

干旱胁迫下平邑甜茶对外源硅处理的生理响应特性

张德¹, 罗学义², 赵通¹, 程丽¹, 张瑞¹,
张夏焱¹, 王双成¹, 张仲兴¹, 王延秀^{1*}

(¹甘肃农业大学, 兰州 730070; ²天水市麦积区果品产业局, 甘肃天水 741000)

摘要:【目的】探究外源硅(Si)对干旱胁迫下苹果砧木生理特性的影响。【方法】采用盆栽控水方法, 设置正常水分(对照)和干旱胁迫外加5种浓度硅处理($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), 即0(T1)、1.25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T2)、2.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T3)、3.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T4)、5.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T5), 测定各处理的叶绿素含量、光合特性、荧光参数及抗氧化酶活性, 并利用主成分分析对其进行综合评价。【结果】平邑甜茶叶片的胞间 CO_2 浓度(C_i)、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量随干旱胁迫时间的延长逐渐增加, 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、最大荧光(F_m)、最大光能转化率(F_v/F_m)、光合电子传递速率(ETR)以及叶绿素相对含量(SPAD)则呈下降趋势, 而初始荧光(F_0)和超氧化物歧化酶(SOD)活性随胁迫时间的延长分别呈先降后升和先升后降的趋势。相比对照, 外源硅处理后叶片各指标的变化幅度均有减小, 且存在明显的浓度效应。其中, T4(3.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下 SPAD、 P_n 、 G_s 、 F_v/F_m 、ETR 及 SOD 降幅最小, 显著高于 T1, MDA 升幅最小, 且显著低于 T1 及 CK; Pro 升幅最大, 显著高于 T1。12 个指标相关性分析结果表明, P_n 与 SPAD、 G_s 、 T_r 、 F_v/F_m 、 F_0 、 F_m 、ETR、Pro 及 SOD 呈正相关, 与 C_i 和 MDA 呈负相关。对此 12 个指标进行主成分分析, 提取特征值>1 的 3 个主成分, 其特征值分别为 8.366、2.370 和 1.060。第一、二、三主成分方差贡献率分别为 69.719%、19.754% 和 8.834%, 累计方差贡献率达到 98.307%, 符合分析要求。综合分析表明, 干旱胁迫下不同浓度外源硅对平邑甜茶生理特性的影响排名依次为: T4 > T3 > T5 > T2 > T1。【结论】3.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硅酸钠能更好地改善平邑甜茶的光合能力、提高抗氧化酶活性、增加生物膜的稳定性, 进而达到缓解干旱胁迫的目的。

关键词: 平邑甜茶; 硅处理; 干旱胁迫; 光合; 耐旱性; 主成分分析

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2020)10-1506-12

A study on the physiological responses of *Malus hupehensis* to exogenous silicon treatment under drought stress

ZHANG De¹, LUO Xueyi², ZHAO Tong¹, CHENG Li¹, ZHANG Rui¹, ZHANG Xiayi¹, WANG Shuangcheng¹, ZHANG Zhongxing¹, WANG Yanxiu^{1*}

(¹College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; ²Fruit Industry Bureau, Maiji District, Tianshui City, Tianshui 741000, Gansu, China)

Abstract: 【Objective】*Malus domestica* Mill. is the most important deciduous fruit tree in the world, which is well adapted to the climate of the loess plateau in Northwest China with sufficient sunlight and great diurnal temperature difference. The northwestern region is the best ecological area for apple cultivation, but there are many adverse environmental factors, such as drought, have caused huge losses in agricultural production, and seriously threaten the sustainable development of the apple industry. It is of great significance to select suitable treatments to control the size of trees canopy, enhance resistance to diseases and abiotic stresses. Many studies have shown that spraying with SA, ABA or SE promotes the growth of apple seedlings under drought stress, improves the structure of trees and the photosynthetic characteristics of leaves, which can effectively alleviate the damage of drought stress on plants. With

收稿日期: 2020-02-22 接受日期: 2020-06-28

基金项目: 甘肃省自然科学基金(18JR3RA171)

作者简介: 张德, 男, 在读硕士研究生, 主要从事果树栽培生理研究。Tel: 18394189590, E-mail: 61170164@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 18394189590, E-mail: wangxy@gsau.edu.cn

seedlings of *Malus hupehensis* seedlings at 8 leaf ages as the experimental material, the effects of exogenous silicon (Si) on the physiological characteristics of apple rootstock under drought stress were studied by spraying sodium silicate at different concentrations.【Methods】When the seedlings of *M. hupehensis* grew to 4-leaf age, they were moved into pots with the same size and the same weight of nutrient soil. Intact and uniform *M. hupehensis* with 8 true leaves were selected for the drought stress experiment. The soil moisture was controlled by weighing method, and the severity of drought stress increased with elongated drought. At the same time, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ solutions of 0, 1.25, 2.5, 3.75 and 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ were sprayed. When the field capacity was 50% and normal water (CK) soil maintained 75% of the field capacity, spraying was stopped. Treatments including normal irrigation (CK), drought stress (T1), drought stress + 1.25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (T2), drought stress + 2.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (T3), drought stress + 3.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (T4), drought stress + 5.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (T5) were set for the experiment, which lasted for 20 days. The effects of these treatments on photosynthetic characteristic indices [such as net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and intercellular CO_2 concentration(C_i)], chlorophyll fluorescence parameters [such as Initial fluorescence (F_0), maximum fluorescence (F_m), the maximum light conversion rate of PSII (F_v/F_m) and photosynthetic electron transfer rate (ETR)], chlorophyll content (SPAD), proline content (Pro), superoxide dismutase (SOD), malondialdehyde (MDA) were determined every five days from the day of treatment. Finally, multiple indicators were analyzed using the correlation analysis method and principal component analysis.【Results】With the prolongation of drought stress, C_i , MDA and Pro increased, while P_n , G_s , T_r , F_m , F_v/F_m , ETR and SPAD showed a decreased trend. Besides, as the drought stress extended, F_0 first decreased and then increased, while the activity of SOD increased first and then decreased. With the silicon treatments, the declines or increases in the above leaf indexes were significantly lower than that CK, and there was an obvious concentration effect. Under T4 (3.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), the SPAD, P_n , G_s , F_v/F_m , ETR and SOD demonstrated minimum drop and were significantly higher than under T1, while MDA in T4 had the smallest increase and was significantly lower than in T1 and CK, while Pro had the largest increase and was significantly higher than that in T1. The correlation analysis of the 12 indexes displayed that P_n was positively correlated with SPAD, G_s , T_r , F_v/F_m , F_0 , F_m , ETR, Pro and SOD, but negatively correlated with C_i and MDA. Principal component analysis was performed on these 12 indicators, and three principal components with feature value >1 were extracted, whose eigenvalues were 8.366, 2.370 and 1.060, respectively. The variance contribution rates of the first, second and third principal components were 69.719%, 19.754% and 8.834%, respectively, and the cumulative variance contribution rate reached 98.307%, which met the analysis requirements. The comprehensive analysis showed that the effects of exogenous silicon treatments on the physiological characteristics of *M. hupehensis* were in the order of T4 > T3 > T5 > T2 > T1.【Conclusion】Exogenous silicon could alleviate drought stress by regulating osmotic substances, eliminating reactive oxygen species, activating antioxidant enzymes, and improving heat dissipation with improved light protection. The treatment of 3.75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ sodium silicate could alleviate the drought stress by improving the photosynthetic capacity, antioxidant enzyme activity and the stability of the membrane.

