

外源硒对干旱胁迫下烤烟生长和生理特性的影响

陈彪¹, 李继伟², 王小东², 许自成^{1*}

¹河南农业大学烟草学院, 郑州450002

²河南科技大学农学院, 河南洛阳471023

摘要: 采用盆栽试验, 研究了外源硒(2~12 mg·kg⁻¹)对干旱胁迫下烟株生长、叶片光合色素含量、光合特性、抗氧化酶活性以及渗透调节物质含量的影响。结果表明: 干旱胁迫抑制烤烟生长, 显著影响烤烟的生长和生理生化代谢的相关指标。低浓度的外源硒能不同程度的缓解烤烟所受干旱胁迫的伤害, 但高浓度外源硒处理则表现出毒害效应。适宜浓度的外源硒显著促进了干旱胁迫下烤烟植株生长, 提高了烟株叶片光合色素含量, 提高净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r), 降低胞间CO₂浓度(C_i), 同时也提高了烤烟叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性以及可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质含量, 降低了叶片丙二醛(MDA)的积累。其中4 mg·kg⁻¹外源硒处理缓解效果最好。

关键词: 外源硒; 烤烟; 干旱胁迫; 生理特性

烤烟是我国重要的叶用经济作物之一。近年来, 我国主要烟区旱情频发, 对烤烟生产带来了巨大损失(王亚虹等2016), 干旱已成为我国烤烟生产优质稳产的重要限制因子之一。干旱胁迫对作物最直接的影响就是植株生长受到抑制, 光合强度减弱, 细胞内产生过量活性氧, 打破氧化代谢平衡, 引起膜脂过氧化损伤加剧, 甚至导致植株死亡(Ma等2015)。外源物质的应用是提高作物抗旱性的主要途径之一。硒是动物和人体所必需的营养元素, 大量研究表明适宜浓度的硒对植物生长发育有着重要的生理功能。研究发现, 硒在提高作物生长速率(Cartes等2010)、降低紫外线辐射氧化损伤(Yao等2013)、增加植物叶片叶绿素和类胡萝卜素含量(Dong等2013)、增加重金属胁迫下抗氧化酶活性和渗透调节物质含量(Kumar等2012)等方面发挥重要作用。同时有研究表明, 干旱胁迫下施用硒可以有效提高植物的耐旱性, 通过改善植物的光合能力、增强抗氧化能力和提高渗透调节物质含量等途径缓解干旱胁迫对小麦(Nawaz等2015)、大麦(Habibi 2013)、油菜(Hasanuzzaman和Fujita 2011)等作物的不利影响。外源硒在提高作物抗逆性方面发挥重要作用, 但有关外源硒对干旱胁迫下烤烟生长的生理生化代谢调控的研究鲜有报道。本试验以‘豫烟10号’为材料, 研究外源施硒对烤烟植株生长、光合能力、叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的影响, 探究外源硒缓解烤烟

干旱胁迫的适宜浓度及其生理机制, 以期减轻干旱胁迫对烤烟生长的抑制作用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

本试验于河南科技大学试验农场隔雨棚内进行。供试材料为烟草(*Nicotiana tabacum* L.)品种‘豫烟10号’。盆栽采用内径40 cm、高35 cm的塑料盆, 每盆装土20.0 kg, 土壤通过0.5 cm×1 cm网筛。供试土壤类型为褐土, 质地为砂壤土, 土壤pH值7.6, 有机质20.44 g·kg⁻¹, 碱解氮66.96 mg·kg⁻¹, 速效磷16.03 mg·kg⁻¹, 速效钾143.53 mg·kg⁻¹, 土壤全硒量0.23 μg·g⁻¹。所有处理均施用氮磷钾肥, 每盆施纯N 3.5 g, N:P₂O₅:K₂O为1:1.5:3。硒元素由Na₂SeO₃ (分析纯, 含Se 45.66%)提供。所有肥料在烟苗移栽前溶于水, 一次性施入。

2017年5月10日进行移栽, 试验共设6个处理, (1) CK: 正常浇水; (2) DS0: 干旱处理; (3) DS1: 干旱+2 mg·kg⁻¹ Se; (4) DS2: 干旱+4 mg·kg⁻¹ Se; (5) DS3: 干旱+8 mg·kg⁻¹ Se; (6) DS4: 干旱+12 mg·kg⁻¹ Se; 每个处理3次重复, 每个重复10盆, 共180盆。移栽后还苗期内每天浇水2次, 促苗定根生长。移

