网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.006

板栗枝叶解剖结构特征及其与矮化性的关联分析

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】探究板栗枝叶解剖结构与矮化性的关系,筛选判断板栗矮化的指标,为板栗矮化种质的筛选与利用提供理论依据。【方法】以种植于河北省迁西县的2种类型6个板栗种质(乔化型的'贵州野毛栗'、'垂枝栗'、'灰拣'和矮化型的'紫珀'、'短枝芽变'、'燕山短枝')为试验材料,于2024年8月下旬采集各板栗种质结果枝及叶片,采用石蜡切片法观察2种类型板栗枝叶不同组织的解剖结构,分析其与矮化性的相关性,并利用主成分分析进行综合评价。【结果】2种类型板栗的枝条长度、节间长度及枝叶解剖结构存在显著差异($P<0.05$)。矮化型的叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比和导管密度显著大于乔化型($P<0.05$),而叶片海绵组织结构疏松度、气孔密度与枝条半径、韧皮部厚度、木质部厚度、木质部厚度/枝条半径、木质部厚度/韧皮部厚度、近皮部导管面积、中部导管面积、近髓部导管面积、平均导管面积显著小于乔化型($P<0.05$)。相关性分析和主成分分析表明,乔化型与矮化型差异显著的枝叶解剖结构指标与枝条长度、节间长度极显著相关($P<0.01$)。通过主成分分析降维处理后,2个主成分的累计方差贡献率达到83.74%,充分反映了枝叶解剖结构与矮化性之间的关联关系,2个主成分载荷数值绝对值分别大于0.25和0.30的指标可作为矮化预选指标。【结论】叶片厚度、栅栏组织厚度、栅海比、气孔密度、木质部厚度、木质部厚度/枝条半径、中部导管面积、近髓部导管面积、平均导管面积、导管密度可作为基于枝叶解剖结构特征判断板栗矮化性的重要指标。

[关键词] 板栗;矮化性状;叶片与枝条;解剖结构

[中图分类号] S664.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0046-10

Analysis of the anatomical characteristics of chestnut branches and leaves and their correlation with dwarfism

DENG Chaoli, GUO Sujuan

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

Abstract: 【Objective】 The study aims to investigate the relationship between dwarfism and the anatomical structure of chestnut branches and leaves in order to identify the indicators for chestnut dwarfism, thereby providing a theoretical basis for the selection and utilization of chestnut dwarfism germplasm. 【Method】 Six chestnut germplasms of two types (arborization type: 'Guizhouyemaoli', 'Chuizhili', 'Huijian'; dwarfism type: 'Zipo', 'Duanzhiyabian', 'Yanshanduanzhi') planted in Qianxi County, Hebei Province were used as experimental materials. In late August 2024, the fruiting branches and leaves of each chestnut germplasm were collected. Paraffin sectioning was employed to observe anatomical structures of different tissues in branches and leaves of both types to analyze the correlation between these structures and dwarfism. Principal component analysis was used

[收稿日期] 2025-05-09 [修回日期] 2025-07-02
[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)
[作者简介] 邓超丽(1998—),女,广东信宜人,在读硕士,主要从事经济林(果树)栽培与利用研究。E-mail:1578562457@qq.com
[通信作者] 郭素娟(1965—),女,内蒙古呼和浩特人,教授,博士生导师,主要从事经济林(果树)栽培与利用研究。E-mail:gwangzs@263.net

for comprehensive evaluation.【Result】Significant differences（$P<0.05$）were observed in branch length，internode length，and anatomical structure of branches and leaves between the two types of chestnuts. The thickness of leaves，thickness of palisade tissue，thickness of sponge tissue，ratio of palisade tissue to spongy tissue，and vessel density of dwarfism type were significantly higher than those of the arborization type（$P<0.05$）. Conversely，the leaves compactness and porosity，stomatal density and branch radius，phloem thickness，xylem thickness，xylem thickness/branch radius，xylem thickness/phloem thickness，vessel area near phloem，middle vessel area，vessel area near pith，and average vessel area were significantly lower in the dwarfism type（$P<0.05$）. Correlation analysis and principal component analysis revealed that the anatomical indicators of branches and leaves，which showed significant differences between the arborization type and the dwarfism types，were extremly significantly correlated with branch length and internode length（$P<0.01$）. After dimensionality reduction through principal component analysis，the cumulative variance contribution rate of the two principal components reached 83.74%，which fully demonstrated the correlation between branch and leaf anatomical structure and dwarfism. Indicators with absolute loading values of the two principal components greater than 0.25 and 0.30，respectively，were identified as pre-selection indicators for dwarfism.【Conclusion】Thickness of leaves，thickness of palisade tissue，ratio of palisade tissue to spongy tissue，stomatal density，xylem thickness，xylem thickness/branch radius，middle vessel area，vessel area near pith，average vessel area and vessel density can serve as important indicators for assessing chestnut dwarfism based on the anatomical characteristics of its branches and leaves.

Key words：*Castanea mollissima* Blume；dwarfing trait；leaves and branches；anatomical structure

板栗（*Castanea mollissima* Blume）为壳斗科（Fagaceae）栗属（*Castanea*）植物，是我国重要的木本粮食树种，其坚果果仁因含有大量碳水化合物、蛋白质、脂肪及多种矿物质和维生素而深受消费者青睐，在国内外市场上均具有重要地位[1]。板栗喜光，其结果枝逐年外延导致树体高大，树体管理与果实采收成本高、效益低。因此，筛选矮化种质，降低树体高度对板栗种植业的发展具有重要的现实意义。

