北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

板栗种质资源矮化相关形态指标的综合评价

邓超丽 郭素娟

Comprehensive evaluation of morphological indicators related to dwarfism in chestnut germplasm resources

Deng Chaoli, Guo Sujuan

引用本文:
邓超丽, 郭素娟. 板栗种质资源矮化相关形态指标的综合评价[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(8):88–100. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240383
Deng Chaoli, Guo Sujuan. Comprehensive evaluation of morphological indicators related to dwarfism in chestnut germplasm resources[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8):88–100. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240383

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240383

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

蓝莓种质资源表型多样性研究
Phenotypic diversity analysis of blueberry germplasm resources
北京林业大学学报, 2020, 42(2): 124–134. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190279

北京市区国槐表型差异及综合评价研究
Phenotypic difference and comprehensive evaluation of *Sophora japonica* in Beijing urban area
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 23–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210013

西藏光核桃果实表型性状变异分析与种质资源筛选
Analysis on phenotypic variation and germplasm resource selection of wild *Amygdalus mira* in Tibet of southwestern China
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 48–57. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190422

滇藏杜英天然种质资源果实性状变异和综合评价
Variation and comprehensive evaluation of fruit traits in natural germplasm resources of *Elaeocarpus braceanus*
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 37–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240350

美洲黑杨种质资源创制和综合评价
Creation and comprehensive evaluation of *Populus deltoides* germplasm resources
北京林业大学学报, 2024, 46(8): 79–86. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220101

薄壳山核桃无性系种实性状综合评价
Comprehensive evaluation of seed and fruit traits of thin shell of pecan clones
北京林业大学学报, 2023, 45(5): 57–66. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210323

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240383

板栗种质资源矮化相关形态指标的综合评价

邓超丽　郭素娟

（北京林业大学林学院，林木资源高效生产全国重点实验室，森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】板栗是我国重要的经济林树种之一，但其矮化性状的评价指标尚不完善。本研究旨在筛选出更多有效的评价指标，以更加精准、全面地评价板栗种质矮化性状，为更好地收集、培育与利用板栗矮化种质资源提供理论依据。**【方法】**以种植于河北省迁西县的 80 份板栗种质资源为研究对象，于枝叶成熟期选择 5 株树，选取树冠东、南、西、北 4 个方向外围中部的 3 根标准结果枝，分别测定和计算其分枝角度、枝条长度、枝条直径、枝条节数、节间长度、叶柄长度、叶柄直径、尖削指数和叶形指数，采用正态性检验、相关性分析、主成分分析相结合的方法，对 80 份板栗种质的矮化相关形态指标进行筛选和综合评价，并进行矮化等级的划分与鉴定。**【结果】**(1)枝条长度、节间长度、枝条直径、枝条节数、分枝角度、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径、尖削指数总体呈较标准的正态分布。(2)分枝角度、尖削指数 2 个指标与其他形态指标相关性不显著，枝条长度、枝条直径、枝条节数、节间长度、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径之间大多显著正相关，因而筛选出这 7 个指标为主成分分析的有效评价指标。(3)通过综合评价，将 80 份板栗种质划分为矮化型(6 份)、中间型(40 份)、乔化型(27 份)、极乔化型(7 份)。**【结论】**枝条长度、枝条直径、枝条节数、节间长度、叶形指数、叶柄长度和直径可作为评价板栗矮化形态性状的有效指标，‘短枝芽变’‘紫珀’‘燕山短枝’‘遵玉’‘塔丰’‘优丰’为板栗矮化种质，研究结果将为板栗矮化种质资源的开发与利用提供依据。

关键词：板栗；矮化；表型性状；指标筛选；种质资源评价；主成分分析

中图分类号：S792.17；S664.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)08−0088−13

引文格式：邓超丽，郭素娟. 板栗种质资源矮化相关形态指标的综合评价［J］. 北京林业大学学报，2025，47(8)：88−100.
Deng Chaoli, Guo Sujuan. Comprehensive evaluation of morphological indicators related to dwarfism in chestnut germplasm resources［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8): 88−100.

Comprehensive evaluation of morphological indicators related to dwarfism in chestnut germplasm resources

Deng Chaoli　Guo Sujuan

(School of Forestry, State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］*Castanea mollissima* is one of the important economic forest species in China, but the evaluation indicators for their dwarfism traits are not yet perfect. This study aims to screen out more effective evaluation indicators to accurately and comprehensively evaluate the dwarfing traits of chestnut germplasm, providing theoretical basis for better collection, cultivation, and utilization of chestnut dwarfing germplasm resources. ［**Method**］ 80 chestnut germplasm resources planted in Qianxi County, Hebei Province of northern China were selected as the research objects. Five trees were selected during the maturity stage of branches and leaves, and three standard fruit bearing branches were selected from the outer and middle parts of the crown in four directions: east, south, west, and north. The branching angle, branch

收稿日期: 2024−11−18　**修回日期:** 2025−03−30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2200400)，林业和草原科技成果国家级推广项目(2020133118)。

第一作者: 邓超丽。主要研究方向：经济林(果树)培育与利用。Email: 1578562457@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 郭素娟，教授。主要研究方向：经济林(果树)培育与利用。Email: gwangzs@263.net　地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

length, branch diameter, pitch number, internode length, petiole length, petiole diameter, sharpness index, and leaf shape index were measured and calculated. The dwarfism related morphological indicators of 80 chestnut germplasm were screened and comprehensively evaluated using a combination of normality test, correlation analysis, and principal component analysis, and the dwarfism level was divided and identified. [**Result**] (1) The overall distribution of branch length, internode length, branch diameter, pitch number, branching angle, leaf shape index, petiole length, petiole diameter, and sharpness index showed a relatively standard normal distribution. (2) Considering that correlation between the two indicators of branching angle and sharpness index and other morphological indicators was not significant, the seven indicators of branch length, branch diameter, pitch number, internode length, leaf shape index, petiole length, and petiole diameter were selected as effective evaluation indicators for principal component analysis. (3) Through comprehensive evaluation, 80 chestnut germplasms were classified into dwarfing type (6), intermediate type (40), arborization type (27), and extremely arborization type (7). [**Conclusion**] Branch length, branch diameter, pitch number, internode length, leaf shape index, petiole length and diameter can be used as effective indicators to evaluate the morphological traits of chestnut dwarfism. *C. mollissima* 'Duanzhiyabian', *C. mollissima* 'Zipo', *C. mollissima* 'Yanshanduanzhi', *C. mollissima* 'Zunyu', *C. mollissima* 'Tafeng', and *C. mollissima* 'Youfeng' have been identified as chestnut dwarfism germplasm. The research results will provide a basis for the development and utilization of chestnut dwarfism germplasm resources.

Key words: *Castanea mollissima*; dwarf; phenotypic traits; indicator screening; evaluation of germplasm resources; principal component analysis

板栗（*Castanea mollissima*）是壳斗科（Fagaceae）栗属（*Castanea*）的落叶木本植物，是我国重要的经济林树种之一，因其果实鲜美、营养价值高而深受消费者的喜爱[1]。其在我国 24 个省（自治区、直辖市）均有种植，具有丰富的种质资源[2]。板栗具有顶端优势和顶端结实的特性，新生枝逐年伸长，导致树体高大。在生产过程中，常通过修剪来降低树体的高度以实现矮化[3]，但人工修剪的效果有限且成本过高。随着科学技术的快速发展，一些能够抑制树体生长的化学药剂逐渐被应用于矮化栽培领域，效果较为明显，但化学药剂具有一定的毒性，会残留在树体或土壤里，对环境和人们的健康都具有一定的安全隐患。相较而言，通过系统评价和筛选天然矮化种质资源，培育兼具矮化性状与优良经济性状的板栗新品种，不仅可规避化学药剂的生态风险，更能从源头上解决板栗树体高大导致的生产管理难题，实现节本增效。目前，板栗矮化栽培的相关研究在国内外均鲜有报道，国内魏振国等[4]采用发育枝的枝皮率、尖削指数、节间长度、年生长量 4 个因子建立线性函数，筛选出 2 个矮化型和 6 个乔化型板栗品种。刘庆忠等[5]根据板栗种质枝条特点，将枝条长度 < 15 cm 划分为短枝型，15 cm < 枝条长度 < 20 cm 为中长枝型，枝条长度 > 20 cm 为长枝型，板栗生产中常以此为标准，评价筛选板栗矮化品种。国外以日本栗（*C. crenata*）[6]、欧洲栗（*C. sativa*）[7]为主栽培品种，常通过修枝来控制树高，进而促进树体分枝和结实，但在矮化栽培方面未见报道。由此可见，板栗矮化品种及其相关矮化研究均存在空缺。

