

王韬远, 陶冶, 夏德美, 等. 外源喷施 1-甲基环丙烯(1-MCP)对干旱胁迫下芍药幼苗生长的影响及作用机理[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 447-454.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.027

外源喷施 1-甲基环丙烯(1-MCP)对干旱胁迫下芍药幼苗生长的影响及作用机理

王韬远, 陶冶, 夏德美, 王 恺, 朱志国

(芜湖职业技术学院, 安徽 芜湖 241103)

摘要: 为了提高芍药的耐旱性,本研究以芍药品种粉玉奴为试验材料,采用自然干旱胁迫方法,研究叶面喷施1-甲基环丙烯(1-MCP)对芍药幼苗耐旱性的影响及作用机理。结果表明,自然干旱胁迫 20 d 明显抑制了芍药幼苗的生长,旱害指数达到 70.65%。外源喷施1-MCP可明显缓解干旱胁迫对芍药幼苗造成的损伤,80 g/hm² 1-MCP处理的效果最佳。干旱胁迫达到 20 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP的芍药幼苗株高、茎粗、干质量和总根长分别较自然干旱胁迫对照(CK2)提高 28.17%、14.10%、14.51%和 25.31%,旱害指数降低 53.63% ($P<0.05$),叶片叶绿素含量和根系活力分别较 CK2 提升 93.05%和 132.30%,净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)分别较 CK2 提升 58.95%、84.73%和 74.05%,相对电导率、丙二醛(MDA)含量、过氧化氢(H_2O_2)含量及超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率分别较 CK2 降低 25.17%、25.47%、21.02%和 22.91%。干旱胁迫达到 10 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP的芍药幼苗叶片脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质含量均达到最高,分别较 CK2 提升 78.67%、67.62%和 94.02% ($P<0.05$)。综上所述,外源喷施1-MCP可通过提高芍药幼苗抗氧化能力和渗透调节能力,有效降低因干旱胁迫而导致的活性氧积累和膜脂过氧化,缓解干旱胁迫损伤,提高耐旱性。

关键词: 1-甲基环丙烯(1-MCP); 芍药; 干旱胁迫; 耐旱性

中图分类号: S682.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2020)02-0447-08

Effects of spraying exogenous 1-methylcyclopropene(1-MCP) on growth of *Paeonia lactiflora* Pall. seedlings under drought stress and its mechanism

WANG Tao-yuan, TAO Ye, XIA De-mei, WANG Kai, ZHU Zhi-guo

(Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241103, China)

Abstract: In order to improve the drought tolerance of *Paeonia lactiflora* Pall., the variety Fenyun was used as experimental material in this study. The effects of spraying exogenous 1-methylcyclopropene(1-MCP) on the drought tolerance of *Paeonia lactiflora* Pall. and its mechanisms were studied by natural drought stress method. The results showed that the growth of *Paeonia lactiflora* Pall. seedlings was inhibited under natural drought stress for 20 days, and the drought injury index was 70.65%.

Application of exogenous 1-MCP could significantly alleviate the damage of *Paeonia lactiflora* Pall. seedlings caused by drought stress, and the optimal concentration was 80 g/hm². At twenty days of natural drought stress, compared with those in the treatment of natural drought stress (CK2), the plant height, stem diameter, dry weight and total root length of *Paeonia lactiflora* Pall. seedlings in the treatment of spraying 80 g/hm² 1-MCP were increased by 28.17%, 14.10%,

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 芜湖职业技术学院校级自然重点基金项目(Wzyzrd201906);
安徽省自然科学基金项目(KJ2019A0981); 芜湖职业技术学院
院级科技创新团队基金项目(Wzykj2018ZX01)

作者简介: 王韬远(1987-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 讲师, 主要从事
园林植物遗传育种及生理生态研究。(Tel) 18375328619;
(E-mail) wangty@whit.edu.cn

通讯作者: 朱志国, (E-mail) zhuzg@whit.edu.cn

14.51% and 25.31% respectively, the drought injury index was decreased by 53.63% ($P < 0.05$), the chlorophyll content, root activity, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate were increased by 93.05%, 132.30%, 58.95%, 84.73%, 74.05%, the relative conductivity, malondialdehyde (MDA) content, hydrogen peroxide (H_2O_2) content and superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$) production rate were decreased by 25.17%, 25.47%, 21.02% and 22.91%. At ten days of drought stress, proline content, soluble sugar content, soluble protein content of *Paeonia lactiflora* Pall. seedlings in the treatment of spraying 80 g/hm² 1-MCP were increased by 78.67%, 67.62% and 94.02% compared with those in the treatment of CK2. In conclusion, exogenous spraying 1-MCP could effectively reduce the accumulation of active oxygen and the peroxidation of membrane lipid under drought stress, alleviate the injury caused by drought stress and improve the drought tolerance by improving the antioxidant capacity and osmotic regulation capacity of *Paeonia lactiflora* Pall. seedlings.

