

不同桃自根砧对干旱胁迫的生理响应 及抗逆机理研究

王 鸿, 张 帆, 张雪冰, 陈建军

(甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 砧木的抗旱能力直接影响桃品种生长发育, 选择适宜抗旱性桃砧木对桃产业发展有积极的促进作用。为阐明不同桃砧木对干旱胁迫生理响应机制, 以5种桃砧木扦插苗为试材, 通过盆栽控水方式, 研究不同程度干旱胁迫下5种桃自根砧的叶片水分特性、渗透调节物质、抗氧化酶及叶绿素含量变化。结果表明, 随着干旱程度加重, 5种砧木相对含水量、临界含水量下降, 自然饱和亏、临界饱和亏及需水程度上升, 组织密度和自由水含量逐渐减少, 束缚水含量则增大, 持水能力、组织水势和耐旱系数下降。各干旱胁迫处理的丙二醛(MDA)含量、游离脯氨酸(Pro)含量、可溶性糖含量和叶绿素含量均增加; 过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性提高, 其中随干旱程度加重, 丙二醛(MDA)含量、游离脯氨酸(Pro)含量均呈增加趋势, SOD活性、CAT活性也均呈提升趋势, 可溶性糖含量、叶绿素含量、POD活性变化不尽相同。综合隶属函数分析可知, 桃自根砧品种间抗旱性由强到弱依次为櫻桃李5号、RA、櫻桃李3号、GF677、櫻桃李1号。

关键词: 桃自根砧木; 干旱胁迫; 叶片含水量; 生理生化特性; 抗旱评价

中图分类号: S646; S759.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2022)01-0066-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2022.01.013

Studies on Physiological Response and Stress Resistance Mechanism of Different Peach Rootstocks under Drought Stress

WANG Hong, ZHANG Fan, ZHANG Xuebing, CHEN Jianjun

(Fruit and Floriculture Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Drought-resistant ability of rootstocks has a direct impact on the growth and development of peach varieties. To clarify the physiological response mechanism of different peach rootstocks under drought stress, this experiment analyzed changes in moisture characteristics, osmotic adjustment substances, antioxidant enzymes, and chlorophyll fluorescence in leaves of five peach rootstocks by means of pot experiment. The results showed that with the aggravation of drought, compared with the respective controls, relative water content and critical water content of 5 rootstocks decreased, while natural saturation deficit, critical saturation deficit and water demand increased, the tissue density and free water content gradually decreased, while the bound water content increased, and the water holding capacity, tissue water potential and drought tolerance coefficient decreased, and were less than their respective controls. Malondialdehyde (MDA) and free proline (Pro) contents, soluble sugar and chlorophyll contents were increased compared with their respective controls under different drought treatments, and increased activities of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) were detected. But with the aggravation of drought, contents of MDA, Pro and activities of SOD and CAT showed the tendency of increase, while soluble sugar and chlorophyll contents and activity of POD showed diverse tendency of change. Under long-term drought stress, rootstock stimulates the activity of antioxidant enzymes by regulating the water potential and water holding capacity of leaf tissue, which prevents a large amount of MDA production and increases the content of osmoregulation substances, and enhances the ability to resist drought stress, thus improving the drought tolerance.

Key words: Peach rootstock; Drought stress; Leaf water content; Physiological characteristic; Drought resistance evaluation

桃为多年生落叶果树, 是世界上栽培最为广泛的温带水果之一。桃树在生长发育过程中极易

受干旱等非生物逆境胁迫的影响。干旱是一种普遍影响植物生产力的环境胁迫, 桃树大多栽培于丘

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 国家桃产业技术体系种苗扩繁与生产技术岗位(CARS-30-1-6); 农业农村部西北地区果树科学观测实验站(S-10-18); 甘肃省农业科学院科技成果转化项目(2022GAAS-CGZH06)。

作者简介: 王 鸿(1973—), 男, 甘肃灵台人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事果树育种与生理生态研究工作。Email: wanghong@gsagr.ac.cn。

通信作者: 张 帆(1976—), 女, 新疆石河子人, 博士, 主要从事果树栽培生理与育种等研究工作。Email: zhanfan528@163.com。

陵、山地, 更易受到水分亏缺的影响。在干旱环境下, 桃树能够迅速感受到逆境信号, 进而从分子、细胞、生理和发育水平上表现出其受到胁迫后的反应, 最为明显部位则是叶片^[1]。耐旱品种在干旱环境中, 自身能形成一套应对环境胁迫机制, 提高植物对逆境胁迫的适应能力和抗性^[2]。砧木是桃树嫁接的基础, 其可有效地提高桃树的抗性和适应性。正确选择和利用砧木, 是桃树栽培获得成功的一个重要的因素。砧木的抗旱能力直接影响着树体的生长发育、产量及果实品质的形成^[3]。选育抗旱性砧木对桃产业发展意义重大。

