

一氧化氮对水分胁迫下苹果砧木新疆野苹果 光合与生理特性的影响

石晓昀,王延秀,姜 霄,陈佰鸿,胡 亚,朱燕芳,何成勇
(甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:以 10 叶龄的新疆野苹果(*M. sieversii* (Ledeb) Roem.)实生苗为研究材料,采用盆栽控水的研究方法,于中度水分胁迫(含水量为土壤最大持水量的 45%~55%)条件下,外源喷施一氧化氮(NO),测定净光合速率(*Pn*)等光合特性指标、SOD 等抗氧化酶活性以及 Pro 等渗透胁迫物质含量,探讨外源一氧化氮对水分胁迫下苹果砧木生理特性的影响。结果表明:相比于对照,外源 NO 处理(180~210 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)减缓了水分胁迫下新疆野苹果叶片中 MDA 和 Pro 含量、电导率、胞间二氧化碳浓度以及 POD 活性的升高趋势,并能延缓净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)、SOD 与 CAT 酶活性的下降速率,且具有明显的浓度效应;190 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NO 处理效果最佳,相比于对照,*Pn*、*Gs*、*Tr*、SOD 及 CAT 活性分别上升了 28.73%、32.94%、33.33%、14.24%、25.38%;*Ci*、POD 活性、Pro 含量、REC 及 MDA 含量分别下降了 18.68%、40%、78.72%、49.06%、26.47%;适当浓度 NO 处理能够激活水分胁迫下新疆野苹果幼苗的抗氧化酶系统,并可以保护细胞膜系统,增强细胞光合性能,从而提高其耐旱性。

关键词:水分胁迫;苹果砧木;一氧化氮;光合作用;生理指标
中图分类号: S661.1 **文献标志码:** A

Effects of nitric oxide on photosynthesis and physiological characteristics of apple rootstocks under water stress

SHI Xiao-yun, WANG Yan-xiu, Jiang Xiao, CHEN Bai-hong,
HU Ya, ZHU Yan-fang, HE Cheng-yong
(College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The study aims to explore physiological effects of exogenous nitric oxide (nitric oxide, NO) on apple rootstocks under water stress and to clarify the differences of photosynthetic, physiological and biochemical indexes of apple rootstock after different concentrations of exogenous NO treatments. The 10-leaf age of *M. sieversii* (Ledeb) Roem seedlings were tested as experiment materials, and the pot experiment which combined with artificial water control was carried. In the moderate water stress (water content is 45%~55% of the soil field capacity) conditions, after spraying exogenous NO, the photosynthetic rate (*Pn*) and other photosynthetic characteristic indexes, antioxidant enzymes activity such as SOD and the content of osmotic stress substances such as Pro were measured by pot experiment. Compared with the control, exogenous NO slowed the upward trend of MDA and Pro content, conductivity, intercellular CO₂ concentration and POD activity under water stress, and cut the decreasing rate of *Pn*, stomatal conductance (*Gs*), transpiration rate (*Tr*), SOD and CAT activity. It was detected a significant effect of concentration, with 190 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NO having the largest effect. *Pn*, *Gs*, *Tr*, SOD and CAT activities increased by 28.73%, 32.94%, 33.33%, 14.24%, 25.38%; *Ci*, POD activity, Pro content, REC and MDA contents were decreased by 18.68%, 40%, 78.72%, 49.06%, 26.47%. Appropriate concentrations of NO treatment can activate *M. prunifolia* seedlings of antioxidant system, protect the cell membrane system and enhanced cell photosynthetic performance under water stress.