Key words: 1-methylcyclopropene (1-MCP); *Paeonia lactiflora* Pall.; drought stress; drought tolerance

近年来,水资源短缺问题随着全球气候变暖而愈发严重,干旱胁迫已成为非生物逆境胁迫中对植物危害最大的自然灾害之一,不仅影响农作物的产量和品质,还严重降低了园林绿化植物的景观美化效果^[1-2]。大量研究结果表明,干旱胁迫常导致植物体内产生并积累大量活性氧,造成氧化损伤,细胞膜稳定性下降,引起光合作用、呼吸作用等代谢紊乱以及生理老化^[3-5]。内源激素水平变化对植物抗逆性具有明显影响^[6]。前人研究结果表明,植物遭遇逆境胁迫时,体内会迅速产生大量乙烯,进而导致植物叶片黄化、脱落,抗性降低,产量下降^[6-8]。降低逆境胁迫下植物体内的乙烯含量,已成为提高植物抗逆性的关键途径之一。

1-甲基环丙烯(1-MCP)是一种新型的乙烯受体抑制剂,可通过与乙烯受体结合来抑制乙烯信号传导,从而降低果蔬对乙烯的敏感性,延缓成熟和衰老^[9]。目前,1-MCP广泛应用于果蔬保鲜领域,可明显降低果蔬中乙烯的产生速率和呼吸速率,保持果实色泽,抑制果实软化、褐变和腐烂,减少营养物质流失,延缓果蔬衰老^[10-11]。此外,1-MCP在缓解植物逆境胁迫损伤方面也取得了一定的研究进展。外源喷施1-MCP可降低高温胁迫下辣椒植株的乙烯产生速率,缓解高温胁迫^[12]。外源喷施1-MCP可明显缓解干旱胁迫对甘蔗^[13]、小麦^[14]和棉花^[15]造成的伤害,提高抗旱能力。芍药(*Paeonia lactiflora* Pall.),属芍药科芍药属多年生草本植物,是中国传统名花之一,在中国主要分布于干旱和半干旱地区,干旱常导致芍药植株矮小、叶片发黄卷曲等,已成为限制其推广应用的主要因素之一^[16]。目前,关于1-MCP缓解园林植物逆境胁迫方面的研究较少,1-MCP是否可以提高芍药的抗旱能力?作用机理如何?尚需进一步研究。

因此,本研究拟以芍药品种粉玉奴为试验材料,

探究外源喷施不同浓度1-MCP对芍药生长、光合作用、抗氧化能力和渗透调节能力的影响,以期对芍药抗旱栽培提供一定的参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年4月10日在芜湖职业技术学院试验基地的日光温室内进行。供试芍药品种为粉玉奴,购自芜湖市常青苗圃。试验用1-MCP为分析纯,购自生工生物工程(上海)股份有限公司。试验采用盆栽方式进行,花盆规格为35 cm×45 cm(高×直径),栽培基质为草炭土,每盆装基质6 kg,定植幼苗1株,缓苗20 d,缓苗期间给予常规管理。2018年5月,从中选取大小、长势一致的幼苗进行干旱胁迫试验。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验采用自然干旱胁迫方法进行,浇水使各处理基质相对含水量达到70%左右,随后不再浇水,开始为期20 d的自然干旱胁迫试验。试验共设置5个处理,即正常灌水(CK1)、自然干旱胁迫(CK2)、自然干旱胁迫+30 g/hm² 1-MCP(T1)、自然干旱胁迫+80 g/hm² 1-MCP(T2)和自然干旱胁迫+120 g/hm² 1-MCP(T3),每个处理15盆,3次重复,共计225盆。自然干旱胁迫试验前,T1、T2、T3处理喷施相应浓度的1-MCP,喷施量以芍药幼苗叶片水珠悬挂不滴为准,CK1和CK2处理喷施等量清水。分别于自然干旱胁迫处理的第0 d(基质相对含水量70%)、第5 d(基质相对含水量62%)、第10 d(基质相对含水量53%)、第15 d(基质相对含水量45%)和第20 d(基质相对含水量37%)进行生理生化指标测定,并于第20 d进行生长指标测定和旱害指数调查。

1.2.2 测定指标及测定方法 株高、总根长采用直尺测定,茎粗采用游标卡尺测定,干质量采用烘干法测定,芍药幼苗旱害程度参照表 1 进行分级,并按照公式(1)进行旱害指数计算。叶绿素含量和根系活力分别采用丙酮-乙醇混合法和氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定,光合作用参数采用 Li-6400 便携式光合作用仪测定,光照度为 900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,流速为 500 ml/s。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法、紫外分光光度法和试剂盒法进行测定。相对电导率(RC)、丙二醛(MDA)含量、过氧化氢(H_2O_2)含量及超氧阴离子(O_2^-)产生速率分别采用电导仪法、硫代巴比妥酸显色法、四氯化钛沉淀法和羟胺氧化法测定。脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质的含量分别采用磺基水杨酸提取法、萘酮比色法和考马斯亮蓝 G-250 染色法测定。