近年来, 学者们对葡萄、苹果、梨、核桃等落叶果树砧木抗旱性进行了评价^[4-7], 筛选出一些具有耐旱能力的砧木已用于生产中, 促进了产业发展。蔡志翔等^[8]早期对常用实生桃砧木GF1869、筑波5号、GF43、山桃、毛桃、GF305、列玛格等的抗旱性进行了研究, 筛选出耐旱性较强的山桃、毛桃等。生产中发现, 实生砧木嫁接育苗价格低廉, 但易使后代发生变异、性状分离、形成的新群体在遗传上具有不稳定性^[9], 苗木整齐度差, 不利于后期规模化整形修剪, 且果品商品性不理想, 无性系砧木研发推广应用是解决这一系列问题的主要途径。有关桃砧木的研究主要集中在无性系繁育技术研发、抗涝、抗根线虫, 抗盐碱及抗重茬等方面^[10-13], 而对近年来无性系繁育的桃砧木櫻桃李(*Prunus cerasifera* Ehrhart)1号、櫻桃李3号、櫻桃李5号、RA(*Prunus cerasifera* Ehrhart)、GF677(*Prunus dulcis* Mill. × *Prunus persica*)在不同干旱条件下的生理性状反应未见系统评价。

我们探讨了桃砧木櫻桃李1号、櫻桃李3号、櫻桃李5号、RA、GF677无性系繁殖的幼苗经过30 d不同干旱胁迫下的生理性状变化, 明确其叶片含水量特性、MDA、渗透物质、抗氧化酶活性等指标在不同干旱胁迫下的反应及其相关性, 并经过隶属函数分析, 评价筛选出适宜桃树生产栽培中应用抗旱性较强的桃无性系砧木, 为全国桃树乃至果树的抗旱资源繁育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选择苗龄为1 a的扦插桃砧木櫻桃李(*Prunus cerasifera* Ehrhart)1号(简称李1)、櫻桃李3号(简称李3)、櫻桃李5号(简称李5)、RA(*Prunus cerasifera* Ehrhart)和GF677(*Prunus dulcis* Mill. × *Prunus persica*)为试材, 2020年1月扦插, 生根后先移栽至10 cm × 10 cm营养钵中, 培养基质为珍

珠岩、蛭石、草炭按体积比1:1:1混合配制, 60 d后定植在规格为20 cm × 20 cm(长 × 宽)的塑料花盆中, 每盆装土4 kg, 每盆1株, 幼苗长至高40 cm左右时进行抗旱模拟试验。

1.2 试验设计

试验于2021年在甘肃省农业科学院连栋玻璃温室进行, 温室环境用自动控制系统进行管理。将事先定植好的5种桃自根砧木各筛选长势一致的60株。采用称水控法模拟干旱环境。用环刀法测定, 盆内基质容重为1.34 g/cm³、田间持水量23%。试验设4个水分梯度, 分别是田间最大持水量的70%~80%(轻旱)、40%~50%(中旱)、16%~20%(重旱)、75%~85%(对照)[每种砧木均设有对照, 如李1对应的对照, 记作李1(CK)]。每天称重补水, 30 d后选择新梢上第2~4片成熟叶测定叶片水分特性、叶绿素含量、抗氧化酶和渗透调节物质等生理生化指标及叶绿素荧光特性。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 桃砧木叶片水分生理指标测定 叶片自由水和束缚水用称量法, 叶片相对含水量、自然饱和和亏、组织密度、耐旱系数用烘干法, 叶片临界含水量、临界饱和亏、需水程度、叶片持水能力用自然干燥法, 以上指标具体测定和计算方法均参照张帆等^[3]的方法; 叶片组织水势(Ψ_w)采用小液流法测定^[14], 略有改动。

1.3.2 桃砧木叶片生理指标测定 叶片MDA、游离脯氨酸(Pro)、可溶性糖含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性及叶绿素含量参照李合生^[15]的方法。指标均以鲜重(FW)计。

1.3.3 桃砧木叶绿素快速荧光测定 用快速荧光仪MINI-PAM-II(Hansatech Instruments Ltd, UK)测定叶绿素荧光。干旱处理第30天10:00时, 选取健壮并长势一致的砧木, 测定其叶片叶绿素a快相荧光动力学曲线(OJIP)。所有叶片测定前均暗适应30 min, 每株树测5个叶片。对OJIP曲线进行JIP-test分析。

1.3.4 桃砧木抗旱性综合评价 以干旱处理30 d的相对生物量来评价苗期抗旱性, 耐旱系数=(干旱30 d生物量/30 d CK生物量) × 100%。

将测定指标换算成隶属函数值(公式①)或反隶属函数值(公式②), 用来判断桃砧木的抗旱性。

$$R(X_i) = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (2)$$

式中, X_i 为指标测定值, X_{max} 、 X_{min} 为所有自根

砧某一指标的最大值和最小值。

1.4 数据分析

用 Excel 分析作图，用 DPS 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)，用最小显著差数法(LSD 法)进行多重比较，用隶属函数值进行抗旱性评价。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对桃自根砧叶片水分特性的影响

