

黑核桃不同砧穗组合的嫁接成活率及幼苗生长状况评价

谭娟^{1,2,3}, 郭琼^{1,2,3}, 田硕^{3,4}, 赵文倩^{1,2,3}, 张锐^{1,2},
金强^{1,2}, 虎海防^{5*}, 郭众仲^{1,2*}

(¹塔里木大学园艺与林学院, 新疆阿拉尔 843300; ²南疆特色果树高效优质栽培与深加工技术国家地方联合工程实验室, 新疆阿拉尔 843300; ³新疆佳木果树学国家长期科研基地, 新疆阿克苏 843101; ⁴新疆农业大学林学与风景园林学院, 乌鲁木齐 830052; ⁵新疆维吾尔自治区林业科学院, 乌鲁木齐 830000)

摘要:【目的】系统评价黑核桃与核桃不同砧穗组合的嫁接亲和性, 筛选最优组合。【方法】以6个抗逆性强的黑核桃家系为砧木, 新早丰、温185、新新2为接穗构建18种砧穗组合, 采用主成分分析综合评价新梢长度、叶面积、超氧化物歧化酶(SOD)活性等14项指标。【结果】新早丰和温185在黑核桃1号砧木上的成活率最高(68.89%、77.78%), 在黑核桃5号、黑核桃6号上的生长性状较好。新早丰在黑核桃6号上的可溶性蛋白、糖含量显著高于其他指标($P < 0.05$), 但多酚氧化酶(PPO)活性最低($12\ 665.57\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1}$), 在黑核桃4号上的过氧化氢酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性最弱; 温185在黑核桃5号上的可溶性糖含量和PPO活性达到峰值, 但可溶性蛋白含量及SOD和POD活性最低, 温185和新新2在黑核桃3号上的PPO、CAT活性最低; 新新2在黑核桃6号上的成活率(54.44%)、生长及POD活性最优, 在黑核桃5号上的SOD活性($2\ 123.17\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)及在黑核桃2号上的可溶性糖、蛋白含量最高, 但在黑核桃4号上的SOD、POD活性最低。【结论】基于多维指标综合评价, 推荐新早丰、新新2选用黑核桃6号砧木, 温185选用黑核桃5号砧木。

关键词: 核桃; 砧穗组合; 成活率和生长特性; 生理指标; 嫁接亲和性

中图分类号: S664.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2025)10-2321-12

Grafting survival rates of different black walnut rootstock-scion combinations and evaluation of seedling growth status

TAN Juan^{1,2,3}, GUO Qiong^{1,2,3}, TIAN Shuo^{3,4}, ZHAO Wenqian^{1,2,3}, ZHANG Rui^{1,2}, JIN Qiang^{1,2}, HU Haifang^{5*}, GUO Zhongzhong^{1,2*}

(¹College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China; ²State Local Joint Engineering Laboratory of High-Efficiency and High-Quality Cultivation and Deep-Processing Technology of Speciality Fruit Trees in Southern Xinjiang, Alar 843300, Xinjiang, China; ³National Long-term Research Base of Fruit Arboriculture, Jiamu, Aksu 843101, Xinjiang, China; ⁴College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; ⁵Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: 【Objective】Xinjiang is one of the earliest regions in China to plant walnuts (*Juglans regia* L.), and in 2023, the area of walnuts in Xinjiang have reached $42 \times 10^4\ \text{hm}^2$, with an output of 133.41×10^4 tons, bring economic benefit for farmers in Xinjiang.. The soil in the region has high salinity, and the walnut industry in Xinjiang is currently limited due to lack of good rootstock. Black walnut (*J. nigra* L.) is a potential excellent rootstock for walnut. In practice, the grafting affinity vary with different combination of scion and rootstock. Therefore, this study aimed to systematically evaluate the graft compatibility of different scion-rootstock combinations of walnut and black walnut to identify the optimal combinations. 【Methods】In this study, we constructed Eighteen scion-rootstock combinations with

收稿日期: 2025-04-10 接受日期: 2025-05-11

基金项目: 2022年度南疆重点产业创新发展支撑计划项目(2022DB022); 2023年自治区重点研发计划(2023B02026)

作者简介: 谭娟, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为果树种质资源与品种选育。E-mail: 2431678832@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: huhaifang1109@sina.com; E-mail: 742560026@qq.com

three walnut varieties Xinzaofeng, Wen 185 and Xinxin 2 and six black walnut strains with high resistance to salinity. The nursery trees of the rootstocks were planted in 2024 and the scion varieties were grafted on them by budding. Each combination had 30 plants. Afterwards, 14 indexes such as new shoot length, leaf area and SOD activity were comprehensively evaluated by principal component analysis. **【Results】** Xinzaofeng and Wen 185 had the highest survival rate (68.89%, 77.78%) on No. 1 rootstock and better growth potential with the rootstock No. 5/6. Xinzaofeng had higher soluble protein and sugar content with the rootstock No. 6 ($P<0.05$) and the lowest PPO activity ($12\ 665.57\ \text{U}\cdot\text{g}^{-1}$), and the weakest POD and CAT activities with the rootstock No. 4. Wen 185 had highest soluble sugar content and PPO activity with the rootstock No. 5, but the lowest soluble protein content and SOD and POD activities. Wen 185 and Xinxin 2 had the lowest PPO and CAT activities with the rootstock No. 3. Xinxin 2 had the highest survival rate (54.44%) and growth potential and POD activity with the rootstock No. 6, the highest SOD activity ($2\ 123.17\ \text{U}\cdot\text{g}^{-1}$) with the rootstock No. 5, and the highest soluble sugar and protein content with the rootstock No. 2, but the lowest SOD and POD activities with the rootstock No. 4. The principal component analysis showed that the Xinzaofeng had the highest affinity score (0.659) with the rootstock No. 6. Xinzaofeng had the lowest score (-0.848) with the rootstock No. 4; Wen 185 had the highest affinity score (0.744) with the rootstock No. 5, the lowest score with the rootstock No. 3 (-0.604). Xinxin 2 had the highest affinity score (0.900) with the rootstock No. 6 and the lowest score with the rootstock No. 1 (-0.640). **【Conclusion】** Based on multidimensional evaluation, the principal component analysis concluded that Xinzaofeng and Xinxin 2 showed the highest affinity with 6 black walnut rootstock. Wen 185 showed the best performance in 5 combinations. It is worth noting that the rootstock No. 4 should not be used as rootstock for Xinzaofeng. The rootstock No. 3 should not be used as rootstock for Wen 185. The rootstock No. 1 should not be used as rootstock for Xinxin 2.