矮化是集约化、现代化果树栽培的发展趋势，目前已有很多关于果树矮化的研究报道。刘国成等[2]观察‘寒富’苹果（*Malus pumila* Mill.）短枝型1年生枝的平均长度、节间长度、叶片厚度、栅海比、气孔密度等解剖学特征，发现‘寒富’苹果具有典型的矮化特征；隗晓雯[3]研究了不同矮化程度苹果砧木间形态指标及生理生化指标的差异，确定了评价苹果的矮化指标和矮化砧木；侯玉珏等[4]比较了矮化型、短枝型和柱型苹果苗的枝、芽和叶片特征，发现株高和主干节间在三者中有显著差异；闫春晓[5]通过对杜梨（*Pyrus betulifolia* Bunge）诱变群体的表型、生理生化指标进行构建和筛选，确定了具有矮化倾向的植株；叶宇等[6]从组织解剖结构、物质运输、代谢组学、激素水平和致矮基因等5个方面综述了梨矮化砧木的致矮机制；苏怡[7]通过形态、生理和生化指标研究不同株系的枇杷（*Eriobotrya japonica*（Thunb.）Lindl.），确定了枝条电阻、叶片厚度、上下表皮占叶片厚度比例、枝皮率、栅海比以及超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、吲哚乙酸氧化酶（IOD）活性均可以作为树体生长势早期预选的主要指标；张志华等[8]研究了核桃（*Juglans regia* L.）枝条解剖结构与生长势的关系，发现枝条的材皮比及木质部面积所占比例可作为核桃实生树生长势强弱的预测指标。然而，除了板栗叶片的抗旱性[9]、果皮及种皮的耐贮性研究[10]外，关于板栗枝叶矮化相关解剖结构的研究在国内外尚鲜有报道。目前，仅有根据枝条长度、节间长度等形态特征选育出矮化型品种‘遵玉’[11]、‘紫珀’[12]及短枝型品种‘燕山短枝’的报道[13]。为此，本研究基于前期评价结果，以初步筛选出具有矮化性和乔化性的板栗种质各3份作为试验材料，采用石蜡切片法，探究其叶片、枝条及气孔解剖结构与矮化性之间的关联性，以期为板栗矮化种质的筛选与利用提供依据。

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。该区地处东部季风暖温带气候区，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，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%。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,平均气温为25.4 ℃。该地属于低山丘陵区,土壤类型为沙壤土,pH值为6.44,土壤肥力为中等水平[14]。

1.2 试验材料

选取生长健壮、无病虫害的乔化型与矮化型板栗种质各3份(表1),各种质均为2013年以接穗形式嫁接在3年实生母树砧木上的嫁接树,同一母树砧木,同一时间嫁接,接穗经过十几年的生长,仍然保持接穗特性。

表1 2种类型6种板栗种质名称及其拉丁名

Table 1 Names and scientific names of the six chestnut germplasms of two types

类型 Type	种质 Germplasm	拉丁名 Scientific name	类型 Type	种质 Germplasm	拉丁名 Scientific name
矮化型 Dwarfism	紫珀	*Castanea mollissima* 'Zipo'	乔化型 Arborization	贵州野毛栗	*Castanea mollissima* 'Guizhouyemaoli'
	短枝芽变	*Castanea mollissima* 'Duanzhiyabian'		垂枝栗	*Castanea mollissima* 'Chuizhili'
	燕山短枝	*Castanea mollissima* 'Yanshanduanzhi'		灰拣	*Castanea mollissima* 'Huijian'

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 2024年8月下旬在板栗枝条和叶片的形态特征均达到生理成熟[15]时,对6份供试板栗种质进行取样。每个种质选择5株样树进行结果枝抽样调查,对每一树体东、南、西、北4个方位内的树冠外围结果枝的长度及直径进行调查记录,根据平均值确定每一方位内的标准枝,并进行挂牌标记。选取每个方向标准结果枝上的5个功能叶和枝条进行试验,则每份板栗种质共选取100个叶片、100根枝条。使用直尺测定枝条长度、节间长度,剪取叶片中部主脉两侧大小为0.5 cm×0.5 cm的小正方形,取枝条中部大小为0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm的小茎段,立即用FAA固定液进行固定,并制作石蜡切片。

1.3.2 气孔特征观察 选择晴天上午09:00-11:00取样,以便于气孔特征的观察。采用指甲油印迹法,先用橡皮将板栗叶片背面的星状毛擦掉,涂一层透明指甲油,待其完全晾干后,用镊子取下置于载玻片上,在Olympus DP 72生物显微镜下观察。

1.3.3 测定指标及方法 将叶片和枝条石蜡切片放在Olympus DP 72生物显微镜下观察,每个种质重复20次,并用ImageJ-win 64软件对叶片、气孔、枝条相关解剖结构指标进行测量,每个指标测定10次。测定的相关指标有叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和气孔数量、气孔长度、气孔宽度、气孔开张长度、气孔开张宽度、气孔密度,以及枝条半径、周皮厚度、韧皮部厚度、木质部厚度、髓半径、近皮部导管面积、中部导管面积、近髓部导管面积、导管数量等。参考叶片、导管相关方法[9,16]计算下列指标:

栅海比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度;

叶片栅栏组织结构紧密度=栅栏组织厚度/叶片厚度;

叶片海绵组织结构疏松度=海绵组织厚度/叶片厚度;

气孔密度=气孔数量/视野面积;

平均导管面积=(近皮部导管面积+中部导管面积+近髓部导管面积)/3;

导管密度=导管数量/视野面积。

1.4 数据处理

采用Excel 2019对数据进行处理,利用Origin 2024进行方差分析、相关性分析、主成分分析,探讨板栗枝叶解剖结构特征与矮化性的关系。

2 结果与分析

2.1 2种类型板栗枝条长度、节间长度的比较

由表2可知,矮化型板栗的枝条长度均小于13 cm,节间长度均小于1 cm;乔化型板栗的枝条长度均大于35 cm,节间长度均大于1 cm。由此可见,乔化型板栗的枝条长度、节间长度均显著大于矮化型($P<0.05$)。

2.2 2种类型板栗叶片解剖结构特征的比较

由图1和表3可知,矮化型板栗的叶片厚度均大于200 μm,乔化型的均小于200 μm,2种类型之间叶片厚度差异显著($P<0.05$)。矮化型板栗叶片的栅栏组织、海绵组织厚度和栅海比均显著大于乔化型($P<0.05$)。其中栅栏组织厚度以'短枝芽变'最厚(94.97 μm),'贵州野毛栗'最薄(84.93 μm),且板栗的栅栏组织为两层结构,与乔化型相比,矮化型的栅栏组织结构表现更为明显;海绵组织厚度也以'短枝芽变'最大(71.46 μm),而'垂枝栗'最小(54.34 μm);栅海比以'燕山短枝'最大(1.46),'灰拣'最小(1.17)。矮化型板栗'紫珀'、'短枝芽变'、'燕山短枝'的栅栏组织结构紧密度均为0.44,乔化

