO S S, ZHANG T X, et al. Seedling preliminary selection of introduced provenances of Chifeng *Xanthoceras sorbifolia*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(28):18-22.

[10] 国家质量技术监督局 .GB/T 2772—1999 林木种子检验规程 [S]. 北京 : 中国标准出版社 ,1999.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 2772-1999 Inspection procedures for tree seeds[S]. Beijing: China Standards Press,1999.

[11] SHEN Z, DUAN J, MA L Y. Genetic diversity of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge germplasm using morphological traits and microsatellite molecular markers[J]. PLoS One,2017,12(6): e0177577.

[12] 许慧慧 , 刘肖娟 , 王孟珂 , 等 . 文冠果不同种质资源的叶片解剖结构分析及抗旱性评价 [J]. 浙江农林大学学报 , 2023,40(2):348-355.
XU H H, LIU X J, WANG M K, et al. Leaf anatomical structure and evaluation of drought resistance of different germplasm resources of *Xanthoceras sorbifolium*[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2023,40(2):348-355.

[13] 赵阳 , 毕泉鑫 , 句娇 , 等 . 文冠果种子及苗期生长性状地理种源变异 [J]. 林业科学研究 ,2019,32(1):160-168.
ZHAO Y, BI Q X, JU J, et al. Geographic variation of seed and seedling growing traits in *Xanthoceras sorbifolium*[J]. Forest Research,2019,32(1):160-168.

[14] WU L M, CHEN S C, WANG B. An allometry between seed kernel and seed coat shows greater investment in physical defense in small seeds[J]. American Journal of Botany,2019,106(3): 371-376.

[15] 黄瑞春 , 黄丁容 , 刘泽发 , 等 . 广西七个油桐品种综合评判分析 [J]. 湖北农业科学 ,2019,58(9):64-68.
HUANG R C, HUANG D R, LIU Z F, et al. Comprehensive evaluation and analysis on seven varieties of *Vernicia fordii* in Guangxi[J]. Hubei Agricultural Sciences,2019,58(9):64-68.

[16] 柴春山 , 戚建莉 , 王三英 , 等 . 文冠果人工种群类型划分及优良类型选择 [J]. 经济林研究 ,2018,36(4):16-26.
CHAI C S, CHI J L, WANG S Y, et al. Type division and fine type selection of artificial *Xanthoceras sorbifolia* populations[J]. Non-wood Forest Research,2018,36(4):16-26.

[17] TURNBULL L A, PAUL-VICTOR C, SCHMID B, et al. Growth rates, seed size, and physiology: do small-seeded species really grow faster?[J]. Ecology,2008,89(5):1352-1363.

[18] YANG J H, CHEN B B, MANAN S, et al. Critical metabolic pathways and SAD/FADs, WRI1s, and DGATs cooperate for high-oleic acid oil production in developing oil tea (*Camellia oleifera*) seeds[J]. Horticulture Research,2022,9:uhac087.

（下转第 55 页）

protein contents and soluble carbohydrate contents of *Artemisia cnethifolia*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(16):147-149.

[27] 王芝权 , 喻方圆 , 施钦 , 等 . 中山杉 407 ThP5CS 和 Thδ-OAT 的克隆及干旱胁迫下的表达分析 [J]. 林业科学研究 ,2018,31(4):126-134.
WANG Z Q, YU F Y, SHI Q, et al. Cloning and expression analysis of *ThP5CS* and *Thδ-OAT* gene in *Taxodium* hybrid 'Zhongshanshan 407' under drought stress[J]. Journal of Forestry Research,2018,31(4):126-134.

[28] 刘娥娥 , 宗会 , 郭振飞 , 等 . 干旱、盐和低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2000,8(3):235-238.
LIU E E, ZONG H, GUO Z F, et al. Effects of drought, salt and chilling stresses on proline accumulation in shoot of rice seedlings[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2000,8(3):235-238.

[29] 刘畅 , 孙璐 . 盐碱胁迫对玉米苗期生理指标影响的研究进展 [J]. 种子科技 ,2020,38(11):18-19.
LIU C, SUN L. Research progress on effects of saline-alkali stress on physiological indexes of maize at seedling stage[J]. Seed Science & Technology,2020,38(11):18-19.

[30] WANG S, HU X C, WEI C H, et al. Effects of Di-2-ethylhexyl phthalate on growth, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activity in *Dunaliella salina*[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,804:042039.

[31] 黄轩 , 李琬婷 , 黄晓霞 , 等 . 铅胁迫对中华常春藤叶绿素含量及荧光特性的影响 [J]. 分子植物育种 ,2019,17(16):5469-5475.
HUANG X, LI W T, HUANG X X, et al. Effects of lead stress on chlorophyll content and fluorescence characteristics of Chinese Ivy (*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)[J]. Molecular Plant Breeding,2019,17(16):5469-5475.

[32] AUNG T T, SHI F R, ZHAI Y N, et al. Acidic and alkaline conditions affect the growth of tree peony plants via altering photosynthetic characteristics, limiting nutrient assimilation, and impairing ROS balance[J]. International Journal of Molecular Sciences,2022,23:5094.

[本文编校：吴　彬]

（上接第 33 页）

[19] 侯元凯 , 黄琳 , 杨超伟 , 等 . 文冠果种粒性状相关性 [J]. 东北林业大学学报 ,2011,39(2):107-108.
HOU Y K, HUANG L, YANG C W, et al. Correlation between seed traits of *Xanthoceras sorbifolia*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(2):107-108.

[20] 秦倩 , 王楠楠 , 李金花 , 等 . 油橄榄品种表型和 SSR 标记的多样性及聚类分析 [J]. 林业科学研究 ,2016,29(5):676-681.
QIN Q, WANG N N, LI J H, et al. Diversity and cluster analysis on phenotypic traits and SSR of olive cultivars[J]. Forest Research,2016,29(5):676-681.

[21] LIN P, WANG K L, WANG Y P, et al. The genome of oil-camellia and population genomics analysis provide insights into seed oil domestication[J]. Genome biology,2022,23:14.

[22] 李思琪 , 张文臣 , 杨柳 , 等 . 基于 SSR 标记的文冠果遗传多样性分析及指纹图谱构建 [J]. 生物技术通报 ,2024,40(5):74-83.
LI S Q, ZHANG W C, YANG L, et al. Genetic diversity analysis and DNA fingerprint construction based on SSR markers for *Xanthoceras sorbifolia*[J]. Biotechnology Bulletin,2024,40(5):74-83.

[23] 邵雯雯 , 范国祯 , 何知舟 , 等 . 多地同质园实验揭示普通野生稻的表型可塑性与本地适应性 [J]. 生物多样性 ,2023,31(3):109-116.
SHAO W W, FAN G Z, HE Z Z, et al. Phenotypic plasticity and local adaptation of *Oryza rufipogon* revealed by common garden trials[J]. Biodiversity Science,2023,31(3):109-116.

[24] DE VILLEMEREUIL P, GAGGIOTTI O E, GOUDET J. Common garden experiments to study local adaptation need to account for population structure[J]. Biodiversity Science,2022,110:1005-1009.

[25] 兗攀 , 王久照 , 姜继元 , 等 . 文冠果幼树树形培养及花序调控效果 [J]. 新疆农业科学 ,2021,58(6):1095-1105.
YAN P, WANG J Z, JIANG J Y, et al. Experimental study on the tree shape culture and inflorescence regulation of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2021,58(6):1095-1105.

[本文编校：吴　彬]