矮化作为经济林栽培的关键农艺性状，其形态特征一般表现为树冠小、分枝少、枝条紧凑、节间短等，具有显著的直观性和生产实用性，已成为种质评价的核心指标。Cong 等[8]研究发现，木瓜（*Pseudocydonia sinensis*）矮化砧木能够显著提高接穗的开花率。Yakushiji 等[9]也发现柿子（*Diospyros kaki*）矮化砧木的结实量更大，果实品质更高。综上，矮化砧木能够显著促进接穗的开花结实，提高产量。Liu 等[10]通过树体、节间、叶片以及内源激素含量等生物学特性，研究矮化梨（*Pyrus betulifolia*）品种'601D'及其强突变体'601T'的矮化性状，发现脱落酸的积累导致矮化梨品种表现出树体矮小、节间短、叶片宽厚的特征。贾旭梅等[11]通过植株的年生长量、节间长度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度、栅海比、叶厚度等形态及解剖结构特征，评价出八棱海棠（*Malus robusta* ）砧木'辽砧 2 号'的矮化性最强。王菁菁等[12]选择新梢生长量、节间长、叶绿素含量等形态及生理指标对新疆野苹果（*Malus pumila*）的矮化株系进行筛选评价，结果表明 GB-21-1、GB-21-2、GB-21-3 均具矮化特征。胡福初等[13]选择多个形态指标评价 120 份荔枝（*Litchi chinensis*）种质资源，发现枝梢长度、枝梢直径、节间长度、叶片长度、叶片宽度、复叶柄长度、复

叶柄直径可作为荔枝矮化评价指标。综上，矮化种质的选育常通过形态、解剖、生理 3 个生物学特性进行评价和筛选。而采用矮化相关的形态特征进行评价和筛选，可初步便捷、准确地选育出矮化植株。

为了客观、准确地评价板栗种质的矮化性状，筛选出便捷可行的评价指标，本研究以种植于河北省迁西县的 80 份板栗种质资源为研究对象，拟测定不同种质的枝条长度、枝条节数、节间长度、枝条直径、分枝角度、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径、尖削指数等指标，通过正态性检验、相关性分析、主成分分析等方法评价板栗矮化性状，旨在将 80 份板栗种质划分等级，确定板栗矮化种质与矮化评价指标，为板栗矮化种质资源的开发与利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域位于河北省迁西县北京林业大学经济林(板栗)育种与种植实践基地(40°18′N，118°54′E)。地势较为平坦，东部季风暖温带气候，夏季降水比较多(如 7 月和 8 月)，年平均气温 10.9 ℃，一年当中最冷月为 1 月，平均气温为−6.5 ℃，最热月为 7 月，平均气温 25.4 ℃，年平均降水量为 817 mm，其中 5—10 月降雨量占全年降水量的 88%。该地属于低山丘陵区，土壤类型为沙壤土，pH 值为 6.44，土壤肥力属于中等水平[14]。

1.2 试验材料

80 份板栗种质资源详见表 1，所有种质于 2013 年以接穗形式嫁接到 3 年生实生母树砧木上，至今为 11 年生的嫁接树。所有实生母树砧木均为同一种类、同一树龄、同一时间在同一条件下种植，经过十几年的生长，嫁接种质的生长特性仍未改变，因此可认为实生母树砧木对接穗生长的影响可忽略不计。在试验地，板栗按照南北方向每列种植 34 株，株行距为 4 m × 3 m，南北两侧各种植两行保护行。每列包含 3 个不同板栗种质资源，每个种质资源定植 10 株。选择生长正常、枝条健康且立地条件基本一致的板栗种质进行测定。

1.3 试验方法

1.3.1 矮化指标选取与测定

在河北省迁西县地区，8 月份是板栗生长枝叶成熟期，此时板栗新梢生长逐渐放缓，生长量占比逐渐减少，枝条新梢主要以加粗生长为主，结果枝则以生殖生长为主，枝条的形态特征基本定型[1]。8 月中旬，从每个板栗种质中选择 5 株树，对其树冠外围东、南、西、北 4 个方位的结果枝进行抽样调查，记录结果枝的长度和直径，并根据平均值确定每个方位的标准枝，进行挂牌标记。8 月下旬，参考《中国果树志·板栗卷》的方法[1]，使用直尺、游标卡尺和量角器等，分别在树冠东、南、西、北 4 个方向外围中部，测定 3 根 2 年生枝先端的第 1 个芽抽生的结果枝长度，枝条顶端、中部和基部直径，分枝角度，调查枝条节数，进而计算节间长度(枝条长度与枝条节数的比值)和尖削指数(枝条顶端直径与枝条基部直径的比值)[4]。同时，测定枝条中部叶片的长度、宽度，叶柄长度和中部直径，并计算叶形指数(叶片长度与叶片宽度的比值)。其中，枝条中部直径即为枝条直径，叶柄中部直径即为叶柄直径。每个板栗种质测定 5 株树、60 根枝条、100 个叶片，总计 4 800 根枝条，8 000 个叶片。统计各指标的最大、最小值，计算均值、标准差及变异系数，同时参考武燕奇等[15]的方法将不同指标归一化绘制成热图，以表现出不同种质的形态特征。

1.3.2 矮化指标的正态性检验与相关性分析

采用频数分布直方图统计 80 份板栗种质在 9 个指标上的分布规律，通过正态 Q-Q 图检验数据的正态性，以保证对板栗种质进行等级划分的科学性与准确性。采用皮尔逊相关系数法分析指标之间的相关性，筛选出与 80 份种质关联性强、具有代表性的指标进行综合评价。

1.3.3 基于主成分分析的板栗矮化性状综合评价及分类

参考胡福初等[13]方法进行主成分分析，根据隶属函数值及各指标所占权重计算矮化指数(D)，具体公式如下。

$$\boldsymbol{k}_{ji} = \boldsymbol{A}_{ji}/(B_j)^{1/2}$$

式中：$\boldsymbol{k}_{ji}$ 为主成分特征向量，$\boldsymbol{A}_{ji}$ 为第 j 个主成分中第 i 个指标对应的荷载向量值，B_j 为第 j 个主成分对应的特征值。

$$F_j = \sum_{j=1}^{n}\left(\boldsymbol{k}_{ji} \times R\left(X_{nj}\right)\right)$$