Keywords: water stress; apple root stock; nitric oxide; photosynthesis; physiological index

收稿日期:2016-04-26
基金项目:甘肃省自然科学基金项目(145RJZA167);甘肃省教育厅基本科研业务项目(035-041051);甘肃省农牧厅生物技术专项项目(035-034070)
作者简介:石晓昀(1992—),男,甘肃临夏人,硕士研究生,研究方向为果树栽培生理与技术。E-mail:525173816@qq.com。
通信作者:王延秀,女,博士,副教授,主要从事果树栽培生理与技术研究。E-mail:wangxy@gsau.edu.cn。

苹果(*Malus pumila*)是世界性果品,同时也是我国种植面积最大的果树之一,是我国重点果产区的支柱性产业^[1-2]。西北黄土高原产区海拔高、光照充足、昼夜温差大、生产集中,是我国苹果的最优生态区,栽培面积占全国的 44%,产量占全国的 49%,出口量约占全国的 40% 以上^[3]。但黄土高原产区多为干旱与半干旱地区,干旱成为制约该地区苹果生长发育的重要因子。水分胁迫严重影响着苹果树体的生长发育和产量的形成。应用抗性强的砧木是提高栽培果树抗性的主要措施^[4]。在苹果栽培中,常因干旱影响其正常的光合作用、抗氧化酶活性等生理活动,导致树体根系活力下降,影响其对养分和水分的吸收^[5];同时叶片中抗氧化酶活性下降,叶绿素含量和叶面积减小,光合作用受到抑制,进而影响植株干物质的积累与转运,最终导致产量降低^[6]。

一氧化氮(NO)是近年来国内外关注的一种植物生长和发育的调节分子,对植物体生长发育有双重影响,即低浓度对其有保护作用,而高浓度会诱发超氧自由基(O_2^-)和过氧化氢(H_2O_2)大量产生,从而对组织产生破坏性^[7]。到目前为止,已经初步证实 NO 在植物呼吸作用^[8]、气孔运动^[9]、种子萌发^[10]、根与叶片的生长发育^[11]、植物抗逆反应^[12]等生理过程中有重要作用。阮海华、张永平等通过对小麦和黄瓜的研究发现 NO 可降低叶片气孔开度,增加气孔阻力,减少植物体的蒸腾失水,因而提高植物叶片的相对含水量和抗旱性^[5-6]。但有关 NO 对木本果树抗旱性方面的研究鲜见报道。

本试验在水分胁迫条件下研究外源 NO 对新疆野苹果光合特性、抗氧化酶、膜脂过氧化、渗透调节物质的影响,以期进一步明确 NO 提高植物耐旱机理,同时为苹果栽培中合理应用砧木资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

试验于 2014 年 3—7 月在甘肃农业大学园艺学院避雨棚进行。2014 年 2 月 1 日选取饱满、一致的新疆野苹果种子,蒸馏水浸泡 12 h,在 4℃ 湿沙中处理。3 月 18 日选露白较好、发芽一致的种子播入蛭石中,室温下培养,待幼苗长至 2 片真叶时,移入盛装基质(20% 蛭石,20% 珍珠岩,60% 泥炭)重量为 0.65 kg 的花盆(内径 10 cm,深 18 cm)中,每盆一株,统一管理。在育苗期间定期浇水、松土、除草。植株具 10 片真叶时,进行盆栽控水胁迫处理。采用持续称重法控制土壤含水量,每 2 天于傍晚称重并补充

水分至田间持水量的 45% ~ 55% (中度水分胁迫)。试验设 4 个不同浓度的 NO 处理,NO 供体硝普钠溶液浓度分别为 C1 (180 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、C2 (190 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、C3 (200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、C4 (210 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。控水胁迫中,用各处理溶液进行喷施处理至滴水为止,以同期同量喷施清水作为对照(CK)。

试验外源 NO 供体硝普钠 SNP(sodium nitroprusid),为德国 MERCK 公司提供,随配随用。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 光合作用气体交换参数的测定 从胁迫处理当天开始,每隔 3 d 上午 8:00 选取生长一致的幼苗相同节位叶片进行各项指标测定。用 Li-6400 光合仪(LI-COR 公司,美国)测定第 8 片真叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)及胞间 CO_2 浓度(C_i)。设定 CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,环境温度 25℃,光强为 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2.2 生理生化指标的测定 采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[8];采用愈创木酚显色法测定过氧化物酶(POD)活性^[9];采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[9];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[12];脯氨酸含量采用磺基水杨酸法测定^[11];相对电导率采用电导法测定^[13]。