干旱胁迫后，桃砧木叶片相对含水量、自然饱和和亏、组织密度、临界含水量、临界饱和亏和需水程度发生了明显变化(图 1)。5 种砧木叶片相对含水量和临界含水量均随干旱胁迫加重呈下降趋势，各处理与自身对照相比较，李 1 的叶片相对含水量分别下降了 61.66%、69.39%、85.30%，李3 的叶片相对含水量分别下降了 42.2%、63.4%、77.4%，李 5 的叶片相对含水量分别下降了 39.6%、62.7%、77.6%，RA 的叶片相对含水量分别下降了 67.5%、73.2%、85.7%，GF677 的叶片相对含水量分别下降了 69.05%、76.93%、84.81%。5 种砧木的自然饱和和亏、临界饱和亏和需水程度随着干旱程度加重逐渐上升，与各自对照相比，均表现为显著增加。5 种砧木的组织密度因干旱程度不同表现出不同变化水平，李 1、李 5 和 RA 随干旱程度加重组织密度减小，均小于各自对照，且差异极显著($P<0.01$)；李 3 和 GF677 随干旱程度加重，其组织密度增加，

但均小于各自对照，且差异极显著($P<0.01$)。

2.2 干旱胁迫对桃自根砧叶片自由水和束缚水的影响

干旱胁迫下，5 种自根砧的叶片自由水和束缚水含量处理间表现各异(图 2)。随着干旱胁迫程度加重，自由水含量逐渐减少；随着干旱胁迫程度加重，束缚水含量呈上升趋势，处理间差异显著 ($P<0.05$)。叶片束缚水含量不尽相同，李 1 和 GF677 不同胁迫下束缚水均高于自身对照，李 3 则低于自身对照，李 5 轻旱时低于李5(CK)，中度干旱和重度干旱时均高于自身对照，RA 重旱时叶片束缚水明显高于自身的其他处理。

2.3 干旱胁迫对桃自根砧叶片持水能力的影响

由图 3 可知，干旱胁迫改变了不同砧木的叶片持水能力，随着离体时间的延长，持水能力均呈下降趋势。与各自对照相比，不同干旱胁迫的持水能力变化各异。随着干旱胁迫程度加重，叶片持水能力越来越差，尤其是重度胁迫后叶片萎蔫程度加重，饱和处理后持水能力仍表现为最低，说明重度胁迫严重伤害了叶片持水能力。李 5 不同处理下叶片离体后含水量下降缓慢，经干旱胁迫后持水力强，说明抗旱性强；李 3 和 RA 持水能力较强；其余 2 个砧木(李 1 和 GF677)叶片持水能力差异不显著。

