

外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗 生长及其生理特性的影响

庄 晔,刘瑞恒,付国占,王小东

(河南科技大学农学院/河南省旱地农业工程技术研究中心,河南 洛阳 471023)

摘要:以烤烟品种‘秦烟 96’和‘云烟 116’等 2 个烤烟品种为试验材料,通过开展盆栽试验,设置正常供水和
中度干旱等 2 个水分梯度,外源花青素设置 6 个浓度,研究外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗农艺性状、单株干重、
光合气体参数、叶绿素荧光参数及活性氧代谢系统的影响。结果表明:干旱胁迫下,两个烤烟品种生长受到抑制且
生理性能下降;干旱胁迫下喷施外源花青素可显著增加烤烟幼苗的株高、茎围、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、单
株干重、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率 PS II 最大光化学效率、PS II 实际光化学效率和光化学猝灭系数,降低叶片
中胞间 CO₂ 浓度和非光化学猝灭系数,降低超氧阴离子自由基产生速率和丙二醛含量,提高叶片中超氧化物歧化酶、
过氧化物酶和过氧化氢酶活性,增强烤烟幼苗对干旱胁迫的耐受性,有效缓解干旱胁迫对烤烟幼苗生长及其生理功
能的损害;其中‘秦烟 96’以叶面喷施 3 mg · L⁻¹花青素对考烟幼苗生长的促进效果最佳,‘云烟 116’以叶面喷施 4
mg · L⁻¹花青素效果最佳。

关键词:烤烟;干旱胁迫;花青素;农艺性状;生理特性

中图分类号:S572 **文献标志码:**A

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

ZHUANG Ye, LIU Ruiheng, FU Guozhan, WANG Xiaodong

(Henan Province Dryland Agricultural Engineering Technology Research Center/College of Agronomy,
Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: This pot experiment used flue-cured tobacco varieties of ‘Qinyan 96’ and ‘Yunyan 116’ as exper-
imental materials. The treatments including two water gradients of normal water supply and moderate drought and six
concentrations of exogenous anthocyanins were set to study the effects of exogenous anthocyanins on agronomic char-
acters of flue-cured tobacco seedlings. The results showed that under drought stress, the growth of two flue-cured to-
bacco varieties was inhibited, and their physiological properties decreased. Spraying exogenous anthocyanins on the
leaves of flue-cured tobacco seedlings under drought stress significantly increased the plant height, stem circumfer-
ence, maximum leaf length, maximum leaf width, maximum leaf area, dry weight per plant, net photosynthetic rate
stomatal conductance, transpiration rate, maximum photochemical efficiency of PSII, actual photochemical efficiency
of PSII and photochemical quenching coefficient. By reducing intercellular CO₂ concentration and non-photochemical
quenching coefficient in leaves, it not only reduced the production rate of superoxide anion radical and malondialde-
hyde, but also increased the activities of superoxide dismutase, peroxidase and catalase in leaves. By enhancing the
tolerance of flue-cured tobacco seedlings to drought stress, it was effective to alleviate the damage of drought stress to
the growth and physiological functions of flue-cured tobacco seedlings. Of which, spraying 3 mg · L⁻¹ anthocyanin on
the leaves of ‘Qinyan 96’ had the best effect on promoting the growth of tobacco seedlings, and spraying 4 mg · L⁻¹
anthocyanin on the leaves of ‘Yunyan 116’ also had the best effect on promoting the growth of tobacco seedlings.

收稿日期:2022-01-22

修回日期:2022-03-15

基金项目:河南省科技攻关项目(222102110360);河南省产学研合作项目(152107000017)

作者简介:庄晔(1995-),男,河南永城人,硕士研究生,研究方向为烟草栽培生理。E-mail: 769160883@qq.com

通信作者:王小东(1977-),男,河南新安人,副教授,主要从事烟草栽培生理生态与品质调控研究。E-mail: wxd@haust.edu.cn

Keywords: flue-cured tobacco; drought stress; anthocyanin; agronomic traits; physiological property

水资源匮乏是威胁农业正常生产的主要因素之一,提高作物在缺水情况下生存和生长的能力至关重要。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,干旱已成为我国烤烟生产优质稳产的重要限制因子之一^[1]。干旱胁迫抑制植物细胞分裂^[2],导致植物体内活性氧的产生和清除系统之间的平衡遭到破坏^[3],使得活性氧过量积累,造成细胞内蛋白质与酶等生物大分子失活,细胞膜结构与功能遭到破坏^[4],光合作用受到抑制^[5],阻碍细胞正常代谢,最终导致作物减产降质,甚至死亡^[6]。由于干旱对农业的威胁日趋严重,探究改善烤烟对于干旱胁迫适应能力的新途径及其调节机制具有重要的理论和实践意义^[7]。

当受到外部环境刺激时,植物可以通过自身内部生理活动进行调节,以应对外部环境变化对自身生长发育产生的影响,但是这种自身调节是有限的。施用外源物质是有效缓解植物干旱的重要途径之一,前人研究了外源一氧化氮^[8]、外源亚精胺^[9]、外源硒^[10]、外源褪黑素^[11]等外源物质对烤烟在干旱条件下的缓解效应。当受到紫外线、盐度或干旱胁迫时^[12-14],植物通常会积累与其应对压力的能力相关的特殊代谢物,其中花青素是苯丙素途径中研究最多的中间体^[15]。有研究表明,花青素是当今人类发现最有效的抗氧化剂,也是最强效的自由基清除剂^[16]。然而有关外源花青素对植物生理生化代谢调控的研究鲜有报道,为更好地了解外源花青素对植物生理和形态产生的影响及其对于干旱胁迫耐受性,本试验以‘秦烟 96’和‘云烟 116’为材料,研究外源花青素对烤烟幼苗农艺性状、光合能力、活性氧系统的影响,进而明确外源花青素缓解烤烟幼苗干旱胁迫的适宜浓度及其调控机制,以期为减轻干旱胁迫对烤烟幼苗的抑制作用提供参考。

1 材料和方法

1.1 供试材料

本试验选用烤烟品种‘秦烟 96’(以下简称 Q96)和‘云烟 116’(以下简称 Y116),前期已对两个烤烟品种幼苗进行抗旱性评价,其中 Q96 较 Y116 的耐旱性更强。