1.3 数据分析

试验数据用 Microsoft Excel 2003 作图,运用 SPSS16.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

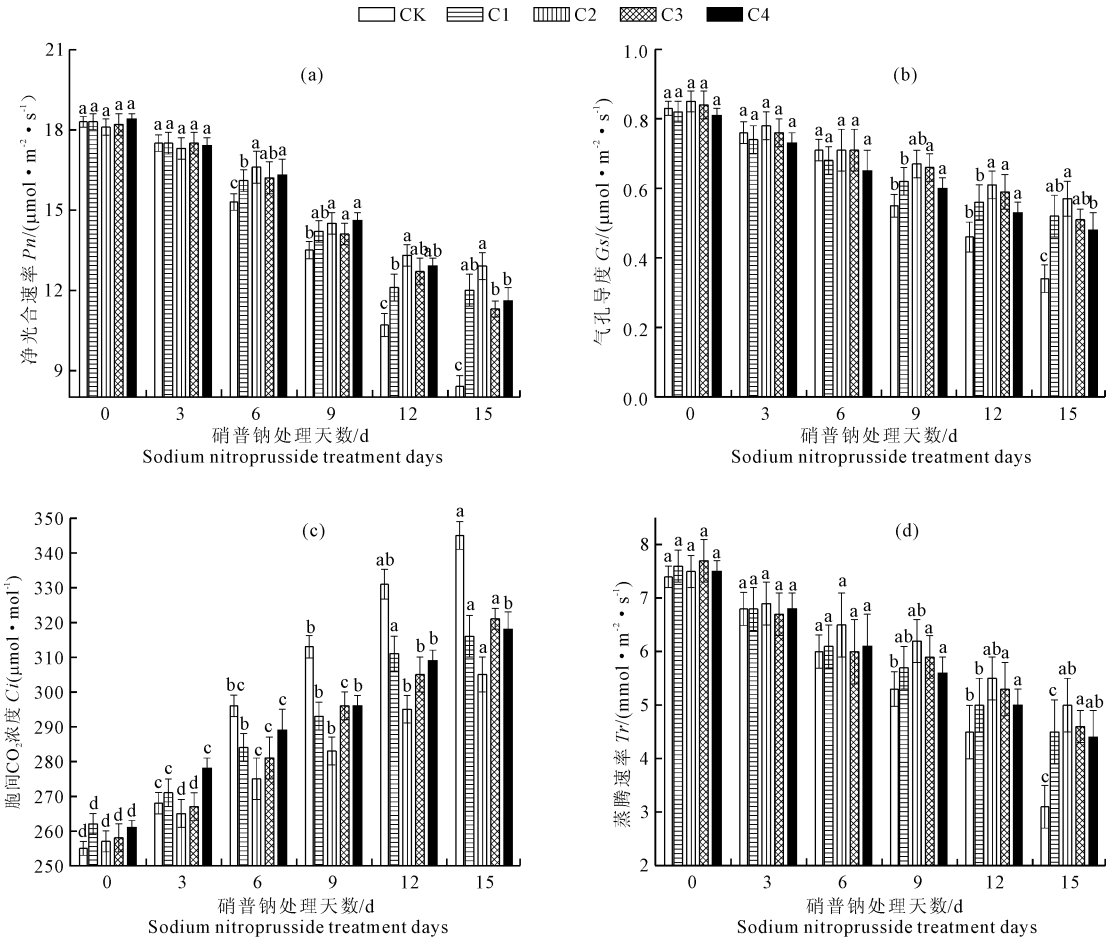
2.1 外源 NO 对水分胁迫下新疆野苹果光合特性的影响

光合作用的强弱是判断植物长势和抗逆性强弱的指标之一^[15],而以净光合速率为代表的光合特性参数是植物生长状况的直接体现。水分胁迫下 NO 对新疆野苹果叶片光合特性的影响如图 1 所示。