旱害指数 = $\Sigma(\text{旱害级数} \times \text{本级株数}) / (\text{最高级数} \times \text{总株数}) \times 100\%$ (1)

1.2.3 数据分析 采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理,采用 SPSS18.0 软件进行统计分析。

表 1 干旱胁迫条件下芍药旱害分级
Table 1 Drought classification of Chinese herbaceous peony under drought stress

旱害级数	芍药表现形态
I	植株生长正常,无黄化或萎蔫症状
II	有少部分叶片萎蔫下垂,叶尖、叶缘变黄
III	约有 1/2 叶片的叶尖和叶缘变黄,卷曲发干
IV	大部分叶片有卷曲、干枯现象
V	叶枯、枝枯直至整个植株死亡

表 2 干旱胁迫下 1-甲基环丙烯(1-MCP)对芍药幼苗生长及旱害指数的影响

Table 2 Effects of 1-methylcyclopropene(1-MCP) on growth and drought injury index of Chinese herbaceous peony seedlings under drought stress

处理	株高(cm)	茎粗(mm)	单株干质量(g)	总根长(cm)	旱害指数(%)
CK1	40.26±2.22d	0.93±0.05d	4.65±0.13d	16.73±0.22d	0a
CK2	28.75±2.33a	0.78±0.02a	3.86±0.15a	12.25±0.24a	70.65±1.24e
T1	31.18±2.02a	0.81±0.02a	4.02±0.08ab	12.86±0.32a	53.85±1.53d
T2	36.85±2.06c	0.89±0.05c	4.42±0.08c	15.35±0.35c	32.76±1.18b
T3	34.26±2.15b	0.85±0.02b	4.15±0.11b	14.02±0.28b	41.69±0.96c

CK1:正常灌水;CK2:自然干旱胁迫;T1:自然干旱胁迫+30 g/hm² 1-MCP;T2:自然干旱胁迫+80 g/hm² 1-MCP;T3:自然干旱胁迫+120 g/hm² 1-MCP。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

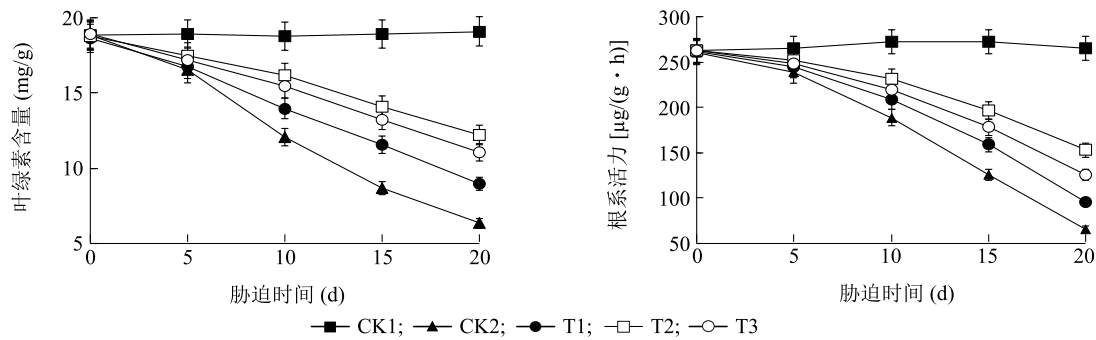
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下1-MCP对芍药幼苗生长和旱害指数的影响

表 2 显示,干旱胁迫明显抑制芍药幼苗生长,提高旱害指数。干旱胁迫达到 20 d 时,CK2 处理的芍药幼苗株高、茎粗、单株干质量和总根长分别较 CK1 降低 28.59%、16.13%、16.99%和 26.78%(P<0.05),旱害指数达到 70.65%。外源喷施1-MCP对芍药幼苗干旱胁迫具有明显的缓解作用,缓解效果随喷施质量浓度的增大而呈现先升高后降低趋势。干旱胁迫达到20 d时,喷施 80 g/hm² 1-MCP的芍药幼苗株高、茎粗、单株干质量和总根长分别较 CK2 提高 28.17%、14.10%、14.51%和 25.31%,旱害指数降低 53.63%(P<0.05)。说明,外源喷施1-MCP可明显缓解芍药幼苗干旱胁迫,以 80 g/hm² 1-MCP处理的效果最佳。

2.2 干旱胁迫下1-MCP对芍药幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

图 1 显示,芍药幼苗叶片叶绿素含量和根系活力在干旱胁迫条件下明显降低。干旱胁迫达到 20 d 时,CK2 处理的芍药幼苗叶片叶绿素含量和根系活力分别较 CK1 降低 66.89%和 75.22%。与 CK2 相比,外源喷施1-MCP可提升芍药幼苗叶片叶绿素含量和根系活力,并且相同胁迫天数下叶绿素含量和根系活力随1-MCP喷施质量浓度增加而表现为先上升后降低。干旱胁迫达到 20 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP的芍药幼苗叶片叶绿素含量和根系活力分别较 CK2 提升 93.05%和 132.30%。这说明,外源喷施1-MCP可明显缓解芍药幼苗因干旱胁迫导致的叶绿素含量和根系活力降低,以 80 g/hm² 1-MCP处理的效果最佳。



