

# 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果生长特性、叶片生理及果实品质的影响

董铁<sup>1a</sup>, 王红平<sup>1,2a</sup>, 孙文泰<sup>1</sup>, 尹晓宁<sup>1</sup>, 牛军强<sup>1</sup>, 刘兴禄<sup>1</sup>, 马明<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070; <sup>2</sup>甘肃农业大学园艺学院, 兰州 730070)

**摘要:**【目的】探究不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果树体结构的组成、叶片抗氧化酶活性及果实品质的影响,为筛选适宜陇东地区密植的砧穗组合提供参考依据。【方法】以八棱海棠为基础,SH40、M26、SH38、B9、M9、M9-T337、Y-1、GM256为中间砧,嫁接‘长富2号’为试验材料。【结果】8个砧穗组合的幼树矮化程度由强到弱依次为M9-T337>M9>M26>Y-1>GM256>SH40>SH38>B9。M9-T337、M26、M9树高和冠幅较其他砧穗组合明显减小,而主枝分支数量和干径横截面积显著高于其他组合。M9-T337、M26、M9的枝条生长量、枝条总量和长枝比例较其他砧穗组合明显减小,而短枝比例显著高于其他砧穗组合。M9-T337、M26和M9单果质量、硬度、果形指数和可溶性固形物含量显著高于其他砧穗组合,而可滴定酸含量明显减小。通过隶属函数法综合评价,得出各砧穗组合在生长势(致矮效果)、抗氧化酶活性和果实品质等方面的排序是M9-T337>M9>M26>SH38>SH40>Y-1>GM256>B9。【结论】陇东地区以八棱海棠为基础,以M9-T337、M9和M26为中间砧,‘长富2号’作为接穗品种较佳,可考虑作为当地苹果栽培的首选砧穗组合。

**关键词:** 苹果; ‘长富2号’; 砧穗组合; 矮化中间砧; 生长特性; 抗氧化酶活性; 果实品质

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2020)12-1846-10

## Effects of different dwarfing interstocks on tree growth characteristics, leaf physiology and fruit quality of ‘Nagano Fuji No.2’ apple

DONG Tie<sup>1a</sup>, WANG Hongping<sup>1,2a</sup>, SUN Wentai<sup>1</sup>, YIN Xiaoning<sup>1</sup>, NIU Junqiang<sup>1</sup>, LIU Xinglu<sup>1</sup>, MA Ming<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Fruit and Flower, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; <sup>2</sup>College of Horticulture, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** 【Objective】High density planting with dwarfing rootstock is a new cultivation pattern for apple in China. Screening of rootstock-scion combination is important for high density planting. Dwarfing effect, adaptability, productivity and fruit quality are the main indexes for the evaluation of rootstock-scion combination. This article aimed to study the effect of different dwarfing interstocks on the growth structure composition and antioxidant enzyme activity and fruit quality of ‘Nagano Fuji No.2’ apple as scion cultivar in order to provide reference for screening scion-rootstock combination suitable for planting in Longdong area of Gansu province. 【Methods】‘Nagano Fuji No.2’ were grafted onto SH40, M26, SH38, B9, M9, M9-T337, Y-1, GM256 as interstocks with plantlets generated from tissue culture of *Malus robusta* Rehd. as rootstock in containers (36 cm × 28 cm × 32 cm) in 2012. The grafted plants were transplanted in the field in 2016. The evaluation was carried out in 2018. The effect of dwarfing interstocks on the fruit quality were evaluated based on membership values of function ingredients calculated by the method of membership function and all the collected data were analyzed using SPSS 19.0.

