

引文格式: 尹鹏龙, 王祖光, 李爽, 等. 干旱胁迫对苹果不同中间砧及其上嫁接品种光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(1): 104–111. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202205055

干旱胁迫对苹果不同中间砧及其上嫁接品种 光合特性和抗氧化酶活性的影响*

尹鹏龙, 王祖光, 李爽, 周莎莎, 徐继忠, 张学英**

(河北农业大学园艺学院, 河北保定 071001)

摘要: 【目的】研究干旱胁迫对苹果不同中间砧及其上嫁接品种的叶片光合特性及抗氧化酶活性的影响。

【方法】以河北农业大学自主选育的苹果矮化砧木冀砧3号及优系15-1、1-8、14-7、10-1和22-46为试验材料, 研究干旱胁迫下苹果砧木及其上嫁接天红2号的叶片光合参数和抗氧化酶活性的变化, 并利用隶属函数法分析不同中间砧对干旱胁迫的响应差异。【结果】干旱胁迫下, 不同苹果砧木及砧穗组合的光合作用受到不同程度的影响; 叶片初始荧光与可变荧光和最大荧光比值与对照组相比差异显著; 随着干旱胁迫时间的延长, 砧木叶片抗氧化酶(SOD、POD和CAT)活性呈现先升高后降低的趋势, 嫁接品种叶片的SOD和CAT活性整体呈升高的趋势; 砧木14-7及其上嫁接天红2号叶片的光合作用和3种抗氧化酶活性对干旱胁迫响应相对较弱, 而砧木22-46和其上嫁接品种响应较强。隶属函数分析表明: 6种砧木抗旱性为14-7>15-1>冀砧3号>10-1>1-8>22-46。【结论】干旱胁迫下, 苹果6种不同中间砧及其上嫁接品种的光合特性和抗氧化酶活性存在差异。

关键词: 干旱胁迫; 苹果砧木; 光合作用; 抗氧化酶

中图分类号: S661.101

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2023)01-0104-08

Effects of Drought Stress on Photosynthetic Characteristics and Antioxidant Enzyme Activities of Different Rootstocks and Grafted Apple Variety

YIN Penglong, WANG Zuguang, LI Shuang, ZHOU Shasha, XU Jizhong, ZHANG Xueying

(College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: [Purpose] To study the effects of drought stress on the photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of leaves of different rootstocks and grafted apple variety. [Methods] The apple dwarf rootstock Jizhen No.3 and superior lines 15-1, 1-8, 14-7, 10-1 and 22-46 independently bred by Hebei Agricultural University were used as experimental materials, the changes of photosynthetic parameters and antioxidant enzyme activities in leaves of apple rootstock and its grafted Tianhong No.2 under drought stress were analyzed, and the differences of different intermediate rootstocks to drought stress were analyzed by membership function method. [Results] Under drought

收稿日期: 2022-05-27

修回日期: 2022-10-26

网络首发日期: 2023-02-10

*基金项目: 河北省重点研发计划项目(19226317D); 河北省现代农业产业技术体系苹果创新团队资金项目(HBCT2021100210)。

作者简介: 尹鹏龙(1997—), 男, 河北承德人, 在读硕士研究生, 主要从事果树栽培生理研究。

E-mail: y15632211661@163.com

**通信作者 Corresponding author: 张学英(1972—), 女, 河北唐山人, 博士, 教授, 主要从事果树生物技术及果树栽培生理与生态研究。E-mail: zhangxueying1996@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20230210.1201.001.html>



stress, the photosynthesis of leaves of different rootstocks and stions were affected by different degrees. The initial fluorescence and the ratio of variable fluorescence and maximal fluorescence were significantly or extremely significantly higher than the control group. With the prolongation of drought stress time, the activities of antioxidant enzymes (SOD, POD and CAT) in rootstocks leaves increased at first and then decreased, and the activities of SOD and CAT in grafted varieties increased on the whole. The response of photosynthesis and three antioxidant enzymes in rootstock 14-7 and its grafted Tianhong No.2 leaves to drought stress was relatively weak, while that of rootstock 22-46 and its grafted varieties was strong. Membership analysis showed that the drought resistance of six rootstocks was 14-7>15-1>Jizhen No.3>10-1>1-8>22-46. [**Conclusion**] Under drought stress, there are differences in photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities among six different apple rootstocks and grafted apple variety.

Keywords: drought stress; apple rootstock; photosynthesis; antioxidase

中国是世界苹果原生中心之一, 35 个苹果品种中有 27 个原生于中国, 这些资源对品种选育及科学研究具有重要意义, 不仅满足了国内市场供应的需求, 对世界苹果产业的发展也做出了重要贡献^[1]。苹果主要种植于降雨量较少的地区, 其生长发育和产量受干旱胁迫影响较大。干旱胁迫下, 苹果树体对水分和养分的吸收减少, 导致生理活动受到干扰, 进而影响光合能力及体内有机物的积累和转运, 严重影响树体的生长发育和果实的产量品质^[2-3]。砧木作为苹果生产上应对逆境胁迫的主要手段之一, 对苹果优质丰产起到决定性作用^[2]。因此, 在水资源缺乏的地区, 选育并利用抗旱矮化砧木对苹果产业发展具有重要意义^[4]。