式中：F_j 为第 j 个主成分得分，$R(X_{ni})$为 n 种质 i 指标的隶属函数值，X_{ni} 为 n 种质 i 指标的测定值。

$$F_n = \sum_{j=1}^{m}\left(F_j \times \lambda_j\right)$$

$$\lambda_j = \frac{B_j}{\sum_{j=1}^{m} B_j}$$

式中：F_n 为第 n 个种质的综合得分，λ_j 表示主成分的权重，B_j 表示第 j 个主成分对应的特征值。

在 F_n 值的基础上进行数据转换处理，转换后的数据为矮化性状综合评价值，即为矮化指数(D)。

$$D = (F_{\mathrm{a}} - F_n)/F_{\mathrm{a}}$$

式中：F_{a} 代表着 F_n 的极限值。

表 1　80 份板栗种质资源

Tab. 1　80 chestnut germplasm resources

编号	名称	拉丁名	编号	名称	拉丁名
1	‘峪沟1号’	*C. mollissima* ‘Yugou 1 hao’	41	‘大板红’	*C. mollissima* ‘Dabanhong’
2	‘红光’	*C. mollissima* ‘Hongguang’	42	‘燕昌’	*C. mollissima* ‘Yanchang’
3	‘王厂沟’	*C. mollissima* ‘Wangchanggou’	43	‘塔丰’	*C. mollissima* ‘Tafeng’
4	‘白木1号’	*C. mollissima* ‘Baimu 1 hao’	44	‘明拣’	*C. mollissima* ‘Mingjian’
5	‘优丰’	*C. mollissima* ‘Youfeng’	45	‘燕丰’	*C. mollissima* ‘Yanfeng’
6	‘玉丰’	*C. mollissima* ‘Yufeng’	46	‘九家种’	*C. mollissima* ‘Jiujiazhong’
7	‘得水湾1号’	*C. mollissima* ‘Deshuiwan 1 hao’	47	‘迁西早红’	*C. mollissima* ‘Qianxizaohong’
8	‘柏查子1号’	*C. mollissima* ‘Baichazi 1 hao’	48	‘清丰’	*C. mollissima* ‘Qingfeng’
9	‘荔波早栗’	*C. mollissima* ‘Libozaoli’	49	‘泰栗1号’	*C. mollissima* ‘Taili 1 hao’
10	‘洞台1号’	*C. mollissima* ‘Dongtai 1 hao’	50	‘银丰’	*C. mollissima* ‘Yinfeng’
11	‘石丰’	*C. mollissima* ‘Shifeng’	51	‘杏树台1号’	*C. mollissima* ‘Xingshutai 1 hao’
12	‘花木1号’	*C. mollissima* ‘Huamu 1 hao’	52	‘烟清’	*C. mollissima* ‘Yanqing’
13	‘紫珀’	*C. mollissima* ‘Zipo’	53	‘灰拣’	*C. mollissima* ‘Huijian’
14	‘峪沟2号’	*C. mollissima* ‘Yugou 2 hao’	54	‘泰安薄壳栗’	*C. mollissima* ‘Taianbokeli’
15	‘西营1号’	*C. mollissima* ‘Xiying 1 hao’	55	‘二道关1号’	*C. mollissima* ‘Erdaoguan 1 hao’
16	‘东丰’	*C. mollissima* ‘Dongfeng’	56	‘得水湾’	*C. mollissima* ‘Deshuiwan’
17	‘贵州野毛栗’	*C. mollissima* ‘Guizhouyemaoli’	57	‘毛栗1号’	*C. mollissima* ‘Maoli 1 hao’
18	‘短枝芽变’	*C. mollissima* ‘Duanzhiyabian’	58	‘下六’	*C. mollissima* ‘Xialiu’
19	‘短花’	*C. mollissima* ‘Duanhua’	59	‘栗平’	*C. mollissima* ‘Liping’
20	‘大屯’	*C. mollissima* ‘Datun’	60	‘艾峪口’	*C. mollissima* ‘Aiyukou’
21	‘燕红’	*C. mollissima* ‘Yanhong’	61	‘西寨西沟大栗’	*C. mollissima* ‘Xizhaixigoudali’
22	‘燕昌早生’	*C. mollissima* ‘Yanchangzaosheng’	62	‘小龙湾’	*C. mollissima* ‘Xiaolongwan’
23	‘小水峪1号’	*C. mollissima* ‘Xiaoshuiyu 1 hao’	63	‘燕龙’	*C. mollissima* ‘Yanlong’
24	‘八月红’	*C. mollissima* ‘Bayuehong’	64	‘关利艳’	*C. mollissima* ‘Guanliyan’
25	‘燕山短枝’	*C. mollissima* ‘Yanshanduanzhi’	65	‘迁西职教’	*C. mollissima* ‘Qianxizhijiao’
26	‘沙峪1号’	*C. mollissima* ‘Shayu 1 hao’	66	‘王钱大栗’	*C. mollissima* ‘Wangqiandali’
27	‘杏树台短枝’	*C. mollissima* ‘Xingshutaiduanzhi’	67	‘迁西5号’	*C. mollissima* ‘Qianxi 5 hao’
28	‘燕山早丰’	*C. mollissima* ‘Yanshanzaofeng’	68	‘燕明’	*C. mollissima* ‘Yanming’
29	‘遵达栗’	*C. mollissima* ‘Zundali’	69	‘青龙23号’	*C. mollissima* ‘Qinglong 23 hao’
30	‘红栗’	*C. mollissima* ‘Hongli’	70	‘无雄花’	*C. mollissima* ‘Wuxionghua’
31	‘寸栗’	*C. mollissima* ‘Cunli’	71	‘燕宝’	*C. mollissima* ‘Yanbao’
32	‘鲁岳早丰’	*C. mollissima* ‘Luyuezaofeng’	72	‘学院燕胜’	*C. mollissima* ‘Xueyuanyansheng’
33	‘无花栗’	*C. mollissima* ‘Wuhuali’	73	‘王家大栗’	*C. mollissima* ‘Wangjiadali’
34	‘崔家堡子’	*C. mollissima* ‘Cuijiabaozi’	74	‘三屯红栗’	*C. mollissima* ‘Santunhongli’
35	‘罗田乌壳栗’	*C. mollissima* ‘Luotianwukeli’	75	‘学院早红’	*C. mollissima* ‘Xueyuanzaohong’
36	‘虎爪栗’	*C. mollissima* ‘Huzhuali’	76	‘昌杂’	*C. mollissima* ‘Changza’
37	‘遵化短刺’	*C. mollissima* ‘Zunhuaduanci’	77	‘京早丰’	*C. mollissima* ‘Jingzaofeng’
38	‘东陵明珠’	*C. mollissima* ‘Donglingmingzhu’	78	‘京暑红’	*C. mollissima* ‘Jingshuhong’
39	‘怀黄’	*C. mollissima* ‘Huaihuang’	79	‘垂枝栗’	*C. mollissima* ‘Chuizhili’
40	‘遵玉’	*C. mollissima* ‘Zunyu’	80	‘迁西壮栗’	*C. mollissima* ‘Qianxizhuangli’

根据 *D* 值频数分布直方图的规律，参考苹果[16]的分级标准，将 80 份板栗种质划分为极乔化型、乔化型、中间型、矮化型 4 个等级。

1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 进行数据处理和计算，利用 Origin 2024 软件进行正态性检验、相关性分析、主成分分析及制图。

2 结果与分析

2.1 板栗矮化相关形态指标的分析

形态指标的测定结果(表 2，图 1)显示：不同种质枝条的长度范围为 8.23 ~ 54.93 cm，最长的种质是‘垂枝栗’，最短是‘塔丰’，两者相差较大，变异系数大于正常值 0.3，其他指标的变异系数均小于 0.3，说明 80 份板栗种质的枝条长度离散程度较高；枝条节数 8 ~ 24 个，最多的种质是‘杏树台 1 号’，最少是‘王厂沟’；节间长度在 0.59 ~ 2.93 cm 之间，最长的种质是‘垂枝栗’，最短是‘短枝芽变’；枝条直径在 2.80 ~ 6.57 mm 之间，最大的种质是‘西寨西沟大栗’，最小是‘红光’；分枝角度范围为 20° ~ 135°，最大值是‘垂枝栗’，最小值是‘贵州野毛栗’。叶形指数的范围为 1.40 ~ 2.73，最大值为‘垂枝栗’，最小值为‘优丰’。叶

表 2 80 份板栗种质矮化相关形态指标的测定结果

Tab. 2 Measurement results of morphological indicators related to dwarfism in 80 chestnut germplasms

指标	最大值	最小值	均值	标准偏差	变异系数
枝条长度/cm	54.93	8.23	21.24	8.18	0.38
枝条节数	24	8	16.01	3.28	0.20
节间长度/cm	2.93	0.59	1.32	0.39	0.29
枝条直径/mm	6.57	2.80	3.95	0.63	0.16
分枝角度/ (°)	135	20	51.48	12.41	0.24
叶形指数	2.73	1.40	2.30	0.19	0.08
叶柄长度/mm	23.99	10.09	15.60	3.08	0.20
叶柄直径/mm	3.95	1.94	2.68	0.38	0.14
尖削指数	0.66	0.25	0.47	0.07	0.15