收稿日期: 2020-05-22 接受日期: 2020-07-22

基金项目: 国家苹果产业技术体系专项资金(CARS-27); 国家重点研发计划课题(2016YFD0201135); 甘肃省苹果产业科技攻关项目(GPCK2013-3); 公益性行业(农业)科研专项(201303104); 农业农村部西北地区果树科学观测实验站

作者简介: 董铁, 副研究员, 研究方向为果树栽培生理与育种。Tel: 13919206727, E-mail: 972465347@qq.com。a为共同第一作者。王红平, 男, 硕士, 研究方向为果树栽培生理与育种。Tel: 17739805480, E-mail: 1214995694@qq.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 13893685370, E-mail: maming65118@163.com

Growth habits of the trees were quantified by tree height, canopy diameter, circumference and total shoot number and proportions of different types of shoots were measured in 2015. The method of membership function was used to evaluate the suitability and dwarfing effect of the stock/interstock/scion combinations. The tree growth characteristics, morphological appearance, leaf physiological activity, antioxidant enzyme and fruit quality were used to evaluate the dwarfing effect of different combinations

**【Results】** The dwarfing degree of the saplings eight rootstock /interstock/scion combinations from strong to weak was M9-T337> M9 > M26 > Y-1 > GM256 > SH40 > SH38 > B9. The effect of 8 dwarfing interstocks on the number of main branches and the cross-sectional area of the dry diameter of ‘Nagano Fuji No.2’ was Y-1 > M9 > GM256 > B9 > M9-T337 > SH38 > SH40 > M26 from large to small. The variation coefficients of plant height, crown width, number of main branches and cross-sectional area of dry diameter were 13.34%, 10.78%, 27.40% and 30.20% respectively. The long-branch ratio of M9 and T337 as interstock were 6.57% and 7.30% while the long-branch ratio of other combinations was between 10.80% and 17.57%. The variation coefficients of branch growth, total number of branches, proportion of long branches, proportion of medium branches and proportion of short branches were respectively 23.11%, 18.56%, 31.24%, 25.71% and 12.27%. The activity of SOD, POD, PPO and IOD of each combination was M9-T337 > M9 > M26 > Y-1 > GM256 > SH40 > SH38 > B9 from large to small. The variation coefficient of SOD, POD, PPO and IOD enzyme activities were 55.22%, 50.98%, 26.30% and 35.83%, respectively. The comprehensive evaluation index of each combination was M9-T337 > M9 > M26 > SH38 > SH40 > Y-1 > GM256 > B9. The tree height and crown width of M9-T337, M26 and M9 interstocks were significantly lower than those of other interstocks, while the number of main branches and the cross-sectional area of trunk diameter were significantly higher than those of other interstocks. M9-T337, M26 and M9 had significantly lower shoot growth, total shoot amount and proportion of long shoot than other combinations. The activities of SOD, POD, PPO and IOD of each combination from high to low were M9-T337 > M9 > M26 > Y-1 > GM256 > SH40 > SH38 > B9. The single fruit weight, fruit hardness and soluble solid content of the fruits of ‘Nagano Fuji No.2’ apple grafted on M9-T337, M26 and M9 as interstock were significantly higher than those on other interstocks, while titratable acid was significantly lower than on other interstocks. The content of oxalic acid, tartaric acid and malic acid of the fruits of ‘Nagano Fuji No.2’ apple grafted on M9-T337, M9 and M26 as interstock were significantly higher than those on other interstocks.

**【Concluision】** The rank of different interstock in dwarfing effect, anatomical structure, antioxidant enzyme activity and fruit quality is M9-T337 > M9 > M26 > SH38 > SH40 > Y-1 > GM256 > B9. M9-T337, M9 and M26 might be the best interstock combination in Long dong area of Gasu province which could be possibly considered as the first choice for cultivation. Long term evaluation is needed for more precise conclusion.

**Key words:** Apple; ‘Nagano Fuji No.2’ apple; Rootstock combination; Dwarfing interstocks; Growth characteristics; Antioxidant enzyme activity; Fruit quality

矮化密植栽培已发展成为苹果生产的主流栽培模式,应用矮化砧木是实现苹果矮化栽培的主要途径之一<sup>[1]</sup>。目前我国已先后引进、选育了大量的矮化砧木,但由于各地气候类型差异较大,这些矮化砧木的应用并不普遍,因此开展砧穗组合筛选成为推广矮化密植栽培的重要工作<sup>[2-3]</sup>。目前生产中多采用矮化中间砧,一方面矮化中间砧可以控制枝条生长,