关于干旱胁迫对果树光合及抗氧化系统的影响已有很多研究, 其中, 张星等^[5]和杜学海等^[6]研究表明干旱胁迫对葡萄叶片光合作用有显著影响; 綦伟等^[7]研究发现荧光参数与葡萄抗旱性密切相关; 杜典等^[8]和黄尧瑶等^[9]研究发现: 超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性随干旱胁迫时间的延长呈先上升后下降的趋势。可见, 干旱胁迫对植物叶片的光合、叶绿素荧光参数及抗氧化酶活性均有一定程度的影响。前人关于干旱胁迫对苹果砧木生理特性影响的研究较多^[10-12], 而对于干旱胁迫对苹果砧木及其嫁接品种的影响是否一致的研究较少。本研究以河北农业大学选育的 6 种苹果砧木为试验材料, 研究了自然干旱胁迫对嫁接在平邑甜茶上的不同矮化砧木及对不同砧穗组合叶片光合特性及抗氧化酶活性的影响, 以期苹果矮化砧木的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验地点在河北农业大学创新试验园抗旱棚内。将平邑甜茶栽植于装有育苗基质的塑料花盆(上沿直径 30 cm, 下沿直径 20 cm, 盆高 22 cm)中。2020 年 4 月分别将河北农业大学选育的矮化砧木优系 15-1、1-8、14-7、10-1 和 22-46 以及冀砧 3 号共 6 种砧木嫁接于平邑甜茶上, 2021 年 4 月在 6 种中间砧上嫁接天红 2 号, 2020 年 7 月 25 日和 2021 年 7 月 18 日选择生长一致的试材, 统一浇透水后进行持续干旱处理。干旱第 8、10、12 和 14 天, 砧木的土壤相对含水量分别为 50%~60%、40%~50%、30%~40% 和 20%~30%; 砧穗组合的土壤相对含水量分别为 50%~55%、45%~50%、35%~40% 和 25%~30%; 对照的土壤相对含水量保持在 70%~80%。砧木及砧穗组合分别在第 8、10、12、14 天出现 1、2、3、4 级旱害症状^[11], 干旱第 8 天开始取新梢中上部功能叶片, 以锡纸包裹置于液氮中冷冻, 于 -80 ℃ 冰箱保存用于酶活性的测定, 干旱胁迫处理第 14 天结束取样。

1.2 试验方法

1.2.1 光合参数和叶绿素荧光参数的测定

光合参数的测定: 在干旱处理第 14 天(天气晴朗)上午 9:00—11:00, 使用 LI-6400 型便携式光合仪测定新梢中部成熟叶片的蒸腾速率(T_r)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。

叶绿素荧光参数的测定: 在干旱处理第 14 天(天气晴朗)上午 9:00—11:00, 选取新梢

中部生长良好且完整的叶片,暗处理 20 min 后使用 pocket PEA 手持叶绿素荧光仪测定叶片初始荧光值 (F_0) 和可变荧光与最大荧光比值 (F_v/F_m)。

1.2.2 抗氧化酶活性的测定

测定干旱胁迫处理第 8、10、12 和 14 天样品的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性,测定方法参考《植物生理生化实验原理和技术》^[13]。

1.2.3 抗旱性分析

将 6 种苹果砧木及砧穗组合相关指标进行隶属函数 $[U(X)]$ 综合分析,根据平均隶属值评价不同中间砧及砧穗组合的抗旱性。若测定指标与其抗旱性呈正相关,则 $U(X) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$; 若测定指标与其抗旱性呈负相关,则 $U(X) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X 为各指标的隶

属函数平均值; $X_{\max}$ 为测定指标的最大值, $X_{\min}$ 为测定指标的最小值。

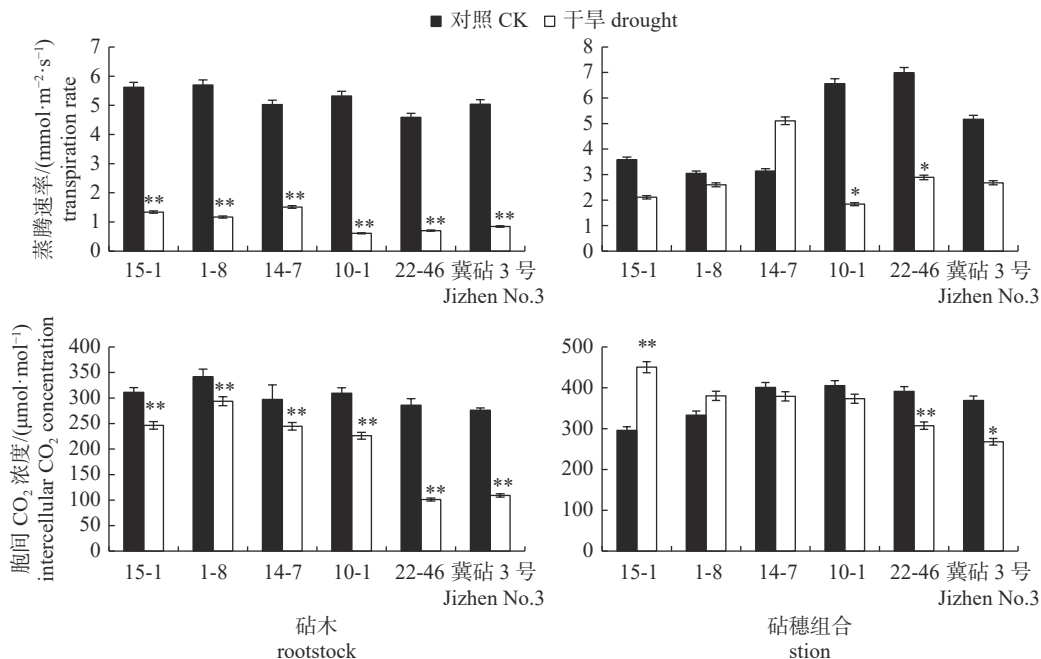
1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2010 和 DPS 9.01 进行数据整理、统计和分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对苹果砧木及砧穗组合叶片光合参数的影响