收稿 2017-09-19 修定 2017-12-11

资助 中国烟草总公司河南省公司重点科技攻关项目(HYKJ 201405)。

* 通讯作者(zichengxu@126.com)。

栽后1周还苗结束即开始控水,盆栽盆内安装真空表负压计(Waterstar,北京)监测土壤水势,将负压计陶土头底部置于盆内15 cm土层处。根据环刀法测定试验所用土壤的最大田间持水量,依据预实验所得土壤水分特征曲线,得到土壤相对含水量与土壤水势的线性关系。每天6:00~7:00、11:00~12:00、16:00~17:00时记录负压计读数,早晚浇水并计算控制正常浇水处理土壤相对含水量为75%~80%,干旱处理土壤相对含水量为50%~60%。移栽后60 d,随机采集不同处理烤烟植株中部功能叶片,并迅速置于液氮中,-80°C保存备用。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 农艺性状调查

于移栽后60 d测量烟株的株高、茎围、最大叶长和最大叶宽等农艺性状指标,并计算最大叶面积;烟叶最大叶面积=最大叶长×最大叶宽×0.6345。选取整株测定鲜重,并于105°C下杀青30 min后经80°C烘干测定干重。

1.2.2 叶绿素含量测定

采用95%乙醇浸提法,参照李合生(2000)方法,测定提取液叶绿素 a 、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量。

1.2.3 光合指标测定

于晴天上午9:00~11:00采用LI-6400XT便携式光合测定系统(LI-COR,美国),选取功能盛期叶片测定光合指标,包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。每张叶片测定10次,取其平均值。测定光照强度为1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, CO_2 浓度为390 $\mu mol \cdot mol^{-1}$ 。

1.2.4 抗氧化相关指标测定

采用硫代巴比妥酸法(TBA)测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,超氧化物歧化酶(super-

oxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑还原法测定,过氧化物酶(peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(catalase, CAT)活性采用紫外吸收法测定(陈建勋和王晓峰2006)。

1.2.5 渗透调节物质测定

可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝G520法,脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮法,可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定(李合生2000)。

1.3 数据统计分析

采用Excel 2010和SPSS 21.0软件进行数据统计分析,结果采用Origin 9.0进行分析绘图,对平均数用Duncan新复极差法进行多重比较。

2 实验结果

2.1 外源硒对干旱胁迫下烤烟生长的影响

与正常浇水相比,干旱胁迫处理的烤烟株高、茎围、最大叶面积、鲜重和干重均显著降低,表现出干旱胁迫对烤烟生长的抑制作用;不同浓度外源硒处理均对干旱胁迫下烤烟生长指标有显著影响,但不同浓度外源硒处理对干旱胁迫下烤烟生长量积累的影响存在差异(表1)。低浓度硒处理($Se \leq 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, DS1和DS2)对干旱胁迫下烤烟生长有促进作用,增加了烤烟株高、茎围、最大叶面积、鲜重和干重,且以上指标均在4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒处理(DS2)时达到最大值,并显著高于单一干旱胁迫处理($P < 0.05$),相对于单一干旱处理(DS0),4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒处理的生物量增加最大。与低浓度硒处理提高干旱胁迫下烤烟生长的促进作用不同,高浓度硒处理($Se \geq 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, DS3和DS4)则显著抑制了烤烟的生长,表现出毒害效应。由此可见,干旱胁迫处理显著抑制了烤烟的生长,外源硒处理

表1 外源硒对干旱胁迫下烤烟生长的影响

Table 1 Effects of exogenous selenium on the growth of flue-cured tobacco under drought stress

处理	株高/cm	茎围/cm	最大叶面积/cm ²	鲜重/g	干重/g
CK	60.33±0.02 ^a	7.22±0.39 ^a	634.63±1.60 ^a	1 019.63±7.95 ^a	216.93±0.77 ^a
DS0	49.57±0.18 ^c	6.82±0.81 ^b	487.26±1.77 ^d	622.51±6.67 ^c	166.61±0.45 ^d
DS1	58.27±1.02 ^{ab}	6.86±1.20 ^b	614.88±0.10 ^b	654.29±1.17 ^c	182.10±0.17 ^c
DS2	59.63±1.46 ^{ab}	7.05±1.61 ^a	628.04±0.85 ^{ab}	700.46±1.13 ^b	197.49±0.56 ^b
DS3	57.50±1.91 ^b	6.29±2.02 ^c	581.52±0.55 ^c	530.89±0.87 ^d	175.59±1.32 ^{cd}
DS4	47.30±2.25 ^c	5.88±2.42 ^d	483.83±0.49 ^d	527.11±3.64 ^d	152.61±0.26 ^c