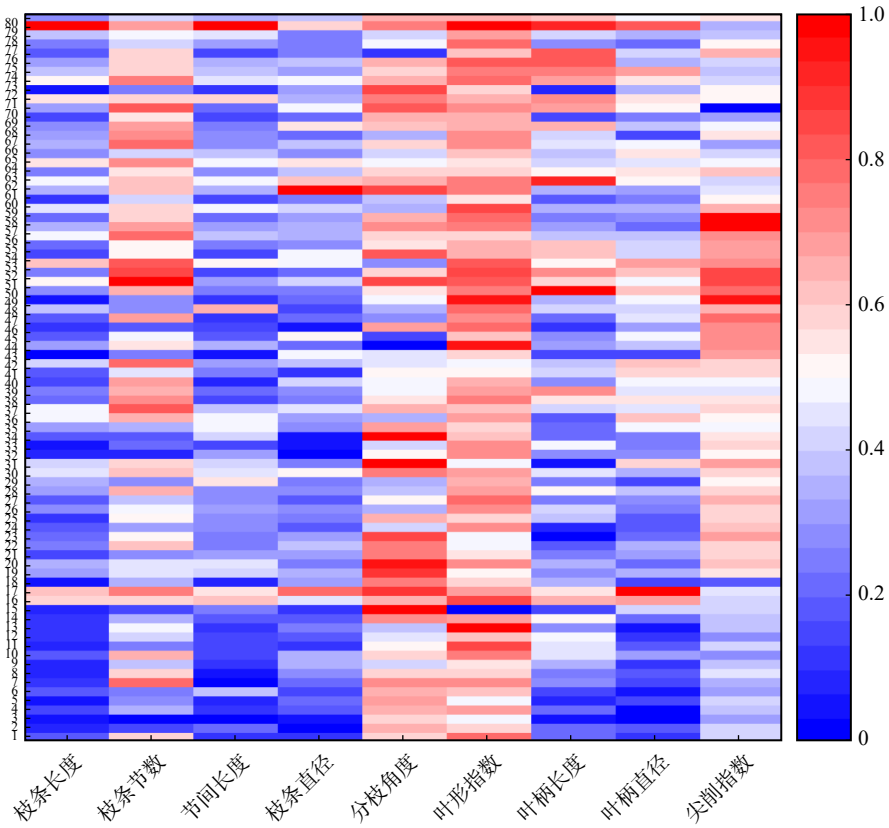


图 1 80 份板栗种质与 9 个指标标准化关系热图

Fig. 1 Heat map of standardized relationship between 80 chestnut germplasms and 9 indicators

柄长度的范围为 10.09 ~ 23.99 mm，最长的种质是‘银丰’，最短是‘小水峪 1 号’，叶柄直径在 1.94 ~ 3.95 mm 之间，最大的种质是‘贵州野毛栗’，最小是‘白木 1 号’。尖削指数的范围为 0.25 ~ 0.66，最小种质是‘西寨西沟大栗’，最大是‘学院燕胜’。综上，‘垂枝栗’在枝条长度、节间长度上均表现突出，表现为枝长、节间大、叶片长、枝条分散；‘贵州野毛栗’在分枝角度、叶柄直径上均表现突出，表现为分枝角度小、枝条紧凑、叶柄粗大。

2.2　板栗矮化相关形态指标的正态性检验

枝条长度、节间长度、枝条直径、枝条节数、分枝角度、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径、尖削指数的直方图呈中间高、两端低，表明种质分布在指标两极的数量少，大约占 10% ~ 20%(图 2)。正态 Q-Q 图结果进一步发现，数据总体呈较标准的正态分布，但也存在极个别点偏离直线，说明存在少部分种质在特定指标上特别突出(图 3)。

2.3　板栗矮化相关形态指标间的相关性分析

9 个形态指标的相关性分析结果(图 4)表明，枝条长度与枝条节数、节间长度、枝条直径、叶柄长度、叶柄直径呈极其显著正相关($P < 0.001$)，与叶形指数呈极显著相关($P < 0.01$)，与分枝角度和尖削指数相关性不显著($P > 0.05$)；枝条节数与枝条直径、叶柄长度、叶柄直径呈极其显著正相关($P < 0.001$)，与叶形指数呈显著正相关($P < 0.05$)，与节间长度、分枝角度和尖削指数相关性不显著($P > 0.05$)；节间长度与叶柄直径呈极其显著正相关($P < 0.001$)，与枝条直径、叶柄长度呈极显著正相关($P < 0.01$)，与分枝角度、尖削指数和叶形指数相关性不显著($P > 0.05$)；枝条直径与叶柄长度、叶柄直径呈极其显著正相关($P < 0.001$)，与分枝角度、尖削指数和叶形指数相关性不显著($P > 0.05$)；分枝角度仅与叶形指数呈极显著负相关($P < 0.01$)，与其他指标相关性不显著($P > 0.05$)；叶柄长度与枝条长度、枝条节数、枝条直径、叶柄直径、叶形指数呈极其显著正相关($P < 0.001$)，与分枝角度、尖削指数相关性不显著($P > 0.05$)；叶柄直径与分枝角度、尖削指数和叶形指数呈显著不相关($P > 0.05$)。综上，分枝角度、尖削指数 2 个指标与其他形态指标的相关性总体上比较差，因而选择枝条长度、枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径 7 个指标进行下一步的综合评价。

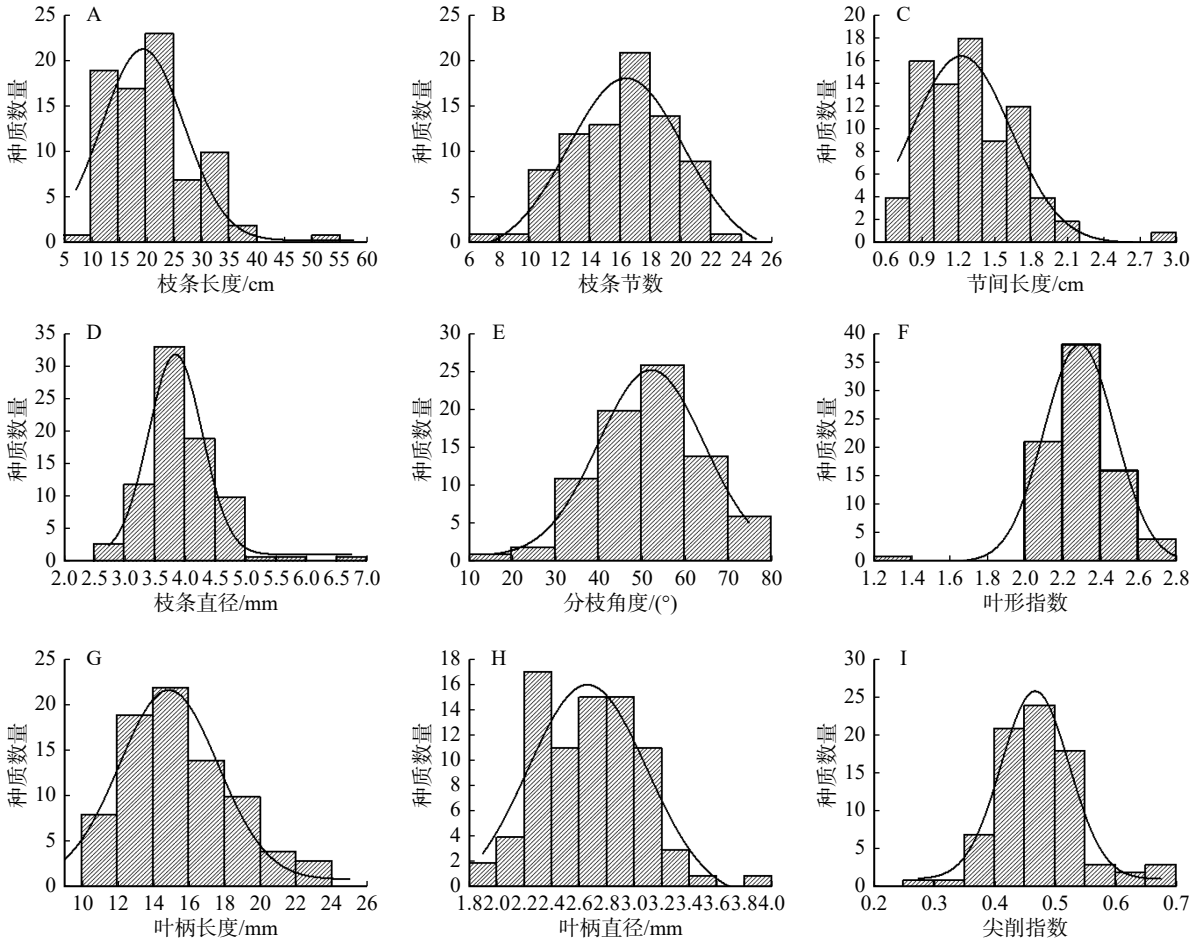


图 2　不同板栗种质 9 个形态指标的频数分布

Fig. 2　Frequency distribution of 9 morphological indicators of different chestnut germplasms