CK1、CK2、T1、T2、T3 见表 2 注。

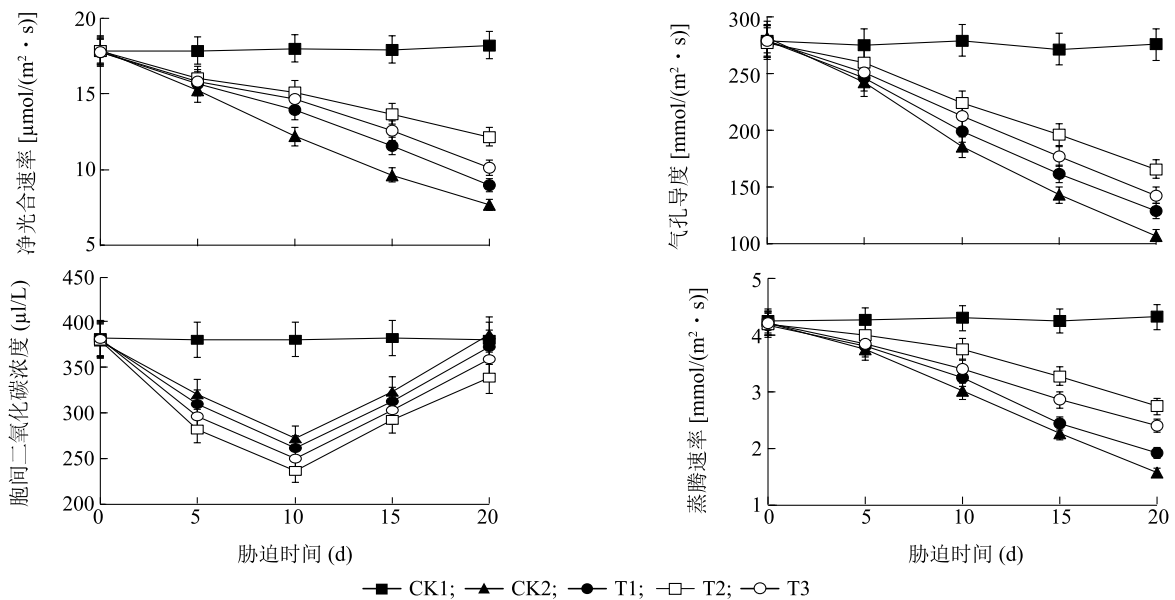
图 1 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

Fig.1 Effects of 1-MCP on chlorophyll content and root activity of Chinese herbaceous peony seedlings under drought stress

2.3 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗光合作用的影响

图 2 显示,干旱胁迫降低了芍药幼苗叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),光合作用受到抑制。随着干旱胁迫时间的延长,芍药幼苗叶片的 P_n 、 G_s 和 T_r 均逐渐降低,而胞间二氧化碳浓度(C_i)则先降低后升高。干旱胁迫达到 20 d 时,CK2 处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 分别较 CK1 降低 58.04%、61.27%和 63.51%, C_i 则无明显变化。外

源喷施 1-MCP 可提升干旱胁迫条件下芍药幼苗叶片 P_n 、 G_s 和 T_r ,降低 C_i ,并且相同胁迫天数的 P_n 、 G_s 和 T_r 随 1-MCP 喷施质量浓度增加而表现为先上升后降低。干旱胁迫达到 20 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP 的芍药幼苗叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 分别较 CK2 提升 58.95%、84.73%和 74.05%, C_i 降低 12.16%。表明,外源喷施 1-MCP 可提升干旱胁迫下芍药幼苗的光合作用,以 80 g/hm² 1-MCP 处理的效果最佳。



CK1、CK2、T1、T2、T3 见表 2 注。

图 2 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗叶片光合参数的影响

Fig.2 Effects of 1-MCP on photosynthetic parameters of Chinese herbaceous peony seedlings under drought stress