型‘垂枝栗’最小（0.41），但乔化型栅栏组织结构紧密度与矮化型之间差异并不显著（$P>0.05$）。乔化型板栗叶片的海绵组织结构疏松度显著大于矮化型（$P<0.05$），其中‘灰拣’叶片的海绵组织结构疏松度最大（0.37），最小的为‘燕山短枝’（0.30）。

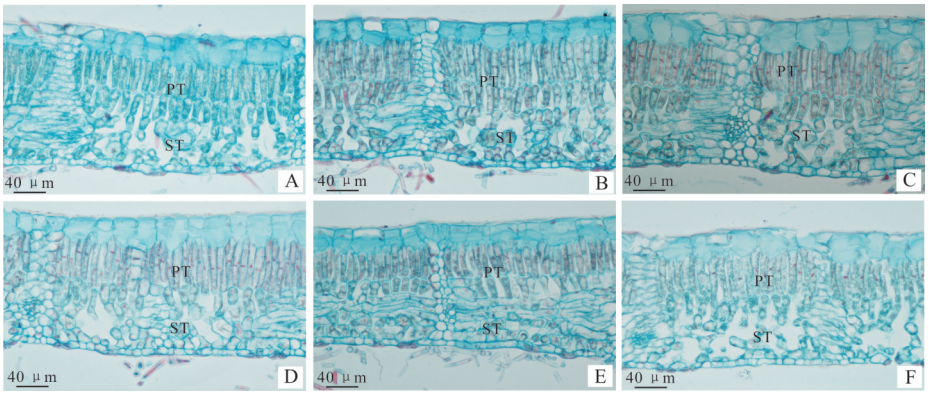
表 2　2种类型6种板栗枝条长度和节间长度的比较

Table 2　Comparison of branch length and internode length among six chestnut germplasms of two types

类型 Type	种质 Germplasm	枝条长度/ cm Branch length	节间长度/ cm Internode length
矮化型 Dwarfism	紫珀 Zipo	12.02±1.76 c	0.85±0.13 c
	短枝芽变 Duanzhiyabian	10.32±2.19 c	0.78±0.12 c
	燕山短枝 Yanshanduanzhi	12.72±1.47 c	0.81±0.11 c
乔化型 Arborization	贵州野毛栗 Guizhouyemaoli	36.88±7.52 b	1.93±0.46 b
	垂枝栗 Chuizhili	54.93±22.37 a	3.09±1.02 a
	灰拣 Huijian	35.30±8.34 b	1.91±0.53 b

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下表同。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.



A. 紫珀；B. 短枝芽变；C. 燕山短枝；D. 贵州野毛栗；E. 垂枝栗；F. 灰拣。PT. 栅栏组织；ST. 海绵组织。

A. Zipo; B. Duanzhiyabian; C. Yanshanduanzhi; D. Guizhouyemaoli; E. Chuizhili; F. Huijian. PT. Palisade tissue; ST. Spongy tissue.

图 1　2种类型6种板栗叶片的解剖结构特征

Fig. 1　Anatomical characteristics of leaves from six chestnut germplasms of two types

表 3　2种类型6种板栗叶片解剖结构特征的比较

Table 3　Comparison of leaf anatomical characteristics among six chestnut germplasms of two types

种质 Germplasm	叶片厚度/μm Thickness of leaves	栅栏组织厚度/μm Thickness of palisade tissue	海绵组织厚度/μm Thickness of spongy tissue	栅海比 Ratio of palisade tissue to spongy tissue	栅栏组织结构紧密度 Leaves compactness	海绵组织结构疏松度 Leaves compactness and porosity
紫珀 Zipo	212.50±4.33 a	93.91±3.15 a	64.88±2.97 b	1.45±0.09 a	0.44±0.01 a	0.31±0.01 c
短枝芽变 Duanzhiyabian	215.49±8.80 a	94.97±3.70 a	71.46±4.84 a	1.33±0.10 b	0.44±0.01 a	0.31±0.02 c
燕山短枝 Yanshanduanzhi	212.97±5.43 a	94.24±2.54 a	64.67±3.08 b	1.46±0.07 a	0.44±0.01 a	0.30±0.01 c
贵州野毛栗 Guizhouyemaoli	184.09±5.30 b	84.93±3.09 b	57.06±4.04 c	1.20±0.09 c	0.42±0.02 b	0.35±0.02 b
垂枝栗 Chuizhili	183.27±4.96 b	86.01±3.59 b	54.34±2.96 c	1.18±0.07 c	0.41±0.01 b	0.35±0.01 b
灰拣 Huijian	181.89±1.22 b	88.42±1.26 b	57.29±2.47 c	1.17±0.04 c	0.43±0.01 ab	0.37±0.01 a