促进营养生长向生殖生长转化,实现早果、丰产、优质生产;另一方面矮化中间砧作为嫁接果树的重要组成部分,对砧木的根系生长、接穗生长量、光合作用、果实品质及产量、矿质元素的吸收和运转等有显著的影响。赵德英等<sup>[4]</sup>研究表明,矮化中间砧通过降低树体高度、减小干径横截面积、新梢长度和节间长度等达到致矮效果。李民吉等<sup>[5]</sup>研究表明,矮化

中间砧可通过增加短枝数量,减少中、长枝数量来维持树势的稳定性。徐继忠等<sup>[6]</sup>和隗晓雯等<sup>[7]</sup>研究表明,矮化效果越强的砧木 POD、IOD、SOD 酶活性越高,主要表现为极矮化>半矮化>矮化>乔化。前人对苹果矮化自根砧的矮化机制及国内外引进砧木的适应性研究较多,且对成龄树的研究较多,而对‘长富2号’苹果嫁接不同矮化中间砧构成的幼树树体的生长特性、叶片生理和果实品质报道较少。陇东地区是我国的苹果优势产区之一,该地区的气候特点是冬春低温干旱,苹果树在冬季极易发生抽条和冻害,而夏季高温多雨树体营养生长旺盛,树势难以控制,花芽分化困难,因此选择矮化效果好的砧木是陇东地区砧穗组合筛选的关键。笔者以国内外常见的 SH40、M26、SH38、B9、M9、M9-T337、Y-1 和 GM256 矮化中间砧搭配相同的‘长富2号’品种砧穗组合作为试验材料,于2018年果树停长期进行田间数据调查,并测定叶片抗氧化酶活性和果实品质等指标,旨在选配陇东地区优良的苹果砧穗组合,以期对苹果矮化密植栽培进行指导和推广。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验时间、地点与试验区概况

试验于2012年4月—2018年10月在甘肃省平凉市静宁县国家苹果产业体系综合试验站(35°24'51"N,105°44'0"E)进行。年平均温度8.3℃,≥10℃积温2 674.8℃,年日照时数2 214.8 h,无霜期169 d,年降水量468.8 mm,主要集中在7—9月份,历年极端最高气温39.70℃,极端最低气温-32.85℃。试验园水肥管理状况良好,均为树盘起垄覆膜栽培,每年春季、秋两季各灌水1次。在10月下旬距离中心干20 cm处挖深10 cm的环状沟,在沟内每株均匀施<sup>15</sup>N-尿素(上海化工研究院生产,丰度10.22%)0.5 g,同时施入普通尿素13.1 g,二铵20 g,硫酸钾18.5 g。

### 1.2 幼树育苗

于2012年4月30日在36 cm×28 cm×32 cm的加仑盆栽中栽植1 a(年)生八棱海棠组培苗,同年8月采集 SH40、M26、SH38、B9、M9、M9-T337、Y-1、GM256 的中间砧(表1)接穗于地面5 cm处进行芽接,2013年4月剪砧,同年8月于中间砧30 cm处嫁接‘长富2号’苹果接芽,2014年4月剪砧,2014年秋季成苗。2018年春季选取长势、大小一致的苗木,中

表1 供试矮化砧木及引种单位  
Table 1 dwarfing interstocks and their sources

序号 No.	矮化中间砧 Dwarf interstock	来源 Introduction unit
1	SH40	山西省农业科学院果树研究所 Pomology Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences
2	M26	英国茂林试验站 Maolin Test Station, UK
3	SH38	山西省农业科学院果树研究所 Pomology Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences
4	B9	前苏联米丘林大学 Maolin Test Station, UK
5	M9	英国茂林试验站 Maolin Test Station, UK
6	M9-T337	英国茂林试验站 Maolin Test Station, UK
7	Y-1	山西省农业科学院果树研究所 Pomology Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences
8	GM256	吉林省农业科学院果树研究所 Fruit Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences