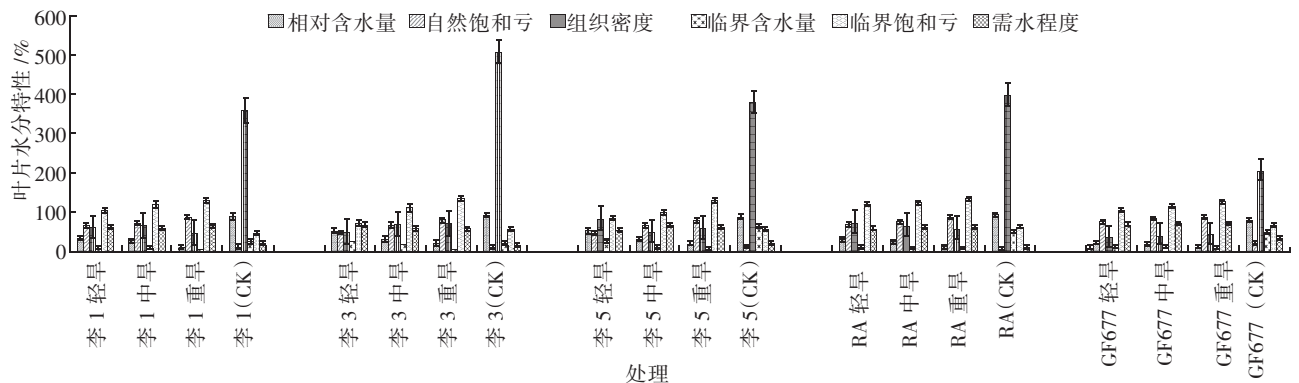


图 1 干旱胁迫对不同桃自根砧叶片水分特性的影响

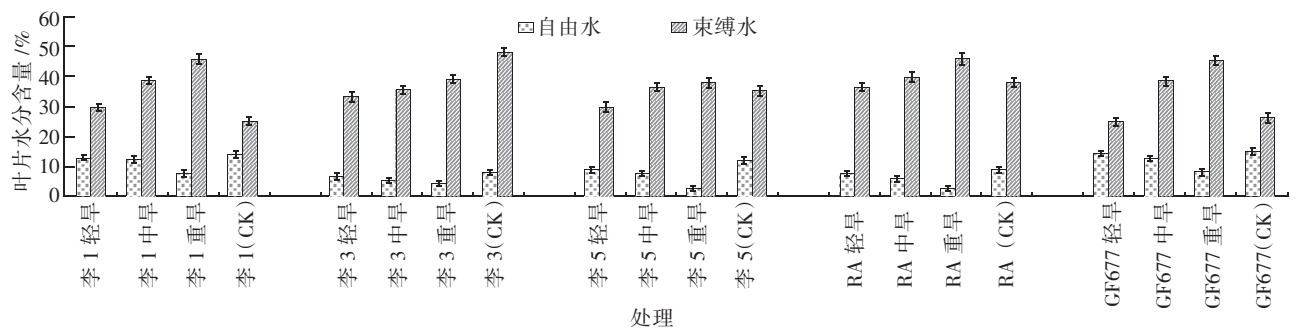


图 2 干旱胁迫对桃自根砧叶片自由水和束缚水的影响

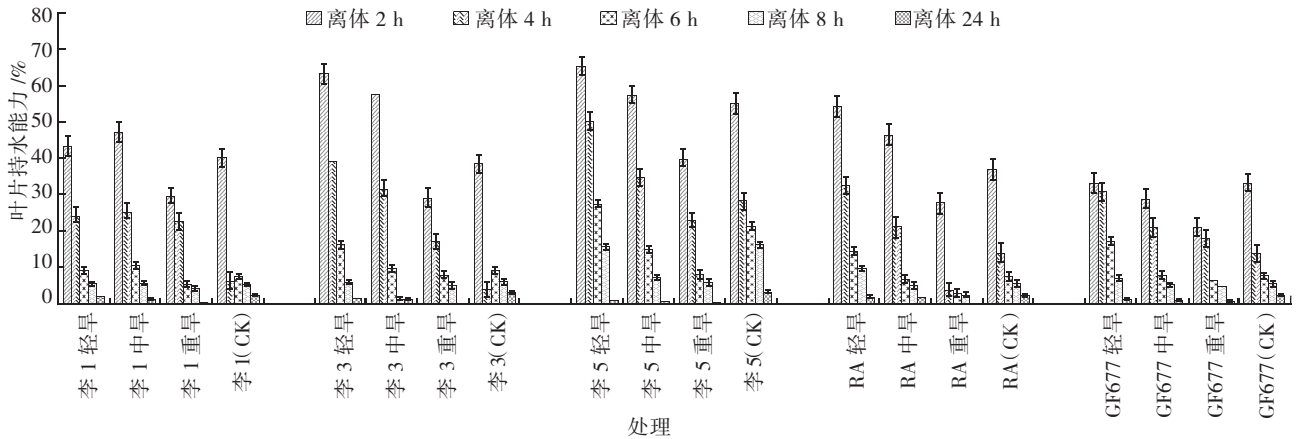


图 3 干旱胁迫对桃自根砧叶片持水能力的影响

2.4 干旱胁迫对桃自根砧叶片组织水势和耐旱系数影响

不同干旱胁迫水平对桃不同砧木叶片水势和耐旱系数影响很大(图 4-A)。5 种砧木相比, 李 3 和李 5 在不同干旱胁迫后, 各处理间水势均高于其他砧木, 且每个处理水势均比其对照低; 其次是李 1, 轻旱时略高于对照, 中旱和重旱时均低于对照; GF677 和 RA 经过不同程度干旱胁迫处理后, 叶片水势明显下降, 且均低于各自对照。

5 种砧木经不同程度干旱胁迫后叶片耐旱系数均发生了变化(图 4-B)。李 3 和李 5 的耐旱系数均高于其他处理, 李 1、GF677、RA 不同干旱胁迫处理的耐旱系数差异不显著, 除砧木 RA 外其余砧

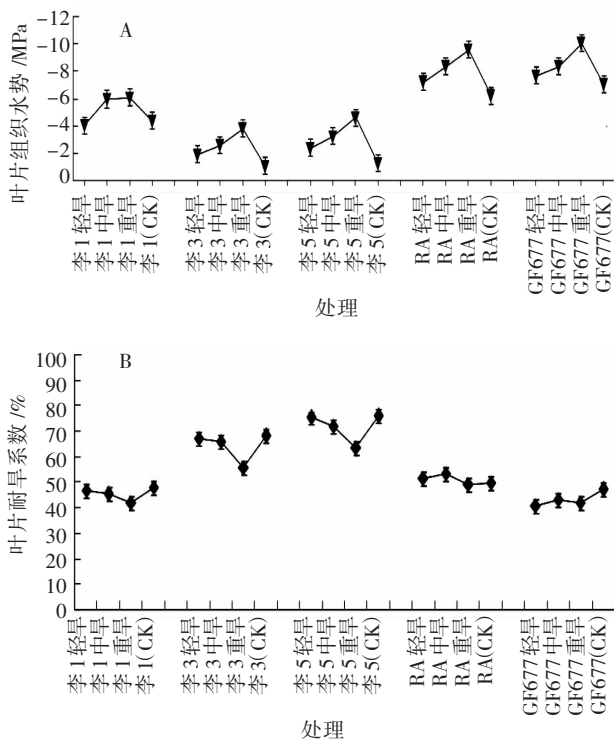


图 4 干旱胁迫对桃自根砧叶片水势和耐旱系数的影响

木不同干旱胁迫处理的耐旱系数均低于自身对照。

2.5 干旱胁迫对桃自根砧叶片 MDA 含量及渗透调节物质的影响

5 种自根砧持续受到不同程度干旱胁迫后, 叶片 MDA 含量发生明显变化, 随着干旱胁迫加重均表现为增加趋势, 与各自对照相比均有上升。总体分析发现, 李 3、李 5、GF677 各处理的 MDA 含量均较低, 胁迫程度对应处理间差异不显著; 李 1 和 RA 各处理的 MDA 含量均较高, 胁迫程度对应处理间差异也不显著(图 5-A)。