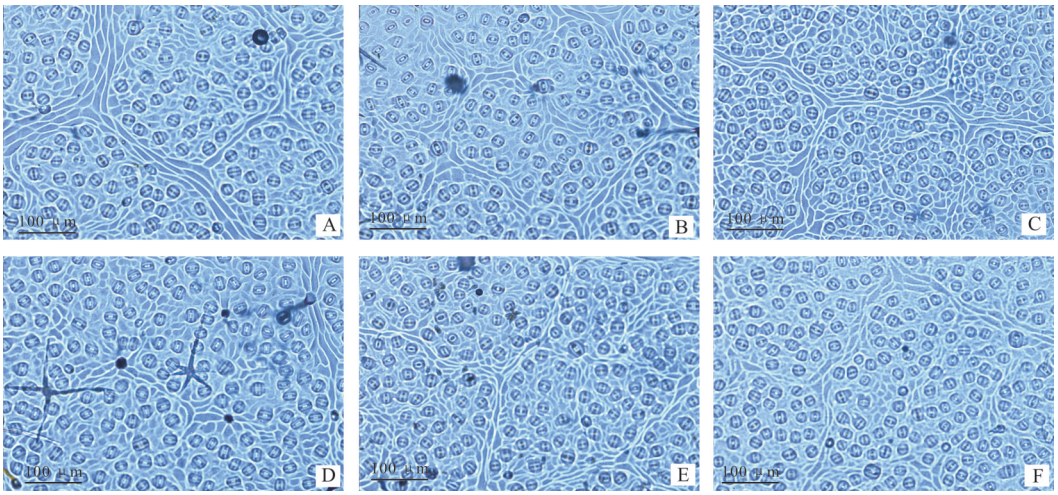
2.3　2种类型板栗叶片气孔特征的比较

由表4和图2结果可知，‘贵州野毛栗’的气孔长度/气孔宽度最大（1.39），‘燕山短枝’最小（1.22），种质之间差异不显著（$P>0.05$）；气孔开张长度/气孔开张宽度以‘垂枝栗’最大（3.52），‘短枝芽变’最小（2.01），乔化型‘垂枝栗’的气孔开张长度/气孔开张宽度与矮化型‘短枝芽变’、‘燕山短枝’之间存在显著差异（$P<0.05$），其他种质之间差异均不显著（$P>0.05$）；气孔密度以乔化型的‘灰拣’最大（3 173.46 个/mm^2），矮化型‘紫珀’最小（2 414.85 个/mm^2），乔化型板栗叶片的气孔密度均显著大于矮化型（$P<0.05$）。

表4 2种类型6种板栗叶片气孔特征的比较

Table 4 Comparison of stomatal characteristics of leaves from six chestnut germplasms of two types

种质 Germplasm	气孔长度/气孔宽度 Stomatal length/ Stomatal width	气孔开张长度/气孔开张宽度 Stomatal aperture length/ Stomatal aperture width	气孔密度/(个·mm^{-2}) Stomatal density
紫珀Zipo	1.30±0.12 a	3.03±1.09 ab	2 414.85±131.70 c
短枝芽变 Duanzhiyabian	1.35±0.18 a	2.01±0.31 c	2 420.89±119.59 c
燕山短枝 Yanshanduanzhi	1.22±0.15 a	2.22±0.43 c	2 476.81±125.72 c
贵州野毛栗Guizhouyemaoli	1.39±0.25 a	2.68±0.48 bc	3 068.73±107.61 b
垂枝栗Chuizhili	1.29±0.14 a	3.52±0.64 a	3 076.74±97.47 a
灰拣Huijian	1.27±0.19 a	2.26±0.36 bc	3 173.46±112.64 a



A. 紫珀;B. 短枝芽变;C. 燕山短枝;D. 贵州野毛栗;E. 垂枝栗;F. 灰拣。

A. Zipo;B. Duanzhiyabian;C. Yanshanduanzhi;D. Guizhouyemaoli;E. Chuizhili; F. Huijian.

图2 2种类型6种板栗叶片的气孔特征

Fig. 2 Stomatal characteristics of leaves from six chestnut germplasms of two types

2.4 2种类型板栗主要枝条解剖结构特征的比较

由表5可见,乔化型板栗的枝条半径显著大于矮化型($P<0.05$);矮化型的周皮厚度均大于乔化型,其中矮化型'紫珀'与乔化型'贵州野毛栗'、'灰拣'之间差异不显著($P>0.05$),而其他种质之间差异均达显著水平($P<0.05$);乔化型的韧皮部厚度均大于矮化型,乔化型'贵州野毛栗'、'垂枝栗'分别与乔化型'灰拣'及矮化型'紫珀'、'短枝芽变'和'燕山短枝'之间差异显著($P<0.05$),其他种质之间差异不显著($P>0.05$);乔化型的木质部厚度均显著大于矮化型种质($P<0.05$);矮化型'短枝芽变'、'燕山短枝'与乔化型'垂枝栗'、'灰拣'之间髓半径差异不显著($P>0.05$),但均显著小于乔化型的'贵州野毛栗'而显著大于矮化型的'紫珀'($P<0.05$)。表6显示,板栗种质在周皮厚度/枝条半径、韧皮部厚度/枝条半径、木质部厚度/枝条半径、髓半径/枝条半径的差异显著性分别与表5中周皮厚度、韧皮部厚度、木质部厚度、髓半径的结果一致;乔化型的木质部厚度/韧皮部厚度显著大于矮化型($P<0.05$)。

表5 2种类型6种板栗枝条解剖结构特征的比较

Table 5 Comparison of anatomical structure characteristics of branches from six chestnut germplasms of two types

种质 Germplasm	枝条半径/μm Branch diameter	周皮厚度/μm Periderm thickness	韧皮部厚度/μm Phloem thickness	木质部厚度/μm Xylem thickness	髓半径/μm Marrow diameter
紫珀Zipo	2 089.46±73.50 cd	40.15±3.06 c	630.90±42.52 c	533.42±58.37 cd	657.79±65.67 c
短枝芽变 Duanzhiyabian	1 985.25±148.58 d	60.02±3.20 a	649.61±45.50 bc	457.32±30.10 d	898.55±66.44 b
燕山短枝 Yanshanduanzhi	2 231.76±229.04 c	49.31±3.32 b	666.41±30.58 bc	573.39±27.39 c	908.14±85.27 b
贵州野毛栗Guizhouyemaoli	3 086.24±140.84 a	38.82±3.83 c	861.48±18.00 a	1 041.52±52.81 b	1 122.11±137.80 a
垂枝栗Chuizhili	2 850.81±213.69 b	30.46±7.88 d	846.53±77.54 a	1 277.43±133.08 a	817.19±92.47 b
灰拣Huijian	2 637.69±168.54 b	37.72±2.46 c	718.59±79.81 b	1 095.74±77.22 b	840.71±143.14 b

表 6　2种类型6种板栗枝条不同组织厚度比值的比较

Table 6　Comparison of different tissue thickness ratios of branches from six chestnut germplasms of two types