间砧长度20 cm,中间砧露出地面10 cm,品种嫁接口以上10 cm处粗度约为0.75 cm的砧穗组合苗为试验材料。

### 1.3 测定指标和方法

1.3.1 植株形态指标的测定 2018年10月25日新梢停长后,每个砧穗组合分别选取生长势一致、无病虫害、健壮的植株10株,用钢卷尺测量树高、冠幅和主枝分枝数量。树高的测量范围为露土树干基部至中心干顶梢;用卷尺分别测量东西和南北方向冠径,取平均值记为每棵树的冠幅;用游标卡尺分别测量东西和南北方向嫁接口上方15 cm处树干干径,取其平均值,作为每棵树树干的干径,并计算干径横截面积。统计树体枝类结构组成短枝(长度<5 cm)、中枝(15 cm≤长度<30 cm)、长枝(30 cm≤长度<60 cm)的数量,并计算总枝数量和枝类比例,具体参照尚志华等<sup>[8]</sup>和张强等<sup>[9]</sup>的方法。

1.3.2 叶片抗氧化酶活性的测定 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑光还原法;过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法;过氧化物酶(PPO)活性的测定采用愈创木酚法;吡啶乙酸氧化酶(IOD)含量的测定采用黄群生的方法测定<sup>[10]</sup>。

1.3.3 果实品质的测定 于2018年10月下旬果实成熟期进行果实品质的测定。每砧穗组合采集树冠东、西、南、北4个方向的果实10个。用百分之一天

平称量单果质量,GY-1型果实硬度计测量果实硬度,采用PAL-1型手持数字折射计(日本ATAGO公司生产)测定可溶性固形物含量,GMK-835F苹果酸度测定仪测定可滴定酸含量。

1.3.4 砧穗组合的综合效果评价方法 砧穗组合效果的评价指标多,指标权重大小不一,因此单一指标很难对其进行正确评价。根据试验结果利用变异系数法对参评指标赋予不同权重,结合隶属函数法,计算各砧穗组合综合评价指数,根据指数大小对砧穗组合效果进行排序。计算公式如下:

权重系数:  $W_i = CV_i / \sum_{i=1}^n (CV_i)$ ,  $CV_i$  代表  $i$  指标的变异系数。

隶属函数值:  $X_j = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ , 其中  $X$  代表测定指标的平均值,  $X_{\min}$  代表指标的最小值,  $X_{\max}$  代表指标的最大值。

综合评价指数:  $P_{ij} = \sum_{j=1}^n (W_j \times X_j)$

#### 1.4 数据处理

用 Microsoft Office Excel 2010 进行数据处理,结合 SPSS 22.0 进行方差分析,统计分析采用单因素 ANOVA 的 LSD 比较处理间的差异显著性 ( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果树体生长结构组成的影响

由表 2 可知,八棱海棠基础上嫁接 8 个矮化中间

砧对‘长富2号’的树高、冠幅、主枝分支数量和干径横截面积的影响差异显著。各矮化中间砧嫁接树最高的是 B9,接近 300.00 cm,并显著高于其他矮化中间砧 ( $p < 0.05$ );SH40、SH38、GM256 的嫁接树高较高,为 260.00~280.00 cm,M26、M9、Y-1 的嫁接树高较低,为 240.00~250.00 cm,T337 的嫁接树高最低,为 180.00 cm 左右,并显著低于其他矮化中间砧 ( $p < 0.05$ )。8 个矮化中间砧嫁接‘长富2号’冠幅最大的是 B9(180.57 cm);其次是 SH40、SH38、GM256 的冠幅变化程度在 175.00 cm 附近,M26、M9、Y-1 的冠幅为 150.00~160.00 cm,T337 的冠幅最低(130.70 cm),并显著低于其他矮化中间砧 ( $p < 0.05$ )。综上所述,8 个矮化中间砧对‘长富2号’株高和冠幅的影响结果一致,由大到小依次是 B9>SH38>SH40>GM256>Y-1>M26>M9>T337。8 个矮化中间砧嫁接‘长富2号’主枝分枝数量为 11.33~26.67,Y-1 的主枝分枝数量最多,M9、GM256 的较多,SH38、SH40 的次之,M26 的主枝分枝数量最少。干横截面积为 7.99~16.89 cm<sup>2</sup>,Y-1 的干横截面积最大,M9、GM256 的次之,M26 的干横截面积最小。由此可见,8 个矮化中间砧对‘长富2号’的主枝分枝数量和干径横截面积的影响结果一致,由大到小依次是 Y-1>M9>GM256>B9>T337>SH38>SH40>M26。株高、冠幅、主枝分枝数量和干径横截面积的变异系数分别为 13.34%、10.78%、27.40%、30.20%。