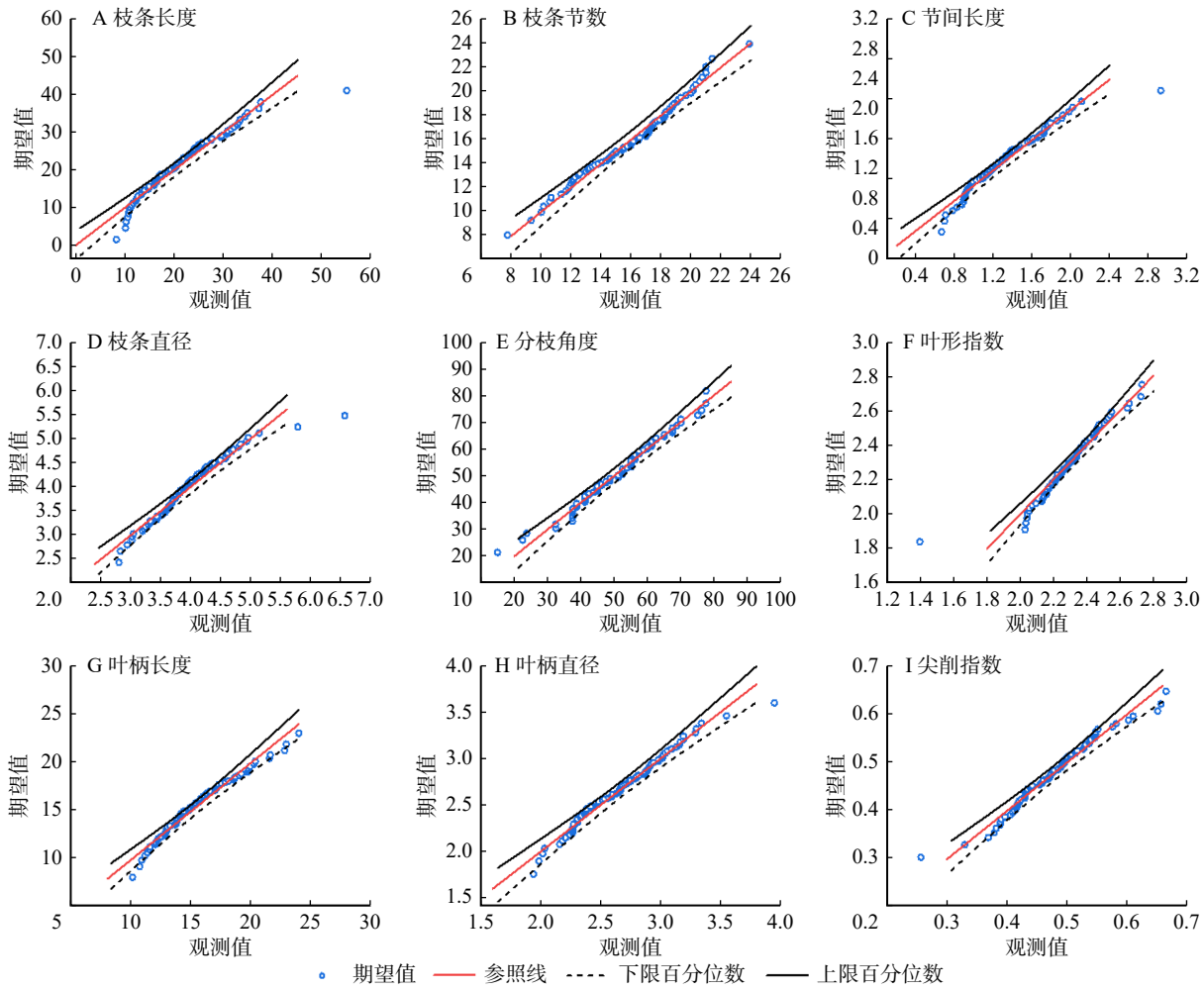
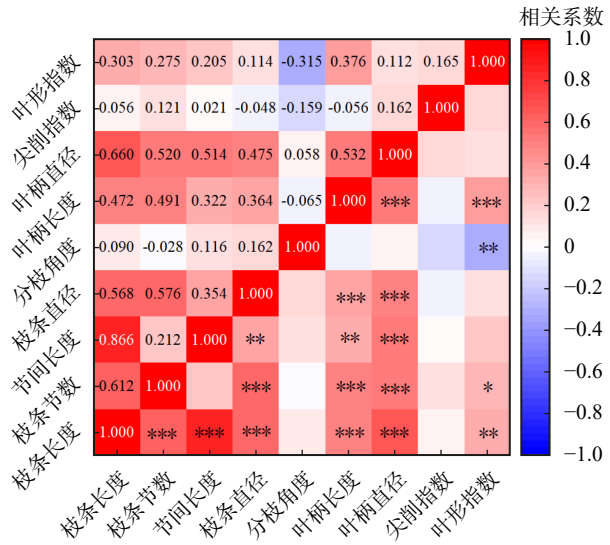


图 3 不同板栗种质 9 个形态指标的正态 Q-Q 图

Fig. 3 Normal Q-Q plots of 9 morphological indicators of different chestnut germplasms



***表示在 0.001 水平上相关性极其显著，**表示在 0.01 水平上相关性极显著，*表示在 0.05 水平上相关性显著。

图 4 9 个指标的相关性分析热图

Fig. 4 Heat map of correlation analysis for 9 indicators

2.4 基于主成分分析的板栗矮化性状综合评价

选取相关性比较强的枝条长度、枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径 7 个指标进行主成分分析，选择特征值 > 1 的 3 个主成分进行评价分析(表 3)。3 个主成分的累计方差贡献率高达 80.21%，充分代表板栗矮化性状的主要信息。第 1 主成分方差贡献率为 52.38%，充分代表板栗矮化性状的主要信息，包括枝条长度、叶柄直径等载荷 > 0.4 的指标；第 2 主成分方差贡献率为 14.65%，包括节间长度、叶形指数、叶柄长度等载荷绝对值 > 0.3 的指标；第 3 主成分方差贡献率为 13.18%，包括枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度等载荷绝对值 > 0.4 的指标。

采用 3 个主成分的特征向量系数分别建立评价模型。

$$F_1 = 0.486X_1 + 0.395X_2 + 0.345X_3 + 0.373X_4 + 0.225X_5 + 0.356X_6 + 0.415X_7$$

$$F_2 = -0.317X_1 + 0.426X_2 - 0.714X_3 + 0.193X_4 + 0.169X_5 + 0.377X_6 - 0.029X_7$$

$$F_3 = -0.005X_1 - 0.153X_2 + 0.127X_3 - 0.390X_4 + 0.839X_5 + 0.215X_6 - 0.243X_7$$

表 3　主成分的特征向量和载荷矩阵

Tab. 3　Eigenvectors and load matrices of principal components

指标	第1主成分		第2主成分		第3主成分	
	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷
枝条长度(X_1)	0.486	0.479	−0.317	0.204	−0.005	0.241
枝条节数(X_2)	0.395	0.388	0.426	−0.199	−0.153	−0.476
节间长度(X_3)	0.345	0.374	−0.714	0.374	0.127	0.585
枝条直径(X_4)	0.373	0.367	0.193	0.142	−0.390	−0.432
叶形指数(X_5)	0.225	0.207	0.169	−0.76	0.839	0.409
叶柄长度(X_6)	0.356	0.363	0.377	−0.377	0.215	−0.624
叶柄直径(X_7)	0.415	0.413	−0.029	0.198	−0.243	−0.111
特征值	1.915		1.213		1.061	
贡献率/%	52.38		14.65		13.18	
累计贡献率/%	52.38		67.03		80.21	

基于 F_1、F_2、F_3，通过函数模型评价法计算各种质综合得分(F_n)和矮化指数(D)，根据 D 值的频数分布直方图(图 5)，将 80 份板栗种质划分为 4 个等级(表 4)。具体包括：Ⅰ级，极乔化型，$D < 0.4$，种质数量为 7 份，占 8.75%，代表种质有‘垂枝栗’‘贵州野毛栗’‘灰拣’等，其枝条长度均 > 30 cm，枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径数值总体偏高，说明枝条生长健壮，叶片大，叶柄长粗；Ⅱ级，乔化型，$0.4 \leqslant D < 0.6$，种质数量为 27 份，占 33.75%，代表种质有‘三屯红栗’‘明拣’‘燕山早丰’等，其枝条长度均 > 20 cm 且 ⩽ 30.65 cm，枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径数值总体较高，说明枝条长势较旺盛，叶片较大，叶柄较长；Ⅲ级，中间型，$0.6 \leqslant D < 0.8$，种质数量为 40 份，占 50%，代表种质有‘遵达栗’‘鲁岳早丰’‘八月红’等，其枝条长度 > 15 cm 且 ⩽ 20.27 cm，枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径数值总体中等，说明枝条长势中等，叶片较小，叶柄较短；Ⅳ级，矮化型，$D \geqslant 0.8$，种质数量为 6 份，占比为 7.5%，代表种质有‘短枝芽变’‘紫珀’‘燕山短枝’‘遵玉’‘塔丰’‘优丰’，其枝条长度均 < 15 cm，枝条节数、节间长度、枝条直径、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径数值总体小，说明枝条长势弱，叶片偏小，叶柄短(表 5)。此外，除了矮化型的枝条直径(3.35 ~ 4.08 mm)处于中间型(3.04 ~ 4.22 mm)与乔化型(3.82 ~ 4.80 mm)之间以外，其他指标的范围呈随乔化程度增大而增大的趋势，这些指标与矮化程度呈负相关。综上，4 个等级特点鲜明，特别是矮化型与极乔化型的代表种质；而矮化型的‘短枝芽变’‘紫珀’‘燕山短枝’‘遵玉’‘塔丰’‘优丰’为板栗矮化种质。这说明采用枝条长度、节间长度等形态指标进行综合评价和分级是科学可行的，可为板栗矮化性状的鉴定和筛选提供可量化计算的方法。