种质 Germplasm	周皮厚度/枝条半径 Periderm thickness/ Branch diameter	韧皮部厚度/枝条半径 Phloem thickness/ Branch diameter	木质部厚度/枝条半径 Xylem thickness/ Branch diameter	髓半径/枝条半径 Marrow diameter/ Branch diameter	木质部厚度/韧皮部厚度 Xylem thickness/ Phloem thickness
紫珀 Zipo	0.02±0.001 c	0.31±0.02 c	0.26±0.03 cd	0.32±0.03 c	0.85±0.09 c
短枝芽变 Duanzhiyabian	0.03±0.002 a	0.31±0.02 bc	0.22±0.01 d	0.43±0.03 b	0.71±0.06 c
燕山短枝 Yanshanduanzhi	0.02±0.002 b	0.32±0.01 bc	0.28±0.01 c	0.44±0.04 b	0.86±0.08 c
贵州野毛栗 Guizhouyemaoli	0.02±0.002 c	0.42±0.01 a	0.50±0.03 b	0.54±0.07 a	1.21±0.07 b
垂枝栗 Chuizhili	0.01±0.004 d	0.41±0.04 a	0.62±0.06 a	0.40±0.04 b	1.52±0.12 a
灰拣 Huijian	0.02±0.001 c	0.35±0.04 b	0.53±0.04 b	0.41±0.07 b	1.54±0.19 a

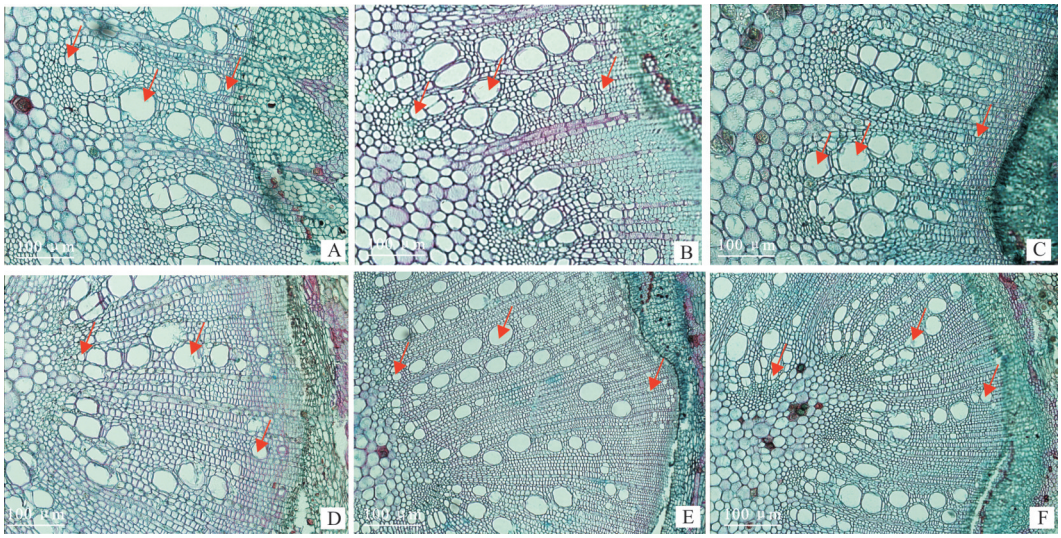
2.5　2种类型板栗枝条导管面积及密度的比较

表7和图3表明，当年生枝条中部横切面近皮部导管面积最大的是‘灰拣’（397.69×10^{-6} mm^2），最小的是‘燕山短枝’（193.58×10^{-6} mm^2）；枝条中部、近髓部导管面积和平均导管面积最大均为‘贵州野毛栗’，其枝条中部、近髓部导管面积和平均导管面积分别为 3 081.68×10^{-6}，802.46×10^{-6} 和 1 418.42×10^{-6} mm^2，最小的分别为‘燕山短枝’（612.41×10^{-6} mm^2）、‘紫珀’（134.92×10^{-6} mm^2）和‘燕山短枝’（329.32×10^{-6} mm^2），且均以乔化型板栗显著大于矮化型（$P<0.05$）。当年生枝条中部横切面导管密度以‘燕山短枝’最大（281.99 个/mm^2），‘贵州野毛栗’最小（54.67 个/mm^2），整体而言，乔化型板栗枝条的导管密度均显著小于矮化型（$P<0.05$）。

表 7　2种类型6种板栗当年生枝条中部横切面导管面积及密度的比较

Table 7　Comparison of vessel area and density in the middle transverse section of current-year branches among six chestnut germplasms from two growth types

种质 Germplasm	近皮部导管面积/（×10^{-6} mm^2） Vessel area near phloem	中部导管面积/（×10^{-6} mm^2） Middle vessel area	近髓部导管面积/（×10^{-6} mm^2） Vessel area near pith	平均导管面积/（×10^{-6} mm^2） Average vessel area	导管密度/（个·mm^{-2}） Vessel density
紫珀 Zipo	196.53±41.63 b	855.72±109.00 c	134.92±27.60 c	395.72±37.93 c	219.83±32.81 b
短枝芽变 Duanzhiyabian	225.87±48.84 b	799.10±265.12 c	157.39±44.43 c	394.12±104.34 c	191.92±17.26 b
燕山短枝 Yanshanduanzhi	193.58±43.62 b	612.41±181.63 c	181.98±46.59 c	329.32±58.17 c	281.99±33.35 a
贵州野毛栗 Guizhouyemaoli	371.11±24.98 a	3 081.68±971.97 a	802.46±322.17 a	1 418.42±348.63 a	54.67±7.91 c
垂枝栗 Chuizhili	342.83±95.03 a	1 949.58±589.18 b	449.69±194.78 b	914.03±217.83 b	78.69±19.49 c
灰拣 Huijian	397.69±145.66 a	2 435.87±1 252.28 ab	488.37±247.39 b	1 106.84±367.19 ab	68.56±6.28 c