试验用塑料盆盆口和盆底直径分别为 40 cm 和 25 cm,盆高 35 cm;供试土壤类型为褐土,质地为砂壤土,pH 值 7.55,有机质 20.36 mg · kg⁻¹,碱解氮 66.53 mg · kg⁻¹,速效磷 15.86 mg · kg⁻¹,速效钾

139.65 mg · kg⁻¹。花青素由北京索莱宝生物科技有限公司提供。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2021 年 5 月在河南科技大学农学院试验大棚内进行。供试土壤过 0.5 cm × 1 cm 网筛并风干,每盆装风干土 20 kg,供试肥料:硝酸磷肥(总氮 32%、有效磷 4%)、磷酸铵(全氮 11%、有效磷 44%)、硫酸钾(50%)、饼肥(全氮 5%),施 N 量均为 3.5 g · 盆⁻¹,其中 N : P₂O₅ : K₂O 为 1 : 1.5 : 3,肥料混匀后一并装入盆中。盆内安装真空负压计(Waterstar, 北京)用于土壤水势的监测,选取长势一致的烤烟幼苗进行移栽(每盆 1 株烟苗),两个烤烟品种各设置 7 个处理(如表 1 所示),每个处理重复 3 次,待还苗期结束(移栽 5 d 后)开始控水,并按照分组分别喷施 0~5 mg · L⁻¹的花青素(对照组喷施蒸馏水),在烟叶正单面喷施均匀,每天 7 : 00—8 : 00、11 : 30—12 : 30、16 : 00—17 : 00 时记录负压计读数,对负压计读数明显变化的盆栽进行补水,于第 15 d 开始测定各处理烤烟幼苗的生长及生理指标。

表 1 试验处理设置情况

Table 1 Test processing settings

处理 Treatment	土壤持水量/% Soil water holding capacity	喷施花青素浓度/(mg · L ⁻¹) Spray anthocyanin concentration
CK	65~70	0
T0	45~50	0
T1	45~50	1
T2	45~50	2
T3	45~50	3
T4	45~50	4
T5	45~50	5

控水可靠性验证:在烟苗移栽前进行了控水处理预实验,在预先装好干土的盆内安放负压计(每盆 1 支),并设置了不同水分梯度,待负压计读数稳定后,采用环刀法测定盆内土壤的最大田间持水量,分别读取每盆的负压计读数(即土壤水势)和测得相应的土壤相对含水量。通过两者相关分析表明,土壤相对含水量与土壤水势(负压计读数)呈极显著负相关关系,负压计读数能够较好地指示土壤相对含水量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标 农艺性状指标的选定参照烟草农艺性状调查测量方法(中华人民共和国烟草行业标准 YC/T 142-2010);将植株样品置于 105℃ 下杀青 30 min 后经 80℃ 烘干至恒重,称量并计算其干物

质积累量(即干重,以 g 为单位)。

1.3.2 叶片光合和叶绿素荧光参数 用便携式光合仪(Li-6400 XT/美国)测定其功能叶片(≥ 5 cm 心叶往下第 3 叶位叶片)光合参数,测定时间为上午 9:00—11:00 之间,当天为晴天,测定时选择 Li-6400-02B 红蓝光光源叶室,温度为 25℃,空气相对湿度为 50%~70%,设定有效光合辐射为 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。用便携式调制荧光仪(PAM-2100, Walz 公司,德国)测定功能叶片叶绿素荧光参数,光反应测定最大荧光(F'_m)、稳态荧光(F_s)和光下最小荧光(F'_0),暗反应测定初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)。计算出:

PS II 最大光化学效率

$$(F_v/F_m) = (F_m - F_0)/F_m \quad (1)$$

PS II 实际光化学效率

$$(\Phi_{\text{PSII}}) = (F'_m - F_s)/F'_m \quad (2)$$

光化学猝灭系数

$$(qP) = (F'_m - F_s)/(F'_m - F'_0) \quad (3)$$

非光化学猝灭系数

$$(NPQ) = (F_m - F'_m)/F'_m \quad (4)$$

1.3.3 活性氧系统相关指标 超氧阴离子自由基产生速率参照王爱国等的方法^[17];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[18];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[19]。

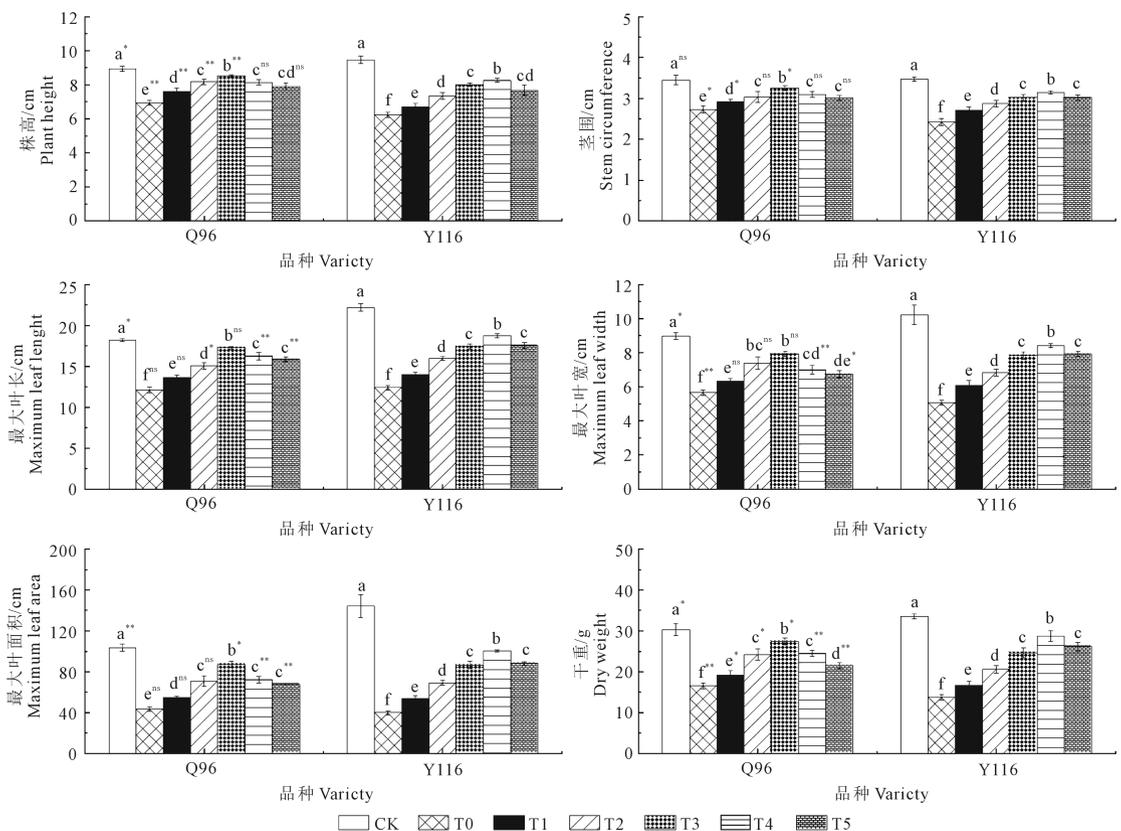
1.4 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 统计软件进行数据处理和分析;采用单因素方差分析和 LSD 检验同一品种内不同水分处理间的差异显著性,采用 F 检验分析相同水分处理下不同品种间差异显著性;采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗生长的影响