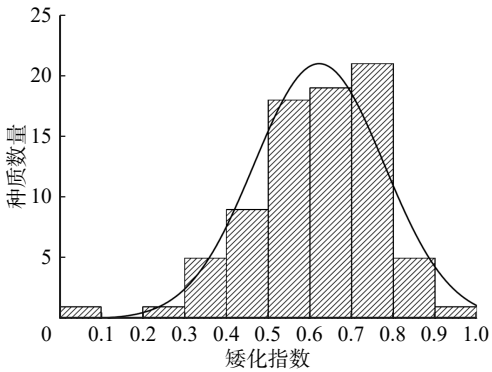


图 5　矮化指数的频数分布

Fig. 5　Frequency distribution of dwarfism index

3　讨　　论

板栗是木本植物，在没有人为干扰的良好环境下，能够生长至几十米甚至几百米高，易形成树大果少的现象。在果实采收期，人们常使用长竹竿将果实打落，以提高收益，但该行为对树体易造成损伤、营养流失以及降低翌年结实率等后果。由此可见，树体高度调控已逐渐成为现代集约化果树栽培体系中亟待解决的关键性技术瓶颈。通过遗传改良或砧穗组合优化实现植株矮化表型，可有效缓解树冠层间光照竞争及地下部根系冗余生长导致的营养分配失衡问题。值得关注的是，矮化栽培模式在提升土地资源利用效率与单位面积经济产量方面具有显著优势，其冠层结构优化有利于实施标准化树形培育和精准修剪作业，同时改善果实空间分布格局，显著降低人工采收难度与机械损伤率[17]。综合上述优势，矮化栽培体系的构建与优良矮化基因型的选育，已成为突破传统乔化栽培模式限制、实现果树产业转

表 4 不同板栗种质的评价结果及分级

Tab. 4 Evaluation results and grading of different chestnut germplasms

种质编号	种质名称	F_1	F_2	F_3	F_n	D	类别(占比)
79	‘垂枝栗’	2.201	−0.426	−0.002	1.359	0.029	
17	‘贵州野毛栗’	1.832	−0.232	−0.402	1.088	0.223	
53	‘灰拣’	1.627	−0.462	−0.199	0.945	0.325	
16	‘东丰’	1.581	−0.474	−0.100	0.929	0.336	极乔化型(8.75%)
62	‘小龙湾’	1.585	−0.562	−0.494	0.851	0.392	
71	‘泰栗1号’	1.455	−0.386	−0.179	0.850	0.393	
73	‘王家大栗’	1.526	−0.534	−0.340	0.843	0.398	
64	‘关利艳’	1.386	−0.264	−0.263	0.813	0.419	
36	‘虎爪栗’	1.258	−0.275	0.052	0.780	0.443	
51	‘杏树台1号’	1.485	−0.648	−0.431	0.780	0.443	
74	‘三屯红栗’	1.365	−0.576	−0.332	0.732	0.477	
37	‘遵化短刺’	1.302	−0.387	−0.293	0.731	0.478	
30	‘红栗’	1.278	−0.397	−0.200	0.729	0.479	
61	‘西寨西沟大栗’	1.318	−0.421	−0.369	0.723	0.484	
42	‘燕昌’	1.261	−0.278	−0.359	0.713	0.490	
59	‘栗平’	1.219	−0.491	0.040	0.713	0.491	
56	‘得水湾’	1.221	−0.388	−0.219	0.691	0.507	
48	‘清丰’	1.073	−0.386	0.295	0.679	0.515	
31	‘寸栗’	1.040	−0.098	0.060	0.671	0.521	
70	‘无雄花’	1.349	−0.649	−0.598	0.664	0.526	
50	‘银丰’	1.342	−0.759	−0.579	0.642	0.541	乔化型(33.75%)
66	‘王钱大栗’	1.218	−0.553	−0.327	0.640	0.543	
75	‘学院早红’	1.264	−0.719	−0.390	0.630	0.550	
35	‘罗田乌壳栗’	0.966	−0.197	0.141	0.618	0.559	
78	‘京暑红’	1.053	−0.402	0.002	0.615	0.561	
80	‘迁西壮栗’	1.133	−0.460	−0.260	0.613	0.562	
68	‘燕明’	1.220	−0.560	−0.529	0.608	0.566	
65	‘迁西职教’	1.037	−0.337	−0.060	0.606	0.567	
52	‘烟清’	1.275	−0.810	−0.506	0.601	0.570	
63	‘燕龙’	1.111	−0.416	−0.341	0.593	0.576	
19	‘短花’	0.971	−0.236	−0.042	0.584	0.583	
28	‘燕山早丰’	1.097	−0.559	−0.279	0.568	0.594	
39	‘怀黄’	1.158	−0.644	−0.462	0.562	0.598	
44	‘明拣’	1.021	−0.648	0.074	0.561	0.599	
57	‘毛栗1号’	1.038	−0.543	−0.119	0.559	0.601	
29	‘遵达栗’	0.875	−0.303	0.241	0.556	0.603	
20	‘大屯’	0.950	−0.449	0.069	0.550	0.607	中间型(50%)
38	‘东陵明珠’	1.095	−0.668	−0.403	0.526	0.624	
55	‘二道关1号’	1.032	−0.576	−0.339	0.513	0.634	
45	‘燕丰’	0.950	−0.389	−0.255	0.508	0.637	

表 4(续)

Tab.4 (continued)

种质编号	种质名称	F_1	F_2	F_3	F_n	D	类别(占比)
26	‘沙峪1号’	0.947	−0.529	−0.104	0.505	0.639	
67	‘迁西5号’	0.990	−0.603	−0.187	0.506	0.639	
22	‘燕昌早生’	0.900	−0.296	−0.209	0.499	0.643	
41	‘大板红’	0.882	−0.386	−0.183	0.476	0.660	
54	‘泰安薄壳栗’	1.022	−0.587	−0.506	0.477	0.660	
76	‘昌杂’	1.064	−0.685	−0.580	0.474	0.661	
58	‘下六’	0.905	−0.576	−0.101	0.470	0.665	
10	‘洞台1号’	0.968	−0.654	−0.343	0.456	0.674	
77	‘京早丰’	0.837	−0.556	0.057	0.454	0.675	
47	‘迁西早红’	0.937	−0.531	−0.368	0.454	0.676	
21	‘燕红’	0.891	−0.548	−0.194	0.450	0.679	
23	‘小水峪1号’	0.761	−0.322	−0.017	0.435	0.689	
34	‘崔家堡子’	0.785	−0.547	0.074	0.425	0.697	
49	‘燕宝’	0.710	−0.245	0.007	0.420	0.700	
69	‘青龙23号’	0.798	−0.480	−0.170	0.405	0.711	
24	‘八月红’	0.638	−0.346	0.258	0.396	0.717	
6	‘玉丰’	0.785	−0.711	−0.023	0.379	0.730	中间型(50%)
14	‘峪沟2号’	0.725	−0.474	−0.089	0.372	0.734	
60	‘艾峪口’	0.634	−0.430	0.212	0.370	0.736	
32	‘鲁岳早丰’	0.570	−0.358	0.244	0.347	0.752	
1	‘峪沟1号’	0.749	−0.617	−0.183	0.346	0.753	
15	‘西营1号’	0.646	−0.406	−0.119	0.328	0.766	
72	‘学院燕胜’	0.571	−0.473	0.229	0.324	0.769	
12	‘花木1号’	0.682	−0.675	−0.019	0.319	0.772	
7	‘得水湾1号’	0.467	0.134	−0.091	0.315	0.775	
11	‘石丰’	0.757	−0.703	−0.322	0.313	0.776	
8	‘柏查子1号’	0.703	−0.601	−0.212	0.314	0.776	
9	‘荔波早栗’	0.583	−0.345	−0.023	0.314	0.776	
33	‘无花栗’	0.671	−0.494	−0.258	0.306	0.782	
27	‘杏树台短枝’	0.693	−0.536	−0.313	0.303	0.783	
46	‘九家种’	0.700	−0.849	−0.018	0.299	0.786	
2	‘红光’	0.655	−0.747	−0.022	0.288	0.795	
4	‘王厂沟’	0.635	−0.646	−0.062	0.286	0.796	
3	‘白木1号’	0.523	−0.535	0.234	0.283	0.798	
5	‘优丰’	0.605	−0.526	−0.231	0.261	0.814	
43	‘塔丰’	0.534	−0.578	0.019	0.246	0.824	
40	‘遵玉’	0.446	−0.420	0.181	0.244	0.825	矮化型(7.5%)
25	‘燕山短枝’	0.537	−0.446	−0.174	0.240	0.828	
13	‘紫珀’	0.444	−0.353	−0.038	0.219	0.843	
18	‘短枝芽变’	0.173	−0.367	0.156	0.072	0.949	