A. 紫珀；B. 短枝芽变；C. 燕山短枝；D. 贵州野毛栗；E. 垂枝栗；F. 灰拣。箭头从左到右依次代表近髓部导管、中部导管、近皮部导管。

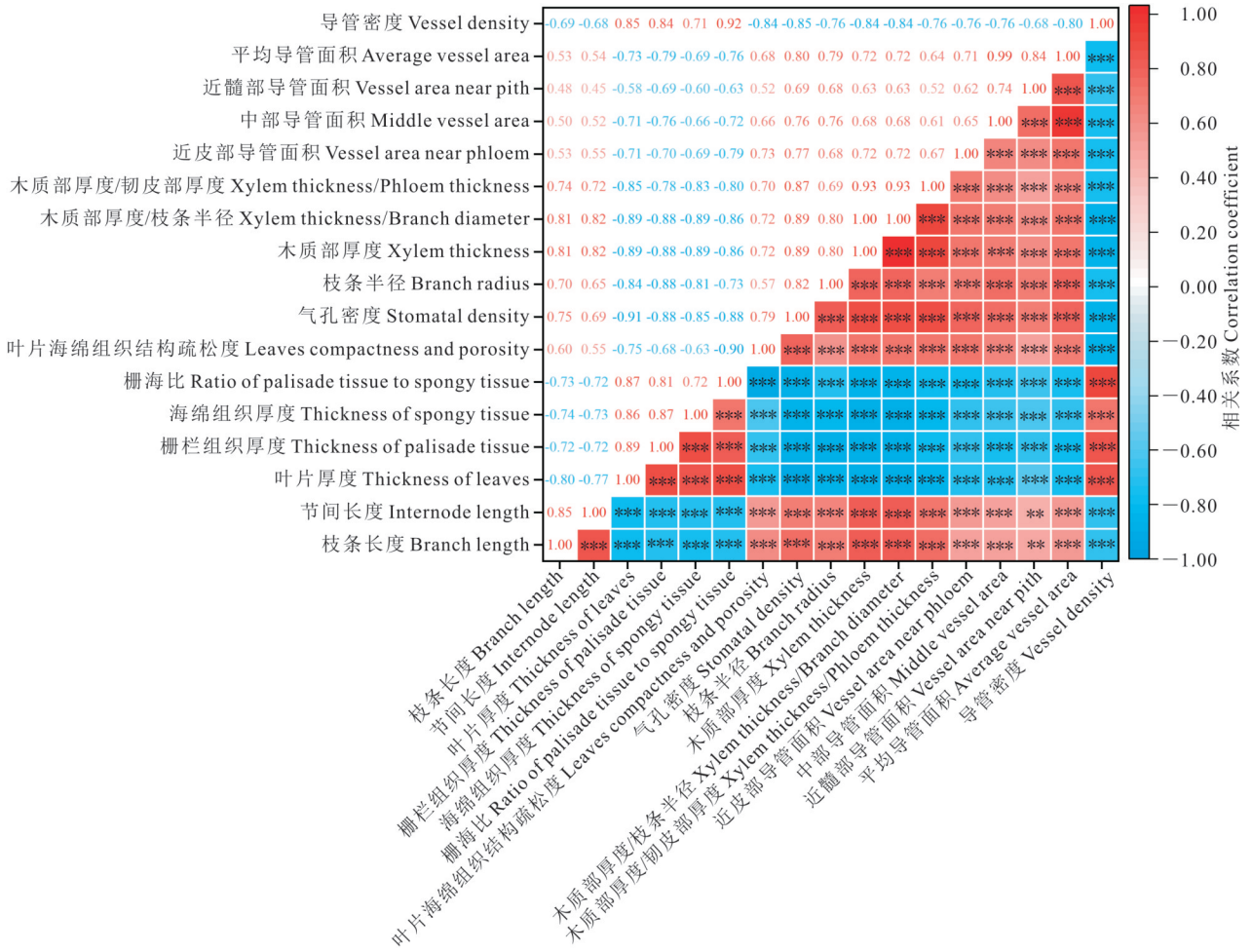
A. Zipo；B. Duanzhiyabian；C. Yanshanduanzhi；D. Guizhouyemaoli；E. Chuizhili；F. Huijian. The arrows from left to right represent vessels near pith，middle vessels，and vessels near phloem，respectively.

图 3　2种类型6种板栗枝条不同部位的导管结构

Fig. 3　Vessel structures in different parts of branches from six chestnut germplasms of two types

2.6 板栗枝叶解剖结构特征与矮化性的关联性分析

2.6.1 板栗枝叶解剖结构特征的相关性 枝条长度、节间长度是判断植物矮化性的重要指标,将板栗枝条长度、节间长度与2种类型差异显著的叶片、枝条相关指标进行相关性热图分析,结果见图4。



. $P<0.01$,*. $P<0.001$.

图4 板栗枝叶解剖结构特征之间的相关性热图

Fig. 4 Correlation heatmap of anatomical features in chestnut branches and leaves

图4表明,枝条长度、节间长度分别与叶片海绵组织结构疏松度、气孔密度、枝条半径、木质部厚度、木质部厚度/枝条半径、木质部厚度/韧皮部厚度、近皮部导管面积、中部导管面积、近髓部导管面积、平均导管面积均呈极显著正相关($P<0.01$);枝条长度、节间长度分别与叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、导管密度均呈极显著负相关($P<0.001$)。

2.6.2 板栗枝叶解剖结构特征的主成分分析 根据特征值>1作为主成分提取原则,本试验提取2个主成分,特征值分别为13.020和1.215(表8),选择这2个主成分进行评价。2个主成分的累计方差贡献率高达83.74%,第一主成分方差贡献率为76.59%,表现了枝条横向及纵向生长、枝条导管、叶片之间的联系,其中,气孔密度、木质部厚度、木质部厚度/枝条半径与载荷呈正相关,叶片厚度、栅栏组织厚度、栅海比、导管密度与载荷呈负相关,且其数值绝对值均大于0.25;第二主成分方差贡献率为7.15%,主要体现出枝条纵向生长以及枝条导管之间的关系,其中枝条的中部导管面积、近髓部导管面积、平均导管面积与载荷呈正相关,枝条长度、节间长度与载荷呈负相关,且其数值绝对值均大于0.30。