由图 1 可知:干旱胁迫第 14 天,6 种砧木叶片的蒸腾速率 (T_r) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 均极显著低于对照;10-1 和 22-46 砧穗组合的 T_r 均显著低于对照,15-1 砧穗组合的 C_i 极显著高于对照,而 22-46 砧穗组合的 C_i 极显著低于对照。



注: “*”和“**”分别表示与对照相比差异显著 ($P < 0.05$) 和差异极显著 ($P < 0.01$); 下同。

Note: “*” and “**” indicate significant difference ($P < 0.05$) and extremely significant difference ($P < 0.01$) compared with the control, respectively; the same as below.

图 1 干旱胁迫下不同砧木及砧穗组合叶片光合参数的变化

Fig. 1 Changes of leaf photosynthetic parameters of different rootstocks and stions under drought stress

2.2 干旱胁迫对苹果砧木及砧穗组合叶片叶绿素荧光参数的影响

由图 2 可知:干旱胁迫第 14 天,砧木 22-46 叶片的初始荧光值 (F_0) 极显著高于对照、可变荧光与最大荧光比值 (F_v/F_m) 则极显著低于对照;1-8 和冀砧 3 号砧穗组合叶片的 F_0 值均显著高于对照、 F_v/F_m 值均显著低于对照,而 15-1、

14-7、10-1 和 22-46 砧穗组合叶片的 F_v/F_m 值显著高于对照。

2.3 干旱胁迫对苹果砧木及砧穗组合叶片抗氧化酶活性的影响

由图 3~5 可知:干旱胁迫下,6 种苹果砧木叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性均呈先升高后降低的趋势,且均在干旱胁迫第 12 天达到最大

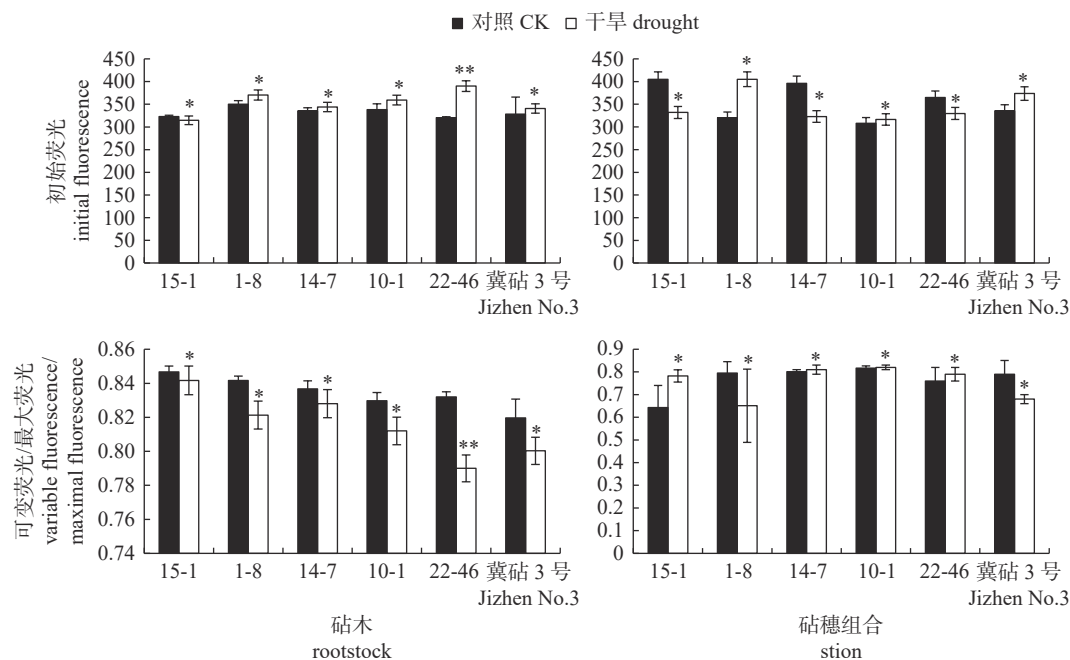


图 2 干旱胁迫下不同砧木及砧穗组合叶片荧光参数的变化

Fig. 2 Changes of leaf fluorescence parameters of different rootstocks and scions under drought stress