5 种桃自根砧叶片的游离脯氨酸含量随干旱胁迫程度的加重而增加, 中旱或重旱胁迫下, 游离脯氨酸含量出现峰值, 均较各自对照高。其中 RA 和 GF677 在不同干旱胁迫处理下的游离脯氨酸含量总体处于较高水平, 李 1、李 3、李 5 除各自重旱胁迫处理下游离脯氨酸含量较高之外, 其余干旱胁迫处理的游离脯氨酸含量水平均较低(图 5-B)。

可溶性糖属于植物内渗透调节物质, 经不同程度干旱胁迫后, 不同砧木的可溶性糖含量变化各异。李 1 和李 5 随着干旱胁迫程度加重, 叶片可溶性糖含量呈下降趋势, 与各自对照相比, 均高于对照; 李 3 虽然不同干旱胁迫处理的可溶性糖含量均高于自身对照, 但随着干旱胁迫程度加重, 整体呈波浪状, 轻旱时最高; RA 的可溶性糖含量随干旱胁迫程度加重呈先升后降趋势, 轻旱时与其自身对照无差异, 中旱时达到最高水平; GF677 不同干旱胁迫处理的可溶性糖含量均低于自身对照, 且重旱时可溶性糖含量处于最低水平(图 5-C)。

2.6 干旱胁迫对桃自根砧木叶片酶活性的影响

如图 6-A 所示, 随着干旱胁迫的程度增加, 不同桃自根砧的 SOD 酶活性随之发生变化, 总体变化趋势一致。与李 1(CK)相比, 李 1 轻旱、李 1 中旱、李 1 重旱时 SOD 酶活性分别提高了 3.9%、