表 2 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果树体生长期发育的影响

Table 2 Effects of different dwarfing intermediate anvil on the growth period of ‘Nagano Fuji No.2’ apple

砧穗组合 Scion-rootstock combination	株高 Tree height/cm	冠幅 Crown width/cm	主枝分枝数 Number of main branches	干径横截面积 Trunk cross-sectional area/cm <sup>2</sup>
长富2号/SH40/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH40/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	268.27±0.64 c	258.80±0.87 d	15.07±0.09 d	16.68±0.37 a
长富2号/M26/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M26/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	250.63±0.60 e	152.97±1.30 bc	11.33±0.45 e	9.48±0.53 d
长富2号/SH38/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH38/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	280.57±0.66 b	177.67±5.90 a	16.43±0.38 c	14.56±0.62 b
长富2号/B9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/B9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	299.10±0.85 a	180.57±1.01 a	17.40±0.40 c	8.63±0.42 de
长富2号/M9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	247.13±1.90 e	150.17±0.34 c	24.17±0.58 b	12.67±0.29 c
长富2号/T337/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/T337/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	182.57±2.28 f	130.70±0.55 d	16.50±0.21 c	16.02±0.44 a
长富2号/Y-1/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/Y-1/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	255.43±0.61 d	159.30±0.75 b	26.67±0.20 a	8.61±0.06 de
长富2号/GM256/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/GM256/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	258.80±0.87 d	175.36±0.65 a	22.03±0.35 b	8.07±0.08 e
变异系数 Coefficient of variation /%	13.34	10.78	27.40	30.20

注:数据为 2018 的平均值,不同小写字母表示经 Duncana 检验有显著差异 ( $p < 0.05$ )。下同。

Note: Data are average values recorded in 2018, different small letters in the same column indicate significant difference at  $p < 0.05$ . The same below.

## 2.2 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果树体枝类结构组成的影响

由表3可知,八棱海棠基础上嫁接8个矮化中间砧对‘长富2号’的枝条生长量、总枝量和枝类组成影响差异显著。各砧穗组合枝条生长量和枝条总量均是SH38、GM256和SH40的较高,M26、T337和M9的次之,Y-1和B9的最低。在枝类组成中M9和T337短枝比例超过75.00%,显著大于其他组合,而

长枝比例不足10.0%,明显小于其他组合。一般观点认为10%~20%的长枝比例对维持矮砧树树势有利,由此可见M9和T337的长枝比例相对不足,前期可能造成树体早期衰弱,而其他砧穗组合的长枝比例为10.80%~17.57%,可以满足树体的生长和产量形成。枝条生长量、枝条总量、长枝比例、中枝比例和短枝比例的变异系数分别为23.11%、18.56%、31.24%、25.71%和12.27%。

表3 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果树体枝类结构组成的差异

Table 3 The difference of different dwarfing intermediate anvil on the branch structure of ‘Nagano Fuji No.2’ apple tree