由图 1 可知,干旱胁迫下两个烤烟品种幼苗的株高、茎围、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积和单株



注:不同小写字母表示相同品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。在相同处理不同品种间,**表示相同处理两个品种间差异极显著($P < 0.01$),*表示差异显著($P < 0.05$),ns表示差异不显著($P > 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different treatments of the same variety ($P < 0.05$). In same treatment between different species, ** indicates that the difference between two varieties in the same treatment is extremely significant, $P < 0.01$; * indicates significant difference at $P < 0.05$; ns indicates no significant correlation at $P > 0.05$. The same as following.

图 1 外源花青素对烤烟幼苗农艺性状和单株干重的影响

Fig.1 Effects of exogenous anthocyanins on agronomic characters and dry weight of flue-cured tobacco seedlings

干重均显著降低。与 T0 相比,当喷施外源花青素时,两个烤烟品种幼苗的株高、茎围、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积和单株干重均显著增加,且随着外源花青素浓度增加均呈现先增加后降低趋势。与 T0 相比,T3 处理 Q96 恢复效果最好,其株高、茎围、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积和单株干重分别增加了 23.1%、19.5%、43.0%、40.0%、100.2% 和 65.2%;T4 处理 Y116 恢复效果最好,其株高、茎围、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积和单株干重分别增加了 32.6%、29.9%、51.3%、66.5%、151.8% 和 108.7%。在充足供水时,Q96 的单株干重显著低于 Y116,在单纯干旱胁迫下,Q96 的单株干重显著高于 Y116,说明干旱对 Y116 单株干重影响较大;在 T3 处理下 Q96 的单株干重显著高于 Y116,说明 3 mg · L⁻¹ 外源花青素对 Q96 促进效果明显;在 T4 处理下 Q96 的单株干重显著低于 Y116,4 mg · L⁻¹ 外源花青素对 Y116 单株干重增加更明显。

2.2 外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗光合特性的影响

由图 2 可知,干旱胁迫下,两个烤烟品种幼苗的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)均显著降低,胞间 CO₂ 浓度(C_i)均显著升高。与 T0 相比,喷施外源花青素处理中,两个烤烟品种幼苗的 P_n 、 T_r 和 G_s 均显著升高, C_i 均显著降低,且随着外源

花青素浓度的增加, P_n 、 T_r 和 G_s 均呈现先升高再降低趋势, C_i 均呈现先降低再升高趋势。与 T0 相比,T3 处理 Q96 光合参数恢复最好, P_n 、 T_r 和 G_s 分别增加 71.2%、52.5% 和 44.8%, C_i 降低 24.3%;T4 处理 Y116 光合参数恢复最好, P_n 、 T_r 和 G_s 分别增加 96.0%、85.3% 和 58.4%, C_i 降低 38.4%。在充足供水时 Q96 的 P_n 、 T_r 和 C_i 与 Y116 无显著差异,在单纯干旱胁迫下 Q96 的 P_n 和 T_r 均显著高于 Y116, C_i 显著低于 Y116,说明干旱对 Y116 光合参数影响较大;在 T3 处理下 Q96 的 P_n 和 T_r 均显著高于 Y116, C_i 显著低于 Y116,说明 3 mg · L⁻¹ 外源花青素对 Q96 光合作用增强效果明显;在 T4 处理下 Q96 的 P_n 和 T_r 均显著低于 Y116, C_i 显著高于 Y116,说明 4 mg · L⁻¹ 外源花青素对 Y116 的光合作用提升更明显。

2.3 外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗叶绿素荧光特性的影响

干旱胁迫下两个烤烟品种幼苗的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著降低, NPQ 均显著升高(图 3)。与 T0 相比,喷施外源花青素处理中,两个烤烟品种幼苗的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著升高, NPQ 均显著降低,且随着外源花青素浓度的增加, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均呈现先升高再降低趋势, NPQ 均先降低再升高。与 T0 相比,T3 处理 Q96 叶绿素荧光恢复最好, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 分别增加 71.2%、52.5% 和 44.8%,