Key words: *Malus hupehensis*; Silicon treatment; Drought stress; Photosynthetic; Drought tolerance; Principal component analysis

苹果(*Malus domestica* Borkh.)是世界上最重要的落叶果树^[1]。中国是苹果的生产大国,占世界苹果栽培面积和产量的48%和54%^[2]。西北黄土高原地区光照充足、昼夜温差大、海拔适宜,是我国面积最大、品质最佳的苹果产区^[3]。该区域是典型的雨养农业区,干旱已成为植物生长和产量形成中最重要的限制因素,严重威胁着苹果产业的可持续发展^[4]。外源喷施物如SA、ABA和SE均可促进干旱胁迫下苹果幼苗的生长,改善树体结构,提高叶片光合特性,从而有效缓解干旱胁迫对植株造成的伤害^[5]。故适宜的外源物质对控制树体大小、增强果树抗逆性及抗病能力等具有重要的意义。

近年来,在生产中应用外源物质以期提高植物抗逆性的研究已成为焦点。硅(Si)作为土壤中含量第二位的元素,在植物非生物胁迫中的研究日益受到重视。陈伟等^[6]研究发现施硅可提高干旱胁迫下水稻植株叶片叶绿素含量、净光合速率等。朱佳等^[7]研究表明硅能提高低温胁迫条件下小麦 P_n 和气孔限制值(L_s)。钱琼秋等^[8]发现Si处理可以显著降低盐胁迫下黄瓜幼苗叶绿体中丙二醛(MDA)含量,提高超氧化物歧化酶(SOD)活性。木合塔尔·扎热^[9]利用外源硅增加了干旱胁迫下沙枣幼苗的光合色素含量,提高 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、qP和ETR曲线的稳定值,促进了沙枣幼苗的生长。前人在小麦、水稻、番茄等作物上的研究可知,硅可参与干旱胁迫下植物生理代谢并提高ROS清除系统强度,将ROS对植物细胞毒害程度降到最低^[10]。Lee等^[11]对大豆的研究中发现 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Si可提高盐胁迫下植株生长特性,即株高、鲜干生物量、叶绿素含量和内源赤霉素(GAs)水平。外源喷施甜菜碱、脱酸落、硝普钠可对干旱复水条件下平邑甜茶生理特性和抗氧化系统特性产生影响^[12]。喷施硅预处理能有效缓解轻度水分胁迫下苹果叶片相对含水量的减少,降低丙二醛含量,增加脯氨酸含量,提高抗氧化酶活性^[13]。目前,关于外源施硅处理的研究大多集中在干旱地区的禾本科植物,而对木本植物尤其苹果砧木是否具有相似功能及效果,鲜见报道。

平邑甜茶(*M. hupenensis* Rehd.)是苹果生产中应用较广的砧木材料,群体内个体在形态特征上整齐一致,有较强的抗寒性,对白粉病、白绢病、褐斑病及苹果绵蚜具有天然抗性,与不同苹果品种嫁接亲和力和好,易于繁殖,嫁接树生长较旺,但其耐干旱性

低于其他砧木^[14]。笔者以8叶龄平邑甜茶为试材,通过盆栽控水试验,研究干旱条件下喷施不同浓度外源硅对平邑甜茶光合、荧光、叶绿素及生理特性的影响,利用主成分综合分析评价不同浓度之间的效果,以期外源硅在苹果砧木抗性研究及栽培生产中提供一定的理论依据,从而为苹果高产优质栽培技术的制定提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料及处理

2018年2月将饱满一致的平邑甜茶种子用0.2%的高锰酸钾消毒30 min,用流水冲洗12 h,然后置于4℃下沙藏35 d。3月中旬选择发芽一致的种子种于含有育苗基质的塑料花盆中(11.2 cm × 16.8 cm,含有2.5 kg基质),并置于甘肃农业大学避雨棚中(N 36°1'–37°9', E 106°21'–107°44')统一管理。平邑甜茶幼苗生长至4片真叶时,移入大小相同、装营养土重量相同的花盆中,每盆1株。待植株长至8片真叶时,选择长势一致的幼苗,进行水分胁迫处理,采用称重法控制土壤含水量,每天傍晚称重并复水保持田间持水量50%。控水试验采用持续干旱法进行干旱胁迫处理,试验设6个处理,每处理6个重复。干旱胁迫同时,分别用0、1.25、2.5、3.75、5 mmol·L⁻¹的Na₂SiO₃·9H₂O溶液进行喷施处理至田间持水量50%,对照处理的土壤始终保持田间持水量的75%,不喷施任何溶液。分别以正常水分(对照)、干旱胁迫(T1)、干旱胁迫+1.25 mmol·L⁻¹ Na₂SiO₃·9H₂O(T2)、干旱胁迫+2.5 mmol·L⁻¹ Na₂SiO₃·9H₂O(T3)、干旱胁迫+3.75 mmol·L⁻¹ Na₂SiO₃·9H₂O(T4)、干旱胁迫+5 mmol·L⁻¹ Na₂SiO₃·9H₂O(T5)代表各处理。从胁迫处理开始,第1次取样时间为2018年6月21日上午7:00,以后每5 d选取生长一致的幼苗顶端相同节位叶片进行各项指标测定。

1.2 测定指标及测定方法

1.2.1 光合、荧光及叶绿素相对含量的测定 光合指标测定采用便携式光合仪(LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE, USA),于晴天上午9:00—11:00,选取同一节位的功能叶进行净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)和气孔导度(G_s)的测定,5次重复。光合仪系统控制叶片温度25℃,测定系统采用开放式气路,自然光源,光合有效辐射为400~600

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶室内空气流量设定为 $500\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,室内 CO_2 浓度为 $(385\pm 10)\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

荧光参数测定采用 IMAGING-PAM 叶绿素荧光仪和 Imaging WinGegE 软件 (Walz, Effeltrich, 德国) 测定初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m)、最大光化学效率 (F_v/F_m)、表观光合电子传递速率 (ETR), 荧光参数测定天数同光合指标, 叶片采用同一节位叶片。叶绿素相对含量 (SPAD) 用 SPAD-502 叶绿素仪测定。

1.2.2 生理指标的测定 胁迫 0、5、10、15、20 d 后, 取植株中上部大叶节以上的功能性叶片, 洗净并剪掉叶脉磨碎用于相关指标测定。MDA 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定^[15]; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用文献^[16]的方法测定; 游离脯氨酸 (Pro) 含量用酸性茚三酮法测定^[17]; 生物学 6 次重复。

1.2.3 数据分析 实验数据用 Microsoft Office Ex-

cel 2007 及 Origin 2018 进行处理及作图, 采用 SPSS 22.0 单因素 ANOVA 的 LSD 法比较差异显著水平 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下外源 Si 对平邑甜茶叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 的影响

由图 1 可知, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的 SPAD 呈下降趋势, 但不同处理对 SPAD 的降幅不同。其中, 胁迫 20 d 后, SPAD 表现出随处理浓度增加呈先升后降趋势, 且在 T4 处理达到峰值, 分别为 56.12 (T1)、57.66 (T2)、59.33 (T3)、59.93 (T4)、58.23 (T5); 与对照相比, 分别降低了 16.15% (T1)、13.85% (T2)、11.36% (T3)、10.46% (T4)、13% (T5)。因此, T4 降幅较小, 显著小于对照 (66.93) 及其他处