同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

能有效缓解干旱胁迫对烤烟生长的抑制作用, 但具有剂量效应, 以 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒处理效果最好, 仍未能恢复到正常浇水水平。

2.2 外源硒对干旱胁迫下烤烟叶片光合色素含量的影响

如表2所示, 干旱处理(DS0)下烤烟叶绿素 a 、叶绿素 b 、叶绿素 $a+b$ 和类胡萝卜素含量均显著低于CK ($P<0.05$), 干旱胁迫下施加不同浓度外源硒的烤烟叶片叶绿素 a 、叶绿素 $a+b$ 和类胡萝卜素含量均表现出随处理浓度的提高先逐渐升高后下降的趋势, 其中以 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒处理(DS2)下达到最高, 叶绿素 a 、叶绿素 $a+b$ 和类胡萝卜素含量分别比干旱胁迫下(DS0)提高了11.94%、9.41%和5.55%。施用不同浓度外源硒处理对干旱胁迫下烤烟叶绿素 b 含量并无显著影响。高浓度硒处理($\text{Se}\geq 8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, DS3和DS4)则显著降低了干旱胁迫下烤烟叶片的叶绿素 a 、叶绿素 $a+b$ 和类胡萝卜素含量。结果表明, 施用外源硒处理可以促进干旱胁迫下烤烟叶片光合色素合成, 提高烤烟叶片光合色素含量, 且施用 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒效果最好。

2.3 外源硒对干旱胁迫下烤烟光合特性的影响

相比正常浇水, 干旱胁迫显著降低了烤烟的净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 和蒸腾速率 T_r , 并显著提高了胞间 CO_2 浓度 C_i (图1)。随着外源硒浓度的增加, 干旱处理下烤烟的 P_n 、 G_s 和 T_r 均呈现先上升后下降的趋势, C_i 则呈先下降后上升的趋势。相对于单一干旱处理(DS0), 低浓度外源硒处理($\text{Se}\leq 4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, DS1和DS2)下的 P_n 、 G_s 和 T_r 均显著升高, 而 C_i 则显著低于干旱胁迫处理($P<0.05$), 以 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒处理的效果最好, 说明适宜浓度外源硒可以缓解干旱胁迫对烤烟叶片光合特性的影响, 从而降低干旱的损伤。相对单一干旱处理, 高浓度外

源硒处理($12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, DS4)时, P_n 和 T_r 均显著降低, C_i 显著升高, 而 G_s 的变化不显著, 说明高浓度的外源硒会加重干旱胁迫对烤烟叶光合特性的影响。

2.4 外源硒对干旱胁迫下烤烟叶片MDA含量和抗氧化酶活性的影响

由图2-A可知, 干旱胁迫下烤烟叶片中MDA含量显著提高(58.03%); 施加不同浓度外源硒能够不同程度影响干旱胁迫下烤烟叶片的MDA含量, 表现出随着外源硒浓度的提高, MDA含量呈现先下降后升高的趋势, 其中 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒处理使干旱胁迫下烤烟叶片MDA含量降低了21.39%。而高浓度硒处理($\text{Se}\geq 8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, DS3和DS4)则增加了胁迫伤害, 加重了脂质过氧化程度, 施硒量为 $12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 烤烟叶片MDA含量比单一干旱胁迫提高了46.28%。

干旱胁迫下SOD、POD和CAT活性均有升高(图2-B~D), 其中SOD活性提高了34.41%且差异显著($P<0.05$), 而POD和CAT活性变化无显著差异。与单独干旱胁迫相比, 施用不同浓度外源硒处理($\text{Se}\leq 8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均不同程度上增加了抗氧化酶活性, 其中 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒处理对抗氧化酶的促进作用较其他浓度更明显。相对于单一干旱胁迫, 高浓度硒处理($12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著降低了叶片抗氧化酶活性($P<0.05$), 说明低浓度的外源硒可以促使干旱胁迫下烤烟叶片中SOD、POD和CAT活性增加, 高浓度的外源硒会降低干旱胁迫下烤烟叶片中的SOD、POD和CAT活性。