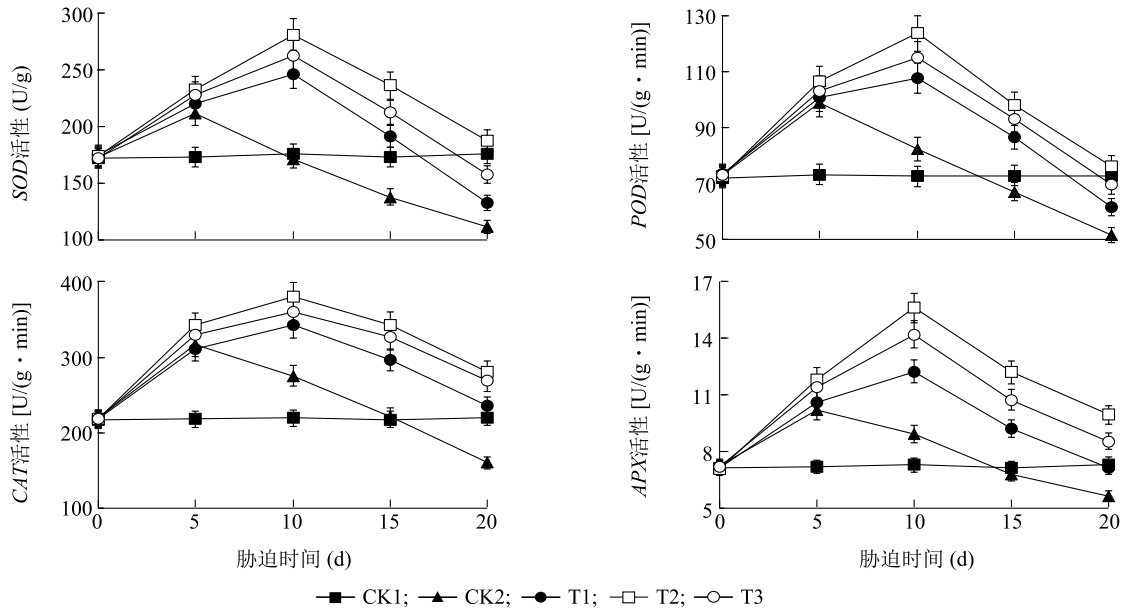
2.4 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

图 3 显示,干旱胁迫下,随着胁迫时间的延长,

芍药幼苗叶片抗氧化酶(SOD 、 POD 、 CAT 和 APX)活性均表现为先升高后降低趋势。CK2 处理的芍药幼苗叶片 SOD 、 POD 、 CAT 和 APX 活性在干旱胁迫达

到 5 d 时均达到最高,分别较 CK1 提升 22.71%、34.81%、45.18% 和 41.55%,随后则迅速下降。干旱胁迫条件下,外源喷施 1-MCP 可提升芍药幼苗叶片的抗氧化酶活性,并且相同胁迫天数下抗氧化酶活性随 1-MCP 喷施质量浓度的增加表现为先上升后降低。干旱胁迫达到 10 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP

的芍药幼苗叶片 *SOD*、*POD*、*CAT* 和 *APX* 的活性最高,分别较 CK2 提升 63.52%、50.05%、38.07% 和 74.53%。说明,外源喷施 1-MCP 可明显提升芍药幼苗抗氧化酶活性,清除因干旱胁迫而积累的过量活性氧,减少干旱胁迫损伤,以 80 g/hm² 1-MCP 处理的效果最佳。



CK1、CK2、T1、T2、T3 见表 2 注。*SOD*:超氧化物歧化酶;*POD*:过氧化物酶;*CAT*:过氧化氢酶;*APX*:抗坏血酸过氧化物酶。

图 3 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗抗氧化酶活性的影响

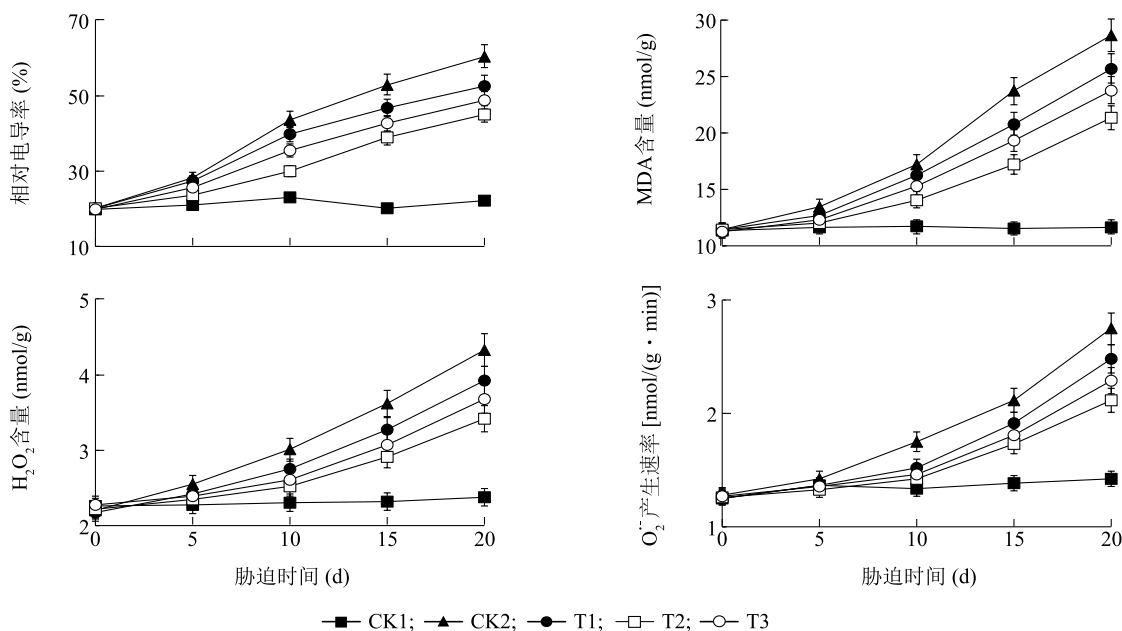
Fig.3 Effects of 1-MCP on antioxidant enzyme activity of Chinese herbaceous peony seedlings under drought stress