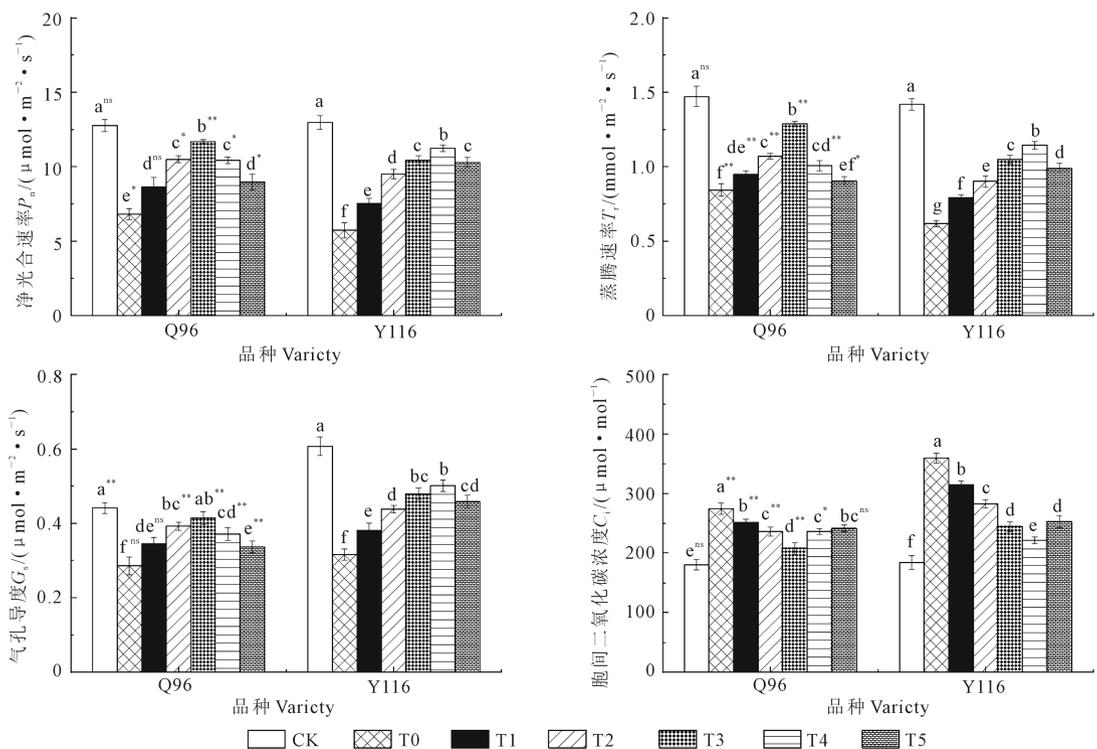


图 2 外源花青素对烤烟幼苗光合特性的影响

Fig.2 Effects of exogenous anthocyanins on photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings

NPQ 降低 24.3%;T4 处理 Y116 光合参数恢复最好, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 分别增加 96.0%、85.3%和 58.4%, NPQ 降低 38.4%。在充足供水时 Q96 的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均与 Y116 无显著差异,在单纯干旱胁迫下 Q96 的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著高于 Y116,说明干旱对 Y116 叶绿素荧光特性影响较大;在 T3 处理下 Q96 的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著高于 Y116,3 mg · L⁻¹外源花青素对 Q96 的叶绿素荧光特性提升效

果明显;在 T4 处理下 Q96 的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著低于 Y116,4 mg · L⁻¹外源花青素对 Y116 的叶绿素荧光特性提升更明显。

2.4 外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗超氧阴离子自由基产生速率的影响

干旱胁迫下两个烤烟品种幼苗的超氧阴离子自由基(O₂⁻)均显著升高(图 4)。与 T0 相比,喷施外源花青素处理中,两个烤烟品种幼苗的 O₂⁻均显著

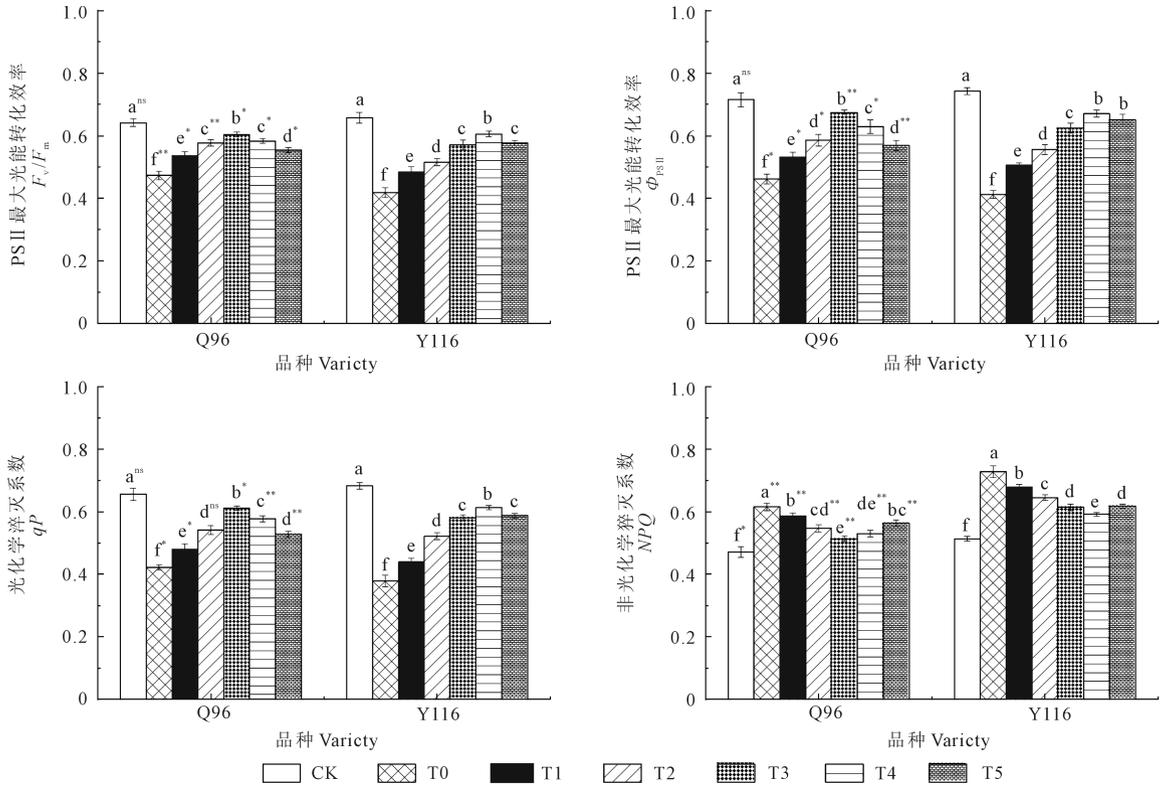


图 3 外源花青素对烤烟幼苗叶绿素荧光特性的影响

Fig.3 Effects of exogenous anthocyanins on chlorophyll fluorescence characteristics of flue-cured tobacco seedlings

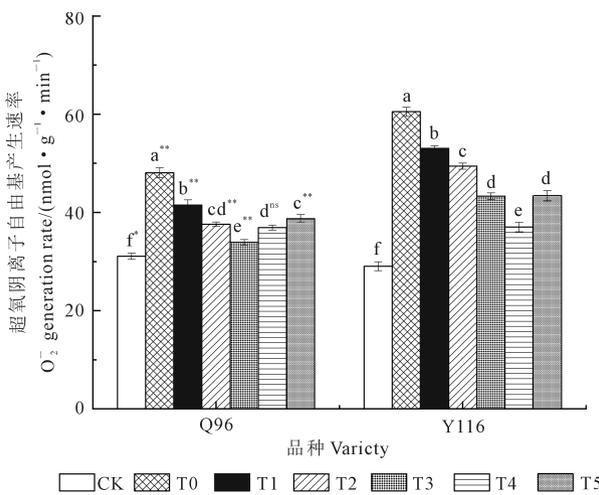


图 4 外源花青素对烤烟幼苗超氧阴离子自由基产生速率的影响

Fig.4 Effect of exogenous anthocyanins on the production rate of superoxide anion free radicals in flue-cured tobacco seedlings