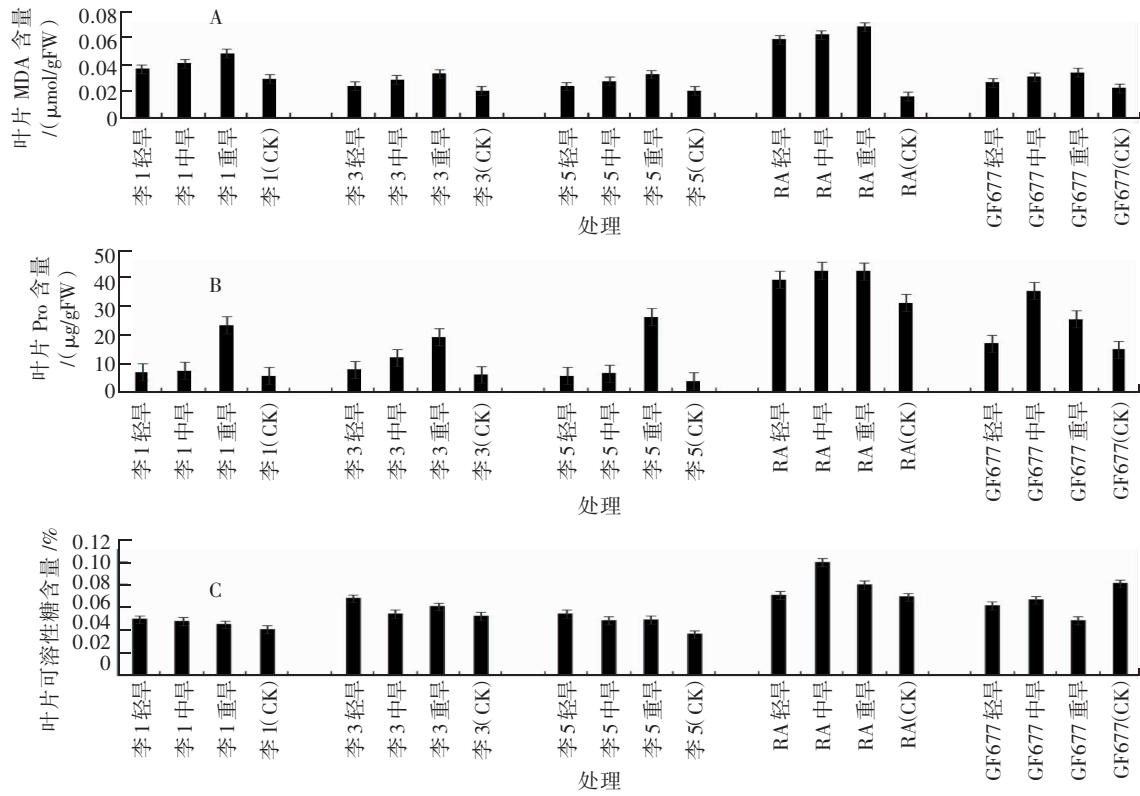


图 5 干旱对桃自根砧叶片 MDA 和渗透调节物质的影响

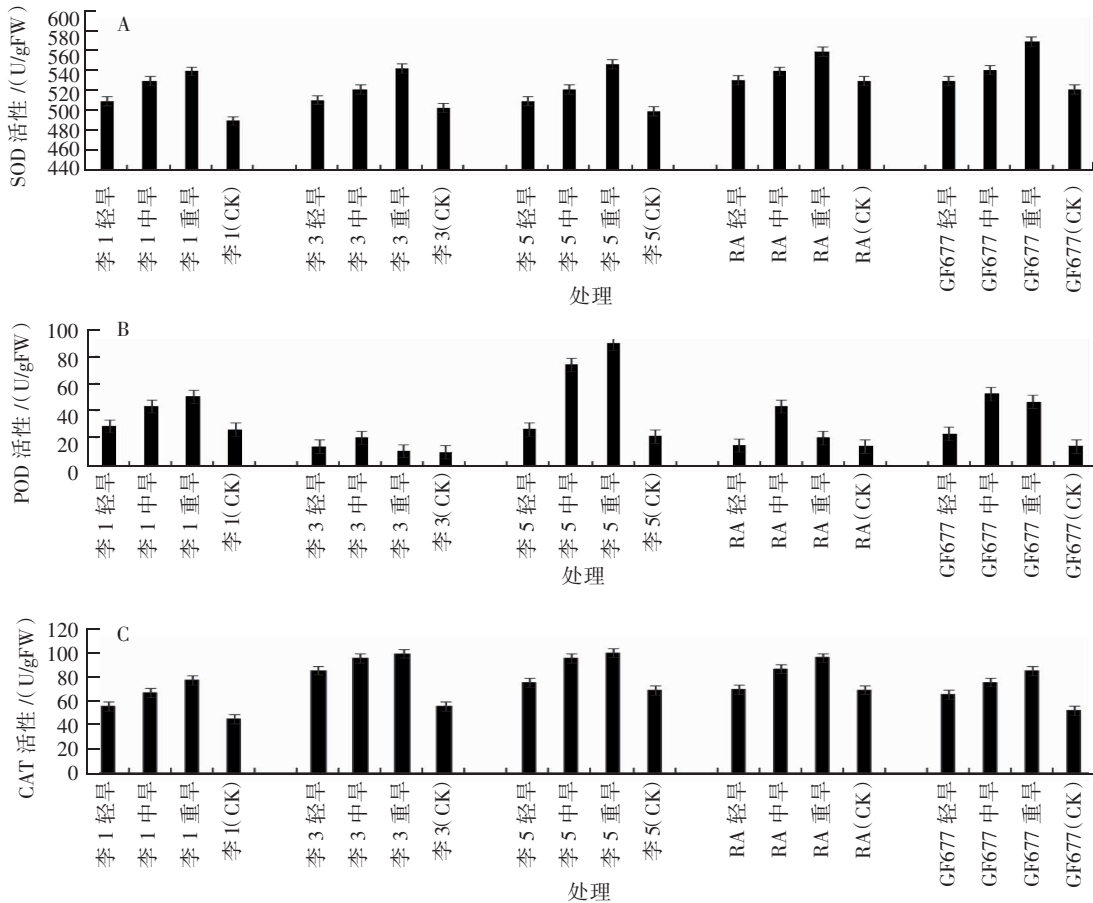


图 6 干旱对桃自根砧叶片酶活性的影响

4.6%、9.3%; 与李3(CK)相比, 李3轻早、李3中早、李3重早时 SOD 酶活性分别提高了 1.6%、3.6%、7.3%; 与李5(CK)相比, 李5轻早、李5中早、李5重早时 SOD 酶活性分别提高了 2.0%、4.2%、8.6%; 与 RA(CK)相比, RA 轻早、RA 中早、RA 重早时 SOD 酶活性分别提高了 0.2%、1.9%、5.4%; 与 GF677(CK)相比, GF677 轻早、GF677 中早、GF677 重早时 SOD 酶活性分别提高了 1.5%、3.5%、8.4%。

由图 6-B 可知, 不同桃自根砧 POD 经干旱胁迫, 随着胁迫加重, 与自身对照相比, 均呈上升趋势, 并且 5 种砧木变化一致。与李1(CK)相比, 李1轻早、李1中早、李1重早时 POD 酶活性分别提高了 8.8%、39.3%、48.0%; 与李3(CK)相比, 李3轻早、李3中早、李3重早时 POD 酶活性分别提高了 30.5%、53.3%、9.1%; 与李5(CK)相比, 李5轻早、李5中早、李5重早时 POD 酶活性分别提高了 19.5%、71.3%、76.3%; 与 RA(CK)相比, RA 轻早、RA 中早、RA 重早时 POD 酶活性分别提高了 4.1%、67.69%、30.9%; 与 GF677(CK)相比, GF677 轻早、GF677 中早、GF677 重早时 POD 酶活性分别提高了 39.7%、73.4%、70.0%。