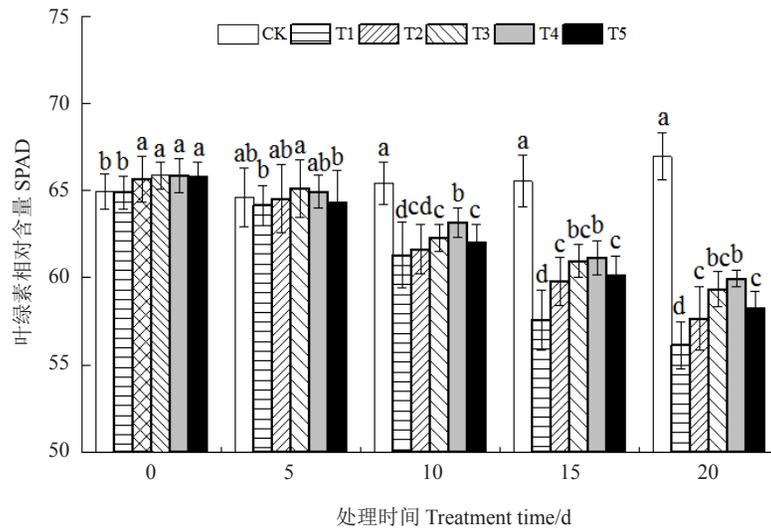


图 1 外源硅处理对平邑甜茶叶片 SPAD 的影响

Fig. 1 Effect of Si on SPAD value of *M. hupenensis* leaves

理。

2.2 外源 Si 对干旱胁迫下平邑甜茶光合特性的影响

图 2-A 可得, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的 P_n 呈下降趋势, 但不同处理对 P_n 的降幅不同。胁迫 10 d 后, P_n 表现出随处理浓度增加先升后降的趋势, 胁迫至 20 d 时差异最显著, 且在 T4 时达峰值, 与对照相比, 分别降低了 54.6% (T1)、44.0% (T2)、30.0% (T3)、22.9% (T4)、32.0% (T5), 可能外源硅处理可有效缓解干旱造成的 P_n 下降, 其中 T4 效果最明显, 降幅显著小于对照及其他处理。

图 2-B 表明, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶

片的 G_s 变化趋势与 P_n 相同, 干旱处理期间亦呈下降趋势。不同处理对 G_s 和 P_n 的影响相同, 均对 G_s 和 P_n 的下降表现出一定的抑制作用, 胁迫至 20 d 时, G_s 在各处理下降至最低值, 其中 T4 处理效果最明显, 降幅为 39.5%, 且显著小于对照及其他处理。

与 P_n 和 G_s 变化趋势相同, 平邑甜茶叶片的 T_r 也呈下降的趋势。但不同处理对 T_r 的降幅不同。胁迫至 20 d, T_r 在各处理下降至最低, 均显著低于对照。其中 T2 (40.7%) 和 T3 (38.7%) 处理降幅较小, 显著小于对照及其他处理 (图 2-C)。

从图 2-D 可看出, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的 C_i 呈上升的趋势, 但不同处理对 C_i 的升幅

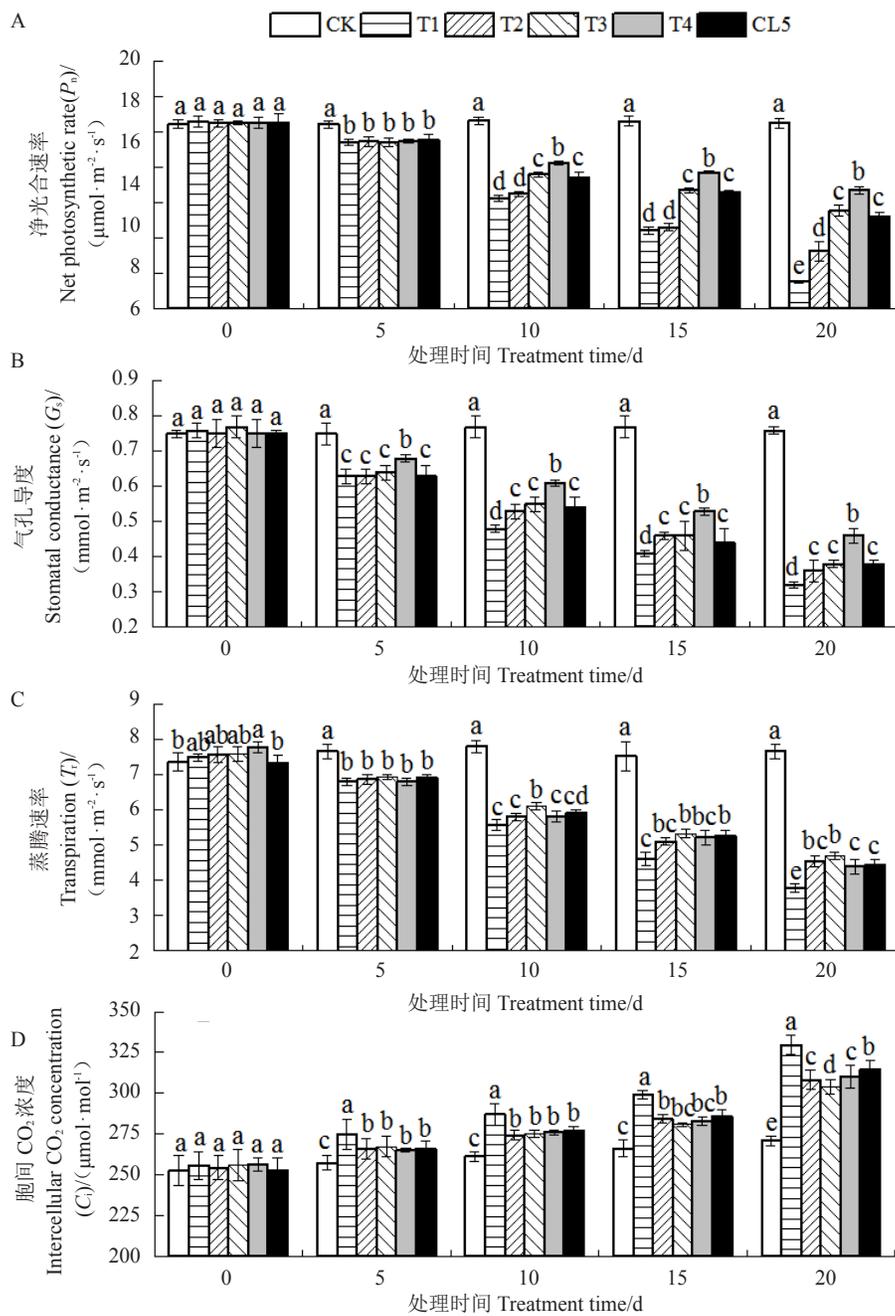


图 2 外源硅处理对干旱胁迫下平邑甜茶叶片 P_n 、 G_s 、 T 、 C_i 含量的影响

Fig. 2 Effect of Si on P_n , G_s , T , and C_i in *M. hupehensis* leaves

不同。胁迫 15 d 后, C_i 表现出随处理浓度升高先降后升的趋势。胁迫 20 d 时, C_i 在各处理时升至峰值, 与对照相比, T1 处理升幅最大, 为 17.9%; T3 处理升幅最小, 为 12.3%, 显著小于 T1 及其他处理。

2.3 干旱胁迫下外源 Si 对平邑甜茶叶片荧光特性的影响

图 3-A 可知, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的 F_0 呈先降后升趋势, 但不同处理对不同时间 F_0 的变化影响不同, 对 0~10 d 的下降无明显影响, 而 10~20 d 的升幅各处理间存在显著差异。胁迫至 10 d,

F_0 在 T4 处理下降至最低值, 为 0.158, 且各处理间无显著差异。10~20 d, F_0 显著升高, 20 d 时各处理均达到峰值。与对照相比, F_0 在 T1 处理下降幅最大, 为 42.9%; T3 下降幅最小, 为 31.4%, 显著小于 T1 其他处理。