砧穗组合 Scion-rootstock combination	枝条生长量 Growth increment of branch/cm	枝条总数 Total shoot	枝类组成 The proportion of different shoot types/%		
			长枝比例 Long shoot	中枝比例 Medium shoot	短枝比例 Spur shoot
长富2号/SH40/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH40/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	1 255.50±17.20 ab	206.13±3.38 bc	13.47±0.63 c	22.60±1.10 c	63.93±0.55 d
长富2号/M26/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M26/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	1 359.59±0.35 a	249.33±3.76 a	10.80±0.59 d	30.83±1.19 a	63.36±1.74 d
长富2号/SH38/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH38/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	1 256.59±18.84 ab	246.33±4.67 ab	12.36±0.68 d	23.70±1.32 b	63.94±1.97 c
长富2号/B9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/B9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	743.94±23.36 f	153.35±2.71 e	17.57±0.49 a	30.33±0.30 a	52.09±0.58 e
长富2号/M9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	1 162.75±13.24 b	177.46±1.19 d	6.57±0.67 e	17.45±0.34 e	75.97±1.00 ab
长富2号/T337/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/T337/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	939.48±20.34 d	175.64±1.07 d	7.30±0.50 e	14.62±0.35 f	78.08±0.85 a
长富2号/Y-1/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/Y-1/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	759.95±13.14 f	161.97±0.98 e	15.45±0.58 ab	20.45±0.35 cd	64.10±0.93 d
长富2号/GM256/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/GM256/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	889.91±5.21 e	193.70±3.40 c	12.60±0.61 d	19.51±0.60 e	67.89±0.29 c
变异系数 Coefficient of variation/%	23.11	18.56	31.24	25.71	12.27

## 2.3 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果叶片抗氧化酶SOD、POD、PPO和IOD活性的影响

由表4可知,八棱海棠基础上嫁接8个不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果叶片的SOD、POD、PPO和IOD酶活性影响差异显著。GM256的SOD酶活性达最高(188.51 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著高于其他砧穗组合( $p < 0.05$ );M26、M9的SOD酶活性较高,分别为133.96、138.95 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,但两者差异不显著( $p > 0.05$ );SH40、SH38、Y-1、GM256的SOD酶活性次之,分别为68.88、51.66、72.72、69.07 U·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>,但彼此之间差异不显著( $p > 0.05$ );B9的SOD酶活性最低(36.91 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著低于其他砧穗组合( $p < 0.05$ )。T337的POD酶活性最高(201.40 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著高于其他砧穗组合( $p < 0.05$ );M26、M9、Y-1的POD酶活性较高,分别为114.78、116.66、111.10 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,但三者之间差异不显著

( $p > 0.05$ );SH40、SH38、Y-1的POD酶活性次之,分别为63.97、52.82、71.05 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,但三者之间差异不显著( $p > 0.05$ );B9的POD酶活性最低(42.53 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著低于其他砧穗组合( $p < 0.05$ )。T337的PPO酶活性最高(840.00 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著高于其他砧穗组合( $p < 0.05$ );M26、M9、Y-1的PPO酶活性较高,分别为661.60、763.33、650.00 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>;SH40、SH38的PPO酶活性次之,分别为505.07、428.27 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>;B9的PPO酶活性最低(396.93 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著低于其他砧穗组合( $p < 0.05$ )。各砧穗组合的IOD酶活性差异显著。M9、T337的IOD酶活性含量分别为519.33、502.31 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,并显著高于其他砧穗组合( $p < 0.05$ );M26的IOD酶活性较高,Y-1、GM256的IOD酶活性居中,SH40、SH38的IOD酶活性次之,B9的IOD酶活性最低(199.43 U·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>),并显著低于其他砧

表4 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果叶片抗氧化酶活性

Table 4 Antioxidant enzyme activity of different dwarfing intermediate anvil on the leaves of ‘Nagano Fuji No.2’ apple