Key words: Walnut; Rootstock-scion combination; Survival and growth characteristics; Physiological indices; Grafting affinity

核桃(*Juglans regia* L.)为胡桃科落叶乔木,兼具用材、生态、经济和生物能源价值,具有喜光、抗旱及适应性强等特性^[1-2]。中国作为核桃原产地之一,栽培历史悠久,是世界最大生产国和主要出口国^[3],广泛栽培于新疆、山西、河北、云南等产区^[4]。新疆是中国最早种植核桃的地区之一,据最新统计,2023年新疆核桃面积达到 $42\times 10^4\ \text{hm}^2$,产量达 $133.41\times 10^4\ \text{t}$ 。核桃产业是新疆地区农民增收致富的支柱产业和经济收入来源^[5]。然而,该地区有着较高的土壤含盐量^[6],且新疆核桃是目前十二大树种中唯一没有良种砧木的树种,已成为制约新疆核桃产业发展的“卡脖子”关键问题^[7]。黑核桃(*Juglans nigra* L.)属胡桃科核桃属,原产美国,为果材兼用树种,适应性强且适种区域广,同时是果树栽培的优良砧木资源,嫁接亲和力和抗性突出^[8-10]。优良砧木通过提升植株适应能力与调控关键农艺性状,在现代园艺系统中发挥着核心作用^[11]。多项研究表明,怀枝作为砧木进行荔枝品种嫁接时,因其优异的嫁接亲和

性可显著缩短果树的生长周期,使嫁接植株提前进入丰产期^[12]。在葫芦科作物中,以南瓜属砧木嫁接西瓜的试验显示,该组合通过调节植株养分分配模式,有效促进果实发育进程,从而使果实成熟期显著提前^[13]。更有研究指出,琯溪蜜柚嫁接到浦江香橙上,成活率高,嫁接接合部位的维管组织分化完全,木质部与韧皮部连接紧密,未出现愈伤组织过度增生或接口畸形现象,具有良好的嫁接亲和性。此外,该组合通过提高光合能力从而提高果实品质^[14]。

在核桃栽培中,嫁接技术被广泛应用于提高其抗病性、适应性和产量,以及加速品种选育进程^[15]。嫁接的成功与否直接影响着核桃的生长发育和产量品质。然而,在嫁接过程中,不同砧木和接穗之间的亲和性差异会影响嫁接的成活率和后期生长情况,而目前对于“黑核桃+核桃”不同砧穗组合的嫁接亲和性了解不足。为此,笔者在本研究中选取6个黑核桃优良家系作为砧木,以3个新疆主栽早实品种为接穗,通过对嫁接幼苗早期的生长发育情况、物质

含量和抗氧化酶活性进行测定,以全面了解“黑核桃+核桃”不同砧穗组合的嫁接亲和性,为新疆核桃选育优良砧木提供科学依据和理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验地点位于新疆阿克苏地区温宿县“新疆佳木果树学国家长期科研基地”,地理坐标为:80°32′

15″E、41°15′31″N。砧木为黑核桃优良家系苗黑核桃1号、黑核桃2号、黑核桃3号、黑核桃4号、黑核桃5号、黑核桃6号,接穗品种为新早丰、温185、新新2。共18个砧穗组合,每组合30株(表1)。嫁接后每3 d抹芽1次,待嫁接芽长至3~5 cm后即可剪掉芽以上的砧木,半个月除草1次,每月灌水1次。开沟施肥,施用尿素与二铵(1:2)。试验所用砧穗组合于2024年6月在田间采用夏季芽接方式进行嫁接。

表1 嫁接材料及组合名对应缩写
Table 1 Abbreviations for grafting materials and combination names

接穗 Scion	砧木 Rootstock	组合 Combination	接穗 Scion	砧木 Rootstock	组合 Combination	接穗 Scion	砧木 Rootstock	组合 Combination
新早丰 Xinzaofeng	黑核桃1号 Black Walnut No. 1	Z1	温185 Wen 185	黑核桃1号 Black Walnut No. 1	W1	新新2 Xinxin 2	黑核桃1号 Black Walnut No. 1	X1
	黑核桃2号 Black Walnut No. 2	Z2		黑核桃2号 Black Walnut No. 2	W2		黑核桃2号 Black Walnut No. 2	X2
	黑核桃3号 Black Walnut No. 3	Z3		黑核桃3号 Black Walnut No. 3	W3		黑核桃3号 Black Walnut No. 3	X3
	黑核桃4号 Black Walnut No. 4	Z4		黑核桃4号 Black Walnut No. 4	W4		黑核桃4号 Black Walnut No. 4	X4
	黑核桃5号 Black Walnut No. 5	Z5		黑核桃5号 Black Walnut No. 5	W5		黑核桃5号 Black Walnut No. 5	X5
	黑核桃6号 Black Walnut No. 6	Z6		黑核桃6号 Black Walnut No. 6	W6		黑核桃6号 Black Walnut No. 6	X6

1.2 试验方法

1.2.1 植株生长量及叶面积等形态特征测定 “黑核桃+核桃”嫁接后75 d(2024-08-22)统计成活率,90 d(2024-09-07)对不同砧穗组合的植株生长量及叶面积等形态特征进行测量。

新梢长度:用卷尺测定。
新梢粗度:用游标卡尺测定。

叶长、叶宽、叶长宽比、叶周长和叶面积用LA-S植物图像分析仪(万深)测量。

嫁接成活率/%=(成活株数/嫁接株数)×100。

1.2.2 物质含量和酶活性的测定 在嫁接90 d(2024-09-07)后采摘大小均匀、完整且无病害的成熟叶片。用冰袋冷藏后带回实验室,用去离子水清洗叶片表面灰尘,后用吸水纸擦干,再用锡箔纸包好迅速用液氮预冷。存放在-80℃冰箱中,以备后用。

可溶性蛋白和可溶性糖含量分别采用考马斯亮蓝法和蒽酮比色法^[16]进行测定;过氧化氢酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和多酚氧化酶(PPO)活性采用上海酶联生物科技有限公司

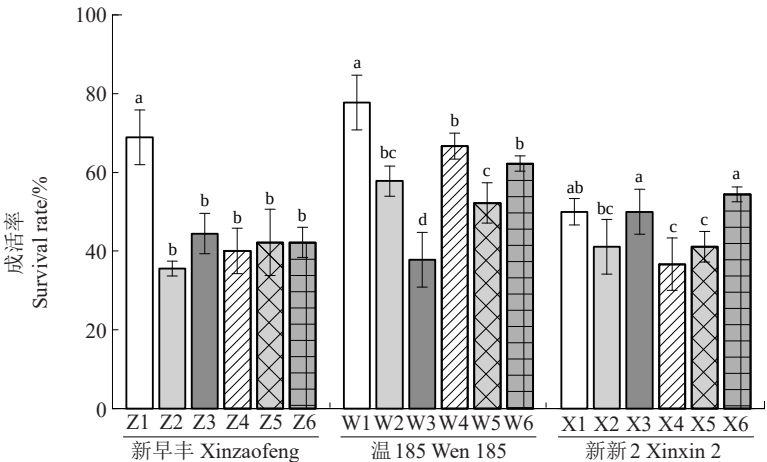
的试剂盒进行测定。
1.2.3 数据统计分析与嫁接亲和性综合评价 采用Microsoft Excel 2016与IBM SPSS Statistics 26进行数据整理、单因素方差分析、差异显著性分析、相关性分析、主成分分析等,利用Origin作图。

2 结果与分析

2.1 不同砧穗组合成活率与生长性状

不同砧穗组合嫁接成活率情况如图1所示,各砧穗组合嫁接成活率各有差异。其中以新早丰为接穗,Z1组合的嫁接成活率最高,达到68.89%,显著高于其他组合($P<0.05$),最低是Z2组合,嫁接成活率仅为35.29%。以温185为接穗,W1组合的嫁接成活率最高,达到77.78%,而W3组合的嫁接成活率最低,为37.78%,除W3组合外,其他组合嫁接成活率均高于50.00%。以新新2为接穗,X1和X3组合的嫁接成活率均为50.00%,而X4组合的嫁接成活率最低,为36.67%,X6组合的嫁接成活率最高,达到54.05%。