3 讨 论

3.1 矮化型和乔化型板栗叶片解剖结构特征与矮化性的关系

隗晓雯[3]研究发现,苹果矮化砧木表现为叶片

气孔大，气孔密度小，在短枝型苹果[4]的研究中也得到相同的结论。本试验中，矮化型板栗种质的气孔密度显著小于乔化型，说明矮化型板栗叶片的气孔大，单位面积内的气孔密度小；而乔化型的气孔小，气孔密度则大，这与上述研究结果一致。此外，气孔密度与枝条长度、节间长度呈显著正相关，而与矮化性呈显著负相关。杨廷桢等[17]研究表明矮化苹果叶片的栅栏组织有三层，板栗叶片仅有两层[9]，但矮化型板栗叶片的栅栏组织较乔化型更厚、排列更紧密。史宝胜等[18]研究表明，随着矮化程度升高，苹果矮化砧木叶片的栅海比增大，与本研究结果一致。胡福初等[19]研究发现，荔枝的叶片厚度与其生长势无关。而在本研究中，板栗的叶片厚度与矮化性呈显著正相关，说明叶片厚度与生长势的关系可能因树种而异。周卫东[20]研究表明，苹果矮化砧的叶片栅栏组织结构紧密度和海绵组织结构疏松度小于其他砧穗组合，本研究矮化型板栗叶片海绵组织结构疏密度显著小于乔化型，但矮化型的叶片栅栏组织结构紧密度整体大于乔化型，说明矮化型板栗叶片的栅栏组织所占比重较大。此外，矮化型板栗种质的栅栏组织厚度、海绵组织厚度均整体大于乔化型，栅栏组织厚度、海绵组织厚度均与枝条长度、节间长度呈显著负相关，但与矮化性呈显著正相关，这与贾旭梅等[21]关于八棱海棠中不同矮化砧木叶片解剖结构特征的研究结果一致。

表 8　板栗枝叶解剖结构特征主成分分析的载荷矩阵

Table 8　Loading matrix of the principal component analysis on the anatomical characteristics of chestnut branches and leaves

指标 Index	PC1	PC2	指标 Index	PC1	PC2
枝条长度 Branch length	0.224	−0.362	木质部厚度/枝条半径 Xylem thickness/Branch diameter	0.264	−0.191
节间长度 Internode length	0.221	−0.362	木质部厚度/韧皮部厚度 Xylem thickness/Phloem thickness	0.245	−0.229
叶片厚度 Thickness of leaves	−0.261	0.121	近皮部导管面积 Vessel area near phloem	0.223	0.157
栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	−0.258	−0.014	中部导管面积 Middle vessel area	0.226	0.420
海绵组织厚度 Thickness of spongy tissue	−0.247	0.143	近髓部导管面积 Vessel area near pith	0.204	0.415
栅海比 Ratio of palisade tissue to spongy tissue	−0.256	−0.012	平均导管面积 Average vessel area	0.236	0.427
叶片海绵组织结构疏松度 Leaves compactness and porosity	0.225	0.074	导管密度 Vessel density	−0.254	−0.097
气孔密度 Stomatal density	0.263	0.004	特征值 Eigenvalue	13.020	1.215
枝条半径 Branch radius	0.242	0.081	方差贡献率/% Contribution rate	76.59	7.15
木质部厚度 Xylem thickness	0.264	−0.191	累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate	76.59	83.74

3.2　矮化型与乔化型板栗枝条解剖结构特征与矮化性的关系

矮化植株的形态特征表现为枝条短、节间短[22]，本研究中矮化型板栗的枝条长度、节间长度也均显著小于乔化型，与上述研究结果高度一致。吴学晶[23]研究表明，中国石竹矮化株茎表皮厚度、木质部厚度均显著大于对照。在本研究中，矮化型板栗枝条的周皮厚度、导管密度大于乔化型，但枝条半径、韧皮部厚度、木质部厚度均小于乔化型，与上述研究结果具有相似性。李明哲等[24]解剖了苹果枝条横切面，发现髓部面积与树体的生长势呈正相关。在本研究中，板栗当年生枝条中部横切面的髓半径在乔化型和矮化型2种类型中无明显规律且差异不显著。王宏伟[25]研究表明，矮化砧木甜樱桃枝条导管面积、导管平均密度与其生长势呈正相关；王成霞等[26]研究表明，矮化型桃枝条的导管密度和面积与节间长度呈显著正相关，均与本研究结果一致。FORNER-GINER等[27]研究表明，矮化柑橘砧木木质部导管面积小，影响导水率进而提高了矮化砧木的果实质量，利于高密度种植；李春燕等[16]研究发现，苹果当年生枝条木质部中的导管面积从近皮部到近髓部依次减小，而导管密度依次增大。本研究表明，与苹果枝条导管大小的分布不同，板栗枝条的木质部导管面积呈现出中部显著大于近皮部、近髓部的现象。综上可知，乔化型板栗的导管面积显著大于矮化型，说明乔化型导管发

达,有利于物质运输并促进枝条生长。反之,矮化型板栗的导管较小,运输效率低,导致枝条生长缓慢而变得矮小。此外,本研究中乔化型板栗的木质部厚度/韧皮部厚度、近皮部导管面积、中部导管面积、近髓部导管面积、平均导管面积均显著大于矮化型种质,这些枝条指标与枝条长度、节间长度呈显著正相关;而矮化型板栗的周皮厚度、导管密度显著大于乔化型,与枝条长度、节间长度呈显著负相关。

3.3 矮化型与乔化型板栗枝叶解剖结构特征与矮化性的综合评价

根据板栗叶片、枝条以及气孔解剖结构特征与枝条长度、节间长度显著相关的指标,对矮化型与乔化型板栗的矮化性进行主成分分析及综合评价,结果表明叶片厚度、栅栏组织厚度、栅海比、气孔密度、木质部厚度、木质部厚度/枝条半径、中部导管面积、近髓部导管面积、平均导管面积、导管密度能充分代表板栗枝叶矮化解剖结构特征,该结果与实际田间试验观察到的形态特征基本一致。

果树的矮化是一个复杂的过程,除了形态特征、解剖结构与矮化性状密切相关外,酶活性[28]、内源激素含量[29]、相关矮化基因[30]也能通过各种途径影响植株的矮化性。因此,为更准确分析板栗的矮化性,还应该考虑更多因素并进行深入研究。

[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 rolls of China fruit tree[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.

[2] 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.

[3] 隗晓雯. 苹果砧木矮化性评价指标的研究及应用[D]. 河北保定:河北农业大学,2014.
WEI X W. The research and application of parameters for evaluating dwarfing ability in apple rootstocks[D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2014.