降低,且随着外源花青素浓度的增加,O₂⁻均呈现先降低再升高趋势。与 T0 相比,T3 处理 Q96 的 O₂⁻下降幅度最大(29.5%);T4 处理 Y116 的 O₂⁻下降幅度最大(38.8%)。在充足供水时,Q96 的 O₂⁻显著高于 Y116,在单纯干旱胁迫下,Q96 的 O₂⁻显著低于 Y116,说明干旱对 Y116 超氧阴离子自由基产生速率影响较大;在 T3 处理下 Q96 的 O₂⁻显著低 Y116,说明 3 mg · L⁻¹外源花青素对 Q96 的超氧阴离子自由基产生速率降低效果明显;在 T4 处理下 Q96 的 O₂⁻高于 Y116,说明 4 mg · L⁻¹外源花青素对 Y116 的超氧阴离子自由基产生速率降低效果明显。

2.5 外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗 MDA 含量的影响

由图 5 可知,干旱胁迫下两个烤烟品种幼苗的 MDA 含量均显著升高。与 T0 相比,喷施外源花青

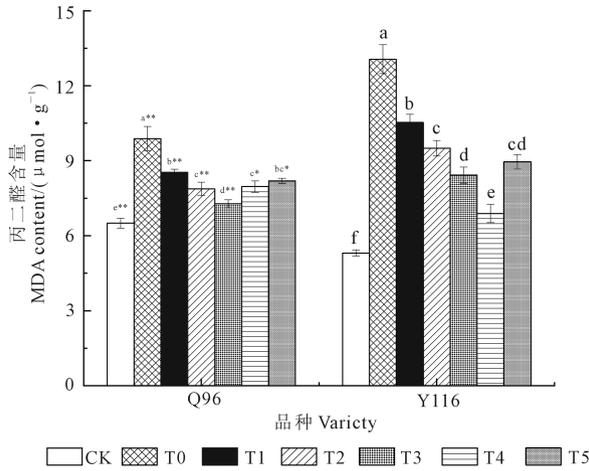


图 5 外源花青素对烤烟幼苗 MDA 含量的影响
Fig.5 Effect of exogenous anthocyanin on MDA content of flue-cured tobacco seedlings

素处理中,两个烤烟品种幼苗的 MDA 含量均显著降低,且随着外源花青素浓度的增加呈现先降低再升高趋势。与 T0 相比,T3 处理 Q96 的 MDA 含量下降幅度最大(26.3%);T4 处理 Y116 的 MDA 含量下降幅度最大(47.2%)。在充足供水时,Q96 的 MDA 含量显著高于 Y116,在单纯干旱胁迫下 Q96 的 MDA 含量显著低于 Y116,说明干旱胁迫下 Y116 的 MDA 增量较大;在 T3 处理下 Q96 的 MDA 含量显著低于 Y116,说明 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源花青素下 Q96 的 MDA 含量降低效果最明显;在 T4 处理下 Q96 的 MDA 含量显著高于 Y116,说明 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源花青素对 Y116 的 MDA 含量降低效果最明显。

2.6 外源花青素对于干旱胁迫下烤烟幼苗抗氧化酶活性的影响

由图 6 可知,干旱胁迫下 Q96 的 SOD 活性升高,POD 和 CAT 活性显著升高;Y116 的 SOD、POD 和 CAT 活性显著降低。与 T0 相比,喷施外源花青素处理中,两个烤烟品种幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性均显著升高,且随着外源花青素浓度的增加,SOD、POD 和 CAT 活性均呈现先升高再降低趋势。与 T0 相比,T3 处理 Q96 的 SOD、POD 和 CAT 活性达到最高,分别增加 48.3%、43.1% 和 31.3%;T4 处理 Y116 的 SOD、POD 和 CAT 活性达到最高,分别增加 64.6%、74.9% 和 29.7%。在充足供水时,Q96 的 SOD、POD 和 CAT 活性均低于 Y116,在单纯干旱胁迫下 Q96 的 SOD、POD 和 CAT 活性均高于 Y116,说明干旱胁迫下 Q96 的抗氧化能力较强;在 T3 处理下 Q96 的 SOD、POD 和 CAT 活性均高于 Y116,说明 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源花青素对 Q96 的抗氧化能力提升效果明显;在 T4 处理下 Q96 的 SOD 和 POD 活性均