值。除干旱胁迫处理第 8 天的冀砧 3 号外, 其他砧木和砧穗组合处理的叶片 SOD 活性均极显著高于对照 (图 3)。干旱胁迫第 8 天, 砧木 15-1 和冀砧 3 号的 POD 活性极显著高于对照, 14-7 的 POD 活性显著低于对照, 其他砧木的 POD 活性显著高于对照; 干旱胁迫第 14 天, 除砧木 10-1 的 POD 活性显著高于对照外, 其他 5 种砧木叶片的 POD 活性均极显著高于对照 (图 4)。干旱胁迫

第 8 天, 砧木 22-46 叶片的 CAT 活性极显著高于对照组, 其他 5 种砧木叶片的 CAT 活性均显著高于对照组; 干旱胁迫第 10、12 和 14 天, 6 种苹果砧木叶片的 CAT 活性均极显著高于对照 (图 5)。

由图 6 可知: 干旱胁迫下, 6 种苹果砧穗组合叶片的 SOD 活性呈上升趋势, 且均在干旱胁迫第 14 天达到最大值。由图 7 可知: 干旱胁迫

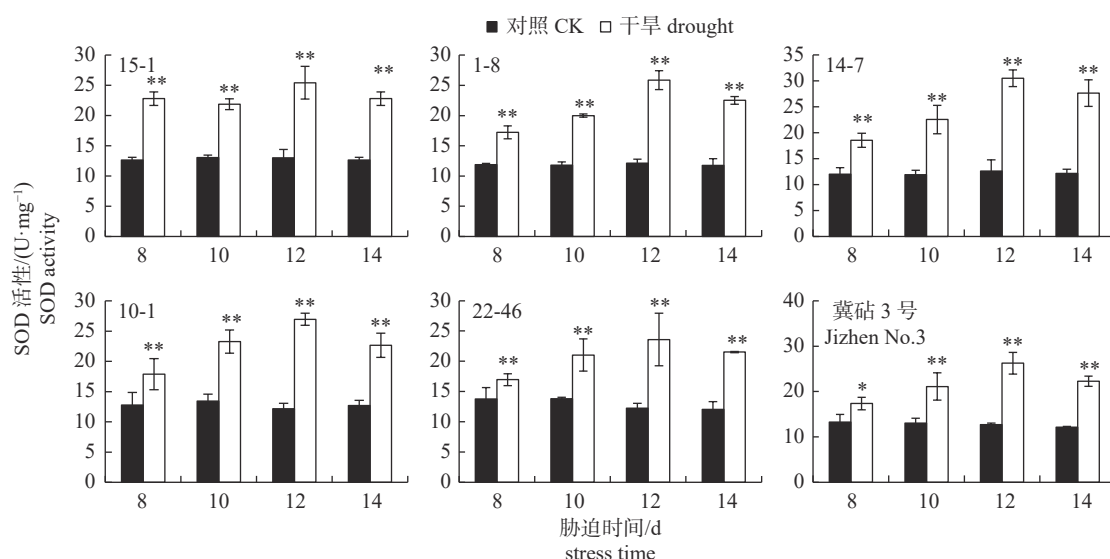


图 3 干旱胁迫下不同砧木叶片 SOD 活性的变化

Fig. 3 Changes of superoxide dismutase activity in leaves of different rootstocks under drought stress

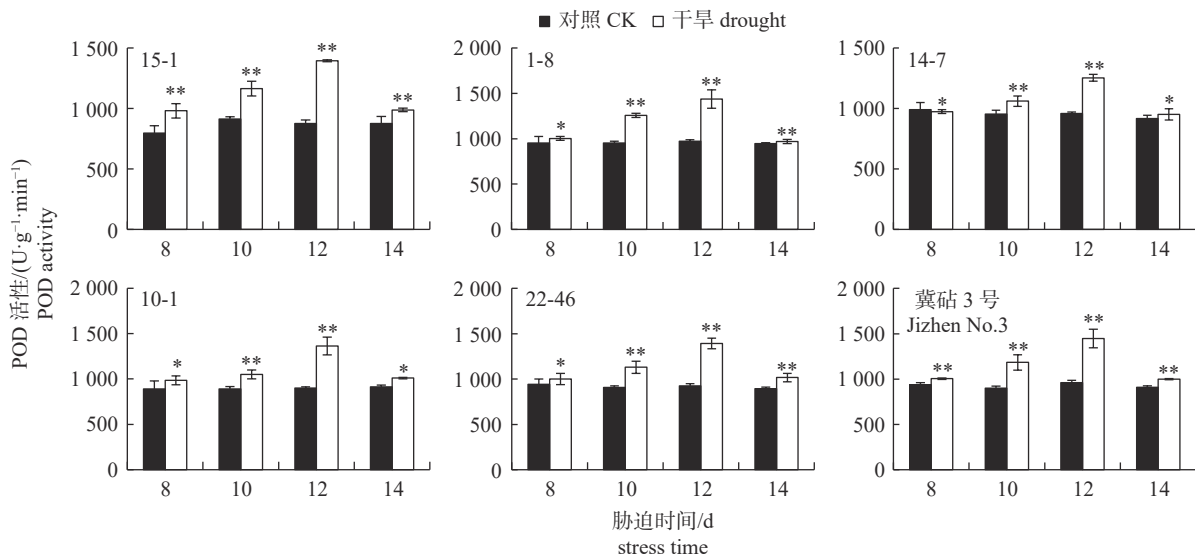


图 4 干旱胁迫下不同砧木叶片 POD 活性的变化

Fig. 4 Changes of peroxidase dismutase activity in leaves of different rootstocks under drought stress

