

高温干旱复合胁迫对花生幼苗生理指标的影响

李聪聪¹, 李乃光², 吴正锋³

(1. 聊城大学 东昌学院, 山东 聊城, 252000;

2. 聊城市东昌府区郑家镇政府, 山东 聊城, 252000;

3. 山东省花生研究所/国家花生工程技术研究中心, 山东 青岛, 266100)

摘要:为探讨高温和干旱复合胁迫下的花生幼苗对逆境的响应机制,以抗逆性存在差异的花生品种豫花9719和豫花9326为试验材料,对其幼苗进行昼夜温度为45℃/25℃、土壤含水量为35%~40%左右的高温 and 干旱复合胁迫处理,研究复合胁迫对花生幼苗生长及生理特性的影响。结果表明:胁迫条件下,豫花9719的株高和干重分别比对照组低44.3%和30.2%,差异达极显著水平;含水量、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素、花青素的含量均低于对照,其中叶绿素a的含量低4.88%,差异达显著水平,花青素含量低18.14%,差异达极显著水平;PRI、PI、Gs、Pn值分别比其对照组低12%、50.31%、75.2%、72.3%,差异均达极显著水平;MDA含量和相对电导率分别比对照组高93.1%和29.93%,差异均达显著水平;可溶性蛋白和类黄酮含量分别比对照组高104.5%和41.00%,差异均达显著水平;SOD和CAT活性分别比对照组低0.91%和3.29%,差异不显著。豫花9326的株高比其对照组低33.6%,差异达极显著水平,干重降幅不显著;含水量、类胡萝卜素、花青素的含量均比对照组低,但差异均不显著;叶绿素a和叶绿素b的含量分别比对照组高19.44%和3.39%,其中叶绿素a差异达极显著水平;PRI、PI、Gs、Pn值均比对照低,差异均不显著;MDA含量和相对电导率均比对照组高,但差异均不显著;可溶性蛋白和类黄酮含量分别比对照组高271.33%和48.96%,差异均达极显著水平;SOD和CAT活性分别比对照组高70.11%和68.8%,增幅均达显著水平。推测豫花9326对高温和干旱复合胁迫的抗性较高,主要与其较为强大的抗氧化防御系统及光合系统有关。

关键词:花生;高温和干旱;生理指标;光化学反射指数;光化学指数

中图分类号:S565.2

文献标识码:A

文章编号:1007-9084(2021)05-0906-08

Effects of high temperature and drought combined stress on physiological indexes of seedlings of different peanut varieties

LI Cong-cong¹, LI Nai-guang², WU Zheng-feng³

(1. Dongchang College, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China; 2. Government of Zhengjia Town, Dongchangfu District, Liaocheng 252000, China; 3. Shandong Peanut Research Institute/National Peanut Engineering Technology Research Center, Qingdao 266100, China)

Abstract: To explore the response mechanism of peanut seedlings to combined stress of high temperature and drought, the peanut varieties Yuhua 9719 and Yuhua 9326, with different stress resistance, were used as materials, and the seedlings were subjected to combined stress with temperature of 45℃/25℃ (day/night), and 35%–40% of water content in soil. Their seedling growth and physiological characteristics indexes under compound stress were investigated. The results showed that: (1) Compared with the control group, the plant height and dry weight of Yuhua 9719 decreased by 44.3% and 30.2% under combined stress, respectively, and the difference was extremely significant. The contents of water content, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid and anthocyanin were all lower than those of the control group. Among them, the reduction of chlorophyll a content and anthocyanin content reached significant and highly significant level respectively. The values of PRI, PI, GS and Pn were 12%, 50.31%,

收稿日期:2020-07-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1000906);山东省自然科学基金项目(ZR2016CM07);聊城大学东昌学院科技计划项目(2020LG004)