图 6-C 表明, 干旱胁迫后, 5 种自根砧的叶片 CAT 酶活性变化与 SOD、POD 酶活性基本相一致。与各自的对照相比均表现增加。且干旱胁迫

程度越重 CAT 酶活性越高。不同砧木间相比, 李3、李5、RA 的 CAT 酶活性较高, 且与相对应的不同处理差异不显著; 李1 和 GF677 不同干旱胁迫程度的 CAT 酶活性较低, 且与相对应不同处理间差异不大。

2.7 干旱胁迫对桃自根砧叶片叶绿素含量的影响

随着干旱胁迫的加剧, 砧木间的叶绿素含量发生了比较明显的变化(图7)。除自根砧 GF677 的叶绿素 b 含量之外, 其叶绿素 a、叶绿素 a/b 和类胡萝卜素含量均随着轻早到重早的胁迫程度增强呈下降趋势; 自根砧李5 随轻早到重早的胁迫程度增强, 叶绿素 a 呈下降趋势, 叶绿素 b 呈先增后降趋势, 叶绿素 a/b、类胡萝卜素呈先降后增趋势; 自根砧李1、李3、RA 的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量也均随着轻早到重早的胁迫程度增强呈下降趋势, 而叶绿素 a/b 随轻早到重早的胁迫程度增强呈上升趋势。不同砧木间干旱胁迫处理后均比自身对照叶绿素含量减少, 其中叶绿素 a 含量明显高于其他叶绿素色素。GF677 的叶绿素 b 含量均随着干旱胁迫加重呈先降后升, 李5 则呈先升后降, 但均比自身对照低。

2.8 干旱胁迫下桃自根砧抗旱性综合指标的评价

为更加准确地评价 5 个桃自根砧品种的抗旱性, 本研究对 5 种自根砧各个指标的隶属函数进行综合分析和计算(表 1), 分析发现, 隶属函数平均值与砧木抗旱性之间呈线性关系。可见, 桃自

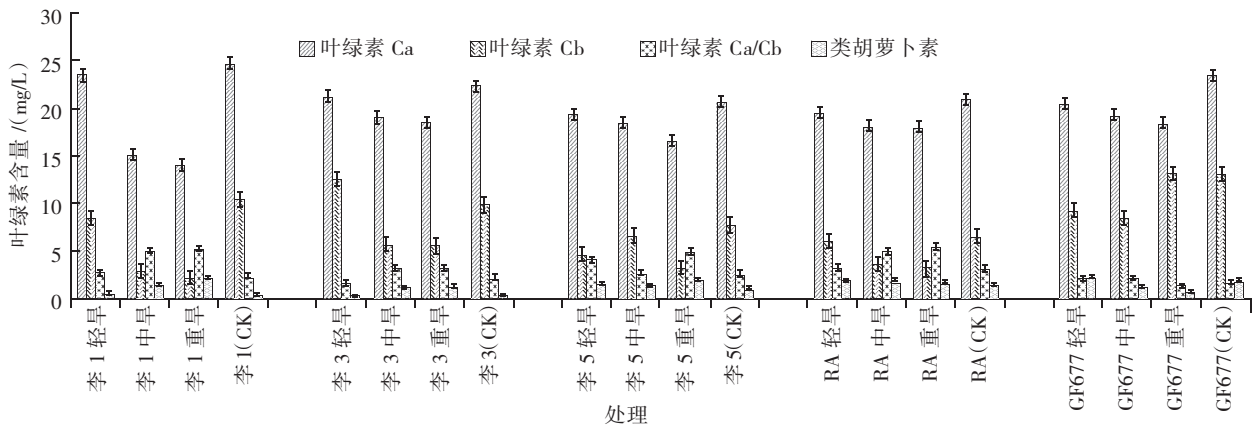


图 7 干旱对桃自根砧叶片叶绿素含量的影响

表 1 不同桃自根砧品种抗旱指标隶属度分析

品种	相对含水量	自由水	持水能力	组织水势	耐旱系数	可溶性糖	叶绿素	MDA	Pro	SOD	POD	CAT	平均值	排序
李1	0.16	0.68	0.29	0.51	0.11	0.49	0.22	0.166	0.37	0.39	0.39	0.37	0.34	5
李3	0.28	0.21	0.31	0.80	0.63	0.23	0.23	0.383	0.35	0.06	0.88	0.58	0.41	3
李5	0.13	0.21	0.36	0.18	0.3	0.89	0.96	0.74	0.62	0.203	0.71	0.46	0.48	1
RA	0.28	0.29	0.16	0.73	0.83	0.22	0.23	0.216	0.37	0.67	0.82	0.42	0.43	2
GF677	0.07	0.72	0.27	0.14	0.03	0.26	0.57	0.35	0.66	0.386	0.55	0.55	0.38	4