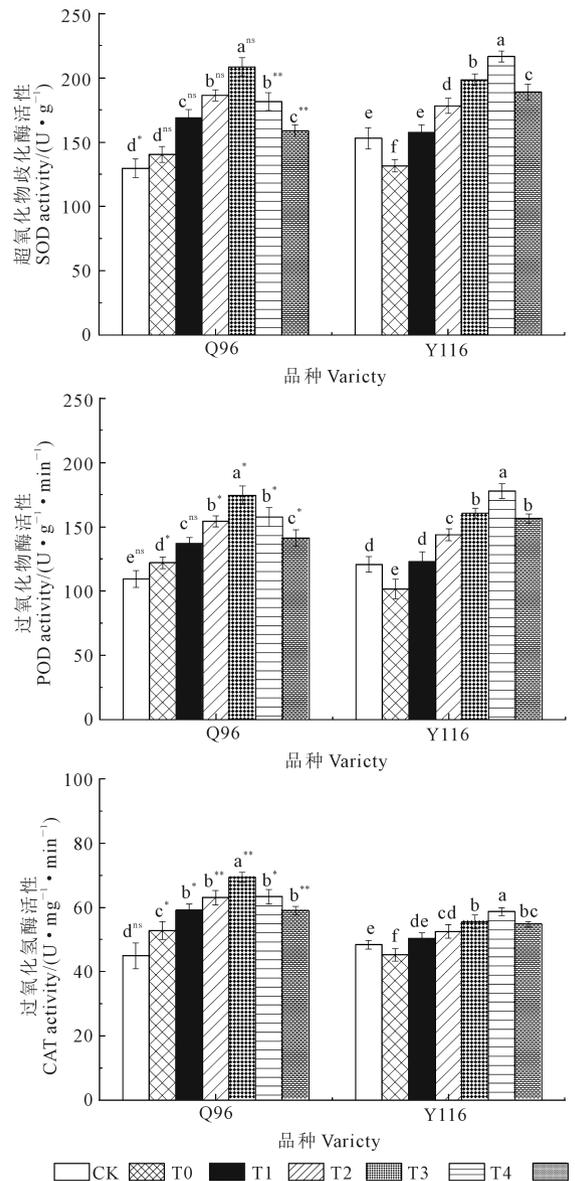


图 6 外源花青素对烤烟幼苗抗氧化酶活性的影响
Fig.6 Effect of exogenous anthocyanin on antioxidant enzyme activity of flue-cured tobacco seedlings

显著低于 Y116,说明 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源花青素对 Y116 的抗氧化能力提升更明显。

3 讨论与结论

干旱胁迫严重限制植物的正常生长发育,主要是因为干旱胁迫限制了植物的光合作用,活性氧系统平衡遭到破坏等多方面生理功能下降^[20]。本试验中随着干旱程度的加剧,两个烤烟品种的生长均受到阻碍,耐旱型烤烟品种 Q96 能通过自身调节快速适应干旱环境,自身生长受到的限制较小。叶片喷施外源花青素处理中,两个烤烟品种的生长状况明显优于单纯干旱处理,这与许灵杰等^[21]的研究结

果一致,这是因为外源花青素增强了烤烟幼苗在干旱胁迫下的光合能力,使其生长受干旱胁迫的限制变小,而两个烤烟品种的最适的外源花青素浓度不一致,这可能与品种自身的耐旱性有关。

逆境胁迫抑制光合作用的原因可以分为气孔限制和非气孔限制,当受到水分胁迫时,保护气孔细胞水势下降,致使作物叶片气孔关闭,阻碍作物对 CO_2 的吸收利用,此时光合作用减弱是气孔限制因素;当作物遭受干旱胁迫时,气孔部分或全部关闭,叶片组织内 CO_2 浓度升高,叶绿体结构受损,导致类囊体膜的解体和光系统 II (PS II) 功能遭到破坏,叶肉细胞光合性能降低,此时光合作用下降是由非气孔因素引起的^[23]。本试验表明,干旱胁迫下两个烤烟品种的 P_n 、 T_r 和 G_s 均下降,与杨文权等^[24] 在烤烟干旱胁迫上的研究结果和赖金莉等^[25] 在鼓节竹干旱胁迫研究结果一致,说明烤烟幼苗光合速率的下降是由非气孔因素导致的。喷施外源花青素处理中,两个烤烟品种的 T_r 、 P_n 和 G_s 均显著升高,而 C_i 均显著降低,这与李敏敏等^[26] 在葡萄砧木叶片缓解干旱胁迫措施方面的研究结果一致,说明烤烟幼苗喷施适宜浓度的外源花青素可以增强烤烟幼苗对光能的转化进而提高光合性能。

叶绿素荧光参数能够真实反映叶片对光能的吸收、传递、转换和耗散情况^[27]。在干旱胁迫下,烤烟叶片 F_v/F_m 和 qP 降低,是因为植物 PSII 反应中心受损,导致 PSII 反应中心的光化学活性降低,降低了光能转化效率,光合作用被限制,此时植物会激发自身保护机构,通过提高 NPQ 及时耗散过剩的光能起到保护光合机构的作用^[28]。本试验表明,干旱胁迫下两个烤烟品种的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均显著下降、 NPQ 均显著上升,这与张会慧等^[29] 在干旱胁迫下外源钙缓解烤烟 PSII 方面的研究结果一致。在干旱胁迫下喷施不同浓度的外源花青素,两个烤烟品种幼苗的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 明显上升、 NPQ 明显下降,这与刘领等^[30] 在外源褪黑素缓解烤烟干旱胁迫方面的研究结果一致,说明喷施适宜浓度的外源花青素对干旱胁迫下 PS II 反应中心起到保护作用,并有效增加光合电子传递,减轻光抑制作用,保护光合机构。

逆境环境下植物体内活性氧 (ROS) 代谢平衡受到破坏,导致 ROS 过量积累,造成膜脂过氧化,使细胞膜的正常功能受损^[31],形成过氧化产物 MDA,MDA 含量受胁迫程度和胁迫时间的影响,干旱程度越高、时间越长,MDA 含量则越高^[32]。抗氧化酶是植物细胞抵御活性氧伤害的重要保护酶^[33],当植物

遭受逆境胁迫时,通过调节自身抗氧化酶活性清除体内产生的过多自由基以起到自我保护的作用。本试验表明,干旱胁迫下两个烤烟品种幼苗的超氧阴离子自由基产生速率加快,MDA 含量上升,这与李冬等^[34] 的研究结果一致,耐旱型烤烟品种的抗氧化酶活性增加,这与王发展等^[35] 在烤烟干旱胁迫方面的研究结果一致,说明抗旱性强的品种可能会通过激发抗氧化酶基因,增强自身的抗氧化能力;而抗旱性弱的品种因调节能力不足,氧化损伤严重,抑制抗氧化性能的发,导致抗氧化酶活性下降。干旱胁迫下施用不同浓度的外源花青素能有效降低超氧阴离子自由基的产生速率,抑制 MDA 的产生,提高抗氧化酶活性,这与梁太波等^[36] 在外源甜菜碱和脯氨酸增强烤烟干旱胁迫下抗氧化代谢方面的研究结果一致,说明干旱胁迫下适宜浓度的外源花青素能够修活性氧系统的平衡,提升抗氧化酶活性,清除过量活性氧,增加烤烟幼苗的抗逆性。