从图 3-B 可看出, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的 F_m 呈下降的趋势, 但不同处理对 F_m 的降幅不同。胁迫 10 d 以后, F_m 在各处理下表现出随处理浓度增加先升后降的趋势, 胁迫 15 d 以后变化趋势趋于稳定, F_m 在各处理下均显著低于对照。与对照

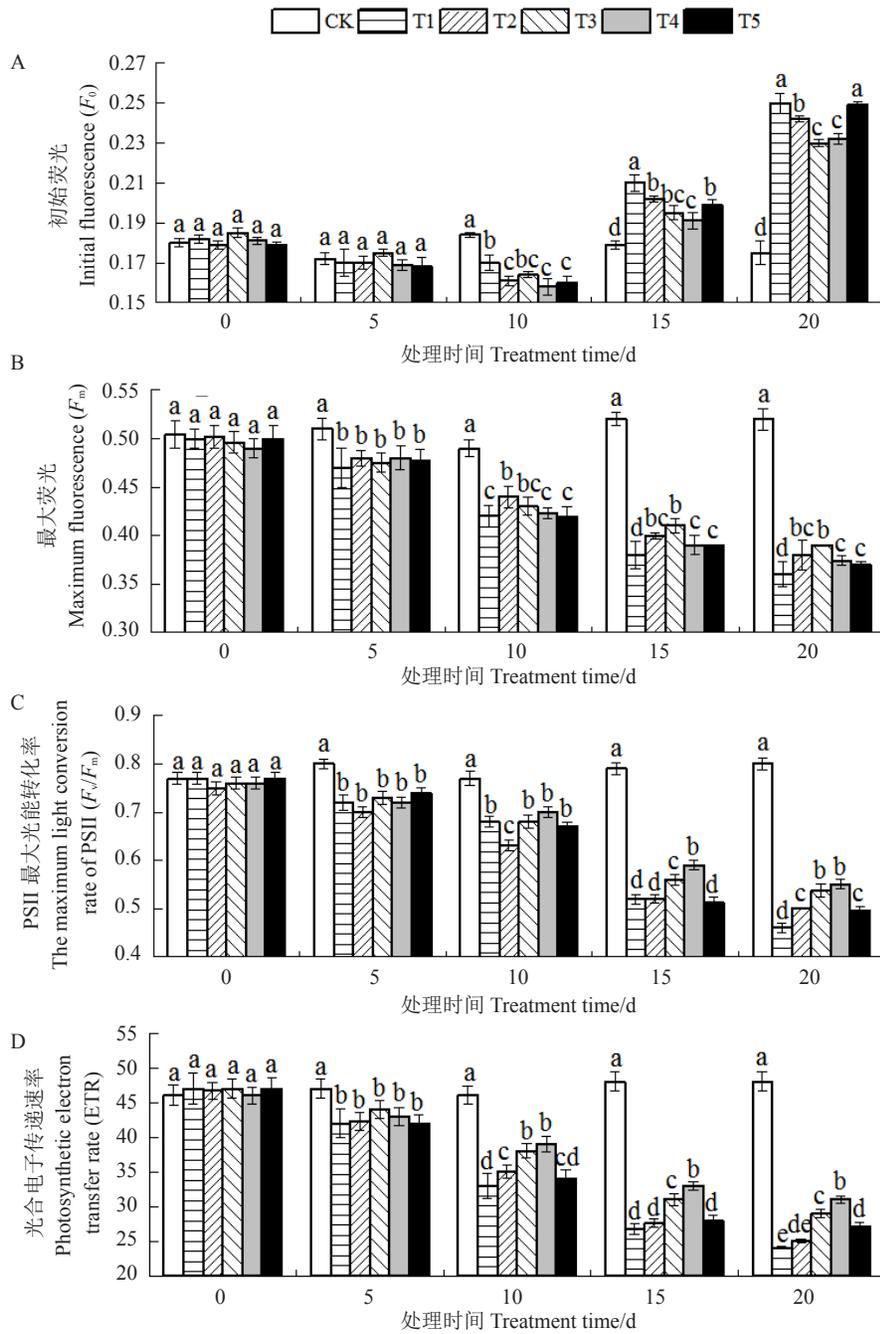


图3 外源硅处理对干旱胁迫下平邑甜茶叶片 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 和 ETR 含量的影响

Fig. 3 Effect of Si on F_0 , F_m , F_v/F_m and ETR in *M. hupehensis* leaves

相比, T3(25.0%)降幅最小, 显著小于T1(38.5%)、T4(28.1%)和T5(28.9%)。

由图3-C可见, 干旱处理期间平邑甜茶叶片 F_v/F_m 的变化趋势与 F_m 基本相同, 但不同处理对 F_v/F_m 的降幅不同。胁迫至15 d时, F_v/F_m 显著下降, 20 d时, F_v/F_m 在各处理下降至最低值, 与对照相比, T4降幅最小, 为31.3%, 显著小于T1(42.5%)。

图3-D表明, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的ETR呈下降的趋势, 但不同处理对ETR的降幅

不同。胁迫至20 d, 各处理降至最低, 分别为24(T1)、25(T2)、29(T3)、31(T4)、27(T5), 显著低于对照, 其中T1下降后仅为对照的50%, T4降幅最小, 相比对照下降了35.4%, 显著低于其他处理组。

2.4 干旱胁迫下外源Si处理对平邑甜茶叶片Pro、SOD、MDA的影响

2.4.1 干旱胁迫下外源Si对平邑甜茶叶片Pro含量的影响 由图4可知, 随着胁迫时间的延长, 平邑甜茶叶片的Pro含量呈上升趋势。与胁迫下Pro含量

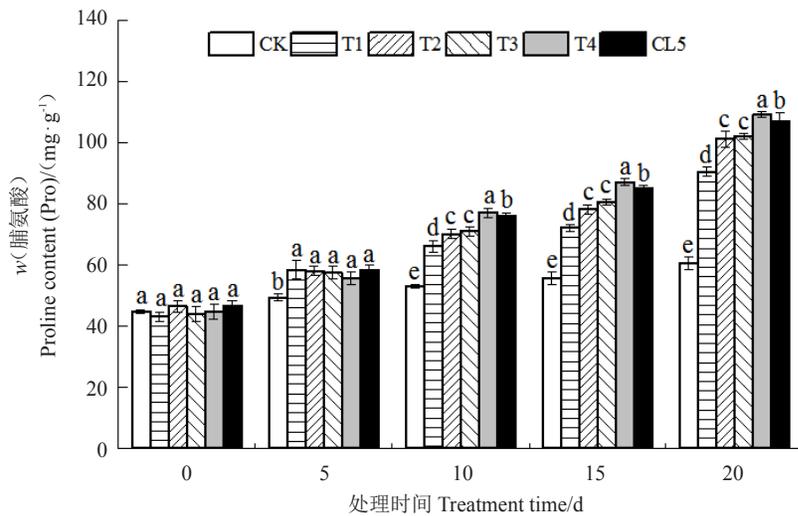


图4 外源硅处理对平邑甜茶叶片 Pro 含量的影响

Fig. 4 Effect of Si on Pro content in *M. hupehensis* leaves

变化相同,外源施硅后,Pro 含量持续增加,且具有明显浓度效应。胁迫至 20 d,平邑甜茶 Pro 积累达到峰值,在 T1 处理积累量最小,为 90.3 mg·g⁻¹;T4 处理积累量最大,为 109.0 mg·g⁻¹。与对照相比,分别上升了 50%(T1)、80.7%(T4),且 T4 升幅最大,显著高于对照及其他处理。