表 5 不同指标在不同类型中的等级范围

Tab. 5 Level range of different indicators in different types

指标	矮化型	中间型	乔化型	极乔化型
枝条长度/cm	8.23 ~ 14.65	14.16 ~ 20.27	20.48 ~ 30.65	30.86 ~ 54.93
枝条节数	12.25 ~ 13.17	13.83 ~ 17.25	17.16 ~ 20.33	18.16 ~ 23.91
节间长度/cm	0.69 ~ 0.85	0.89 ~ 1.36	1.24 ~ 1.91	1.98 ~ 2.93
枝条直径/mm	3.35 ~ 4.08	3.04 ~ 4.22	3.82 ~ 4.80	4.62 ~ 5.78
叶形指数	2.04 ~ 2.28	2.16 ~ 2.46	2.29 ~ 2.44	2.31 ~ 2.73
叶柄长度/mm	11.48 ~ 15.37	14.18 ~ 18.69	14.89 ~ 20.34	16.02 ~ 22.53
叶柄直径/mm	2.02 ~ 2.90	2.16 ~ 3.02	2.68 ~ 3.33	2.88 ~ 3.95

型升级的重要技术路径。

在经济林乔木树种矮化机理研究领域，苹果、梨、樱桃(*Prunus avium*)及桃(*Prunus persica*)等典型树种的矮化砧木与中间砧应用已形成系统化研究体系。研究表明，矮化植株的表型特征主要表现为树体紧凑性显著增强，具体表征为冠幅缩小、新梢节间长度缩短、茎干粗度增加等形态学特征[18]，这为直观判别矮化效应提供了形态学依据。值得注意的是，由于经济林乔木多采用嫁接繁育以保持优良种质特性[19]，其树形易受人工修剪干扰，难以真实反映树体自然生长状态。但相关研究[20]证实，枝条构型参数与植株生长势存在显著相关性，提示营养器官的形态建成可作为生长势评估的间接指标。叶片作为光合代谢的核心器官，其形态塑性参数对环境胁迫具有高度敏感性，因叶形指数兼具稳定性与敏感性特征，被确立为本研究的核心评价指标[21]。叶柄作为维管束运输的关键通道，其解剖结构特征与物质运输效率密切相关。前期研究证实，桑树(*Morus alba*)叶柄维管束发达程度与抗旱性呈正相关[22]，杧果(*Mangifera indica*)叶柄形态特征与矮化性状密切相关[23]，这为本研究采用叶柄作为辅助评价指标提供了理论依据。基于器官形态相关性理论，本研究构建了包含枝条构型参数、叶形指数及叶柄形态特征的三级评价体系，对 80 份板栗种质资源进行量化评估，通过整合营养器官的形态–结构–功能关联特征，实现了对矮化表型的多维度解析。

具体来说，本研究通过多维度形态指标筛选与统计分析，构建了板栗矮化种质综合评价体系。首先采用皮尔逊相关系数法对 9 个候选形态指标进行关联性分析，发现分枝角度和尖削指数与其他指标参数无显著相关性($P > 0.05$)，遂予以剔除。通过主成分分析法提取累计贡献率达 80.21% 的 7 个关键指标，运用 D 值法结合正态分布理论将 80 份种质划分为极乔化型($D < 0.4$)、乔化型($0.4 \leqslant D < 0.6$)、中间型($0.6 \leqslant D < 0.8$)、矮化型($D \geqslant 0.8$)4 个等级，并确立各等级形态指标阈值范围。结果表明：矮化型种质枝条长度(8.23 ~ 14.65 cm)与《板栗卷》[1]界定的短枝型标准(< 15 cm)高度吻合；中间型(14.16 ~ 20.27 cm)对应中长枝型(> 15 cm 且 ⩽ 20 cm)，乔化型(20.48 ~ 30.65 cm)与极乔化型(30.86 ~ 54.93 cm)则对应长枝型(> 20 cm)分类标准[5]。节间长度随矮化程度加深呈梯度递减趋势，矮化型低于其他类型。值得注意的是，板栗矮化种质枝条直径呈现非线性变化特征，其值介于中间型与乔化型之间，这与苹果等经济林树种呈短粗的枝条特征相似[10]。叶部形态分析显示，叶形指数与矮化等级呈负相关，矮化型低于极乔化型，印证了矮化种质叶片趋向短宽形态的特征[24]。叶柄形态参数亦呈现规律性变化，其长度和直径均与矮化程度呈负相关。上述结果表明，板栗矮化种质通过抑制营养器官生长势实现矮化表型，具体表现为枝条短而粗、叶片宽短、叶柄纤细的差异化表型特征，这也确定了板栗矮化育种形态特征的预选指标。

本研究通过构建包含 7 个形态指标的综合评价体系，对 80 份板栗种质进行矮化性状系统评估。经量化分析，筛选获得‘短枝芽变’‘紫珀’‘燕山短枝’‘遵玉’‘塔丰’及‘优丰’等 6 份典型矮化种质，为板栗矮化砧木的培育与利用提供种质基础。其中，‘紫珀’经品种审定确认为矮化类型[25]，‘遵玉’新梢长度仅 14.8 cm，符合矮化品种标准[26]，‘燕山短枝’则因枝条短粗特征被认定为矮化类型[27]，上述结果与本评价体系的分级结论一致。新增矮化种质‘短枝芽变’‘塔丰’和‘优丰’表现出显著矮化表型，其节间长度较乔化型缩短，节位数减少，该特征与刘爱玉[28]在棉花(*Bombax ceiba*)中观察到的节数减少、节间缩短的矮化生物学特征一致。通过 D 值法结合正态分布划分，还明确‘遵达栗’‘鲁岳早丰’‘八月红’为中间型种质，‘三屯红栗’‘明拣’‘燕山早丰’归属乔化型，‘垂枝栗’‘贵州野毛栗’‘灰拣’则被界定为极乔化型，该分类结果与田间观测数据吻合。研究表明，基于多指标融合的综合

评价方法可有效区分板栗种质矮化等级，但其 4 个类型间的指标阈值存在部分交叉，推测是当前评价样本量有限所致。后续研究需扩充种质规模以提升评价精度，并建议结合解剖结构分析（如维管束发育特征）和生理指标检测（如内源激素含量），从形态发生机制层面深化矮化种质的鉴定标准，以期为板栗矮化资源的评价、创新利用及分子育种提供理论依据。

4 结　　论

本研究针对板栗缺乏矮化种质资源评价、培育与利用等问题，采用正态性检验、相关性分析、主成分分析对枝条长度、枝条节数、枝条直径、节间长度、分枝角度、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径、尖削指数 9 个指标进行综合评价，同时将 80 份板栗种质资源划分等级。研究得到以下结论。

（1）确认了枝条长度、枝条节数、枝条直径、节间长度、叶形指数、叶柄长度、叶柄直径作为板栗矮化评价的有效指标。

（2）80 份板栗种质划分为矮化型、中间型、乔化型、极乔化型，确定了‘短枝芽变’‘紫珀’‘燕山短枝’‘遵玉’‘塔丰’‘优丰’为板栗矮化种质。

本研究结果为板栗矮化砧木定向培育及矮化评价指标体系构建提供了重要理论依据与技术支撑，也为板栗矮化种质的抗病抗旱性、光热资源利用效率、矮化基因功能与分子调控等研究提供了关键的种质基础。

参　考　文　献

[1] 张宇和, 柳鎏, 梁维坚, 等. 中国果树志·板栗榛子卷 [M]. 北京: 中国林业出版社. 2005.
Zhang Y H, Liu L, Liang W J, et al. Chestnut and hazelnut roll of China fruit tree[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.