干旱胁迫对不同烤烟品种的影响存在一定差异,本试验在盆栽条件下研究了在干旱胁迫下喷施外源花青素对两种不同耐旱性烤烟品种幼苗生长和生理特性的影响,外源花青素和植物激素之间可能的串扰可能在植物的干旱胁迫耐受性中起着至关重要的作用,外源花青素在干旱胁迫期间发挥作用的复杂分子系统需要进一步深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 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.
CHEN B, LI J W, WANG X D, et al. Effects of exogenous selenium on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco under drought stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2018, 54(1): 165-172.
- [2] 江洪强,邢兴华,周琴,等.外源- α -萘乙酸对花期长期干旱大豆叶片抗氧化系统的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1718-1726.
JIANG H Q, XING X H, ZHOU Q, et al. Effect of exogenous α -naphthylacetic acid on antioxidant system of soybean leaves with long-term drought at flowering stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1718-1726.
- [3] 张金政,张起源,孙国峰,等.干旱胁迫及复水对玉簪生长和光合作用的影响[J].草业学报,2014,23(1):167-176.
ZHANG J Z, ZHANG Q Y, SUN G F, et al. Effects of drought stress and re-watering on growth and photosynthesis of Hosta[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 167-176.
- [4] 张兴华,高杰,杜伟莉,等.干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(1):154-159.
ZHANG X H, GAO J, DU W L, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of maize varieties at seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 154-159.
- [5] 丁丹阳,张璐翔,朱智威,等.叶面喷施 2,4-表油菜素内酯对烟草抗旱性的影响[J].中国烟草科学,2018,39(4):50-57.

- DING D Y, ZHANG L X, ZHU Z W, et al. Effect of leaf spray 2,4-epibrassinolide on drought resistance of tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2018, 39(4): 50-57.
- [6] 木滢,齐绍武,李跃,等.干旱胁迫对烤烟的影响机理研究进展[J].作物研究,2012,26(2):193-196.
- MU Y, QI S W, LI Y, et al. Research progress on the mechanism of drought stress on flue-cured tobacco[J]. Crop Research, 2012, 26(2): 193-196.
- [7] 李冬,申洪涛,王艳芳,等.干旱胁迫下外源硫化氢对烤烟幼苗光合荧光参数及抗氧化系统的影响[J].西北植物学报,2019,39(9): 1609-1617.
- LI D, SHEN H T, WANG Y F, et al. Effects of exogenous hydrogen sulfide on photosynthetic fluorescence parameters and antioxidant system of flue-cured tobacco seedlings under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(9): 1609-1617.
- [8] 林二阁,李春光,陈孟起,等.外源一氧化氮对干旱胁迫下烤烟脂膜过氧化的抑制效应[J].中国农业科技导报,2018,20(1):55-62.
- LIN E G, LI C G, CHEN M Q, et al. Inhibitory effect of exogenous nitric oxide on lipid membrane peroxidation of flue-cured tobacco under drought stress[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(1): 55-62.
- [9] 李冬,王艳芳,申洪涛,等.外源亚精胺对渗透胁迫下烤烟幼苗生长及生理特性的影响[J].烟草科技,2019,52(9):1-9.
- LI D, WANG Y F, SHEN H T, et al. Effects of exogenous spermidine on the growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco seedlings under osmotic stress[J]. Tobacco Science and Technology, 2019, 52(9): 1-9.
- [10] 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.
- CHEN B, LI J W, WANG X D, et al. Effects of exogenous selenium on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco under drought stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2018, 54(1): 165-172.
- [11] 贺嘉豪,陈建中,徐坚强,等.外源褪黑素对烟草幼苗抗旱性生理机制的影响[J].中国农业科技导报,2020,22(2):50-57.
- HE J H, CHEN J Z, XU J Q, et al. Effects of exogenous melatonin on the physiological mechanism of drought resistance of tobacco seedlings[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(2): 50-57.
- [12] STEYN W J, WAND S J E, HOLCROFT D M, et al. Anthocyanins in vegetative tissues; a proposed unified function in photoprotection[J]. New Phytologist, 2002, 155(3): 349-361.
- [13] LANDI M, TATTINI M, GOULD K S. Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 119: 4-17.
- [14] JANSKÁ A, MARŠÍK P, ZELENKOVÁ S, et al. Cold stress and acclimation-what is important for metabolic adjustment?[J]. Plant Biology, 2010, 12(3): 395-405.
- [15] CIRILLO V, D'AMELIA V, ESPOSITO M, et al. Anthocyanins are key regulators of drought stress tolerance in tobacco[J]. Biology, 2021, 10(2): 139.
- [16] 陈婷婷,符卫蒙,余景,等.彩色稻叶片光合特征及其与抗氧化酶活性、花青素含量的关系[J].中国农业科学,2022,55(3):467-478.
- CHEN T T, FU W M, YU J, et al. Photosynthetic characteristics of colored rice leaves and their relationship with antioxidant enzyme activity and anthocyanin content[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(3): 467-478.
- [17] 王爱国,罗广华.植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J].植物生理学通讯,1990,(6):55-57.
- WANG A G, LUO G H. Quantitative relationship between superoxide radical and hydroxylamine reaction in plants[J]. Plant Physiology Communications, 1990,(6): 55-57.
- [18] 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,2000:164-261.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-261.
- [19] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006: 142-231.
- GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 142-231.
- [20] 施积炎,袁小凤,丁贵杰.作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状[J].山地农业生物学报,2000,19(3):226-233.
- SHI J Y, YUAN X F, DING G J. Research status of compensation and over-compensation effect of crop water deficit[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2000, 19(3): 226-233.
- [21] 许灵杰,杜草,郑登峰,等.模拟干旱胁迫对不同烤烟品种萌发和幼苗生长的影响[J].贵州农业科学,2014,42(9):48-51.
- XU L J, DU X G, ZHENG D F, et al. Effects of simulated drought stress on germination and seedling growth of different flue-cured tobacco varieties[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(9): 48-51.
- [22] NAZAR R, UMAR S, KHAN N A, et al. Salicylic acid supplementation improves photosynthesis and growth in mustard through changes in proline accumulation and ethylene formation under drought stress[J]. South African Journal of Botany, 2015, 98: 84-94.
- [23] 李耕,高辉远,赵斌,等.灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J].作物学报,2009,35(10):1916-1922.
- LI G, GAO H Y, ZHAO B, et al. Effect of drought stress at grain filling stage on photosystem activity of maize leaves[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(10): 1916-1922.
- [24] 杨文权,顾沐宇,寇建村,等.干旱及复水对小冠花光合及叶绿素荧光参数的影响[J].草地学报,2013,21(6):1130-1135.
- YANG W Q, GU M Y, KOU J C, et al. Effects of drought and rewatering on photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of small crown flower[J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(6): 1130-1135.
- [25] 赖金莉,张力,薛磊,等.干旱胁迫对鼓节竹光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2019,48(5): 567-575.
- LAI J L, ZHANG L, XUE L, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of Bambusa bungeana[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 48(5): 567-575.
- [26] 李敏敏,袁军伟,韩斌,等.干旱和复水对两种葡萄砧木叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(1): 221-226.