2.5 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗相对电导率、MDA 含量、H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率的影响

图 4 显示,干旱胁迫提高了芍药幼苗的相对电导率、MDA 含量、H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率,并且随胁迫时间延长而逐渐升高。干旱胁迫达到 20 d 时,CK2 处理的芍药幼苗叶片相对电导率、MDA 含量、H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率分别较 CK1 提升 170.31%、144.54%、81.93% 和 93.66%。外源喷施 1-MCP 可降低干旱胁迫下芍药幼苗叶片的活性氧含量,并且相同胁迫天数下活性氧含量随 1-MCP 喷施质量浓度的增加而表现为先降低后上升。干旱胁迫达到 20 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP 的芍药幼苗叶片相对电导率、MDA 含量、H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率分别较 CK2 降低 25.17%、25.47%、21.02% 和 22.91%。表明,外源喷施 1-MCP 可缓解芍药幼苗因干旱胁迫导致的活性氧含量上升,从而降低干旱胁迫损伤,以 80 g/hm² 1-MCP 处理的效果最佳。

2.6 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗渗透调节物质含量的影响

表 3 显示,在干旱胁迫处理下,随着干旱胁迫时间的延长,芍药幼苗叶片渗透调节物质含量均表现为先升高后降低趋势。在 CK2 处理中,干旱胁迫达到 10 d 的芍药幼苗叶片脯氨酸含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量均最高,分别较 CK1 提升 138.61%、93.08% 和 109.60% ($P < 0.05$)。干旱胁迫条件下,外源喷施 80 g/hm² 和 120 g/hm² 的 1-MCP 可提升芍药幼苗叶片的渗透调节物质含量,而 30 g/hm² 1-MCP 处理对可溶性蛋白质含量则无明显提升作用。干旱胁迫达到 10 d 时,喷施 80 g/hm² 1-MCP 的芍药幼苗叶片脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质含量均达到最高,分别较 CK2 提升 78.67%、67.62% 和 94.02% ($P < 0.05$)。说明,提高渗透调节能力也是外源喷施 1-MCP 缓解芍药幼苗干旱胁迫的主要机理之一,以 80 g/hm² 1-MCP 处理的效果最佳。



CK1、CK2、T1、T2、T3 见表 2 注。MDA: 丙二醛; H₂O₂: 过氧化氢; O₂⁻: 超氧阴离子。

图 4 干旱胁迫下 1-MCP 对芍药幼苗相对电导率、MDA 含量、H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率的影响

Fig.4 Effects of 1-MCP on relative conductivity, malondialdehyde (MDA) content, hydrogen peroxide (H₂O₂) content and superoxide anion (O₂⁻) production rate of Chinese herbaceous peony seedlings under drought stress

3 讨论

植物生长状况的好坏可以反映出植物对干旱胁迫的抗性强弱^[17]。大量研究结果表明,干旱胁迫会明显抑制植物生长,株高、茎粗、单株干质量等生长指标均明显降低,常导致植株早衰^[3,16-17]。本研究发现,干旱胁迫抑制了芍药幼苗生长,与 CK1 相比,干旱胁迫处理下芍药幼苗的早害指数显著提升 ($P < 0.05$)。外源喷施 1-MCP 可明显缓解芍药幼苗干旱胁迫,以 80 g/hm² 1-MCP 处理的效果最佳,株高、茎粗、单株干质量和总根长分别较 CK2 提高 28.17%、14.10%、14.51% 和 25.31%,早害指数降低 53.63%。本结果与邓娇燕等^[12]、王小乐^[13] 研究结果一致,可能是因为外源喷施 1-MCP 降低了干旱胁迫下植物体内的乙烯产生速率,延缓根系衰老,提高植物根系活力,根系对水分和养分的吸收能力明显增强,从而促进芍药幼苗生长。

光合作用是植物生长发育的重要代谢过程,叶绿素含量直接影响光合性能^[18-19]。干旱胁迫条件下,植物叶片的叶绿素容易氧化分解,植物光合作用效率明显降低^[20]。本研究结果表明,干旱胁迫促进芍药幼苗的叶绿素分解,导致根系活力下降,光合作

用受到明显抑制。外源喷施 1-MCP 可缓解因干旱胁迫而造成的叶绿素降解和根系活力下降,提升干旱胁迫下光合作用的效率,以 80 g/hm² 1-MCP 处理的效果最佳,干旱胁迫达到 20 d 时,叶绿素含量、根系活力、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别较 CK2 提升 93.05%、132.30%、58.95%、84.73% 和 74.05%。本结果与邓娇燕等^[12]、王小乐^[13] 的研究结果一致。