随着水分胁迫时间的持续,叶片净光合速率 P_n 总体呈下降趋势,在处理前期(0 ~ 3 d),对照及各处理的 P_n 缓慢下降,而在处理中后期(6 ~ 15 d)则急剧下降,其中对照组的 P_n 下降速率显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,叶片 P_n 从对照组到 C4 处理分别下降了 54.10%、34.42%、28.73%、37.91%、39.96%,其中 C2(190 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NO)处理后 P_n 下降速率显著低于对照及其他处理(图 1a)。与 P_n 的变化相同,叶片气孔导度(G_s)也呈总体下降的趋势,但呈现出前中期(0 ~ 6 d)缓慢下降,后期(9 ~ 15 d)急剧下降的趋势。对照组 G_s 下降速率显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,各处理下降幅

度分别为 59.03%、36. 59%、32. 94%、39. 29%、40.74%,C2 处理下降幅度显著低于对照组及其他处理(图 1b)。胞间二氧化碳浓度(C_i)随胁迫天数增加呈上升的趋势,处理前期(0~3 d),对照及各处理的 C_i 缓慢上升,而在处理中后期(6~15 d)则急剧上升,其中对照组的 C_i 上升速率显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,对照组及各处理 C_i 上升幅度分别为 35. 29%、20. 61%、18. 68%、24. 42%、

21.84%,C2 处理上升幅度显著低于对照及其他处理(图 1c)。持续水分胁迫下,各处理叶片蒸腾速率(T_r)均呈下降趋势,在处理前中期(0~6 d),对照及各处理的 T_r 缓慢下降,而在处理后期(9~15 d)则急剧下降,其中对照组的 T_r 下降幅度显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,下降幅度分别为 58.11%、40.79%、33.33%、40.26%、41.33%,其中 C2 处理下降幅度显著低于对照及其他处理(图 1d)。



注:不同小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$),下同。
Note: different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

图 1 NO 处理对水分胁迫下新疆野苹果光合特性的影响

Fig.1 Effect of NO on photosynthetic characteristic of *M. sieversii* (Ledeb) Roem under water stress

2.2 外源 NO 处理对水分胁迫下砧木抗氧化酶活性的影响

随着水分胁迫时间的持续,叶片内 SOD 酶活性总体呈下降的趋势,在处理前期(0~3 d),对照及各处理的 SOD 缓慢下降,而在处理中后期(6~15 d)则急剧下降,其中对照组的 SOD 酶活性下降幅度显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,对照组及各处理下降幅度分别为 31. 02%、20. 29%、14. 24%、20.07%、18.84%,其中 C2 处理下降幅度显著低于

对照组及其他各处理(图 2a)。对照组及各处理的 POD 活性总体呈上升趋势,在处理前中期(0~6 d),对照及各处理的 POD 急剧上升,而在处理后期(9~15 d)则迅速上升,其中对照组的 POD 酶活性上升幅度显著低于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,对照组及各处理上升幅度分别为 40.43%、52.08%、40%、46.94%、47.26%,其中 C2 处理上升幅度显著低于对照组及其他各处理(图 2b)。不同处理下叶片 CAT 活性随水分胁迫天数的增加总体呈下降的趋

势,处理前期(0~3 d)缓慢下降,处理中后期(9~15 d)迅速下降,其中对照组的 CAT 酶活性下降幅度显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,对照及各处理 CAT 下降幅度分别为 38.28%、29.92%、25.38%、33.07%、36.43%,其中 C2 处理显著低于对照组及其他各处理(图 2c)。