表2所示为不同砧穗组合对生长性状及叶表型



不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。
Different small letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同砧穗组合的成活率
Fig. 1 Survival rate of different rootstock-scion combinations

性状的比较分析。研究结果显示,不同砧穗组合在新梢长度、叶面积等参数上表现出显著差异($P<0.05$)。生长性状比较分析显示,以新早丰为接穗,Z5和Z6组合表现出较高的新梢长度,分别为24.37 cm和18.57 cm,而Z3组合的新梢长最短(10.37 cm);以温 185 为接穗,W2组合的新梢长度最高(32.73 cm),其次是W5组合(30.67 cm),最低是W4组合(20.40 cm);以新新 2 为接穗,X1和X4组合的新梢长度普遍较

短,X6组合各性状优于其他嫁接组合。需要注意的是,接穗新早丰、温 185 和新新 2 在 6 个黑核桃砧木上的新梢粗度无显著差异,大多数组合的新梢粗度在 6~8 mm 之间。从新梢长度和新梢粗度方面比较,Z5、Z6、W2 和 X6 组合嫁接苗生长旺盛,生长势好。叶表型性状比较分析显示,不同砧穗组合亲和性对 5 个叶表型性状具有重要影响。以新早丰为接穗,部分性状组合达到显著差异水平($P<0.05$),如

表 2 不同砧穗组合生长性状的差异
Table 2 Differences in growth traits of different rootstock-scion combinations

组合 Combination	新梢长度 Shoot length/cm	新梢粗度 Shoot thickness/mm	叶长 Leaf length/mm	叶宽 Leaf width/mm	叶长宽比 Leaf length- width ratio	叶周长 Leaf perimeter/mm	叶面积 Leaf area/mm ²
Z1	14.13±1.66 c	8.20±0.62 a	155.30±18.22 ab	77.60±6.81 a	2.00±0.07 ab	446.10±44.17 ab	8 186.18±1 697.02 ab
Z2	14.53±1.07 c	7.89±0.93 a	148.41±22.17 ab	75.32±8.44 a	1.97±0.13 ab	434.20±45.05 b	7 726.50±2 031.77 ab
Z3	10.37±1.10 d	6.69±1.15 a	169.17±46.61 ab	91.68±23.92 a	1.84±0.09 b	482.99±113.43 ab	12 031.75±5 316.09 ab
Z4	15.5±2.08 bc	6.53±1.62 a	132.83±27.39 b	73.32±19.75 a	1.84±0.17 b	396.02±96.36 b	7 032.41±3 077.26 b
Z5	24.37±3.72 a	7.51±1.28 a	165.78±13.42 ab	79.10±8.03 a	2.10±0.09 a	476.59±19.83 ab	9 182.30±1 788.16 ab
Z6	18.57±1.33 a	8.01±0.50 a	181.78±38.53 a	103.28±53.34 a	1.91±0.34 ab	721.38±560.94 a	12 585.23±7 963.16 a
W1	22.87±1.76 ab	6.82±1.46 a	139.59±17.75 b	69.06±8.70 c	2.02±0.09 ab	400.38±52.97 a	6 963.61±1 943.47 c
W2	32.73±4.72 a	8.66±0.59 a	141.25±23.52 b	71.49±13.59 bc	1.99±0.14 abc	411.78±64.29 a	7 230.30±2 634.5 bc
W3	20.43±5.50 b	6.95±1.22 a	146.49±22.49 ab	79.63±9.57 ab	1.84±0.12 c	422.28±69.36 a	8 310.02±2 219.92 abc
W4	20.40±4.09 b	6.58±1.44 a	145.47±10.83 ab	69.86±9.79 c	2.11±0.25 a	406.26±32.97 a	6 890.71±1 382.15 c
W5	30.67±4.37 a	8.54±1.62 a	163.52±15.96 a	81.98±6.28 a	1.99±0.10 abc	459.13±27.49 a	9 529.72±1 354.16 a
W6	24.77±8.36 ab	7.52±0.35 a	157.36±19.47 ab	82.88±7.68 a	1.90±0.11 bc	460.77±49.07 a	9 370.45±1 716.84 ab
X1	6.27±0.78 b	5.39±0.30 a	135.15±19.61 cd	65.20±6.15 c	2.08±0.29 abc	369.34±41.32 c	5 967.29±1 191.24 c
X2	17.10±2.09 a	6.58±1.76 a	133.29±16.35 cd	70.51±4.45 bc	1.89±0.15 c	372.02±39.83 c	6 453.66±1 122.12 bc
X3	25.47±2.10 a	5.64±1.83 a	146.97±21.33 bc	68.71±10.69 bc	2.14±0.11 a	400.14±62.86 bc	7 089.17±2 179.31 bc
X4	5.00±1.40 b	5.45±0.77 a	123.11±14.07 d	63.77±6.51 c	1.93±0.16 bc	345.29±31.98 c	5 646.48±993.74 c
X5	22.10±3.94 a	5.76±0.41 a	158.77±18.70 b	75.24±7.40 b	2.11±0.15 ab	434.08±40.76 b	8 311.13±1 494.48 b
X6	25.50±10.00 a	7.57±0.70 a	184.42±25.51 a	90.02±11.37 a	2.05±0.12 abc	502.93±67.66 a	11 962.51±3 037.94 a

在叶长、叶宽、叶面积和叶周长中Z6组合高于其他组合,此外,Z5组合的叶长宽比最高,为2.10;以温185为接穗,W5组合的叶长和叶面积显著大于部分嫁接组合($P<0.05$),W6和W5组合的叶宽无显著差异,但显著高于其他嫁接组合($P<0.05$)。此外,接穗温185在6个黑核桃砧木上的叶周长无显著差异;以新新2为接穗,X6组合与W5和W6组合结果相一致,均在叶长、叶宽、叶面积和叶周长等性状上表现优异。

2.2 不同砧穗组合物质含量及酶活性的差异

2.2.1 不同砧穗组合物质含量的差异 可溶性蛋白含量的提升可调节砧穗间代谢协同作用,增强愈伤组织形成能力。由图2-A可知,以新早丰为接穗,可溶性蛋白含量(w ,后同)范围为1.13~1.47 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其中含量最高为Z6组合,最低为Z5组合;Z6组合可溶性蛋白含量显著高于Z5组合($P<0.05$),与其他4个组合无显著差异;以温185为接穗,W4组合的可溶性

蛋白含量最高(1.63 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),但其他砧木的表现相对较弱,最低为W5组合(1.15 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);以新新2为接穗,X2组合的可溶性蛋白含量最高,为1.88 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,X5组合可溶性蛋白含量最低(1.10 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),且X2组合的可溶性蛋白含量显著高于其他嫁接组合($P<0.05$)。

可溶性糖含量作为渗透调节物质和能量底物,可显著提升砧穗接合区愈伤组织形成能力。由图2-B可知,接穗新早丰组合中可溶性糖含量范围在31.18~43.77 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,最高是Z6组合,最低为Z4组合,且Z6组合的可溶性糖含量是Z4组合的1.4倍;接穗温185组合中,W5组合的可溶性糖含量最高,与W1、W3和W6组合无显著差异($P>0.05$),但显著高于W2和W4组合;接穗新新2组合中,X2组合的可溶性糖含量最高(39.80 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),最低是X1组合(32.45 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2.2.2 不同砧穗组合的酶活性差异 嫁接可影响植