2.5 外源硒对干旱胁迫下烤烟叶片渗透调节物质含量的影响

由图3-A可知, 与CK相比, 干旱胁迫下烤烟叶片可溶性蛋白含量显著下降, 而脯氨酸和可溶性

表2 外源硒对干旱胁迫下烤烟叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effects of exogenous selenium on photosynthetic pigments contents in flue-cured tobacco leaves under drought stress

处理	叶绿素 a 含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	叶绿素 b 含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	叶绿素 $a+b$ 含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	类胡萝卜素含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)
CK	0.94 ± 0.0707^a	0.27 ± 0.0323^a	1.21 ± 0.1029^a	0.24 ± 0.0175^a
DS0	0.67 ± 0.0016^{bc}	0.19 ± 0.0015^b	0.85 ± 0.0128^{bc}	0.18 ± 0.0030^b
DS1	0.70 ± 0.0055^{bc}	0.18 ± 0.0108^b	0.88 ± 0.0069^{bc}	0.18 ± 0.0027^b
DS2	0.75 ± 0.0161^b	0.18 ± 0.0114^b	0.93 ± 0.0151^b	0.19 ± 0.0034^b
DS3	0.62 ± 0.0223^{cd}	0.16 ± 0.0027^b	0.78 ± 0.0246^{cd}	0.17 ± 0.0100^b
DS4	0.56 ± 0.0136^d	0.15 ± 0.0029^b	0.71 ± 0.0163^d	0.16 ± 0.0057^b

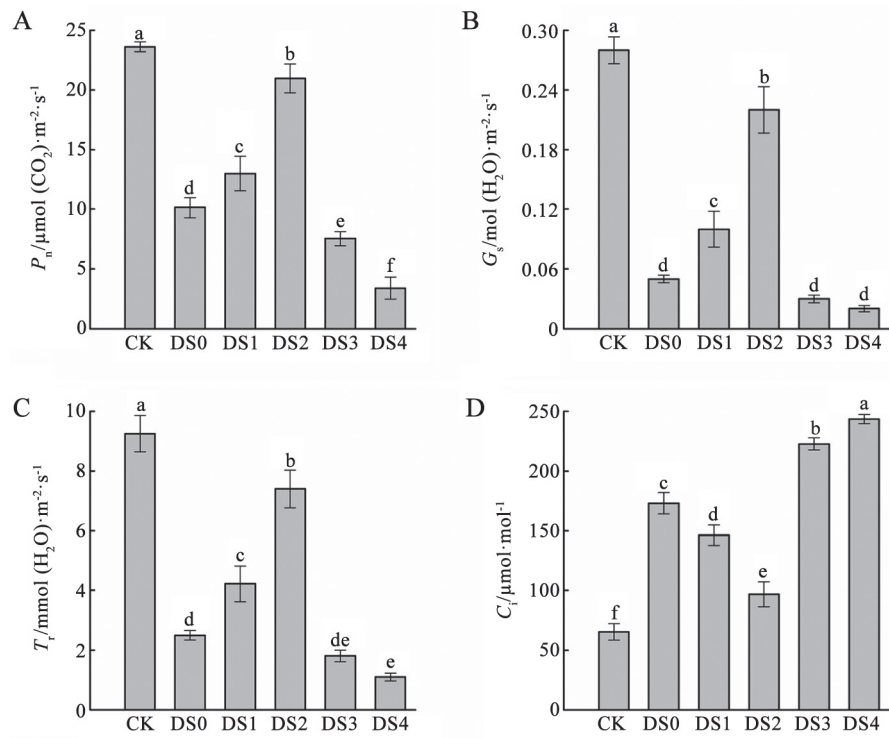


图1 外源硒对干旱胁迫下烤烟光合特性的影响

Fig.1 Effects of exogenous selenium on photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco under drought stress