2.4.2 干旱胁迫下外源 Si 处理对平邑甜茶叶片保护酶活性(SOD)的影响 由图 5 可知,随着胁迫时间的延长,平邑甜茶叶片的 SOD 活性呈先升后降的趋势。各处理分别在胁迫 5 d(T1、T2、T3、T4)、10 d(T5)达到最大值后不断降低,但不同处理对 SOD 活性的降幅不同。胁迫至 20 d,各处理 SOD 活性均降

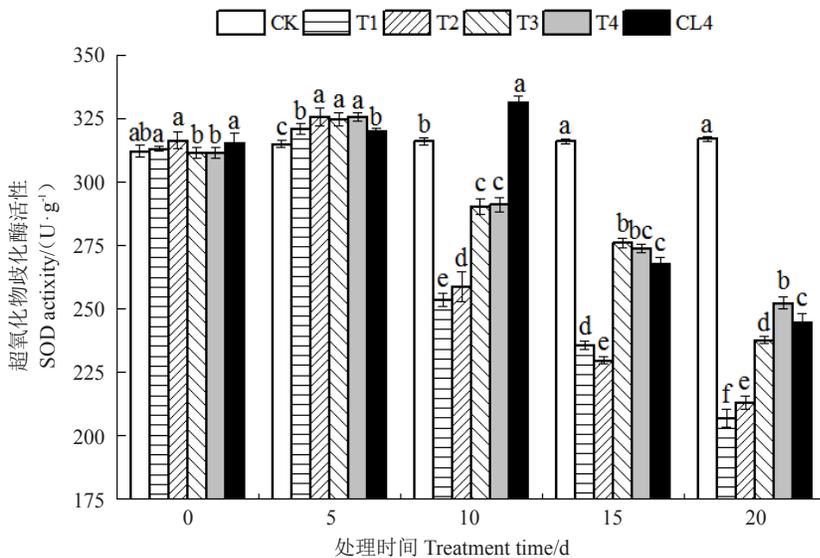


图5 外源硅处理对平邑甜茶叶片 SOD 活性的影响

Fig. 5 Effect of Si on SOD activity in *M. hupehensis* leaves

至最低,相比对照,T1 (207 U·g⁻¹)降幅最大,为 34.7%;T4 (252 U·g⁻¹)降幅最小,为 20.4%,显著小于 T1 及其他处理。

2.4.3 干旱胁迫下外源 Si 对平邑甜茶渗透胁迫物质丙二醛(MDA)的影响 由图 6 可知,随着胁迫时间的延长,平邑甜茶叶片的 MDA 含量呈升高趋势,

且在不同处理下 MDA 含量的升幅不同。胁迫 20 d 时,MDA 含量在各处理下均达峰值,其中 T1 处理下含量最高,为 7.64 μmol·g⁻¹;T4 处理下含量最低,为 7.2 μmol·g⁻¹,显著高于对照(5.75 μmol·g⁻¹),与对照相比,T1 升幅最大,为 32.9%;T4 升幅最小,为 25.2%,显著小于其他处理。

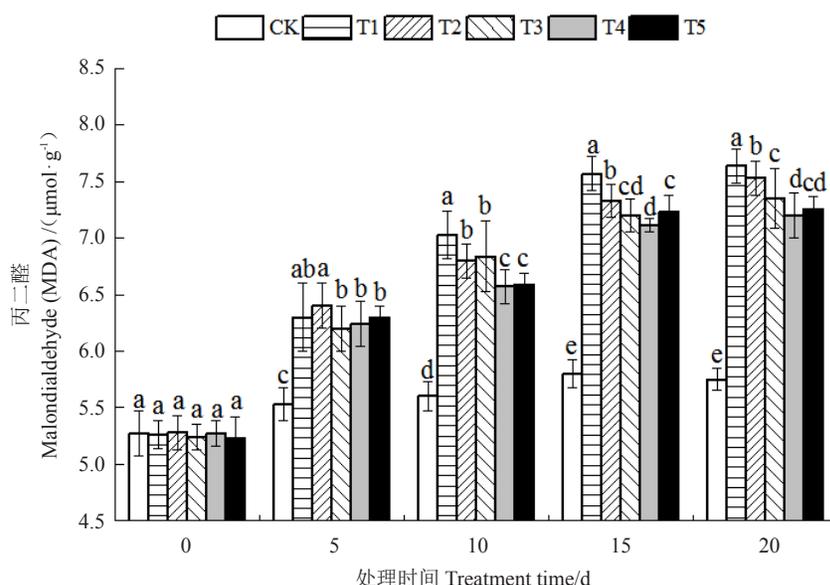


图 6 外源硅处理对平邑甜茶叶片 MDA 含量的影响

Fig. 6 Effect of Si on MDA content in *M. hupenensis* leaves

2.5 干旱胁迫下不同浓度外源硅对平邑甜茶生理效应的综合评价

2.5.1 相关性分析 将处理后的各项指标进行相关性分析,得到相关系数矩阵。对处理后平邑甜茶的

12 个相关指标进行相关性分析(表 1)。结果表明,平邑甜茶叶片的 P_n 与 Pro、SPAD、 F_v/F_m 呈极显著正相关($p < 0.01$),与 SOD 及 ETR 呈显著正相关($p < 0.05$),与 MDA 呈显著负相关($p < 0.05$)。

表 1 不同处理平邑甜茶各项指标的相关性分析

Table 1 The correlation analysis of various indexes of *M. hupenensis* under different treatments

	P_n	T_r	C_i	G_s	Pro	SOD	MDA	SPAD	F_0	F_m	F_v/F_m	ETR
P_n	1											
T_r	0.646	1										
C_i	-0.687	-0.983**	1									
G_s	0.329	0.835*	-0.843*	1								
Pro	0.914**	0.707	-0.710	0.247	1							
SOD	0.803*	0.442	-0.38	-0.004	0.843*	1						
MDA	-0.830*	-0.503	0.63	-0.439	-0.612	-0.347	1					
SPAD	0.972**	0.749	-0.804*	0.524	0.857*	0.670	-0.893*	1				
F_0	0.751	0.612	-0.732	0.637	0.529	0.224	-0.969**	0.867*	1			
F_m	0.480	0.917**	-0.93**	0.981**	0.425	0.141	-0.536	0.654	0.706	1		
F_v/F_m	0.916**	0.741	-0.822*	0.594	0.772	0.515	-0.946**	0.981**	0.944**	0.708	1	
ETR	0.879*	0.453	-0.418	0.054	0.850*	0.982**	-0.496	0.764	0.374	0.197	0.629	1

注:*表示相关性显著($p < 0.05$);**表示相关性极显著($p < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($p < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation($p < 0.01$).