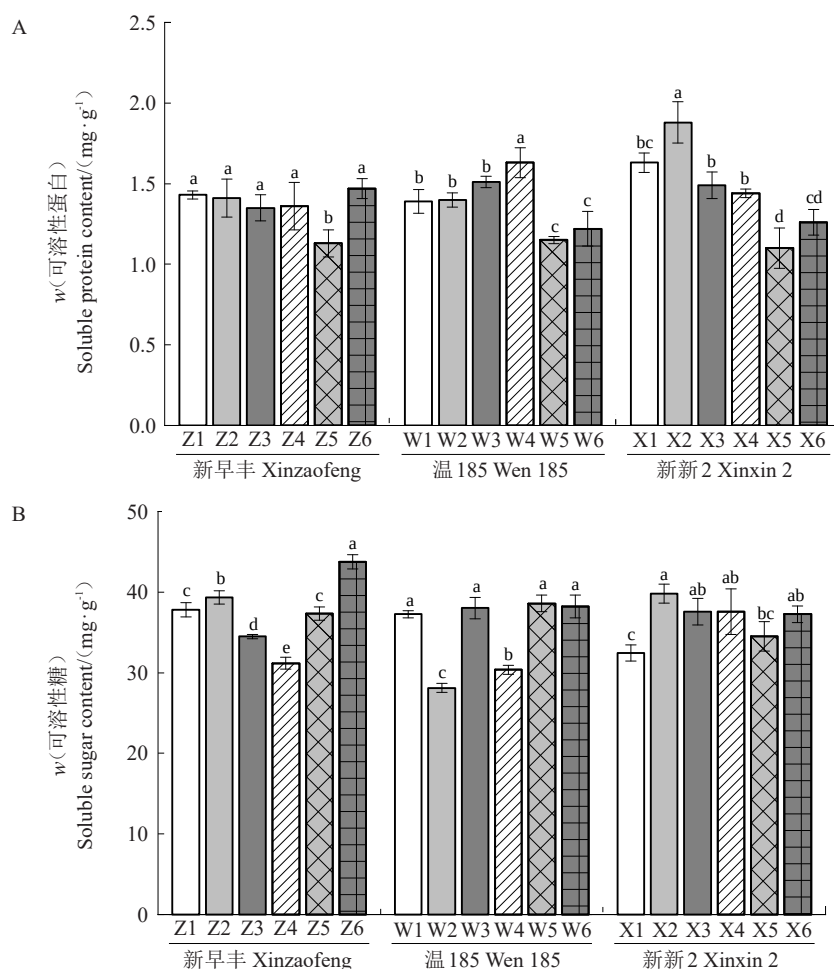


图2 不同砧穗组合可溶性蛋白(A)与可溶性糖含量(B)的差异

Fig. 2 Differences in soluble protein (A) and soluble sugar contents (B) of different rootstock-scion combinations

物体活性氧代谢系统的动态平衡,从而影响嫁接植株SOD的活性。以新早丰为接穗,SOD活性依次为 $Z1>Z4>Z2>Z5>Z6>Z3$,其中Z1组合活性最高($2\,048.58\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$),是Z3组合活性的2.33倍;以温185为接穗,SOD活性依次为 $W3>W4>W1>W6>W2>W5$,W3组合的SOD活性($2\,079.97\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于其他组合活性($P<0.05$);以新新2为接穗,SOD活性依次为 $X5>X6>X2>X3>X1>X4$,X5组合SOD($2\,123.17\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$)与X6组合活性($2\,057.60\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$)无显著差异,但显著高于其他组合($P<0.05$)(图3-A)。

在嫁接体发育过程中,POD参与木质素合成,其酶活性的变化直接影响嫁接苗的成活。以新早丰为接穗,POD活性依次为 $Z1>Z3>Z6>Z4>Z5>Z2$,其中Z1、Z3组合酶活性显著高于其他组合($P<0.05$),分别为 $3.11\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.09\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,而Z2组合酶活性最低($1.64\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$);接穗温185中,POD活性依次为 $W1>W2>W3>W6>W4>W5$,叶片POD活性在W1组合中显著高于其他砧穗组合($P<0.05$),为 $3.40\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而W5组合的活性最低,仅为 $1.25\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,是W1组合的36.76%。接穗新新2中,POD活性依次为 $X6>X2>X5>X3>X1>X4$,POD活性在X6组合上最高($2.77\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$),在X3、X1和X4组合较低(图3-B)。

CAT作为一种内源活性氧清除剂,有效保护膜结构,促进嫁接苗的生长。接穗新早丰中,CAT活性依次为 $Z1>Z6>Z2>Z3>Z5>Z4$,其中Z1、Z6、Z2组合CAT活性显著高于其他砧木($P<0.05$),Z1组合CAT活性为 $730.13\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,而Z4组合CAT活性仅为 $447.47\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$;接穗温185中,CAT活性依次为 $W6>W2>W5>W4>W1>W3$,其中W6、W2组合CAT活性分别为 $834.60\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $819.17\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于其他嫁接组合($P<0.05$),与SOD活性相反的是,CAT活性中最低是W3组合,仅为 $478.60\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$;接穗新新2中,CAT活性依次为 $X1>X2>X4>X5>X6>X3$,与SOD、POD活性相反,CAT活性在X1组合中最高,为 $936.10\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,该组合与X2组合无显著差异($P>0.05$),其次是X4组合,CAT活性为 $853.33\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,最低是X6和X3组合,分别为 $469.13\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $448.53\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,且分别是X1组合的50.12%和47.91%(图3-C)。

多酚氧化酶(PPO)是植物体内重要的保护酶,能

催化多酚类物质氧化形成醌,而醌参与保护植物免受进一步的伤害。接穗新早丰中,PPO活性依次为 $Z2>Z5>Z1>Z3>Z4>Z6$,Z2和Z5组合PPO活性显著高于其他组合($P<0.05$),分别为 $19\,682.73\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $19\,935.77\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。接穗温185中,PPO活性依次为 $W5>W2>W6>W4>W1>W3$,W5组合PPO活性最高($16\,727.10\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$),较最低组合W3高1.5倍;接穗新新2中,PPO活性依次为 $X4>X1>X2>X6>X5>X3$,其中X4组合PPO活性最高($17\,682.53\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$),其次是X1组合($17\,198.27\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$),两组合之间无显著差异($P>0.05$),X3组合仅为 $11\,282.63\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ (图3-D)。

2.3 生长性状与物质含量及酶活性的相关分析

对不同砧穗组合的14个指标进行组内相关性分析,接穗新早丰的不同组合中,新梢粗度与可溶性糖含量、CAT活性存在显著正相关关系,可溶性糖与CAT活性呈显著正相关(图4-A)。

在接穗温185中,新梢粗度与新梢长度、PPO活性呈显著正相关,而叶长与POD活性呈显著负相关,SOD与CAT活性也呈显著负相关(图4-B)。

在接穗新新2中,与接穗温185一致,新梢长度与新梢粗度呈极显著正相关。此外,SOD活性与叶长、叶周长和叶面积均呈现极显著正相关,SOD活性还与叶宽呈显著相关,PPO活性与叶长宽比、CAT活性呈显著正相关,而可溶性蛋白含量与叶长呈显著负相关,CAT活性与叶宽呈极显著负相关,与叶面积呈显著负相关,PPO活性与叶宽呈显著负相关(图4-C)。