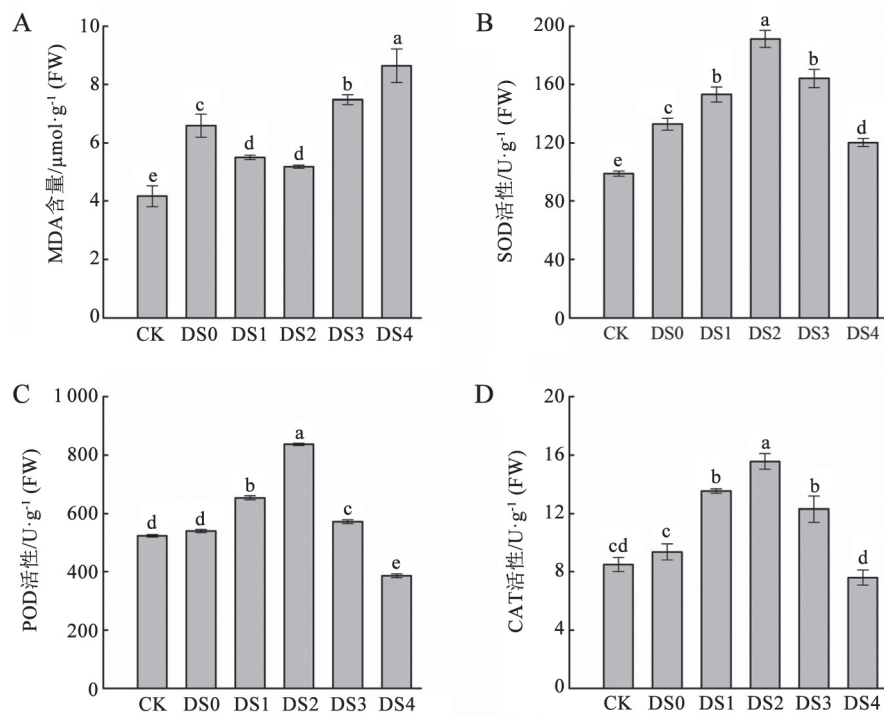
不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$), 下同。

图2 外源硒对干旱胁迫下烤烟叶片MDA含量和抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of exogenous selenium on MDA content and activities of antioxidant enzyme in flue-cured tobacco leaves under drought stress

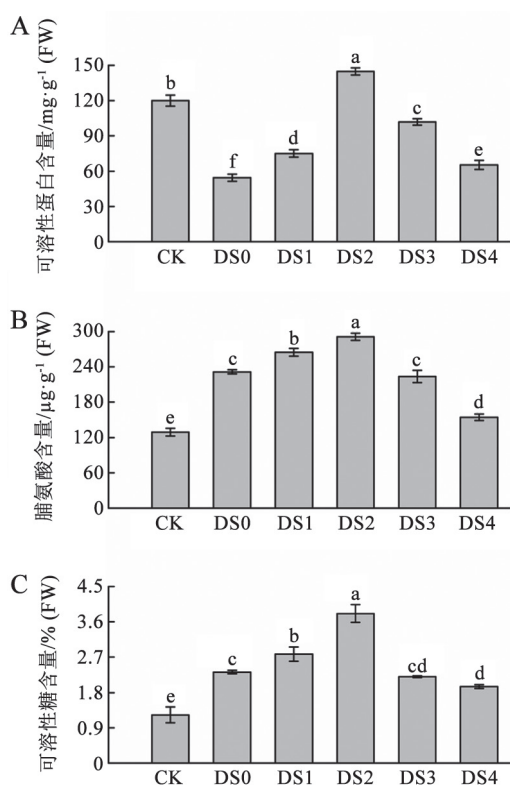


图3 外源硒对干旱胁迫下烤烟叶片渗透调节物质含量的影响
Fig.3 Effects of exogenous selenium on osmotic adjustment substances in flue-cured tobacco leaves under drought stress

糖含量则显著增加(图3-B和C)。与单独干旱胁迫相比,施加不同浓度外源硒能够不同程度影响干旱胁迫下烤烟叶片的可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量,均随着外源硒浓度的提高,呈现先下降后升高的趋势。其中外源硒浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量达到最大。相对于低浓度外源硒处理($\text{Se}\leq 4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, DS1和DS2)促进干旱胁迫下烤烟叶片可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量随浓度升高的积累,高浓度外源硒处理($\text{Se}\geq 8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, DS3和DS4)时三个指标表现趋势与之不同。施硒量为 $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,脯氨酸含量和可溶性糖含量与单独干旱胁迫相比差异不显著,施硒量为 $12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,相对于单独干旱胁迫脯氨酸和可溶性糖含量分别显著降低33.37%和15.94%,而可溶性蛋白含量却显著提高20.24%。由此可知,施用一定浓度范围内外源硒有利于干旱胁迫下烤烟叶片渗透调节物质的合成和积累,减轻干旱胁迫对烤烟的伤害。