[2] Nie X H, Wang Z H, Liu N W, et al. Fingerprinting 146 Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume) accessions and selecting a core collection using SSR markers[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(5): 1277−1286.

[3] 叶甜甜, 叶常奇, 苏淑钗. 短截修剪对‘遵化短刺’板栗新梢生长及果实品质的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 343−350.
Ye T T, Ye C Q, Su S C. Effects of short pruning on new shoot growth and fruit quality of *Castanea mollissima* ‘Zunhuaduanci’ [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(2): 343−350.

[4] 魏振国, 刘维国, 宋庆桃. 矮化板栗表型特征及早期鉴定 [J]. 落叶果树, 2001(3): 4−6.
Wei Z G, Liu W G, Song Q T. Phenotypic characteristics and early identification of dwarf chestnut cultivars[J]. Deciduous Fruits, 2001(3): 4−6.

[5] 刘庆忠, 董玉琛, 刘旭, 等. 板栗种质资源描述规范和数据标准 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Liu Q Z, Dong Y C, Liu X, et al. Descriptors and data standard of chestnut germplasm resources[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2006.

[6] Sogo N, Norio T, Yukie T, et al. The domestication and breeding history of *Castanea crenata* Siebold et Zucc. estimated by direction of gene flow and approximate Bayesian computation[J]. Tree Genetics & Genomes, 2023, 19(5): 34−40.

[7] Maura M C, Angelina N, Luigi M D. Pilot study on the geographical mapping of genetic diversity among European chestnut (*Castanea sativa* Mill.) cultivars in southern Italy[J]. Plants, 2023, 12(4): 917.

[8] Cong L, Ling H T, Liu S S, et al. ‘Yunnan’ quince rootstock promoted flower bud formation of ‘Abbé Fetel’ pear by altering hormone levels and *PbAGL9* expression[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 28(2): 914−924.

[9] Yakushiji H, Sugiura H, Yamasaki A, et al. Tree growth, productivity, and fruit quality of ‘Fuyu’ persimmon trees onto different dwarfing rootstocks[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 278(10): 69−78.

[10] Liu J L, Zhang C X, Li T T, et al. Phenotype and mechanism analysis of plant dwarfing in pear regulated by abscisic acid[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(5): 1346−1356.

[11] 贾旭梅, 王延秀, 党兆霞, 等. 八棱海棠上 11 个矮化砧木生长及其叶片解剖特性的研究 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(6): 1126−1136.
Jia X M, Wang Y X, Dang Z X, et al. Growth and leaf anatomical structure of 11 dwarf rootstocks on *Malus robusta* Rehd.[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(6): 1126−1136.

[12] 王菁菁, 刘立强, 秦伟, 等. 新疆野苹果矮化性状形态学与生理指标评价 [J]. 经济林研究, 2022, 40(3): 151−161.
Wang J J, Liu L Q, Qin W, et al. Dwarf evaluation on morphology and physiological indexes of Xinjiang wild apple[J]. Nonwood Forest Research, 2022, 40(3): 151−161.

[13] 胡福初, 陈哲, 赵杰堂, 等. 荔枝种质资源矮化相关形态指标的鉴定及综合评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(3): 775−785.
Hu F C, Chen Z, Zhao J T, et al. Identification and comprehensive evaluation of dwarfing-related morphological indicators in litchi germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(3): 775−785.

[14] 张亦弛. 植物生长延缓剂对板栗实生苗和嫁接幼树的矮化效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Zhang Y C. Dwarfing effect of plant growth retardants on chestnut seedlings and grafted saplings[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[15] 武燕奇, 郭素娟. 5 个板栗品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价 [J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(1): 20−24, 29.
Wu Y Q, Guo S J. Physiological response of five Chinese chestnut varieties of drought stress and evaluation of drought resistance[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(1): 20−24, 29.

[16] 韩振海 . 苹果矮化密植栽培 - 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Han Z H. Theory and practice of apple dwarfing and close planting[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[17] 何平, 李林光, 王海波, 等. 5 个矮化中间砧对‘沂水红’富士苹果生长、结果和叶片矿质元素积累的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(4): 750−757.
He P, Li L G, Wang H B, et al. Effects of five dwarfing interstocks on shoot growth, fruiting and accumulation of mineral elements in leaves of Yishui Red Fuji apple[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(4): 750−757.

[18] Pilcher R L R, Celton J M, Gardiner S E, et al. Genetic markers linked to the dwarfing trait of apple rootstock ‘Malling 9’[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2008, 133(1): 100−106.

[19] 周应书, 罗林, 王敏, 等. 板栗苗室内外嫁接技术的正交优化试验研究 [J]. 北方园艺, 2009(4): 40−43.
Zhou Y S, Luo L, Wang M, et al. Orthogonal optimization experimental study on grafting techniques of chestnut seedling indoor and outdoor[J]. Northern Horticulture, 2009(4): 40−43.

[20] 张志华, 刘新彩, 刘彦红, 等. 核桃枝条解剖结构与生长势的关系 [J]. 中国农业科学, 2007(6): 1303−1308.
Zhang Z H, Liu X C, Liu Y H, et al. The relationship between anatomical structure and growth of walnut branches[J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2007(6): 1303−1308.

[21] 吴学琴, 申开成, 肖红星, 等. 50 种茶花叶表型性状的多样性分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(10): 165−180.
Wu X Q, Shen K C, Xiao H X, et al. Diversity analysis of leaf phenotypic traits in 50 camellias species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(10): 165−180.

[22] 沈萩荻, 吴艳, 刘利, 等. 6 个种源地不同桑树品种叶柄解剖结构与水分运输能力初探 [J]. 蚕业科学, 2019, 45(1): 1−8.
Shen Q D, Wu Y, Liu L, et al. A preliminary study on anatomical characteristics and water transporting capacity of petioles from six varieties originated from different habitations[J]. Acta Sericologica Sinica, 2019, 45(1): 1−8.

[23] 连文斌, 姚全胜, 马武强, 等. 云南杧果种质资源矮化相关形态指标的鉴定及综合评价 [J]. 中国南方果树, 2024, 53(3): 124−132.
Lian W B, Yao Q S, Ma W Q, et al. Identification and comprehensive evaluation of morphological indicators related to the dwarfing in mango germplasm resources of Yunnan[J]. South China Fruits, 2024, 53(3): 124−132.

[24] 刘国成, 马怀宇, 吕德国, 等. ‘寒富’苹果短枝型特征的解剖学评价 [J]. 北方园艺, 2011(15): 25−28.
Liu G C, Ma H Y, Lü D G, et al. Anatomical evaluation of ‘Hanfu’ apple spur type characteristics[J]. Northern Horticulture, 2011(15): 25−28.

[25] 徐海珍. 板栗矮化新品种‘紫珀’[J]. 农村百事通, 2006(24): 31.
Xu H Z. A new dwarf variety of chestnut (*Castanea mollissima* ‘Zipo’)[J]. Rural Versatile, 2006(24): 31.

[26] 娄进群, 王燕来, 曹淑云. 板栗矮化新品种遵玉的选育 [J]. 中国果树, 2006(2): 11−12, 63.
Lou J Q, Wang Y L, Cao S Y. Breeding of ‘Zunyu’, a new dwarf variety of chestnut[J]. China Fruits, 2006(2): 11−12, 63.

[27] 张继亮, 孙海伟, 杨德平, 等. 短枝型板栗品种 (优系) 性状分析与评价 [J]. 经济林研究, 2015, 33(1): 99−102.
Zhang J L, Sun H W, Yang D P, et al. Analysis and evaluation of spur-type chestnut varieties (excellent clones) characteristics[J]. Non-wood Forest Research, 2015, 33(1): 99−102.

[28] 刘爱玉. 陆地棉矮秆品种陆矮 1 号的矮化形态与机理及其遗传特性研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
Liu A Y. Study on dwarfing morphology, mechanism and genetic characteristics of dwarf cotton variety (*Gossypium hirsutum* Linn.) Lu’ai 1[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 马履一）