值得注意的是,在3种接穗中,叶长与叶宽、叶周长、叶面积均有显著正相关关系,叶宽与叶周长、叶面积均有极显著正相关关系。同样地,叶周长与叶面积也有一定的相关性。

2.4 不同砧穗组合主成分分析

对不同砧穗组合的14个指标进行主成分分析,以特征值大于1为标准,选取的主成分代表供试指标的全部信息。结果如表3所示,接穗新早丰可取出4个主成分,贡献率分别为39.44%、23.93%、19.51%、11.18%,累计贡献率达到94.06%;接穗温185前4个主成分贡献率分别为49.37%、28.02%、10.36%、8.33%,累计贡献率达到96.08%;接穗新新2前4个主成分贡献率分别为61.80%、17.42%、9.93%、7.73%,累计贡献率达到96.88%。

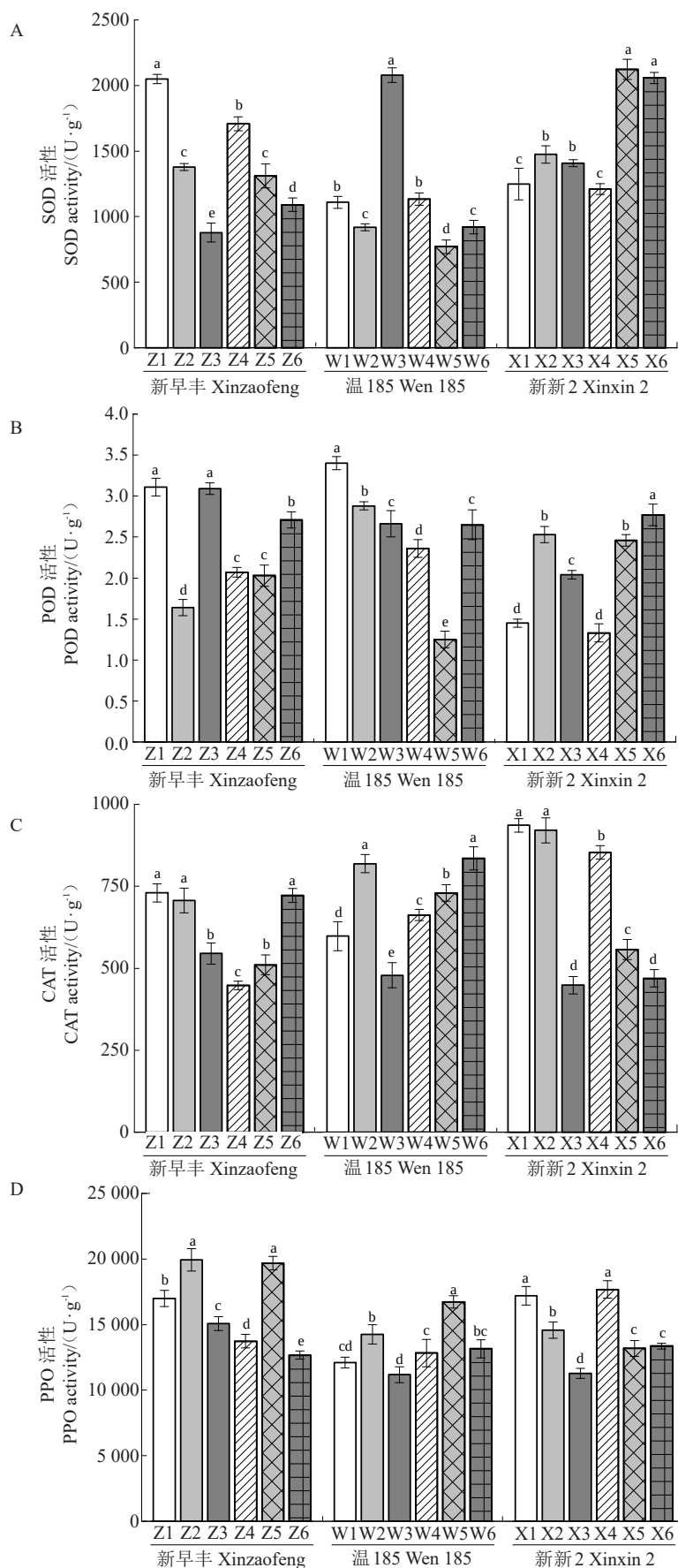
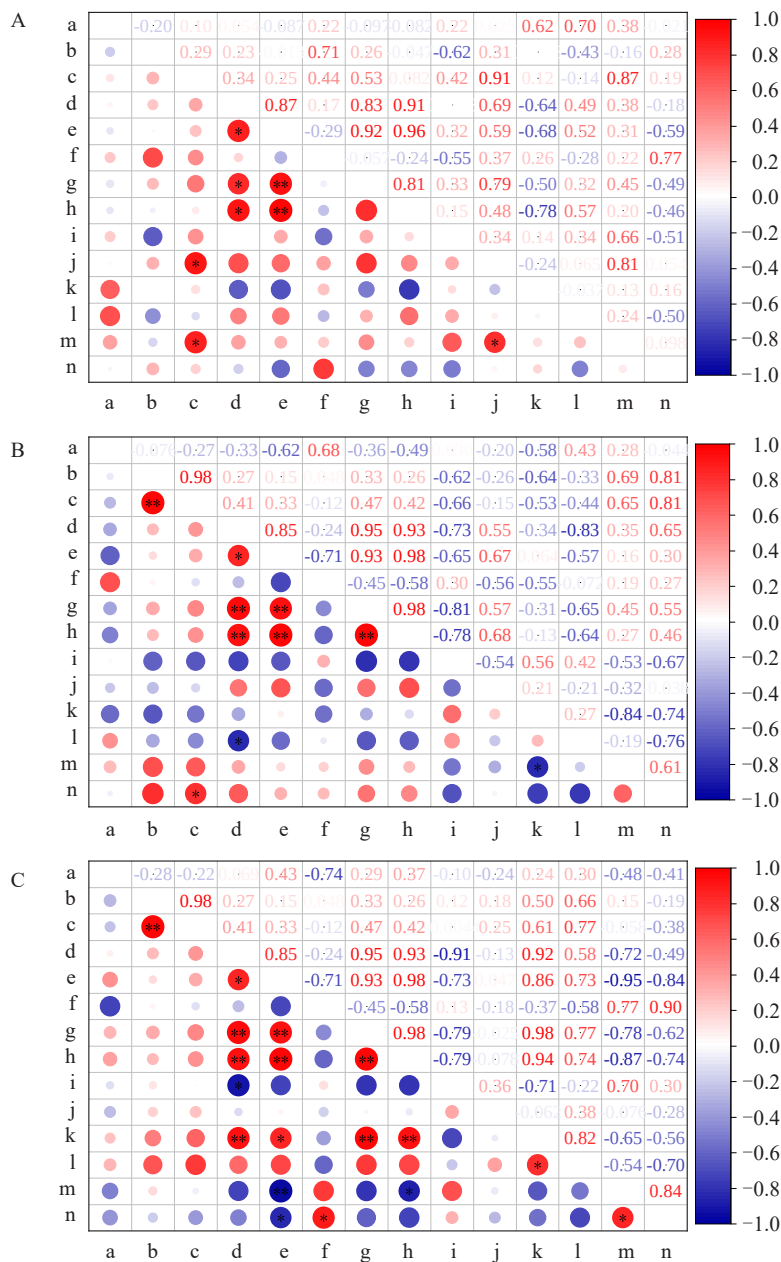