根砧持续干旱 30 d 后, 砧木间抗旱性由强到弱依次为李 5、RA、李 3、GF677、李 1。

3 讨论与结论

植物对干旱环境的反应最敏感的部位是叶片^[3]。本研究发现, 随着干旱胁迫程度加重, 持续干旱 30 d 后, 5 种砧木的叶片相对含水量和临界含水量下降, 自然饱和亏、临界饱和亏和需水程度则相应增加。不同砧木其变幅各异, 李 5 明显变幅小, 说明干旱后保水能力强于其他砧木, 这一结果与罗青红等^[16]的结果一致。自由水/束缚水是衡量植物代谢和强弱和抗逆性的生理指标之一。持续干旱胁迫后, 砧木叶片自由水最干旱程度加重, 自由水呈上升状, 这一结果与王芳琳等^[17]的研究相悖, 可能是因桃自根砧长时间持续干旱胁迫, 叶片表现萎蔫, 代谢能力减弱, 则自由水的含量相对增加, 束缚水随之相应减少, 是植物的短时间应激反应造成的, 或者是试验材料特性差异所致。5 种自根砧的水势和耐旱系数因品种间差异表现不同, 李 3 和李 5 的水势最大且均小于各自自身对照。说明叶片通过自身细胞降低渗透势来降低水势以免致死, 较耐旱品种通过调节水势来增加其耐旱系数, 使细胞可以继续从外界吸水维持细胞膨压, 这一结果与张帆等^[3]的结论相一致。

长期干旱胁迫下植物会受到渗透胁迫带来的伤害, 导致细胞失水, 严重时可造成细胞膨压消失, 直至死亡^[18]。本研究中, 随着干旱程度加重, 丙二醛含量、游离脯氨酸含量均表现增加, 表明各种砧木均可通过积累渗透调节物质来提高细胞的渗透调节能力, 从而增加抗旱能力。不同于干旱胁迫下各种桃砧木的抗氧化酶系统均受到不同程度的损伤, 活性氧的产生超出了细胞的清除能力, 此时自根砧的丙二醛含量、游离脯氨酸含量升高, 尤其重旱条件下, 与自身对照相比, 5 种桃砧木均增幅最大, 说明其细胞膜系统受破坏最大, 抗旱性较弱, 这一结论与 Chen 等^[19]的研究相同。SOD、POD 和 CAT 的酶活性均高于自身对照, 这是自根砧的应激反应, 因为干旱胁迫时其体内的活性氧会大量积累, 导致脂质过氧化从而对细胞膜造成伤害。酶系统之间的相互协调能有效地清除植物体内产生的活性氧, 从而降低干旱胁迫对植物细胞的伤害。

参考文献:

- [1] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants [J]. *Cell*, 2016, 167(2): 313–324.
- [2] ANJUM S A, XIE X Y, WANG L C, et al. Morphologi-
- [3] 张帆, 王鸿, 张雪冰, 等. 干旱胁迫及复水对不同桃自根砧生理特性影响[J]. *植物生理学报*, 2022, 58(4): 767–776.
- [4] MOHAMMAD MAQBOOL MIR, UMAR IQBAL, SHABIR AHMAD MIR. Production technology of stone fruits[M]. Singapore, Springer: 2021.
- [5] N/A. Effect of grafting on iron uptake of farold 40, OHF 333 and OHF 87 Pear rootstocks from the soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(2): 280–288.
- [6] 白世践, 卢金鸽, 蔡军社, 等. 砧木对极端干旱区马瑟兰葡萄光合及酿酒特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 129–137.
- [7] 梁静, 刘丙花, 赵登超, 等. 不同核桃砧木苗木质量综合评价[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(12): 48–52.
- [8] 蔡志翔, 许建兰, 张斌斌, 等. 桃不同砧木类型对持续干旱的响应及其抗旱性评价[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(4): 851–856.
- [9] 张帆, 王鸿. 桃硬枝扦插生根机理研究进展[J]. *植物生理学报*, 2019, 55(11): 1595–1606.
- [10] 张帆, 王鸿. 基质和激素对桃砧木 GF677 硬枝扦插生根的影响[J]. *林业科技通讯*, 2018(12): 53–56.
- [11] 张帆, 王鸿, 陈建军, 等. 桃无性系砧木 GF677 繁育技术[J]. *西北园艺(果树)*, 2020(6): 27–28.
- [12] 马瑞娟, 张斌斌, 蔡志翔, 等. 不同桃砧木品种对淹水的光合响应及其耐涝性评价[J]. *园艺学报*, 2013, 40(3): 409–416.
- [13] 李海炎. 桃砧木根系与南方根结线虫早期互作的组织病理学与转录组学研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [14] 高俊凤. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 李合生. *现代植物生理学*[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [16] 罗青红, 宁虎森, 何苗, 等. 5 种沙地灌木对于干旱胁迫的生理生态响应[J]. *林业科学*, 2017, 53(11): 29–42.
- [17] 王方琳, 柴成武, 赵鹏, 等. 3 种荒漠植物光合及叶绿素荧光对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(10): 1755–1765.
- [18] 熊仕发, 吴立文, 陈益存, 等. 不同种源白栎幼苗叶片对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 3924–3933.
- [19] CHEN X X, DING Y L, YANG Y Q, et al. Protein kinases in plant responses to drought[J]. *Salt, and Cold Stress*. 2021, 63(1): 53–78.