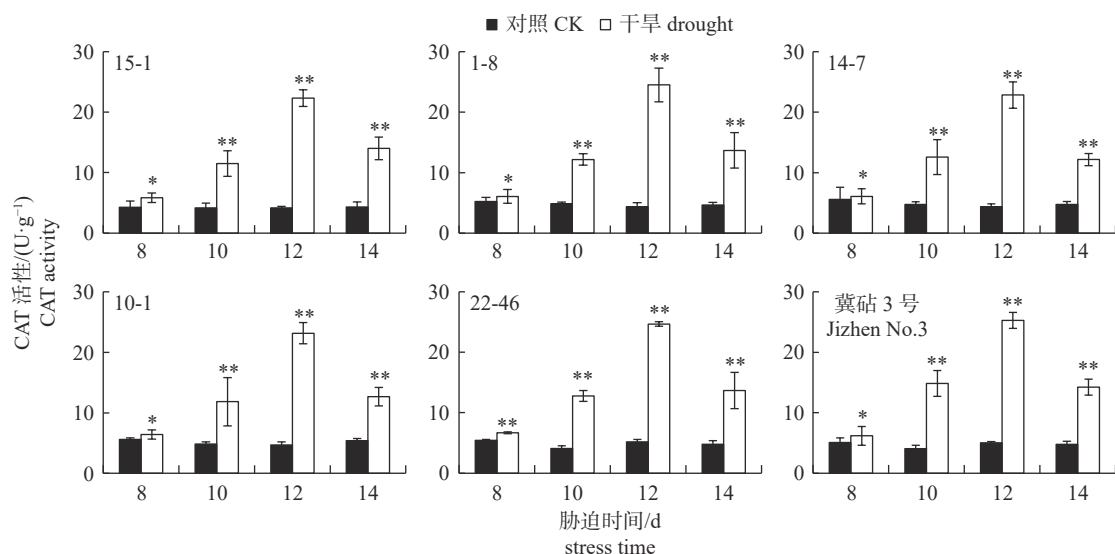


图 5 干旱胁迫下不同砧木叶片 CAT 活性的变化

Fig. 5 Changes of catalase activity in leaves of different rootstocks under drought stress

条件下, 砧穗组合 15-1 和冀砧 3 号叶片的 POD 活性呈先升高后降低的趋势, 其他砧穗组合均呈升高—降低—升高的趋势, 且 6 种砧穗组合叶片的 POD 活性均在干旱胁迫第 10 天达到最大值。由图 8 可知: 干旱胁迫下, 砧穗组合 1-8 叶片 CAT 活性呈先降低后升高的趋势, 其他 5 种砧穗组合均呈逐渐上升的趋势, 6 种砧穗组合叶片的 CAT 活性均在干旱胁迫第 14 天达到最大值; 砧穗组合 15-1 叶片的 CAT 活性在干旱胁迫第 10 天显著高于对照, 其他 5 种砧穗组合叶片的 CAT 活性在干旱胁迫期间均极显著高于对照。

2.4 不同苹果砧木及砧穗组合的抗旱性

由表 1 可知: 无论砧木还是砧穗组合, 均以 14-7 的隶属值最高, 22-46 的隶属值最低。6 种砧木与砧穗组合的平均隶属函数值大小排列顺序基本一致, 因此, 6 种砧木 (优系) 的抗旱性由强到弱为 14-7>15-1>冀砧 3 号>10-1>1-8>22-46。