干旱胁迫会导致植物体内产生大量的活性氧自由基 (ROS),引起细胞膜脂过氧化,造成植物代谢紊乱,其中,相对电导率和 MDA 含量是衡量膜脂过氧化程度的重要指标^[20]。为了适应干旱环境,植物常通过提高自身的保护酶 (POD、SOD、CAT 和 APX 等) 活性来清除体内过量的活性氧,从而减轻活性氧对自身的伤害,维持代谢平衡^[21]。叶面喷施 1-MCP 可提升高温胁迫下辣椒幼苗和干旱胁迫下甘蔗幼苗的抗氧化酶活性,降低氧化损伤,相对电导率、MDA 含量、H₂O₂ 含量及 O₂⁻ 产生速率等明显降低^[12-13]。在葡萄采摘前喷施 1-MCP,可提升采摘后葡萄的 POD 活性和 CAT 活性,降低 MDA 含量,明显延缓葡萄衰老^[22]。本研究发现,干旱胁迫导致芍药幼苗产生大量的活性氧,造成膜脂过氧化,相对电

表 3 干旱胁迫下1-MCP对芍药幼苗渗透调节物质含量的影响

Table 3 Effects of 1-MCP on osmotic adjustment substances contents of Chinese herbaceous peony seedlings under drought stress

处理	处理时间 (d)	脯氨酸含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (mg/g)	可溶性蛋白质 含量 (mg/g)
CK1	0	40.52±2.05a	10.02±0.25a	3.68±0.13a
	5	42.25±2.28a	10.16±0.18a	3.52±0.16a
	10	41.18±1.96a	10.11±0.23a	3.75±0.11a
	15	40.86±2.58a	10.08±0.25a	3.78±0.18a
	20	42.58±2.26a	10.25±0.12a	3.73±0.13a
CK2	0	40.65±2.52a	10.15±0.23a	3.62±0.15a
	5	56.85±3.11b	12.26±0.19b	4.75±0.08b
	10	98.26±2.95fg	19.52±0.16f	7.86±0.33e
	15	90.83±3.32ef	17.12±0.32e	6.78±0.25cd
	20	75.66±3.65cd	14.75±0.26cd	5.82±0.23c
T1	0	42.43±1.96a	10.23±0.28a	3.59±0.16a
	5	63.52±2.76bc	13.46±0.15bc	4.82±0.21b
	10	107.73±3.25g	25.52±0.42h	7.82±0.26e
	15	98.85±2.58fg	22.25±0.35g	6.72±0.13cd
	20	82.11±2.92de	17.12±0.22e	5.86±0.25c
T2	0	41.52±2.65a	10.21±0.32a	3.63±0.18a
	5	78.66±2.16cd	15.56±0.28de	8.06±0.24e
	10	175.56±3.32j	32.72±0.41j	15.25±0.46h
	15	141.85±2.78i	28.33±0.52i	12.18±0.42g
	20	102.53±2.55g	22.35±0.35g	8.56±0.32e
T3	0	43.02±2.36a	10.12±0.26a	3.65±0.16a
	5	70.36±2.22c	15.65±0.26de	6.83±0.26d
	10	138.35±2.92i	30.05±0.26i	12.65±0.31g
	15	126.73±2.86h	26.18±0.35h	10.07±0.36f
	20	86.88±2.15e	20.32±0.18f	6.52±0.19cd

CK1、CK2、T1、T2、T3 见表 2 注。

导率、MDA 含量、 H_2O_2 含量及 O_2^- 产生速率明显提升,芍药幼苗 *POD*、*SOD*、*CAT* 和 *APX* 活性则先上升后下降,说明芍药幼苗具有一定的抗氧化酶诱导合成能力,具有一定抗旱性。外源喷施 1-MCP 可明显缓解因干旱胁迫而导致的芍药幼苗抗氧化酶活性降低,抑制膜脂过氧化和活性氧含量的上升,以 80 g/hm^2 1-MCP 处理的效果最佳,干旱胁迫达到 10 d 时,芍药幼苗叶片 *SOD*、*POD*、*CAT* 和 *APX* 活性达到最高,分别较 CK2 提升 63.52%、50.05%、38.07% 和 74.53%,干旱胁迫达到 20 d 时,喷施 80 g/hm^2

1-MCP 的芍药幼苗叶片相对电导率、MDA 含量、 H_2O_2 含量及 O_2^- 产生速率分别较 CK2 降低 25.17%、25.47%、21.02% 和 22.91%。说明,缓解逆境胁迫下植株抗氧化酶活性的降低是 1-MCP 提高植物抗逆性的主要机制之一。