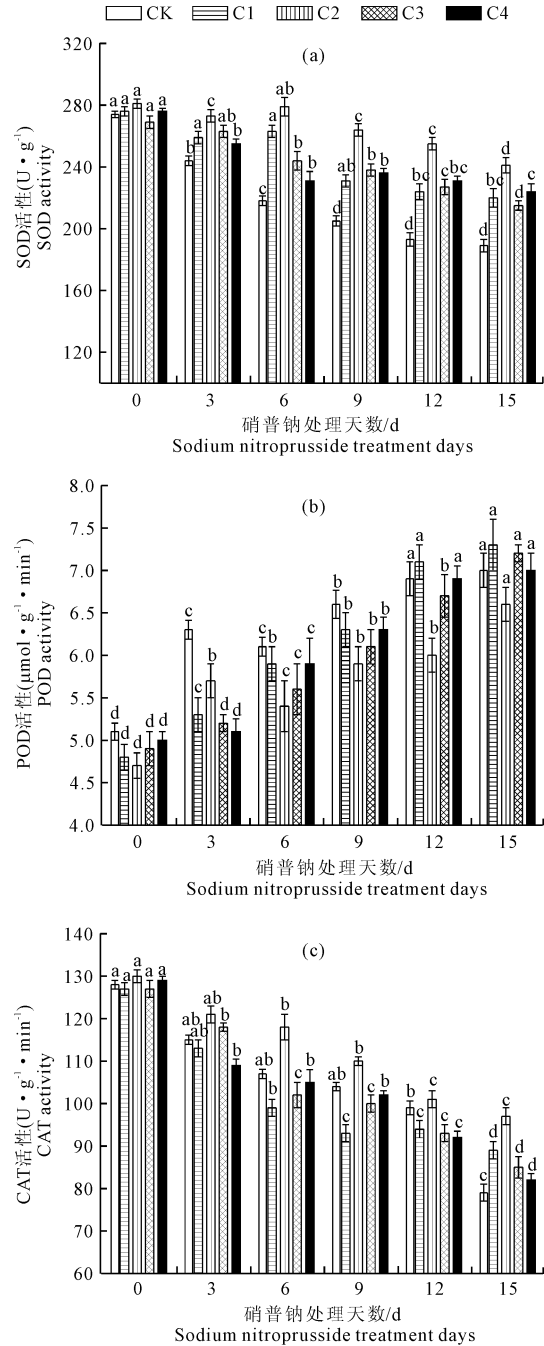


图 2 NO 处理对水分胁迫下新疆野苹果抗氧化酶活性的影响
Fig.2 Effect of NO on antioxidant systems activity of *M. sieversii* (Ledeb) Roem during water stress

2.3 外源 NO 处理对水分胁迫下新疆野苹果渗透胁迫物质的影响

随着水分胁迫的持续,各个处理叶片 Pro 含量

总体呈现不断升高的趋势,在处理前期(0~3 d),Pro 含量缓慢上升,在处理中后期(6~15 d)则迅速上升,其中对照组的 Pro 含量上升幅度显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,Pro 上升幅度分别为 123.9%、63.83%、78.72%、70.46%、68.75%,其中 C2 处理显著高于其他处理,但显著低于对照(图 3a)。相对电导率(REC)总体也呈升高趋势,在处理前期(0~3d),REC缓慢上升,在处理中后期(6~15