[4] 侯玉珏,张晓云,赵彩平,等. 矮化型、短枝型和柱型苹果苗枝芽特性和叶片特征比较[J]. 西北农业学报,2012,21(7):134-137.
HOU Y J, ZHANG X Y, ZHAO C P, et al. Comparison of branch, bud and leaf characteristics of the dwarf-type, spur-type and columnar young apple trees[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(7):134-137.

[5] 闫春晓. 杜梨诱变群体构建及矮化预选指标筛选研究[D]. 山西太谷:山西农业大学,2022.
YAN C X. Study on the construction of mutagenesis population and dwarfing preselection index of *Pyrus betulifolia*[D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2022.

[6] 叶宇,欧春青,王斐,等. 梨矮化砧木致矮机制研究进展[J]. 果树学报,2022,39(11):2163-2171.
YE Y, OU C Q, WANG F, et al. Progress in research on the dwarfing mechanism of pear dwarfing rootstocks[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(11):2163-2171.

[7] 苏怡. 枇杷不同矮化性株系(品种)的形态、生理和生化指标的研究[D]. 四川雅安:四川农业大学,2014.
SU Y. Studies on the morphological, physiological and biochemical indexes of the lines (cultivar) with varying dwarfness in loquat[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2014.

[8] 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,2007,40(6):1303-1308.
ZHANG Z H, LIU X C, LIU Y H, et al. Study on the relationship between the anatomical structure of shoots and growth vigor of *Juglans regia* L. [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(6):1303-1308.

[9] 郭素娟,武燕奇. 板栗叶片解剖结构特征及其与抗旱性的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(9):51-59.
GUO S J, WU Y Q. Leaf anatomical structure characteristics and drought resistance of Chinese chestnut[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(9):51-59.

[10] 赖海荣,郭素娟. 不同耐贮性板栗坚果果皮及种皮的发育特征观察[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(9):41-53.
LAI H R, GUO S J. Observation on the anatomical structure of chestnut nut pericarp and seed coat development[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(9):41-53.

[11] 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 a new dwarf chestnut variety 'Zunyu'[J]. China Fruits, 2006(2):11-12,63.

[12] 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 chestnut variety "Zipo"[J]. Nongcun Baishitong, 2006(24):31.

[13] 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]. Nonwood Forest Research, 2015, 33(1):99-102.

[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] 刘庆忠，孙山，张力思，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, SUN S, ZHANG L S, et al. Descriptors and data standard for chestnut (*Castanea mollissima* Blume)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[16] 李春燕，杨廷桢，王新平，等. 苹果砧木枝条主要输导组织解剖特征与矮化性的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2019，47(10)：139-145.
LI C Y, YANG T Z, WANG X P, et al. Correlation between anatomy feature of main conducting tissue in branch of apple rootstock and dwarfing capacity[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 139-145.

[17] 杨廷桢，高敬东，王骞，等. 不同中间砧嫁接苹果品种叶片和枝条解剖结构与矮化性关系的研究[J]. 中国农学通报，2015，31(13)：95-99.
YANG T Z, GAO J D, WANG Q, et al. Anatomical research on leaves and branches of apple cultivars grafted on different interstocks in relation to dwarf potentiality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(13): 95-99.

[18] 史宝胜，徐继忠，马宝焜，等. 几种苹果矮化砧木枝条与叶片的解剖结构研究[J]. 河北林果研究，2000，15(4)：334-338.
SHI B S, XU J Z, MA B K, et al. Studies on the anatomic structure of some apple dwarf stocks[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2000, 15(4): 334-338.

[19] 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.

[20] 周卫东. 不同矮化中间砧对“烟富3号”叶片生理和果实品质的影响[J]. 北方园艺，2020(22)：16-22.
ZHOU W D. Effects of different dwarfing intermediate anvils on the leaf physiology and fruit quality of ‘Yanfu 3’ apple[J]. Northern Horticulture, 2020(22): 16-22.

[21] 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.

[22] DONG L L, YANG C X, WANG J, et al. Insights into the dwarfing mechanism of pear (*Pyrus betulaefolia*) based on anatomical and structural analysis using X-ray scanning[J]. Horticultural Plant Journal, 2024, 10(2): 355-366.

[23] 吴学晶. 中国石竹矮化诱变剂筛选及其诱变效应比较研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2024.
WU X J. Study on screening of mutagens on dwarfing and their mutagenic effects on *Dianthus Chinensis*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[24] 李明哲，高慧敏，焦永刚. 不同矮化中间砧对红富士苹果枝条解剖结构的影响[J]. 华北农学报，2006，21(S2)：160-162.
LI M Z, GAO H M, JIAO Y G. Effects of different kinds of interstock on the anatomical construction of apple branches (Red. Red Fuji)[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(S2): 160-162.

[25] 王宏伟. 甜樱桃矮化砧木矮化机理研究[D]. 山东泰安：山东农业大学，2004.
WANG H W. Studies on dwarfing mechanisms of sweet cherry dwarfing rootstocks[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2004.

[26] 王成霞，李培环，王永章，等. 桃树枝条的解剖结构与树体矮化的相关性研究[J]. 莱阳农学院学报，2006，23(3)：185-188.
WANG C X, LI P H, WANG Y Z, et al. Studies on the correlation of anatomical structure and dwarf of peach branches[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 2006, 23(3): 185-188.

[27] FORNER-GINER M A, RODRIGUEZ-GAMIR J, MARTINEZ-ALCANTARA B, et al. Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418)[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 179: 376-387.

[28] 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]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(3): 151-161.

[29] GUSTIN J L, ZIMMERMAN S A, SACHS M M. Allelism of uncharacterized dwarf mutants in maize[J]. MicroPublication Biology, 2025: 001504[2025-07-02]. http://doi.org/10.17912/micropub.biology.001504. eCollection2025.

[30] FAZIO G, WAN Y Z, KVIKLYS D, et al. Dw2, a new dwarfing locus in apple rootstocks and its relationship to induction of early bearing in apple scions[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2014, 139(2): 87-98.

（责任编辑：温晓平）