3 讨论

干旱胁迫对植物的生理形态和生化特性变化有很大影响。Farooq等(2012)研究指出,干旱胁迫可通过影响光化学过程直接影响光合作用,间接关闭气孔并减少叶面积,从而降低植物器官的生物量。本研究结果表明,适宜浓度的外源硒施用可以有效缓解干旱胁迫对烤烟生长的抑制作用,改善其生长特性,其中以 $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒处理的缓解效果最好,这与张健伟等(2016)研究得出的适宜浓度的外源硒能够显著促进植株生长的结论一致。而高浓度的外源硒则表现出与干旱胁迫的协同效应,进一步限制了干旱胁迫下烤烟生长和干物质积累。

叶片光合色素是干旱胁迫下植物最重要的生理性状变化之一,光合色素的含量与组成直接影响着植株的光合能力(任志广等2017)。研究表明,干旱胁迫下氧自由基的增加导致细胞过氧化,从而导致光合色素的分解,而光合色素含量的降低直接导致植物在干旱胁迫条件下光吸收的降低(Javadi等2017)。本试验表明,一定浓度的硒处理能够缓解干旱胁迫下烤烟叶片光合色素含量的下降,而高浓度硒处理时,烟叶中叶绿素和类胡萝卜素含量开始出现下降,甚至出现“黄化”症状,这与许自成等(2011)研究结果相一致。

光合作用是植物有机物合成的基础,也是影响烤烟产质量形成的关键因子(刘领等2017)。干旱胁迫下,植物气孔关闭、气孔导度下降、 CO_2 进入气孔受阻,导致叶片蒸腾速率和光合速率下降。研究表明,喷施低浓度的亚硒酸钠能缓解盐胁迫下葡萄叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的下降,同时促进胞间 CO_2 浓度的升高(武林楠等2016)。本试验中,一定浓度的外源硒处理,显著提高了干旱胁迫下烤烟叶片的光合性能。外源硒的施入可能促进了烟株根系对水分的吸收,从而提高烟株的水分代谢和 CO_2 利用能力,而高浓度外源硒的施入则显著加剧了干旱胁迫效应,表现出重度干旱胁迫下的光合水平(Germ等2007)。

MDA作为细胞膜脂过氧化的主要产物,常用作细胞膜受伤害程度的标志物。在本试验中,适宜浓度的外源硒处理下叶片MDA含量显著低于干旱胁迫处理,说明适宜浓度的外源硒处理能够降

低干旱胁迫造成的脂质过氧化程度,维持了细胞膜的稳定性,对干旱胁迫下烤烟叶片细胞膜起到保护作用。SOD、POD和CAT是植物体内ROS清除系统的保护酶,它们协同作用可以防御活性氧自由基对细胞膜的伤害,抑制膜脂过氧化,减轻逆境胁迫对植物细胞造成的伤害。有研究表明,适宜质量分数的硒能增强小麦及油菜叶片SOD、POD等抗氧化酶的活性,但质量分数过高的条件下其活性反而降低(付小丽2013)。本试验条件下,适宜浓度的外源硒处理可提高烤烟叶片抗氧化酶在干旱胁迫下的活性,这与芦文杰等(2016)研究结果一致。

可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖作为植物体细胞内重要的渗透调节物质,对植物生理生化代谢有重要作用。渗透调节物质的积累可以降低植物叶片细胞水势,促进干旱胁迫下细胞恢复吸水,减轻对植物的胁迫损伤。本研究中,干旱胁迫下,烤烟叶片脯氨酸和可溶性糖含量显著上升,而可溶性蛋白含量显著下降,说明脯氨酸和可溶性糖在烤烟干旱胁迫中作用显著。张联合等(2014)研究表明,硒可以通过促进可溶性糖和可溶性蛋白的增加和转移来缓解干旱对植物的胁迫作用。此外,Akladios (2012)研究指出外源硒可以增加脯氨酸的含量减轻植物胁迫伤害。本研究表明,适宜浓度的外源硒处理增加了渗透调节物质的含量,其中 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理效果最好,说明适宜浓度的外源硒可以通过调节可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量来降低渗透势以适应干旱胁迫。