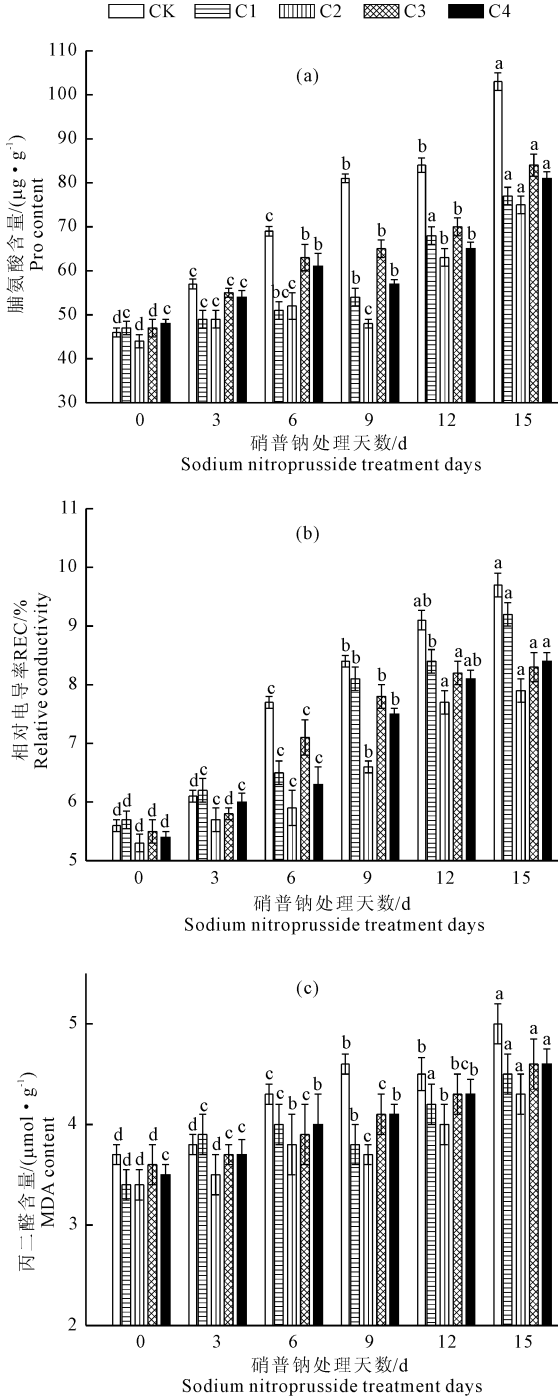


图 3 NO 处理对水分胁迫下新疆野苹果渗透胁迫物质的影响
Fig.3 Effect of NO on osmotic adjustment substances of *M. sieversii* (Ledeb) Roem during water stress

d)则迅速上升,其中对照组的 REC 含量上升幅度显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,各处理及对照组上升幅度分别为 73.21%、61.82%、49.06%、50.91%、55.56%,其中 C2 处理 REC 上升幅度显著低于其他处理(图 3b)。而叶片 MDA 含量总体也呈上升趋势,在处理前期(0~3 d),缓慢上升,在处理中后期(6~15 d)则迅速上升,其中对照组的 MDA 含量上升幅度显著高于各浓度 NO 处理。处理 15 d 后,对照及各处理上升幅度分别为 35.14%、30.56%、26.47%、27.78%、31.43%,其中 C2 处理显著低于对照及其他处理。

3 讨 论

逆境会引发植物体内的一系列反应,包括光合响应以及过氧化酶活性和渗透胁迫物质含量的变化^[14]。几乎所有的逆境都会使植物的光合速率下降^[15],导致同化产物的减少^[16];同时产生活性氧,引起细胞膜结构的过氧化^[17],造成一系列的伤害,严重威胁植物的生命^[18]。近几年研究证明^[19],NO 参与许多重要的生理过程如生长发育、病原体防御反应、细胞凋亡、胁迫适应等。在干旱条件下,NO 参与植物水分胁迫的耐受功能的调节。Bray 等^[20]研究报道,当植物受干旱胁迫时,NO 处理使植物对干旱产生耐受。García - Mata^[21]等用 SNP 对离体叶片进行预处理,与对照组相比,处理后植物耐受干旱胁迫能力提升高达 15.8%。

水分胁迫对植物光合作用的抑制存在气孔限制和非气孔限制^[22]。Farquhar 和 Sharkey^[23]研究认为,引起光合速率降低的气孔和非气孔限制因素可以根据 C_i 和气孔限制值(L_s)的变化方向来判断,其中 C_i 是关键因子。本试验采用外源 NO 处理后,新疆野苹果叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率随着水分胁迫的持续均呈下降趋势,而 C_i 则呈持续升高趋势,各光合参数变化幅度显著低于对照,这一变化表明水分胁迫对新疆野苹果的光合抑制表现为非气孔因素,NO 对水分胁迫造成的光合抑制有所缓解,致使叶片将过多的光能利用荧光的形式或热能耗散,阻止过多光能向 PS II 传递,以保护光合作用机构免于强光破坏。其中低浓度处理效果显著优于其他处理及对照,表明 NO 处理具有浓度效应。这与郭振飞^[24]及 Van^[25]等对草地早熟禾等草坪草的研究结果相一致。