2.5.2 主成分分析 为综合评价干旱胁迫下不同浓度外源硅对平邑甜茶的光合荧光生理响应特性,将胁迫处理后相关的 12 个指标进行主成分分析,提取特征值大于 1 的 3 个主成分,其特征值分别为 8.366、2.370、1.060(表 2)。第一、二、三主成分方差贡献率依次为 69.719%、19.754%、8.834%,累计方差贡献率

达到 98.307%,符合分析要求。表 2 显示,第一主成分(PC1)综合了 P_n 、 T_r 、 C_i 、Pro、MDA、SPAD、 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 和 ETR 这 9 个指标的信息,第二主成分(PC2)综合了 G_s 和 SOD 指标的信息。

综合得分(F)是每个主成分得分与对应贡献率的乘积之和,即: $F = F_1 \times 69.719\% + F_2 \times 19.754\% + F_3 \times$

表2 主成分分析方差解释
Table 2 Total variance explained

指标 Index	载荷 Load		
	PC1	PC2	PC3
P_n	0.928	0.359	-0.103
T_r	0.859	-0.300	0.405
C_i	-0.899	0.338	-0.237
G_s	0.649	-0.710	0.199
Pro	0.850	0.410	0.187
SOD	0.627	0.702	0.310
MDA	-0.838	0.010	0.545
SPAD	0.982	0.130	-0.132
F_0	0.851	-0.242	-0.465
F_m	0.770	-0.596	0.208
F_v/F_m	0.969	-0.022	-0.245
ETR	0.706	0.664	0.156
特征根 Eigen values	8.366	2.370	1.060
方差贡献率 Proportion of variance/%	69.719	19.754	8.834
累计方差贡献率 Cumulative variance/%	69.719	89.472	98.307

注: PC1、PC2、PC3 分别表示主成分 1、主成分 2、主成分 3。下同。

Note: PC1, PC2 and PC3 respectively indicate: principal component 1, principal component 2, principal component 3. The same below.

8.834%。由表3可知,平邑甜茶在不同处理下的综合得分分别为-1.144(T1)、-0.283(T2)、0.414(T3)、0.662(T4)、0.353(T5)。因此,干旱胁迫下不同浓度外源硅对平邑甜茶生理特性的影响排名依次为: T4 > T3 > T5 > T2 > T1。

表3 不同处理下平邑甜茶的综合得分及排名
Table 3 The comprehensive score and ranking of *M. hupenensis* under different treatments

处理 Treatments	主成分得分 Principal component score			综合 得分(F) Compreh- ensive score	综合得 分排名 Compreh- ensive score ranking
	PC1(F1)	PC2(F2)	PC3(F3)		
T1	-1.567 91	0.031 06	-0.683 06	-1.144	5
T2	-0.170 07	-1.038 67	0.464 33	-0.283	4
T3	0.846 87	-0.951 60	0.140 59	0.414	2
T4	0.891 93	0.761 17	-1.244 48	0.662	1
T5	-0.000 81	1.198 04	1.322 62	0.353	3

3 讨论

光合作用是果树生长的物质和能量来源。周宇飞等^[18-19]研究表明,干旱胁迫可以分解光合色素,降低胞间 CO₂ 浓度,影响气孔导度,使叶片 P_n 降低,从

而抑制植株的光合作用。本试验中,随着干旱胁迫时间的延长,平邑甜茶的 SPAD 呈下降趋势,可能是干旱胁迫导致叶绿素降解,通过不同浓度的外源硅处理后,SPAD 含量呈上升状态,表明外源硅可以有效缓解这种伤害。这与丁燕芳等^[20]在小麦中和木合塔尔·扎热^[9]在尖果沙枣中的研究结果一致。因此,外源硅处理缓解了干旱胁迫对平邑甜茶叶绿体膜的损坏,从而保持其结构的完整性。本试验相关性分析表明, P_n 与 SPAD 呈极显著正相关,说明平邑甜茶 SPAD 含量降低是光合作用受到抑制的重要因素。Farquhar 等^[21]认为净光合速率下降主要包括气孔限制和非气孔限制,气孔限制是由于 CO₂ 进入叶片受阻所致,非气孔因素是由于光合细胞机构和功能受到损害而致。本研究表明,干旱胁迫下,平邑甜茶叶片的 G_s 下降的同时伴随着 C_i 上升,说明在干旱胁迫条件下平邑甜茶 P_n 下降是由非气孔限制因素造成的,即平邑甜茶叶肉细胞光合活性降低引起,这可能是干旱胁迫下细胞过氧化使光合电子传递受阻,影响类囊体蛋白质合成和参与卡尔文循环的相关酶活性,导致叶片气孔导度降低、CO₂ 同化缓慢、叶片蒸腾速率和光合速率下降^[22]。通过不同浓度外源施 Si 处理,平邑甜茶 C_i 升幅显著小于未施硅处理, P_n 、 G_s 显著升高,表明 Si 抑制了叶肉细胞光合活性的过度降低,从而提高平邑甜茶的净光合速率,这与李清芳等^[23]在硅缓解玉米干旱胁迫中的研究结果一致。

叶绿素荧光是植物受到干旱胁迫后的一种理想监测手段^[24]。 F_0 、 F_v/F_m 的变化可推断反应中心变化情况和可能的光保护机制^[25]。研究表明, F_0 升高,表示 PS II 反应中心遭受破坏或可逆失活, F_0 降低,表示 PS II 天线色素发生热耗散,通过 PS II 的电子传递能力下降^[26-27]。 F_v/F_m 降低的同时伴随有 F_0 的上升,可能 PS II 已经遭到破坏^[28-29]。本实验结果表明,随着胁迫时间的延长, F_m 、 F_v/F_m 、ETR 均逐渐降低,且显著低于 CK,说明干旱胁迫引起了光抑制的发生。 F_0 在 0~10 d 下降,这可能是平邑甜茶幼苗为减轻光抑制,避免过剩光能伤及 PS II 反应中心所致。 F_v/F_m 在 10~15 d 时显著下降,而 F_0 在 10 d 以后逐渐上升,出现这种现象的原因可能是干旱胁迫对 PS II 反应中心造成了更严重的伤害,而通过不同浓度的硅处理后,降低了胁迫期间 F_0 的上升以及 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 的下降幅度,说明适宜浓度的硅可以有效缓解干旱胁迫对平邑甜茶叶片 PS II 的抑制与伤害,从而提高

光能转化效率和电子传递速率,增加了光合作用,提高平邑甜茶幼苗的耐旱能力。这与木合塔尔·扎热^[9]在尖果沙枣中的研究结果相似,与孙山等^[30]在平邑甜茶中的研究结果相一致。相关性分析表明, F_v/F_m 与 P_n 呈极显著正相关,ETR与 P_n 呈显著正相关,说明 F_v/F_m 和ETR与光合作用紧密相关,其活性的大小可以作为判断植物抗旱能力的重要指标。

活性氧(ROS)是植物体内性质活泼、氧化能力极强的含氧化合物总称^[31]。通常,植物能够调控超氧歧化酶、过氧化氢酶、脯氨酸等物质的合成与积累,以适应渗透胁迫,保持ROS产生与清除系统的动态平衡^[32-33]。Schmidt等^[34]研究表明,叶面喷施硅酸盐可提高干旱胁迫下植物叶片的SOD活性。本试验中,干旱胁迫下平邑甜茶SOD活性显著下降,通过不同浓度外源硅处理,平邑甜茶叶片SOD活性显著高于未施硅处理,这可能是外源施硅增强了抗氧化酶的活性,促进ROS清除来减弱细胞的氧化伤害程度,提高了平邑甜茶的抗旱性,这与刘金荣等^[35]发现硅可提高草坪草叶片抗氧化酶的活性,减轻活性氧积累的研究结果一致。当植物遭遇干旱等逆境胁迫时,ROS代谢的动态平衡遭到破坏形成丙二醛(MDA)^[36]。明东风等^[37]研究发现,施硅使水分胁迫下的秀水11和巴西陆稻根系MDA含量分别下降了23%和21%。本研究表明,干旱胁迫下平邑甜茶MDA含量呈上升趋势,而通过施硅处理与对照相比,T4(25.2%)升幅显著低于T1(32.9%),表明通过外源硅处理能有效缓解MDA含量升高,这与范春丽等^[13]在苹果幼树的研究结果相同,可能是外源硅增加了平邑甜茶植株保护酶活性及生物膜的稳定性,在一定程度上缓解了干旱胁迫造成的伤害。蔡昆争等^[38]研究发现,控水处理(3~9 d)的水稻根系和叶片中,脯氨酸等有机渗透调节物质的水平均大幅上升,而且干旱程度越高,增幅越大。本研究中,平邑甜茶叶片脯氨酸含量呈持续上升的现象,且在胁迫15 d后,Pro含量急剧上升,这可能是干旱胁迫引起蛋白质分解,脯氨酸首先被大量游离出来^[39]。通过不同浓度外源硅处理,平邑甜茶叶片中Pro含量显著高于未施硅处理,这说明外源硅可促进平邑甜茶渗透调节物质总量增加,这可能是硅直接参与植物生理生化过程而促进物质合成。这与张环玮等^[40]在烟草幼苗和范春丽等^[13]在苹果幼树中的研究结果相一致。