砧穗组合 Scion-rootstock combination	SOD活性 SOD activity/ (U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	POD活性 POD activity/ (U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	PPO活性 PPO activity/ (U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	IOD活性 IOD activity/ (U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )
长富2号/SH40/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH40/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	68.88±1.99 cd	63.97±1.08 c	505.07±25.38 d	230.73±5.34 d
长富2号/M26/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M26/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	133.96±3.05 b	114.78±1.85 b	661.60±17.05 c	478.09±4.92 b
长富2号/SH38/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH38/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	51.66±1.90 de	52.82±2.83 cd	428.27±10.48 de	225.23±7.54 d
长富2号/B9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/B9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	36.91±1.41 e	42.53±3.57 e	396.93±21.04 e	199.43±5.41 e
长富2号/M9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	138.95±2.80 b	116.66±1.38 b	763.33±18.99 b	502.31±7.14 a
长富2号/T337/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/T337/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	188.51±3.86 a	201.40±4.87 a	840.00±13.11 a	519.33±9.09 a
长富2号/Y-1/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/Y-1/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	72.72±3.20 c	111.10±2.13 b	650.00±16.88 c	428.80±4.86 c
长富2号/GM256/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/GM256/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	69.07±0.76 cd	71.05±2.88 c	543.60±11.80 d	425.63±2.25 c
变异系数 Coefficient of variation/%	55.22	50.98	26.30	35.83

穗组合( $p < 0.05$ )。综上所述,各砧穗组合的SOD、POD、PPO和IOD活性由大到小依次均为T337、M9、M26、Y-1、GM256、SH40、SH38、B9。各砧穗组合的SOD、POD、PPO和IOD酶活性的变异系数分别为55.22%、50.98%、26.30%和35.83%。

#### 2.4 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果果实外观品质的影响

由表5可以看出,各砧穗组合的单果质量差异显著,T337、M26的单果质量超过250 g,并显著高于

其他砧穗组合( $p < 0.05$ );SH40、SH38、GM256的单果质量较高,为220~230 g;B9、Y-1的单果质量较低,在210 g左右,并显著低于其他砧穗组合( $p < 0.05$ )。T337、M9的果实硬度达到最大值,但两者差异不显著( $p > 0.05$ ),分别为11.60、11.00 kg·cm<sup>-2</sup>,SH40、M26、SH38的果实硬度次之,为10.20~10.47 kg·cm<sup>-2</sup>;B9、Y-1、GM256的果实硬度为9.20~9.33 kg·cm<sup>-2</sup>,并显著低于其他砧穗组合( $p < 0.05$ )。各砧穗组合的果形指数差异显著,T337的果形指数为

表5 不同矮化中间砧对‘长富2号’苹果果实外观品质的影响

Table 5 Effect of different dwarfing intermediate anvil on fruit quality of ‘Nagano Fuji No.2’ apple

砧穗组合 Scion-rootstock combination	单果质量 Single fruit mass/g	硬度 Firmness/ (kg·cm <sup>-2</sup> )	果形指数 Fruit shape index	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(可滴定酸) Titratable acidity content/%
长富2号/SH40/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH40/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	224.83±0.32 d	10.47±0.15 bc	0.80±0.0115 c	14.30±0.25 e	0.32±0.011 d
长富2号/M26/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M26/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	243.60±1.79 c	10.23±0.12 c	0.86±0.0058 b	15.43±0.24 bc	0.33±0.003 cd
长富2号/SH38/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/SH38/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	219.00±3.47 d	10.20±0.06 c	0.75±0.0088 d	14.53±0.15 de	0.41±0.000 a
长富2号/B9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/B9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	203.90±1.63 e	9.33±0.09 d	0.82±0.0120 c	15.27±0.22 cd	0.36±0.011 b
长富2号/M9/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/M9/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	254.77±2.06 b	11.00±0.42 ab	0.86±0.0115 b	16.17±0.58 ab	0.32±0.000 d
长富2号/T337/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/T337/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	263.50±1.11 a	11.60±0.12 a	0.93±0.0058 a	16.67±0.09 a	0.29±0.003 e
长富2号/Y-1/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/Y-1/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	209.10±3.24 e	9.20±0.35 d	0.81±0.0033 c	14.30±0.12 e	0.37±0.008 b
长富2号/GM256/八棱海棠 Nagano Fuji No.2/GM256/ <i>Malus robusta</i> Rehd.	218.23±5.04 d	9.37±0.32 d	0.88±0.0058 b	15.17±0.09 cd	0.35±0.005 bc
变异系数 Coefficient of variation/%	13.74	8.40	6.61	5.67	10.77