3 讨论

严重的干旱胁迫会导致光合作用受到抑制甚至破坏光合系统^[14], 造成植物体光合作用衰弱, 蒸腾速率等相关指标下降; 在干旱胁迫下, 植物

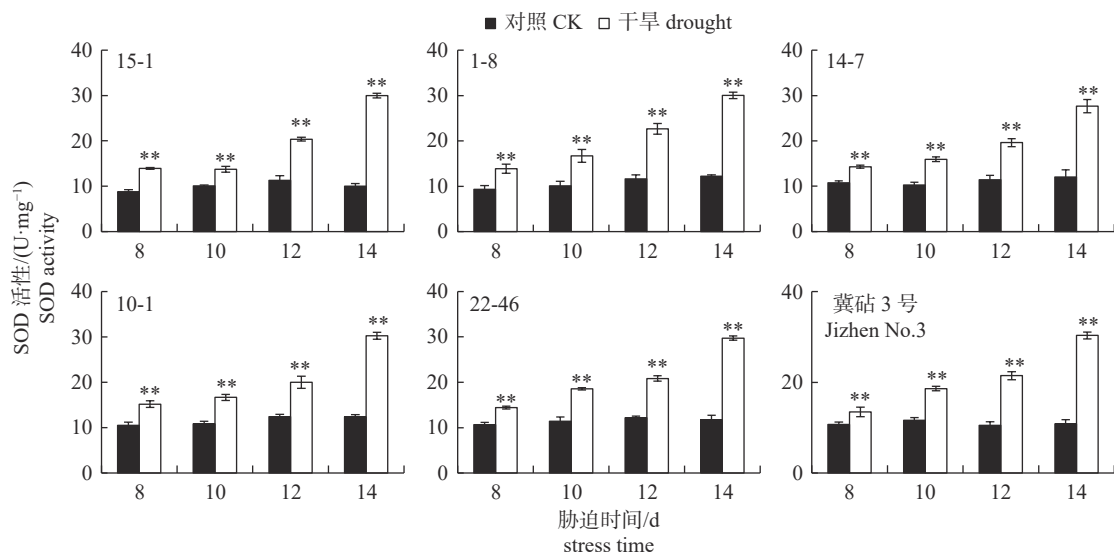


图 6 干旱胁迫下不同砧穗组合叶片 SOD 活性的变化

Fig. 6 Changes of superoxide dismutase activity in leaves of different stions under drought stress

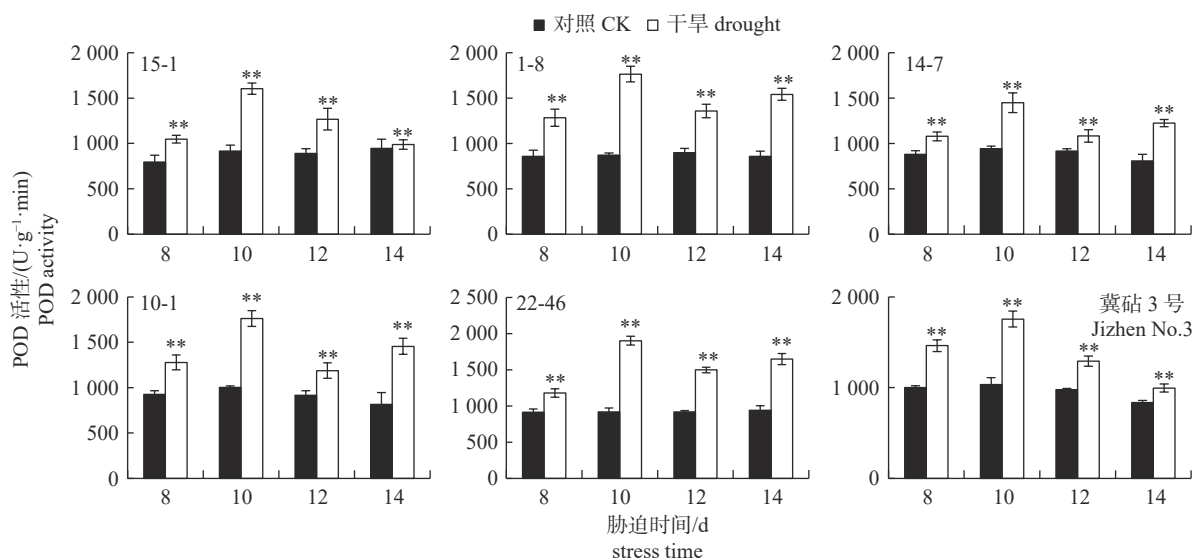


图 7 干旱胁迫下不同砧穗组合叶片 POD 活性的变化

Fig. 7 Changes of peroxidase activity in leaves of different stions under drought stress

体内抗氧化酶活性随干旱胁迫程度的加重出现变化, 一般表现为先升高后降低的趋势^[15], 植物体的多种抗氧化酶构成抗氧化酶系统, 通过相互作用来降低干旱对植物体的损害^[16]。研究发现^[17-19]: 在自然干旱胁迫条件下, 苹果中间砧的叶片光合特性会受到抑制, 主要体现在蒸腾速率等相关指标的变化。本研究中 6 种砧木叶片的蒸腾速率 (T_r) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 均呈下降趋势, 但砧穗组合 14-7 的 T_r 在干旱胁迫下呈上升趋势, 可能是为适应干旱胁迫气孔关闭所致, 也可能是由于叶片内叶绿素发生降解导致叶片内的细胞发生不

可逆的破坏所致。

吕亚等^[20]研究发现: 辣木苗叶片的初始荧光 (F_0) 随干旱胁迫程度加重而增大, 分析其原因主要是由于光反应中心受到不可逆的破坏。本研究中, 干旱胁迫下, 除 15-1 外的其他 5 种砧木的 F_0 值均呈上升趋势, 分析其原因可能是 15-1 的细胞耐性较强, 光反应中心未达到破坏临界点。蔡年辉等^[21]研究发现: 随干旱胁迫时间的增加, 云南松幼苗 PS II 最大光能转化效率 (F_v/F_m) 整体呈下降趋势, 而本研究干旱胁迫下砧穗组合仅有 1-8 和冀砧 3 号叶片的 F_v/F_m 值呈下降趋势, 其