植物的抗旱性受多种生理因素共同作用,本试验通过对平邑甜茶的12个生理指标进行抗旱性评价,通过相关性和主成分分析得出外源硅调节平邑甜茶抗旱性的主要生理指标,同时可知,干旱胁迫下不同浓度外源硅对平邑甜茶生理特性的影响排名依次为:T4 > T3 > T5 > T2 > T1。因此,外源硅通过降低MDA的积累和 F_v/F_m 的升高,提高抗氧化酶活性,积累Pro和SPAD含量来保持光合系统伤害与修复的动态平衡,增加生物膜的稳定性达到缓解干旱胁迫的效应。

4 结 论

干旱胁迫下,外源施硅通过调节渗透物质,清除活性氧,启动抗氧化酶系统,提高热耗散能力,实现光的保护来缓解干旱胁迫导致的伤害,并具有浓度效应。3.75 mmol·L⁻¹的硅酸钠能更好的改善干旱胁迫下平邑甜茶的光合能力、提高抗氧化酶活性、增加生物膜的稳定性缓解干旱胁迫。

参考文献 References:

- [1] 王昆,刘凤之,曹玉芬,田路明,龚欣,刘立军. 苹果种质资源主要描述标准比较分析[J]. 果树学报,2007,24(5):669-672.
WANG Kun, LIU Fengzhi, CAO Yufen, TIAN Luming, GONG Xin, LIU Lijun. Comparison and analysis of main description standards on apple germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(5): 669-672.
- [2] 王金政,毛志泉,丛佩华,吕德国,马锋旺,任小林,束怀瑞,李保华,郭玉蓉,郝玉金,姜远茂,张新忠,杨欣,曹克强,赵政阳,韩振海,霍学喜,魏钦平. 新中国果树科学研究70年:苹果[J]. 果树学报,2019,36(10):1255-1263.
WANG Jinzheng, MAO Zhiquan, CONG Peihua, LYU Deguo, MA Fengwang, REN Xiaolin, SHU Huairui, LI Baohua, GUO Yurong, HAO Yujin, JIANG Yuanmao, ZHANG Xinzhong, YANG Xin, CAO Keqiang, ZHAO Zhengyang, HAN Zhenhai, HUO Xuexi, WEI Qinqing. Fruit scientific research in New China in the past 70 years: apple[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1255-1263.
- [3] 杨文杰,吴发启,方丽. 陕西省渭北黄土高原苹果发展战略研究[J]. 西北农业学报,2004,13(3):158-161.
YANG Wenjie, WU Faqi, FANG Li. Development strategy of apple industry of Weibei Loess Plateau in Shaanxi Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2004, 13(3): 158-161.
- [4] 殷淑燕,黄春长. 黄土高原苹果基地土壤干燥化原因及其对策[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(2):76-80.
YIN Shuyan, HUANG Chunchang. Soil dryization of the apple base in the Loess Plateau and its countermeasures[J]. Journal of Arid Land, 2005, 19(2): 76-80.
- [5] 冯敬涛,邢玥,张鑫,贾志航,李慧峰,刘相阳,葛顺峰,姜远茂. 干旱胁迫下水杨酸、脱落酸和海藻提取物对苹果幼苗抗旱性及养分吸收的影响[J]. 中国果树,2019(6):42-48.
FENG Jingtao, XING Yue, ZHANG Xin, JIA Zhihang, LI Hui-

- feng, LIU Xiangyang, GE Shunfeng, JIANG Yuanmao. Effects of salicylic acid, abscisic acid and seaweed extract on drought resistance and nutrient uptake of apple seedlings under drought stress[J]. *China Fruits*, 2019(6): 42-48.
- [6] 陈伟, 蔡昆争, 陈基宁. 硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2620-2628.
CHEN Wei, CAI Kunzheng, CHEN Jining. Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2620-2628.
- [7] 朱佳, 梁永超, 丁燕芳, 李兆君. 硅对低温胁迫下冬小麦幼苗光合作用及相关生理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(9): 1780-1788.
ZHU Jia, LIANG Yongchao, DING Yanfang, LI Zhaojun. Effect of silicon on photosynthesis and its related physiological parameters in two winter wheat cultivars under cold stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9): 1780-1788.
- [8] 钱琼秋, 李文珊, 朱祝军, 喻景权. 外源硅对盐胁迫下黄瓜幼苗叶绿体活性氧清除系统的影响[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(1): 107-112.
QIAN Qiongqiu, ZAI Wenshan, ZHU Zhujun, YU Jingquan. Effects of exogenous silicon on active oxygen scavenging systems in chloroplasts of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(1): 107-112.
- [9] 木合塔尔·扎热. 尖果沙枣幼苗抗旱特性及其对外源脱落酸和外源硅的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.
Muhetaer · Zhare. The characteristics of drought resistance of *Elaeagnus oxycarpa* Schlecht. seedlings and the response to exogenous abscisic acid and silicon[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009.
- [10] WEERAHEWA D. The mechanisms underlying the anthracnose disease reduction by rice hull as silicon source in capsicum (*Capsicum annuum* L.) grown in simplified hydroponics[J]. *Procedia Foodscience*, 2016, 6: 147-150.
- [11] LEE S K, SOHN E Y, HAMAYUN M, YOON J Y, LEE I J. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system[J]. *Agroforestry Systems*, 2010, 80(3): 333-340.
- [12] 权静. 平邑甜茶在干旱复水条件下对三种外源物质的生理响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
QUAN Jing. Physiological response to three kinds of exogenous substances of *malus hupehensis* under drought stress and rehydrating[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [13] 范春丽, 赵奇. 硅处理对水分胁迫下的苹果幼树生理特性的影响[J]. *北方园艺*, 2016(5): 30-33.
FAN Chunli, ZHAO Qi. Effect of silicon on physiological characteristics of apple young trees under drought stress[J]. *Northern Horticulture*, 2016(5): 30-33.
- [14] 张江红, 毛志泉, 王丽琴, 束怀瑞. 根皮苷对平邑甜茶幼苗生理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 492-498.
ZHANG Jianghong, MAO Zhiquan, WANG Liqin, SHU Huairui. Effect of phloridzin on physiological characteristics of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 492-498.
- [15] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. *植物生理学通讯*, 1994(3): 207-210.
ZHAO Shijie, XU Changcheng, ZOU Qi, MENG Qingwei. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. *Plant Physiological Communication*, 1994(3): 207-210.
- [16] 买合木提·卡热, 克热木·伊力, 吾甫尔·巴拉提. 盐胁迫对扁桃砧木叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响[J]. *西北农业学报*, 2005, 14(6): 96-101.
Mahmut · Kari, Karim · Ali, Wupur · Barat. Effects of salt stress on activity of SOD, POD, CAT in leaves of almond rootstocks[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2005, 14(6): 96-101.
- [17] GUO R, SHI L, YANG Y. Germination, growth, osmotic adjustment and ionic balance of wheat in response to saline and alkaline stresses[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(5): 667-679.
- [18] YANG J Y, ZHENG W, TIAN Y, WU Y, ZHOU D W. Effects of various mixed salt-alkaline stresses on growth, photosynthesis, and photosynthetic pigment concentrations of *Medicago ruthenica* seedlings[J]. *Photosynthetica*, 2011, 49(2): 275-284.
- [19] 周宇飞, 王德权, 陆樟镛, 王娜, 王艺陶, 李丰先, 许文娟, 黄瑞冬. 干旱胁迫对持绿性高粱光合特性和内源激素 ABA、CTK 含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 655-663.
ZHOU Yufei, WANG Dequan, LU Zhangbiao, WANG Na, WANG Yitao, LI Fengxian, XU Wenjuan, HUANG Ruidong. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and endogenous hormone ABA and CTK contents in green-stayed sorghum[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 655-663.
- [20] 丁燕芳, 梁永超, 朱佳, 李兆君. 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 471-478.
DING Yanfang, LIANG Yongchao, ZHU Jia, LI Zhaojun. Effects of silicon on plant growth, photosynthetic parameters and soluble sugar content in leaves of wheat under drought stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 471-478.
- [21] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [22] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 张兴华, 路海东, 史俊通, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(5): 1303-1311.
ZHANG Renhe, ZHENG Youjun, MA Guosheng, ZHANG Xinghua, LU Haidong, SHI Juntong, XUE Jiquan. Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [23] 李清芳, 马成仓, 尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 531-536.
LI Qingfang, MA Chengcang, SHANG Qiliang. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 531-536.
- [24] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(10): 2186-2196.
LI Xiao, FENG Wei, ZENG Xiaochun. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [25] 杨广东, 朱祝军, 计玉妹. 不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 115-118.
YANG Guangdong, ZHU Zhujun, JI Yumei. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and