植物遭受环境胁迫时,体内活性氧水平增高,从而膜脂过氧化作用发生^[26]。齐华等^[27]认为过氧化物酶广泛存在于植物体中,与呼吸作用、光合作用及

生长素的氧化都有关系,可作为组织老化和逆境抗性的一种生理指标。POD 和 CAT 是植物体中最重要的消除自由基的酶,POD 和 CAT 的水平高低可反映出植物对干旱的抵御能力大小。本试验中,水分胁迫后,叶片 SOD 呈现持续下降的趋势,POD 始终上升、CAT 则出现持续下降的趋势,其中低浓度 NO 处理组各项指标参数的变化幅度显著小于对照组,表明 NO 对叶片酶活性系统有保护作用,Groppa M D 等^[28]对向日葵叶片的研究也呈现出相似的结果。同时随着水分胁迫时间的持续,电导率呈现持续上升的趋势,表明水分胁迫造成新疆野苹果膜系统的破坏,而 NO 处理电导率上升幅度则显著低于对照,说明 NO 处理在很大程度上缓解了水分胁迫对膜系统造成的破坏,有效降低了自由基在新疆野苹果叶片中的积累,这对维持较高的 CAT 及较低的 SOD 与 POD 酶活性也是有利的,其中低浓度 NO 处理效果最为显著,这与朱教君等对樟子松叶片的研究结果相似^[29]。

植物器官在逆境下遭受伤害,往往发生膜脂的过氧化作用;丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的主要产物之一^[30],MDA 抑制蛋白质合成,叶绿体形态结构发生变化,基粒类囊体膨胀,囊内空间变大,空泡化,类囊体排列方向发生改变,产生扭曲现象和叶绿素降解使叶片细胞叶绿体和线粒体膜流动性下降,从而影响到叶片的光合作用^[31]。在水分胁迫下 MDA 含量随胁迫程度的增加、胁迫时间的延长而上升^[31]。NO 处理后,新疆野苹果叶片相对电导率、脯氨酸、丙二醛的上升得到有效缓解,其中低浓度 NO 处理的缓解效果显著优于其他处理,说明适当浓度 NO 处理能显著提高新疆野苹果的抗旱性,有效缓解了干旱胁迫下新疆野苹果叶片中的叶绿素降解,降低了 MDA 含量及相对膜透性的增加。这与 Valentic^[32]及 Steinberg^[33]等对玉米和桃子叶片研究的结论相似。

4 结 论

外源 NO 处理有效降低了水分胁迫下新疆野苹果电导率及 POD 活性的增长速率,并能有效缓解 CAT 及 SOD 活性的降低。在很大程度上缓解了 Pn 、 G_s 、 Tr 的降低及 C_i 的增加程度。综合各项数据,C2(190 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NO)处理效果最为显著。说明适当 NO 浓度处理提高了水分胁迫下新疆野苹果的光合能力,在很大程度上缓解了水分胁迫对电子转移系统造成的伤害,降低了膜脂的过氧化水平,进而有效提高新疆野苹果的抗旱能力。

参 考 文 献:

[1] 陈学森,韩明玉.当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J].果树学报,2010,27(4):598-604

[2] 栗海俊.不同形态氮营养和水分胁迫影响水稻幼苗生长及渗透调节机制的研究[J].科学技术与工程,2010,20(4):165-170.

[3] 李嘉瑞,邹养军,任小林.刍议中国苹果产业现代化[J].果树学报,2008,25(3):378-381.

[4] 赵世杰,许长成.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994,30(3):207-210.

[5] 阮海华,沈文彪.一氧化氮对盐胁迫下小麦叶片氧化损伤的保护效应[J].科学通报,2001,46(23):1993-1997.

[6] Egley G H, Paul R N, Vaugh K C, et al. Role of peroxidase in the development of water impemeable seed coats in *Sia spinosa*[J]. *Planta*, 1993,157(3):224-232.