图3 不同砧穗组合 SOD (A)、POD (B)、CAT (C)、PPO (D) 的差异

Fig. 3 Differences in SOD (A), POD (B), CAT (C), and PPO (D) of different rootstock-scion combinations



A. 新早丰不同砧穗组合相关性; B. 温 185 不同砧穗组合相关性; C. 新新 2 不同砧穗组合相关性。a. 成活率; b. 新梢长度; c. 新梢粗度; d. 叶长; e. 叶宽; f. 叶长宽比; g. 叶周长; h. 叶面积; i. 可溶性蛋白含量; j. 可溶性糖含量; k. SOD 活性; l. POD 活性; m. CAT 活性; n. PPO 活性。

A. Correlation of different rootstock-scion combinations of Xin zao feng; B. Correlation of different rootstock-scion combinations of Wen185; C. Correlation of different rootstock-scion combinations of Xin xin 2; a. Survival rate; b. Shoot length; c. Shoot thickness; d. Leaf length; e. Leaf width; f. Leaf length-width ratio; g. Leaf perimeter; h. Leaf area; i. Soluble protein content; j. Soluble sugar content; k. SOD activity; l. POD activity; m. CAT activity; n. PPO activity.

图 4 不同砧穗组合 14 个指标相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of 14 indicators of different rootstock-scion combinations

以各个主成分方差贡献率为权重,对不同砧穗组合的主成分进行评分以及相应权重线性加权求和,代入各主成分得分计算公式得出不同砧穗组合的综合得分并对不同砧穗组合亲和性进行评价(表3、表4)。其中,以新早丰为接穗的组合中亲和性得分

最高为Z6组合(0.659),最低是Z4组合(-0.848);以温185为接穗的组合中亲和性得分最高是W5组合,为0.744,最低是W3组合,为-0.604;以新新2为接穗的组合中亲和性得分最高是X6组合,为0.900,最低是X1组合,为-0.640。

表 3 不同砧穗组合主成分分析数据

Table 3 Principal component analysis data for different rootstock-scion combinations

接穗 Scion	主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Accumulative contribution rate/%
新早丰 Xinzao- feng	1	5.52	39.44	39.44
	2	3.35	23.93	63.37
	3	2.73	19.51	82.88
	4	1.57	11.18	94.06
温 185 Wen 185	1	6.91	49.37	49.37
	2	3.92	28.03	77.39
	3	1.45	10.37	87.75
	4	1.17	8.33	96.08
新新 2 Xinxin 2	1	8.65	61.80	61.80
	2	2.44	17.42	79.22
	3	1.39	9.93	89.15
	4	1.08	7.73	96.88

表 4 不同砧穗组合综合评价得分与排名

Table 4 Comprehensive evaluation scores and rankings of different rootstock-scion combinations

组合 Combination	各主成分得分 Score for each principal component				综合 得分 Score	排名 Panking
	1	2	3	4		
Z1	-0.737	0.614	0.003	1.801	0.170	3
Z2	-0.858	0.991	-0.002	-1.129	-0.230	5
Z3	0.878	-1.098	-0.751	0.298	-0.092	4
Z4	-0.935	-0.953	-0.796	-0.544	-0.848	6
Z5	0.230	-0.622	1.915	-0.164	0.340	2
Z6	1.422	1.068	-0.369	-0.263	0.659	1
W1	-0.187	-0.555	1.059	-1.036	-0.212	4
W2	-1.120	1.551	-0.483	-0.502	-0.090	3
W3	0.144	-1.033	-1.731	-0.236	-0.604	6
W4	-1.050	-0.857	0.682	0.985	-0.380	5
W5	0.847	0.656	0.046	1.476	0.744	1
W6	1.367	0.239	0.427	-0.686	0.543	2
X1	-0.643	-1.092	-0.912	1.148	-0.640	6
X2	-0.101	-0.209	1.776	-0.113	0.204	2
X3	-0.902	1.623	0.017	0.639	0.074	3
X4	-0.589	-0.886	0.071	-1.080	-0.596	5
X5	0.439	0.586	-1.003	-1.276	0.059	4
X6	1.796	-0.022	0.050	0.683	0.900	1

3 讨 论

3.1 不同砧穗组合嫁接成活率及生长性状对亲和性的影响

在嫁接亲和性研究中,嫁接成活率是评价砧木和接穗亲和性的重要指标之一。亲和性高的组合通

常表现出较高的成活率。在蜜柚^[17]、荔枝^[18]、芒果^[19]研究中发现,嫁接成活率高的组合亲和性反而低。在本研究中,Z1 和 W1 组合的嫁接成活率分别为 68.89%和 77.78%,Z6 和 W5 组合的成活率分别为 42.22%和 52.22%,但 Z1 和 W1 组合的亲和性综合评价价值低于 Z6 和 W5 组合,这与前人的研究结果一致^[17-19]。说明成活率不能完全反映黑核桃砧穗组合的亲和性。这可能是受到砧木和接穗之间的遗传、生理因素影响,也有可能受到环境条件或嫁接后管理等人为因素的影响。为此,不能用单一的嫁接成活率来评价砧穗组合的亲和性,还得结合其他指标加以评价。

优良砧木对接穗的生长发育具有重要影响,嫁接亲和性高的植株生长势更强^[20-23],这与本研究结果一致。接穗新早丰和温 185 在砧木黑核桃 5 号和黑核桃 6 号上可能具有较好的生长势,能有效促进接穗的生长和叶片发育。类似地,接穗新新 2 在黑核桃 6 号上呈现出旺盛的生长势。此外,黄海等^[24]研究发现,芒果不同砧穗组合间新梢粗度无显著差异,这与本研究结果一致,可能是新梢快速纵向生长的同时,抑制了新梢的横向生长。

3.2 不同砧穗组合可溶性蛋白和可溶性糖含量对亲和性的影响

糖不仅作为能量来源,而且作为重要的信号分子,调节各种生长过程,增强植物对非生物和生物胁迫的耐受性^[25]。当植物受到胁迫时,糖可以作为渗透保护剂,增强植物对胁迫的抗性^[26-27]。之前的研究表明,在黄瓜对南瓜的异种嫁接中,糖促进了植株的发育^[28],在本研究中也证实了类似的结果。在新早丰接穗中,以黑核桃 4 号作为砧木的组合中可溶性糖含量显著低于其他组合($p<0.05$),且综合评价表现出嫁接不亲和性。这表明嫁接不亲和性可能导致嫁接植株叶片的糖合成受到抑制或消耗加速。

蛋白质不仅为细胞分裂分化提供关键物质基础,而且还兼具介导细胞间信息传递的信号分子功能^[29]。郑鑫^[30]研究发现绿宝苹果嫁接在平顶海棠上,叶片中的可溶性蛋白含量最高,有利于嫁接植株成活,亲和性好。这与本研究中 Z6 组合结果一致。