- active oxygen in cucumber leaves[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 115-118.
- [26] LICHTENTHALER H K. In vivo chlorophyll fluorescence as a tool for stress detection in plants[M]. Germany: Springer, 1988: 129-142.
- [27] 裴斌,张光灿,张淑勇,吴芹,徐志强,徐萍. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1386-1396.
- PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, WU Qin, XU Zhiqiang, XU Ping. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [28] 耿东梅,单立山,李毅. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J]. *植物学报*, 2014, 49(3): 282-291.
- GENG Dongmei, SHAN Lishan, LI Yi. Effect of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant effect of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2014, 49(3): 282-291.
- [29] BAKER N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis[J]. *Physiologia Plantarum*, 1991, 81(4): 563-570.
- [30] 孙山,徐秀玉,程来亮,王来平,高华君. 干旱胁迫下硅对平邑甜茶光合功能的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(12): 2231-2238.
- SUN Shan, XU Xiuyu, CHEN Lailiang, WANG Laiping, GAO Huajun. Effect of silicon on photosynthetic functions of *Malus hupehensis* under drought stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(12): 2231-2238.
- [31] 林植芳,刘楠. 活性氧调控植物生长发育的研究进展[J]. *植物学报*, 2012, 47(1): 74-86.
- LIN Zhifang, LIU Nan. Research progress in the control and regulation of plant growth and development by reactive oxygen species[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(1): 74-86.
- [32] DU C X, FAN H F, GUO S R, TEZUKA T, LI J. Proteomic analysis of cucumber seedling roots subjected to salt stress[J]. *Phytochemistry*, 2010, 71(13): 1450-1459.
- [33] GONG H, ZHU X, CHEN K, WANG S, ZHANG C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought[J]. *Plant Science*, 2005, 169(2): 313-321.
- [34] SCHMIDT R E, ZHANG X, CHALMERS D R. Response of photosynthesis and superoxide dismutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(11): 1763-1773.
- [35] 杜建雄,刘金荣. 硅对干旱胁迫下草坪草叶片保护酶系统及丙二醛含量的影响[J]. *草原与草坪*, 2010, 30(1): 45-49.
- DU Jianxiong, LIU Jinrong. Effects of silicon on protective enzyme system and MDA content of turfgrass leaves under drought stress[J]. *Grassland and Turf*, 2010, 30(1): 45-49.
- [36] GARNCZARSKA M, BEDNARSKI W. Effect of a short-term hypoxic treatment followed by re-aeration on free radicals level and antioxidative enzymes in lupine roots[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2004, 42(3): 233-240.
- [37] 明东风. 硅对水分胁迫下水稻生理生化特性、亚显微结构及相关基因表达的调控机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- MING Dongfeng. Regulatory mechanisms of silicon on physiological and biochemical characteristics ultrastructure and related gene expression of rice under water stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [38] 蔡昆争,吴学祝,骆世明,王维. 抽穗期不同程度水分胁迫对水稻产量和根叶渗透调节物质的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6148-6158.
- CAI Kunzheng, WU Xuezhu, LUO Shiming, WANG Wei. Influences of different degrees of water stress at heading stage on rice yield and osmolytes in leaves and roots[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6148-6158.
- [39] 韩冷,徐敏,张萍. 干旱胁迫下新疆核桃幼苗叶片渗透调节物质变化研究[J]. *天津农业科学*, 2018, 24(8): 1-3.
- HAN Leng, XU Min, ZHANG Ping. Changes of osmoregulation in Xinjiang wild walnut seedlings under drought stress[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018, 24(8): 1-3.
- [40] 张环纬,陈彪,温心怡,张杰,王小东,李继伟,许自成,黄五星. 外源硅对干旱胁迫下烟草幼苗生长、叶片光合及生理指标的影响[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(1): 17-26.
- ZHANG Huanwei, CHEN Biao, WEN Xinyi, ZHANG Jie, WANG Xiaodong, LI Jiwei, XU Zicheng, HUANG Wuxing. Effects of exogenous silicon on growth, leaf photosynthesis and physiological indexes of tobacco seedlings under drought stress[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(1): 17-26.

欢迎订阅2021年《中国果树》

《中国果树》是中华人民共和国农业农村部主管、中国农业科学院果树研究所主办的技术类期刊,是中国科技核心期刊、全国中文核心期刊。曾荣获第二届国家期刊奖提名奖、农业部优秀科技期刊奖、全国优秀农业期刊一等奖等多项奖励。主要报道我国果树科研新成果、新技术、新优品种,交流果树生产先进经验,普及果树科学技术知识,提供国外果树科技信息等。双月刊,单月10日出版,每期定价10.00元,全年6期共60.00元,全国各地邮局均可订阅,邮发代号:8-106。也可直接汇款至编辑部订阅,免收邮费,如需挂号,每期另加3元;订10套以上挂号邮寄,免收挂号费。

我们将通过“中国果树”微信公众号向关注的读者发布本刊每期精品文章、果树产业动态资讯和学术会议信息等内

容,汇聚新闻、技术、产品、市场等内容,全方位为果树产业服务。公众号每月发布4次内容,每次4~5篇文章。欢迎扫描二维码关注,也欢迎向本刊及公众号投稿。

地址:辽宁省兴城市兴海南街98号中国农业科学院果树研究所《中国果树》编辑部

邮编:125100

电话:(0429)3598131 3598168 3598276 3598132

在线投稿平台:<http://zggs.cbpt.cnki.net/>

电子信箱:zggsbjb@vip.163.com(编辑部)、zggsjgb@126.com(广告部)