- LI M M, YUAN J W, HAN B, et al. Effects of drought and rehydration on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of two grape rootstocks [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 221-226.
- [27] 魏清江,冯芳芳,马张正,等.干旱复水对柑橘幼苗叶片光合、叶绿素荧光和根系构型的影响[J].*应用生态学报*,2018,29(8):2485-2492.
- WEI Q J, FENG F F, MA Z Z, et al. Effects of drought and rehydration on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and root architecture of citrus seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2485-2492.
- [28] 张明如,温国胜,张瑾,等.火炬树雌雄母株克隆生长差异及其光合荧光日变化[J].*生态学报*,2012,32(2):528-537.
- ZHANG M R, WEN G S, ZHANG J, et al. The difference of clonal growth between male and female plants of *Rhus typhina* and their diurnal variation of photosynthetic fluorescence[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 32(2): 528-537.
- [29] 张会慧,张秀丽,许楠,等.外源钙对干旱胁迫下烤烟幼苗光系统II功能的影响[J].*应用生态学报*,2011,22(5):1195-1200.
- ZHANG H H, ZHANG X L, XU N, et al. Effects of exogenous CaCl_2 on the functions of flue-cured tobacco seedlings leaf photosystem II under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1195-1200.
- [30] 刘颖,李冬,马宜林,等.外源褪黑素对干旱胁迫下烤烟幼苗生长的缓解效应与生理机制研究[J].*草业学报*,2019,28(8):95-105.
- LIU L, LI D, MA Y L, et al. Alleviation of drought stress and the physiological mechanisms in tobacco seedlings treated with exogenous melatonin[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(8): 95-105.
- [31] TALAAT N B, SHAWKY B T, IBRAHIM A S. Alleviation of drought-induced oxidative stress in maize (*Zea mays* L.) plants by dual application of 24-epibrassinolide and spermine [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 113: 47-58.
- [32] LIU E, ZONG H, GUO Z F, et al. Effects of drought, salt and chilling stresses on proline accumulation in shoot of rice seedlings [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, 8(3): 235-238.
- [33] 袁有波,李继新,丁福章,等.不同干旱胁迫对烟草叶片保护酶活性的影响[J].*中国烟草科学*,2009,30(5):10-13.
- YUAN Y B, LI J X, DING F Z, et al. Effects of different drought stress on protective enzyme activities in tobacco leaves [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2009, 30(5): 10-13.
- [34] 李冬,王艳芳,申洪涛,等.外源 MT 和 EBR 对干旱胁迫下烤烟幼苗的缓解效应[J].*中国烟草学报*,2019,25(5):77-85.
- LI D, WANG Y F, SHEN H T, et al. Alleviating effect of exogenous MT and EBR on tobacco seedlings under drought stress [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2019, 25(5): 77-85.
- [35] 王发展,金伊楠,李子玮,等.干旱胁迫下外源 ALA 对烤烟幼苗光合特性和抗氧化能力的影响[J].*中国烟草科学*,2020,41(1):22-29.
- WANG F Z, JIN Y N, LI Z W, et al. Effects of exogenous ALA (5-aminolevulinic acid) on photosynthesis and antioxidant system of flue-cured tobacco seedlings under drought stress [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2020, 41(1): 22-29.
- [36] 梁太波,张景玲,田雷,等.干旱胁迫下外源甜菜碱和脯氨酸对烤烟抗氧化代谢的影响[J].*烟草科技*,2013,(2):68-71.
- LIANG T B, ZHANG J L, TIAN L, et al. Effects of exogenous betaine and proline on antioxidant metabolism of flue-cured tobacco under drought stress [J]. *Tobacco Science and Technology*, 2013, (2): 68-71.
-
- (上接第 55 页)
- [26] 陈思杰,李金,杜娟,等.枸杞根系内生真菌的染色方法[J].*河北大学学报(自然科学版)*,2021,41(4):406-411.
- CHEN S J, LI J, DU J, et al. Staining methods on endophytic fungi in *Lycium barbarum* roots [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(4): 406-411.
- [27] MCGONIGLE T P, MILLER M H, EVANS D G, et al. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *New Phytologist*, 1990, 115(3): 495-501.
- [28] 朱志明,许兴,毛桂莲.不同玉米自交系幼苗对水分胁迫的响应及其耐旱性评价[J].*干旱地区农业研究*,2018,36(2):176-185.
- ZHU Z M, XU X, MAO G L. Response of different maize inbred lines seedlings to water stress and drought tolerance evaluation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 176-185.
- [29] 朴明鑫,张春宵,杨书华,等.69 份玉米自交系的苗期耐旱性分析[J].*吉林农业科学*,2011,36(3):13-17.
- PIAO M X, ZHANG C X, YANG S H, et al. Analysis of drought tolerance of sixty-nine maize inbred lines at seeding stage [J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2011, 36(3): 13-17.
- [30] 朱娟娟,马海军,李敏,等.基于最小数据集的贺兰山东麓葡萄酒园土壤肥力评价[J].*干旱地区农业研究*,2020,38(3):172-180,187.
- ZHU J J, MA H J, LI M, et al. Comprehensive evaluation of vineyards soil fertility in the eastern foothills of Helan Mountain based on the minimum data set [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3): 172-180, 187.
- [31] 张文英,蒿若超,汪媛媛,等.内生真菌印度梨形孢诱导提高玉米苗期抗旱性研究初探[J].*玉米科学*,2013,21(5):127-130.
- ZHANG W Y, HAO R C, WANG A A, et al. Conferring drought tolerance in maize seedling by endophytic fungus *Piriformospora indica* [J]. *Journal of Maize Science*, 2013, 21(5): 127-130.
- [32] 胡美玲,郑勇,孙翔,等.内生真菌促进玉米幼苗的抗旱性研究[J].*菌物学报*,2017,36(11):1556-1565.
- HU M L, ZHENG Y, SUN X, et al. Effects of endophytic fungi on drought resistance of maize seedlings [J]. *Mycosystema*, 2017, 36(11): 1556-1565.