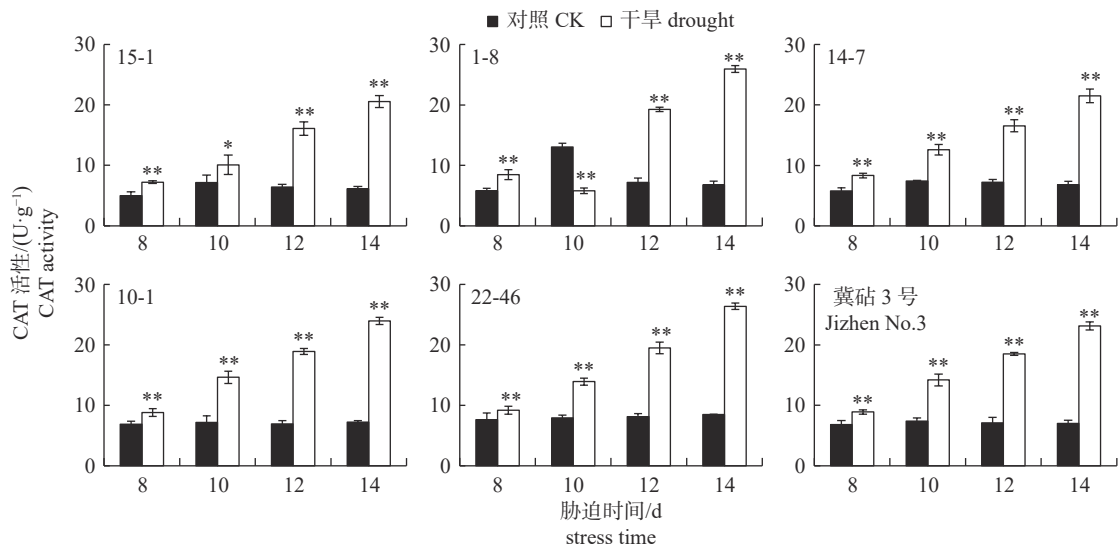


图 8 干旱胁迫下不同砧穗组合过氧化氢酶活性的变化
Fig. 8 Changes of catalase activity in different stions under drought stress

表 1 干旱胁迫下不同砧木及砧穗组合的隶属函数值

Tab. 1 Membership function values of different rootstocks and stions under drought stress

处理 treatments		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	平均隶属值 average membership value
砧木 rootstocks	15-1	0.67	0.87	1.00	1.00	0.14	0.87	0.60	0.57
	1-8	0.50	1.00	0.66	0.58	0.40	0.62	0.35	0.38
	14-7	1.00	0.93	0.79	0.89	1.00	1.00	1.00	0.70
	10-1	0.03	0.75	0.64	0.65	0.40	0.00	0.47	0.39
	22-46	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.27
	冀砧3号 Jizhen No. 3	0.30	0.09	0.74	0.60	0.22	0.27	0.41	0.48
砧穗组合 stions	15-1	0.23	0.00	0.99	0.00	0.87	0.95	1.00	0.58
	1-8	0.42	0.48	0.00	1.00	0.00	0.17	0.33	0.34
	14-7	1.00	0.73	1.00	0.52	1.00	1.00	0.66	0.84
	10-1	0.00	0.76	0.53	0.53	0.04	0.39	0.20	0.35
	22-46	0.10	0.93	0.80	0.45	0.09	0.00	0.00	0.34
	冀砧3号 Jizhen No. 3	0.18	1.00	0.34	0.89	0.01	0.43	0.04	0.41

注: $X_1\sim X_8$ 分别为蒸腾速率、胞间CO₂浓度、初始荧光、可变荧光与最大荧光比、SOD、POD和CAT。
Note: $X_1\sim X_8$ indicates transpiration rate, intercellular carbon dioxide concentration, initial fluorescence, variable fluorescence to maximum fluorescence ratio, superoxide dismutase, peroxidase and catalase, respectively.

他 4 种砧穗组合叶片的 F_v/F_m 值均呈上升趋势, 分析其原因可能是光反应中心发生不可逆的破坏导致 PS II 最大光能转化效率发生紊乱。

当植物受到逆境胁迫而体内活性氧又不能完全消除逆境产生的活性氧时, 会导致细胞氧化膜受到损伤^[22]。研究表明^[23-24]: 砧木受到持续自然干旱胁迫时, 其叶片中 CAT 活性呈上升趋势, SOD 和 POD 活性呈先上升后下降的趋势。嫁接砧木可提升苹果的抗逆境能力, 使其自身的抗旱

能力有所提升^[25-27]。本研究发现砧穗组合的叶片 SOD、POD 和 CAT 变化趋势与砧木叶片的变化趋势有所不同, 分析其原因主要是: 第一, 2 组处理的土壤含水量不完全一致; 第二, 砧木同砧木与品种嫁接的亲合性不同, 具体原因还有待进一步研究。本研究基于隶属函数分析的结果显示: 砧木的抗旱性与砧穗组合的抗旱性表现一致, 为将来的分子研究、砧木其他特性研究以及苹果优良砧木的选育提供了参考。

4 结论

隶属函数对河北农业大学选育的6种苹果矮化砧木(优系)抗旱性评价结果为:14-7>15-1>冀砧3号>10-1>1-8>22-46,表明苹果不同中间砧及其上嫁接品种在干旱胁迫条件下的光合特性和抗氧化酶活性存在差异。