综上所述,干旱胁迫下烤烟生长受到抑制,施用外源硒能够有效缓解烤烟干旱胁迫,但具有剂量效应,以 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外源硒处理效果最好,高浓度硒处理则表现为与干旱胁迫的协同效应,加剧干旱对烤烟的胁迫伤害。适宜浓度的外源硒处理可以促进干旱胁迫下烤烟植株生长,提高叶片光合色素含量及光合能力,降低MDA含量,提高抗氧化酶活性和增加渗透调节物质含量,从而提高烤烟的耐旱性,说明施用适宜浓度的外源硒对缓解烤烟干旱胁迫具有促进作用。

参考文献(References)

- Akladios SA (2012). Influence of different soaking times with selenium on growth, metabolic activities of wheat seedlings under low temperature stress. *Afr J Biotechnol*, 11 (82): 14792–14804
- Cartes P, Jara AA, Pinilla L, et al (2010). Selenium improves the antioxidant ability against aluminium-induced oxidative stress in ryegrass roots. *Ann Appl Biol*, 156 (2): 297–307
- Chen JX, Wang XF (2006). *Experimental Guide of Physiology of Plant*. 2nd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press (in Chinese) [陈建勋, 王晓峰(2006). 植物生理学实验指导. 第2版. 广州: 华南理工大学出版社]
- Dong JZ, Wang Y, Wang SH, et al (2013). Selenium increases chlorogenic acid, chlorophyll and carotenoids of *Lycium chinense* leaves. *J Sci Food Agr*, 93 (2): 310–315
- Farooq M, Hussain M, Wahid A, et al (2012). Drought stress in plants: An overview. In: Aroca R (ed). *Plant Responses to Drought Stress*. Berlin Heidelberg: Springer, 1–33
- Fu XL (2013). The influence of different selenium sources on the growth and selenium accumulation of wheat and oil seed rape (dissertation). Wuhan: Central China Agricultural University (in Chinese with English abstract) [付小丽(2013). 不同硒源对小麦和油菜生长及硒累积的影响(学位论文). 武汉: 华中农业大学]
- Germ M, Kreft I, Stibilj V, et al (2007). Combined effects of selenium and drought on photosynthesis and mitochondrial respiration in potato. *Plant Physiol Bioch*, 45 (2): 162–167
- Habibi G (2013). Effect of drought stress and selenium spraying on photosynthesis and antioxidant activity of spring barley. *Acta Agri Slovenica*, 101 (1): 31–39
- Hasanuzzaman M, Fujita M (2011). Selenium pretreatment upregulates the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system and confers enhanced tolerance to drought stress in rapeseed seedlings. *Biol Trace Elem Res*, 143 (3): 1758–1776
- Javadi T, Rohollahi D, Ghaderi N, et al (2017). Mitigating the adverse effects of drought stress on the morpho-physiological traits and anti-oxidative enzyme activities of *Prunus avium* through β -amino butyric acid drenching. *Sci Hortic-Amsterdam*, 218: 156–163
- Kumar M, Bijo AJ, Baghel RS, et al (2012). Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation. *Plant Physiol Bioch*, 51 (2): 129–138
- Li HS (2000). *Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments*. Beijing: Higher Education Press, 167–169 (in Chinese) [李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 167–169]
- Liu L, Li JW, Chang QQ, et al (2017). Effects of brassica extracts on occurrence of black shank disease and physiological characteristics of flue-cured tobacco. *Plant Physiol J*, 53 (6): 997–1006 (in Chinese with English abstract) [刘