渗透调节是植物遭遇干旱胁迫时的重要生理反应,脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质等渗透调节剂含量的增加有助于提升细胞液浓度并降低水势,从而增加植物的吸水能力,缓解干旱胁迫损伤^[23-24]。前人研究结果表明,外源喷施 1-MCP 可明显促进高温胁迫下辣椒幼苗可溶性糖和可溶性蛋白质的积累,缓解高温胁迫对辣椒幼苗造成的伤害^[12]。本研究中,干旱胁迫增加了芍药幼苗体内的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量,而且外源喷施 1-MCP 可进一步促进渗透物质的积累, 80 g/hm^2 1-MCP 处理效果最佳,干旱胁迫达到 10 d 时,脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量分别较 CK2 提升 78.67%、67.62% 和 94.02%。这说明,提高逆境胁迫下植物的渗透调节能力也是 1-MCP 提高植物抗逆性的重要机制之一。

综上所述,1-MCP 可明显缓解干旱胁迫对芍药幼苗生长发育的抑制,降低旱害指数,其机理主要是 1-MCP 可明显提升干旱胁迫下芍药幼苗的抗氧化能力和渗透调节能力,从而缓解干旱胁迫对芍药幼苗造成的氧化损伤,提高耐旱性, 80 g/hm^2 1-MCP 处理的效果最佳。本研究结果可以为 1-MCP 应用于植物旱作栽培提供一定的参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 曾惠敏,赵冰. 28 个八仙花品种叶片解剖结构与植株耐旱性的关系[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 10-19.
- [2] LOBELL D B, ROBERTS M J, SCHLENKER W, et al. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest[J]. Science, 2014, 344(6183): 516-519.
- [3] 叶君,邓西平,王仕稳,等. 干旱胁迫下褪黑素对小麦幼苗生长、光合和抗氧化特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1275-1283.
- [4] 姚春娟,郭圣茂,马英超,等. 干旱胁迫对 4 种决明属植物光合作作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(9): 1880-1888.
- [5] SUZUKI N, KOUSSEVITZKY S, MITTLER R, et al. ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2012, 35(2): 259-270.
- [6] 罗倩,董运常,严过房,等. 植物生长调节剂在园林植物生产

- 及抗逆性上的应用研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(16): 122-124, 157.
- [7] 张 毅,董春海. 乙烯信号转导及其在植物逆境响应中的作用[J]. 生物技术通报, 2016, 32(10): 11-17.
- [8] HERSHKOVITZ V, FRIEDMAN H, GOLDSCHMIDT E E, et al. Induction of ethylene in avocado fruit in response to chilling stress on tree[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2009, 166(17): 1855-1862.
- [9] 邓丙乾,张 鹏,李江阔,等. 不同浓度1-MCP对柿果保鲜效果研究及灰色关联性分析[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 31-38.
- [10] 史 萌,郑秋丽,高丽朴,等. 1-MCP处理对韭菜采后贮藏生理和品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 58-63.
- [11] 姜启金,谢 玮,陈燕子,等. 1-MCP对浆果品质及采后生理研究进展[J]. 农产品加工, 2017(10): 64-65, 68.
- [12] 邓娇燕,黄 斌,吕立军,等. 叶面喷施1-MCP缓解辣椒幼苗高温伤害的机理研究[J]. 园艺学报, 2019, 46(5): 891-900.
- [13] 王小乐. 干旱胁迫下乙烯利和甲基环丙烯对甘蔗苗期生理生化特性影响的初步研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [14] SHARIPOVA G V, VESELOV D S, KUDOYAROVA G R, et al. Effect of ethylene perception inhibitor on growth, water relations, and abscisic acid content in wheat plants under water deficit[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2012, 59(4): 573-580.
- [15] KAWAKAMI E M, OOSTERHUIS D M, SNIDER J L. Physiological effects of 1-methylcyclopropene on well-watered and water-stressed cotton plants[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, 29(3): 280-288.
- [16] 常青山,张利霞,王建章,等. 干旱和复水对4个芍药品种生理指标的影响及品种抗旱性评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 44-50.
- [17] 陈 月,孙宪芝,杨景慧,等. 水分胁迫下嫁接对抗白菊渗透调节物质及相关代谢酶基因表达的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(5): 895-903.
- [18] 陈 彪,李继伟,王小东,等. 外源硒对干旱胁迫下烤烟生长和生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(1): 165-172.
- [19] 杨 柳,何正军,赵文吉,等. 红景天属植物生长及生理生化特征对遮阴的响应[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(3): 106-111.
- [20] 李本峰,杜红梅. 褪黑素预处理对多年生黑麦草抗旱性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(3): 21-26.
- [21] 陈浩维,邓明华,黄尧瑶,等. 干旱胁迫对玫瑰花瓣膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(5): 885-893.
- [22] 李江阔,曹 森,张 鹏,等. 1-MCP采前处理对葡萄采后相关酶活性与品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 270-275.
- [23] 黄相玲,林妃妃,张明月,等. 盐胁迫对小叶榄仁幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 49(7): 1364-1369.
- [24] 宋吉轩,李金还,刘美茹,等. 油菜素内酯对干旱胁迫下羊草渗透调节及抗氧化酶的影响研究[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 93-102.

(责任编辑:王 妮)