3.3 不同砧穗组合酶活性对亲和性的影响

抗氧化保护酶加速伤口的愈合,使植物能够更早恢复正常生长,嫁接可影响植株活性氧代谢系统的动态平衡,破坏或降低活性氧清除剂作用^[31-32]。在

本研究中,SOD、POD和CAT活性在黑核桃6号砧木较高,且新早丰、温185、新新2在黑核桃6号砧木上的亲和性综合评价较好。Xu等^[31]和Chen等^[33]研究表明,亲和性强的荔枝和黄瓜具有较高的抗氧化酶活性,这与本研究结果一致。然而,在黑核桃5号砧木上的抗氧化酶活性总体较低,Wang等^[34]研究柑橘发现部分组合也表现出抗氧化酶活性降低的情况,与本研究结果一致。这说明在不同组合中,各种酶的功能和贡献有所不同,也可能是嫁接初期,需要高抗氧化酶活性来维持细胞稳态,在愈合后期,亲和性好的组合通过调节ROS信号通路降低抗氧化酶活性,形成低抗氧化应激的稳态环境。

PPO是植物体内的一种保护酶,在植物体受到伤害时,与多酚类化合物相互作用产生黑色和棕色物质,形成屏障,保护植物免受细菌侵害,但抑制植物愈合^[35]。因此,嫁接部位的PPO活性越高,亲和性越低^[36]。与之相反,在本研究结果中W5组合的PPO活性最高,但其亲和性仍然最高,其原因可能是较高的PPO活性有利于木质素的合成,从而促进了导管的分化和形成。

4 结 论

本文研究了不同砧木与接穗组合的嫁接适应性,通过测定不同砧穗组合的嫁接成活率、植株生长及生理指标参数,对14个指标综合分析得出各接穗品种最适宜的砧木。接穗品种新早丰、新新2在黑核桃6号砧木上表现出最强的亲和性;接穗温185在黑核桃5号砧木上表现最优。值得注意的是,接穗新早丰不宜用黑核桃4号作砧木,接穗温185不宜用黑核桃3号作砧木,新新2不宜用黑核桃1号作砧木。笔者在本研究中建立的综合评价体系为新疆核桃主栽品种的优良砧木选择及砧穗亲和性机制研究提供了参考依据。

参考文献 References:

- [1] 胡刁,王敏珍,张治有,谈多多,张春香. 核桃不同间作模式综合性状评价[J]. 林业科技通讯,2023(11):84-88.
HU Diao, WANG Minzhen, ZHANG Zhiyou, TAN Duoduo, ZHANG Chunxiang. Comprehensive evaluation of different intercropping patterns of walnut[J]. Forest Science and Technology, 2023(11):84-88.
- [2] 许建国. 核桃育苗及丰产栽培技术[J]. 林业勘查设计,2024, 53(1):67-70.

- XU Jianguo. Walnut seedling cultivation and high-yield cultivation techniques[J]. Forest Investigation Design, 2024, 53(1):67-70.
- [3] 王磊,曹亚龙,孟海军,赵伟,张港港,韩轩轩,樊璐,卢战平,董兆斌,王根宪,吴国良. 国内外核桃品种选育研究进展[J]. 果树学报,2022,39(12):2406-2417.
WANG Lei, CAO Yalong, MENG Haijun, ZHAO Wei, ZHANG Ganggang, HAN Xuanxuan, FAN Lu, LU Zhanping, DONG Zhaobin, WANG Genxian, WU Guoliang. Research progress in walnut variety breeding at home and abroad[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(12):2406-2417.
- [4] 耿树香,宁德鲁,陈海云,贺娜. 我国不同主产区核桃品质综合评价分析[J]. 中国油脂,2020,45(4):97-101.
GENG Shuxiang, NING Delu, CHEN Haiyun, HE Na. Comprehensive evaluation and analysis on quality of walnut in different main producing areas in China[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(4):97-101.
- [5] 任欢. 新疆核桃生产发展优势及竞争力研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
REN Huan. Study on the development of production advantage and competitiveness in Xinjiang walnut[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- [6] 欧源. 核桃属不同种质耐盐性综合评价[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
OU Yuan. Comprehensive evaluation of salt tolerance in different germplasm of the genus walnut[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [7] 雷夏烁,常英英,张普,宋晓波,白永超,裴东. 核桃 *JrWOX4b* 基因的克隆和功能分析[J]. 林业科学研究,2022,35(2):37-44.
LEI Xiashuo, CHANG Yingying, ZHANG Pu, SONG Xiaobo, BAI Yongchao, PEI Dong. Cloning and functional analysis of *JrWOX4b* in *Juglans hindsii* × *Regia* 'Linzaixiang' [J]. Forest Research, 2022, 35(2):37-44.
- [8] 李铭,郑强卿,姜继元,王小华. 我国黑核桃引种及育苗技术研究进展[J]. 湖南农业科学,2010(17):123-126.
LI Ming, ZHENG Qiangqing, JIANG Jiyeuan, WANG Xiaohua. Research progresses on introduction and seedlings-breeding techniques for black walnut in China[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010(17):123-126.
- [9] ZHOU H J, YAN F, HAO F, YE H, YUE M, WOESTE K, ZHAO P, ZHANG S X. Pan-genome and transcriptome analyses provide insights into genomic variation and differential gene expression profiles related to disease resistance and fatty acid biosynthesis in eastern black walnut (*Juglans nigra*) [J]. Horticulture Research, 2023, 10(3):uhad015.
- [10] 李俊楠. 浅析美国黑核桃嫁接栽培技术及发展前景[J]. 内蒙古林业调查设计,2020,43(1):19-20.
LI Junnan. Analysis on grafting cultivation techniques and development prospects of American black walnut[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2020, 43(1):19-20.