[7] 张永平.氯化胆碱对盐胁迫黄瓜幼苗渗透调节物质及活性氧代谢系统的影响[J].西北植物学报,2011,31(1):0131-0143.

[8] 陈贻竹,B 帕特森.低温对植物叶片中超氧化物歧化酶,过氧化物酶和过氧化氢酶水平的影响[J].植物生理学报,1988,14(4):323-328.

[9] Liu Changcheng, Liu Yu guo, Guo Ke, et al. Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in karst habitats of southwestern China[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011,71(2):174-183.

[10] 李育农.苹果砧木种质资源研究[M].中国农业出版社,2001:225-246.

[11] 刘正鲁,朱月林,胡春梅,等.氯化钠胁迫对嫁接茄子生长,抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响[J].应用生态学报,2007,18(3):537-541.

[12] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants, and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002,7(9):405-410.

[13] 黄建昌,肖 艳,赵春香,等.CPPU 对番木瓜水分胁迫的保护作用[J].果树学报,2003,20(3):211-213.

[14] 张婷华,杨再强,李永秀,等.水分胁迫对番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].灌溉排水学报,2012,32(6):72-76.

[15] 牛铁泉,田给林,薛仿正,等.半根及半根交替水分胁迫对苹果幼苗光合作用的影响[J].中国农业科学,2007,40(7):1463-1468.

[16] 曲桂敏,沈 向,王鸿霞,等.土壤干旱时苹果果实对叶片水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2000,18(2):86-90.

[17] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等.施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响[J].作物学报,2013,39(4):704-711.

[18] 关义新,戴俊英,林 艳.水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J].果树学报,2006,31(4):293-296.

[19] Delledonne M, Xia YJ, Dixon RA, et al. Nitric oxide functions as a signal in plant disease resistance[J]. *Nature*, 2000,934(6698):585-588.

[20] Bray EA. Plant responses to water deficit[J]. *Trends Plant Sci*, 2002,2(97):48-54.

[21] Garía – Mata C, Lamattina L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress[J]. *Plant Physiol*, 2001,126(1):1196-1204.

[22] Xie Yinfeng, Yang Wanhong, Yang Yang, et al. Effects of exogenous nitricoxide on photosynthetic characteristic of *Indocalamus Barbatu*s under a simulated acid rain stresscondition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(12):5198-5200.

[23] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annu Rev Plant Physiol*,1982,33:317-345.

[24] 郭振飞,卢少云.草坪草逆境生理研究进展[J].草业学报,2013,21(4):743-751.

[25] Van K O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. *Photosynthesis Research*, 2005,25:147-150.

[26] Paul E V, Robert E. praline accumulation in maize primary roots at low water potentials, metabolic source of in-creased praline deposition in the elongation zoon[J]. *Plant Physiology*, 2009,119:1349-1360.

[27] 刘 明,齐 华,孙世贤,等.水分胁迫对玉米光合特性的影响[J].玉米科学,2008,16(4):86-90.

[28] 王爱国,邵从本,罗广华.丙二醛作为植物脂质过氧化指标的探讨[J].植物生理学通讯,2006,22(2):55-57.

[29] 姜卫兵,高光林,俞开锦,等.水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J].果树学报,2002,19(6):416-420.

[30] Lasp I N V, Groppa M D, Tomaro M L, et al. Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd induced oxidative stress[J]. *Plant Science*, 2005,169(2):323-330.

[31] Dong Y H, Shi J P. The effect of ABA or 6 – BA on co2 assimilation in wheat seedlings under water stress[J]. *Acta Agronomical Since*, 2007,23(4):501-504.

[32] Valentovic P, Luxova M, Kolarovic L, et al. Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relation in two maize cultivars[J]. *Plant Soil and Enviroment*, 2006,52(4):186-191.

[33] Steinberg S L, Mill J C, Mcfarland M J. Dry matter portioning and vegetative growth of young peach tree under water stress[J]. *Austr J plant Physiol*, 2010,17:23-26.