- 领, 李继伟, 常茜茜等(2017). 芸薹属植物提取液对烤烟黑胫病发生及烟株生理特性的影响. 植物生理学报, 53 (6): 997–1006]
- Lu WJ, Yin MQ, Dang FF, et al (2016). Effect of selenium foliar spray on the physiological characteristics of wheat seedlings under drought stress. J Shanxi Agric Sci, (12): 1780–1784 (in Chinese with English abstract) [芦文杰, 尹美强, 党芳芳等(2016). 叶面喷硒对干旱胁迫下小麦幼苗生理特性的影响. 山西农业科学, (12): 1780–1784]
- Ma XL, Xin ZY, Wang ZQ, et al (2015). Identification and comparative analysis of differentially expressed miRNAs in leaves of two wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes during dehydration stress. BMC Plant Biol, 15: 21
- Nawaz F, Ahmad R, Ashraf MY, et al (2015). Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. Ecotox Environ Safe, 113: 191–200
- Ren ZG, Yang LJ, Gong ZX, et al (2017). Effects of different small molecular organics on physiological characteristics, carbon and nitrogen metabolism and quality of flue-cured tobacco. Plant Physiol J, 53 (7): 1225–1233 (in Chinese with English abstract) [任志广, 杨立均, 龚治翔等(2017). 不同小分子有机物对烤烟生理特性、碳氮代谢及烟叶品质的影响. 植物生理学报, 53 (7): 1225–1233]
- Wang YH, Xu ZC, Gao S, et al (2016). Research progress of tobacco drought stress. Water Saving Irrigation, (12): 103–107 (in Chinese with English abstract) [王亚虹, 许自成, 高森等(2016). 烟草干旱胁迫研究进展. 节水灌溉, (12): 103–107]
- Wu LN, Hao YJ, Feng JR, et al (2016). Effect of selenium on the photosynthetic and fluorescence characteristics of grape under salt stress. Xinjiang Agric Sci, 53 (7): 1217–1222 (in Chinese with English abstract) [武林楠, 郝玉杰, 冯建荣等(2016). 硒对盐胁迫下葡萄光合及叶绿素荧光特性的影响. 新疆农业科学, 53 (7): 1217–1222]
- Xu ZC, Shao HF, Sun SG, et al (2011). Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco. Acta Ecol Sin, 31 (23): 7179–7187 (in Chinese with English abstract) [许自成, 邵惠芳, 孙曙光等(2011). 土壤施硒对烤烟生理指标的影响. 生态学报, 31 (23): 7179–7187]
- Yao XQ, Chu JZ, He XL, et al (2013). Effects of selenium on agronomical characters of winter wheat exposed to enhanced ultraviolet-B. Ecotox Environ Safe, 92 (3): 320–326
- Zhang JW, Wang S, Zhou Y, et al (2016). Effect of different selenium concentration on growth and several physiological indexes of tomato seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress. Nor Horticul, (15): 16–20 (in Chinese with English abstract) [张健伟, 王松, 周艳等(2016). 不同浓度硒对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗生长及几项生理指标的影响. 北方园艺, (15): 16–20]
- Zhang LH, Deng K, Yu FY (2014). Effect of Na_2SeO_3 on physiological characteristics of rice seed germination under PEG stress. Seed, 33 (5): 46–49 (in Chinese with English abstract) [张联合, 邓坤, 郁飞燕(2014). PEG胁迫下 Na_2SeO_3 对水稻种子萌发生理特性的影响. 种子, 33 (5): 46–49]

Effects of exogenous selenium on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco under drought stress

CHEN Biao¹, LI Ji-Wei², WANG Xiao-Dong², XU Zi-Cheng^{1,*}

¹College of Tobacco Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

²College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of exogenous selenium (2–12 mg·kg⁻¹) on plant growth, leaf photosynthetic pigment content, photosynthetic characteristics, antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment substances in flue-cured tobacco leaves under drought stress. The result showed that drought stress inhibited the growth of tobacco and significantly affected the growth, physiological, biochemical and metabolism of tobacco. The lower exogenous selenium concentrations can alleviate the drought stress of tobacco and the higher exogenous selenium concentration had toxic effects on tobacco. Appropriate concentration of exogenous selenium concentrations significantly promoted the growth of tobacco, improved photosynthetic pigment content, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r), elevated the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT), and increased the content of soluble protein, proline and soluble sugar, but reduced the intercellular CO₂ concentration (C_i) and malondialdehyde (MDA) accumulation in tobacco leaves under drought stress. The strongest effect on alleviating drought stress was found in the treatment of 4 mg·kg⁻¹ exogenous selenium.

Key words: exogenous selenium; flue-cured tobacco; drought stress; physiological characteristics

Received 2017-09-19 Accepted 2017-12-11

This work was supported by the Science and Technology Project of Henan Province Tobacco Company of China National Tobacco Corporation (HYKJ 201405)

*Corresponding author (zichengxu@126.com).