[参考文献]

- [1] 束怀瑞, 张世忠. 我国苹果产业70年发展历程与展望[J]. 落叶果树, 2021, 53(1): 1. DOI: [10.13855/j.cnki.lygs.2021.01.001](https://doi.org/10.13855/j.cnki.lygs.2021.01.001).
- [2] 郭爱霞, 石晓昀, 王延秀, 等. 干旱胁迫对3种苹果砧木叶片光合、叶绿体超微结构和抗氧化系统的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 178. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.25](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.25).
- [3] 陈敏, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河中游地区3种植物的抗旱机理研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(4): 747. DOI: [10.3321/j.issn:1000-4025.2007.04.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4025.2007.04.017).
- [4] JI X L, LI H L, QIAO Z W, et al. The BTB-TAZ protein MdBT2 negatively regulates the drought stress response by interacting with the transcription factor MdNAC143 in apple[J]. Plant Science, 2020, 301: 110689. DOI: [10.1016/j.plantsci.2020.110689](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110689).
- [5] 张星, 张剑侠. 葡萄砧木杂种的抗旱性评价[J]. 中国果树, 2020(5): 59. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.05.011](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.05.011).
- [6] 杜学梅, 杨廷桢, 高敬东, 等. 苹果砧木山定子抗性研究进展[J]. 中国果树, 2020(4): 5. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.04.002](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.04.002).
- [7] 綦伟, 谭浩, 翟衡. 干旱胁迫对不同葡萄砧木光合特性和荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 835. DOI: [10.3321/j.issn:1001-9332.2006.05.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9332.2006.05.016).
- [8] 杜典, 刘芬. 两种苹果砧木对中度干旱胁迫的生理响应[J]. 甘肃农业科技, 2020(8): 64. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1463.2020.08.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1463.2020.08.016).
- [9] 黄尧瑶, 邓明华, 彭春秀, 等. 百合花瓣抗氧化酶系统对干旱胁迫响应的研究[J]. 园艺学报, 2020, 47(4): 788. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0469](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0469).
- [10] 戚大伟. 9种苹果矮化中间砧栽培抗旱性比较[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [11] 赵秀明, 王飞, 韩明玉, 等. 新引进苹果矮化中间砧木的抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 105. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7601.2012.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7601.2012.04.019).
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 包秀霞, 廉勇, 慕宗杰, 等. 干旱胁迫下不同来源多根葱根系及叶片光合特性的比较[J]. 华北农学报, 2022, 37(4): 122. DOI: [10.7668/hbxb.20192170](https://doi.org/10.7668/hbxb.20192170).
- [15] 崔蓉, 柳鑫婧, 李锦秀, 等. 不同干旱胁迫程度对不同品种玉米关键生育期抗氧化特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(3): 545. DOI: [10.7685/jnau.202110025](https://doi.org/10.7685/jnau.202110025).
- [16] 赵洁, 郎莹, 吴畏, 等. 土壤极端干旱对金银花光合生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(12): 2444. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2017.12.2444](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2017.12.2444).
- [17] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Reviews of Plant Physiology, 1982, 33: 317. DOI: [10.1146/annurev.pp.33.060182.001533](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.001533).
- [18] 赵通, 程丽, 王城, 等. 不同苹果砧穗组合的生长及光合特性[J]. 西北植物学报, 2018, 38(9): 1707. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2018.09.1707](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2018.09.1707).
- [19] 杜学梅, 杨廷桢, 高敬东, 等. 苹果砧木对嫁接品种影响的研究进展[J]. 西北农业学报, 2020, 29(4): 487. DOI: [10.7606/j.issn.1004-1389.2020.04.001](https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2020.04.001).
- [20] 吕亚, 张祖兵, 任保兰, 等. 水分胁迫对辣木苗期生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(3): 503. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201807002](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201807002).
- [21] 蔡年辉, 张瑞丽, 陈诗, 等. 云南松幼苗对水分胁迫的生理响应[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2013, 28(2): 247. DOI: [10.3969/j.issn.1004-390X\(n\).2013.02.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-390X(n).2013.02.018).
- [22] 里程辉, 刘志, 王宏, 等. 干旱胁迫下不同中间砧对“岳冠”苹果叶片光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 83. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.13](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.13).
- [23] 王婉妮, 鞠延仑, 贾若一, 等. 干旱胁迫对葡萄砧木110R、1103P和5BB叶片光合特性及抗氧化能力的影响[J]. 北方园艺, 2021(13): 43. DOI: [10.11937/bfy.20204244](https://doi.org/10.11937/bfy.20204244).
- [24] 刘忠霞, 刘建朝, 胡景江. 干旱胁迫对苹果树苗活性氧代谢及渗透调节的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 15. DOI: [10.3969/j.issn.1001-7461.2013.02.03](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2013.02.03).
- [25] 张志晓, 王燕, 江文等. 不同砧木绿宝苹果幼树对盐碱土的适应性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(23): 153. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2017.23.042](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2017.23.042).
- [26] 何亚南. 苹果不同砧穗组合抗旱生理特性的比较研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [27] 里程辉. 三种矮化中间砧对“岳冠”苹果植株生产性能影响的比较研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

责任编辑: 何馨成