- [11] HABIBI F, LIU T, FOLTA K, SARKHOSH A. Physiological, biochemical, and molecular aspects of grafting in fruit trees[J]. Horticulture Research, 2022, 9: uhac032.
- [12] HUANG Q Y, ZHANG B, WANG D, ZHAO M, CHEN L, YANG X J, YANG Y B, WANG M, CHEN Z H, ZHANG Z K, QIN Y H, ZHAO J T, HU G B. Physiological, anatomical and transcriptome analyses reveal ‘Huaizhi’ as widely compatible rootstock in *Litchi chinensis* Sonn. grafting[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 331: 113161.
- [13] 刘广. 南瓜砧木对嫁接西瓜品质影响的分子机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- LIU Guang. Research on molecular mechanism of pumpkin rootstock effects on fruit quality of grafted watermelon[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.
- [14] XIE R, HE W, CHAI J F, LUO L, WANG Y, CHEN Q, TANG H R, WANG X R. A study of scion phenotypes in pummelo grafted onto a new *Citrus* rootstock *Citrus junos* ‘Pujiang Xiangcheng’[J]. Horticulturae, 2022, 8(11): 1039.
- [15] KUMAR P, LUCINI L, ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, KALUNKE R M, COLLA G. Insight into the role of grafting and arbuscular mycorrhiza on cadmium stress tolerance in tomato[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 477.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 144-147.
- GAO Junfeng. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 144-147.
- [17] 龚艳菁, 祁有恒, 伏晓科, 杨芮, 陈涛, 汤浩茹, 王小蓉. 蜜柚不同砧穗组合苗期嫁接亲和性评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(3): 287-295.
- GONG Yanqing, QI Youheng, FU Xiaoke, YANG Rui, CHEN Tao, TANG Haoru, WANG Xiaorong. Graft compatibility evaluation of different rootstock-scion combinations of honey pomelo at seedling stage[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2016, 24(3): 287-295.
- [18] 许泽康. ‘南岛无核’荔枝与不同砧木嫁接亲和性研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- XU Zekang. Study on graft compatibility of ‘Nandao Wuhe’ and different litchi rootstocks[D]. Haikou: Hainan University, 2018.
- [19] 李娜, 朱培林, 丰采, 温敏学, 方升佐, 尚旭岚. 青钱柳嫁接愈合过程中砧穗生理特性及其与亲和性的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 13-20.
- LI Na, ZHU Peilin, FENG Cai, WEN Minxue, FANG Shengzuo, SHANG Xulan. Variations in physiological characteristics of rootstock-scion and its relationship to graft compatibility during the grafting union process of *Cyclocarya paliurus*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(1): 13-20.
- [20] 莫荣利, 张娜, 周青龙, 于翠, 张成, 朱志贤, 董朝霞, 孙兵, 李勇, 黄锦, 邓文, 胡兴明. 不同砧木对果桑品种紫晶植株生长及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(9): 1659-1668.
- MO Rongli, ZHANG Na, ZHOU Qinglong, YU Cui, ZHANG Cheng, ZHU Zhixian, DONG Zhaoxia, SUN Bing, LI Yong, HUANG Jin, DENG Wen, HU Xingming. Influence of different rootstocks on tree growth and fruit quality of *Morus multicaulis* ‘Zijing’[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(9): 1659-1668.
- [21] 张宝娟, 张东, 马娟娟, 宋春晖, 李文强, 赵彩平, 杨杰, 韩明玉. 渭北地区富士苹果不同砧穗组合幼树内源激素含量与早花性和易成形性关系的研究[J]. 园艺学报, 2017, 44(10): 1837-1848.
- ZHANG Baojuan, ZHANG Dong, MA Juanjuan, SONG Chunhui, LI Wenqiang, ZHAO Caiping, YANG Jie, HAN Mingyu. Studies on relationships among endogenous hormones, precocious flower and easy formability in different scion-rootstock combinations for young apple trees in Weibei area[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(10): 1837-1848.
- [22] 李超, 白世践, 耿新丽, 陈光, 赵荣华, 蔡军社. 不同砧木对‘赤霞珠’葡萄生长发育的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(10): 1241-1250.
- LI Chao, BAI Shijian, GENG Xinli, CHEN Guang, ZHAO Ronghua, CAI Junshe. Effects of rootstocks on growth and development of ‘Cabernet Sauvignon’ grape[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(10): 1241-1250.
- [23] 魏灵珠, 沈碧薇, 程建徽, 向江, 崔鹏飞, 李明山, 吴江. 砧木对‘新雅’葡萄生长及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(9): 1346-1357.
- WEI Lingzhu, SHEN Biwei, CHENG Jianhui, XIANG Jiang, CUI Pengfei, LI Mingshan, WU Jiang. Effect of different rootstocks on growth and quality of ‘Xinya’ grape[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(9): 1346-1357.
- [24] 黄海, 段军娜, 刘荣, 党志国, 雷新涛, 康专苗, 刘清国, 彭杨, 范建新, 龚德勇. 芒果不同砧穗组合早期嫁接亲和性综合评价[J]. 南方农业学报, 2022, 53(5): 1216-1226.
- HUANG Hai, DUAN Junna, LIU Rong, DANG Zhiguo, LEI Xintao, KANG Zhuanmiao, LIU Qingguo, PENG Yang, FAN Jianxin, GONG Deyong. Comprehensive evaluation of grafting compatibility of different stock-scion combinations in mango[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5): 1216-1226.
- [25] WU Y, CHEN H N, WU M B, ZHOU Y Y, YU C Y, YANG Q H, ROLLAND F, VAN DE POEL B, BOUZAYEN M, HU N, WANG Y K, LIU M C. A vacuolar invertase gene *SIII* modulates sugar metabolism and postharvest fruit quality and stress resistance in tomato[J]. Horticulture Research, 2025, 12(1): uhae283.
- [26] EH T J, JIANG Y X, JIANG M Q, LI J X, LEI P, JI X M, KIM H I, ZHAO X Y, MENG F J. The role of trehalose metabolism in plant stress tolerance[J]. Journal of Advanced Research, 2025, 76: 57-72.
- [27] FENG Z Q, LI T, LI X Y, LUO L X, LI Z, LIU C L, GE S F, ZHU Z L, LI Y Y, JIANG H, JIANG Y M. Enhancement of apple stress resistance via proline elevation by sugar substitutes[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(17): 9548.
- [28] MIAO L, LI Q, SUN T S, CHAI S, WANG C L, BAI L Q, SUN M

- T, LI Y S, QIN X, ZHANG Z H, YU X C. Sugars promote graft union development in the heterograft of cucumber onto pumpkin[J]. Horticulture Research, 2021, 8: 146.
- [29] 苗丽, 李衍素, 范兴强, 贺超兴, 于贤昌. 植物嫁接体接口愈合机制的研究进展[J]. 植物生理学报, 2017, 53(1): 17-28.
- MIAO Li, LI Yansu, FAN Xingqiang, HE Chaoxing, YU Xianchang. Research advances on mechanism of interface healing of plant grafting[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(1): 17-28.
- [30] 郑鑫. 绿宝苹果与不同砧木嫁接亲和性研究[D]. 天津: 天津农学院, 2016.
- ZHENG Xin. Study on graft compatibility between 'Bramley's seedling' apple and different rootstocks[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2016.
- [31] XU Q, GUO S R, LI H, DU N S, SHU S, SUN J. Physiological aspects of compatibility and incompatibility in grafted cucumber seedlings[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2015, 140(4): 299-307.
- [32] LIANG L, TANG W, LIAN H S, SUN B, HUANG Z, SUN G C, LI X M, TU L H, LI H X, TANG Y. Grafting promoted antioxidant capacity and carbon and nitrogen metabolism of bitter melon seedlings under heat stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1074889.
- [33] CHEN Z, ZHAO J T, QIN Y H, HU G B. Study on the graft compatibility between 'Jingganghongnuo' and other litchi cultivars[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 199: 56-62.
- [34] WANG T, DENG L J, HUANG S J, XIONG B, IHTISHAM M, ZHENG Z D, ZHENG W, QIN Z Y, ZHANG M F, SUN G C, WANG J, WANG Z H. Genetic relationship, SPAD reading, and soluble sugar content as indices for evaluating the graft compatibility of citrus interstocks[J]. Biology, 2022, 11(11): 1639.
- [35] LÓPEZ-GÓMEZ E, SAN JUAN M A, DIAZ-VIVANCOS P, MATAIX-BENEYTO J, GARCÍA-LEGAZ M F, HERNÁNDEZ J A. Effect of rootstocks grafting and boron on the antioxidant systems and salinity tolerance of loquat plants (*Eriobotrya japonica* Lindl.)[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60(2): 151-158.
- [36] SHI F H, NI Y, QIU Y H, SHEN Y B. Changes in phytohormone and antioxidant enzyme activities during the healing process of different crabapple rootstock-scion combinations[J]. Forests, 2023, 14(7): 1362.