作者简介:李聪聪(1986–),女,硕士,讲师,研究方向为植物组织培养及植物生理,E-mail: licongcong0622@163.com

* 通讯作者:吴正锋(1976–),男,博士,山东省花生研究所副研究员,主要从事花生栽培生理研究,E-mail: wzf326@126.com

75.2% and 72.3% lower than those in the control group, respectively, and the differences were extremely significant. MDA content and relative conductivity were 93.1% and 29.93% higher than those in the control group respectively, and the differences were significant. The contents of soluble protein and flavonoids were 104.5% and 41.00% higher than those in the control group respectively, and the differences were significant. SOD and CAT activities were 0.91% and 3.29% lower than those in the control group respectively, and the difference was not significant. (2) The plant height of Yuhua 9326 in the treatment group was 33.6% lower than that of control, the difference reached a very significant level, and the dry weight decrease was not significant; the contents of water content, carotenoid and anthocyanin were all lower than those of control group, but the difference was not significant; the contents of chlorophyll a and chlorophyll b were 19.44% and 3.4% higher than that of control group, respectively. The difference of chlorophyll a reached a significant level in 39%, the PRI, PI, Gs and Pn value was lower than the control, the difference was not significant. The MDA content and relative conductivity were higher than the control group, but the difference was not significant, and the content of soluble protein and flavonoid was 271.33% and 48.96% higher than the control group, respectively, the difference reached extremely significant level. The activities of SOD and CAT were 70.11% and 68.8% higher than the control group respectively, the increase reached significant level. It was concluded that, compared the statistics of experiment, Yuhua 9326 shows the better growth of seedling than Yuhua 9719 under heat and drought stress, because it is mainly related to the stronger antioxidant defence system and photosynthetic system of Yuhua 9326.

Key words: peanut; high temperature and drought; physiological indicators; photochemical reflectance index (PRI); photochemical index (PI)

全球变暖是人们一直关注的问题,政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估预测中指出,到21世纪末地表温度最高可升高4.0℃^[1]。大量研究表明,全球变暖导致多种极端气候的产生,对多数农作物的影响是负面的,致使品质、产量下降^[2]。随着全球变暖趋势的加剧,高温和干旱同时发生的几率也在逐年增加^[3]。高温能够破坏植物叶片的超微结构^[4];引起膜脂过氧化;大量累积丙二醛(MDA)^[5];抑制抗氧化酶系统^[6,7];降低光合效率^[8,9]等进而导致农作物减产。干旱则严重影响农作物的根系生长、作物形态、光合生理和产量形成^[10]。统计表明,气温升高使我国主要作物持续减产,水资源亏缺和降水减少致使我国土地干旱面积不断增加^[11]。高温、干旱俨然已经发展成为制约全球农作物产量和经济发展的重要因素。

花生(*Arachis hypogaea* L.)是世界第四大油料作物,也是我国重要的经济作物和油料作物之一^[12]。大力发展花生产业对提高农民收入,保障我国食用油安全具有重要的意义。高温、干旱同样成为限制花生种植和生产的主要非生物因素,致使花生的萌芽率、产量和质量下降^[13]。关于干旱胁迫对花生生理、生长和产量的影响已有较多研究^[14-16],而高温胁迫下花生生理表现的相关研究较少^[17],高温和干旱复合胁迫方面研究的更少。高温和干旱复合胁迫

对植物的影响又不能简单地归结为高温、干旱单独对植物影响的总和,它会激发植物全新的防御模式^[18]。鉴于此,本研究以花生品种豫花9719和豫花9326为试验材料,探讨在高温和干旱复合胁迫条件下,两个品种幼苗在生物量、色素含量、活性氧清除以及光合能力等方面的生理变化,从理论上揭示花生幼苗在高温和干旱复合胁迫逆境下的响应机制,丰富花生的生理研究数据。并通过对高温和干旱复合胁迫下花生幼苗生理生化指标的分析研究,为耐高温和干旱花生种质的遗传改良和栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

花生品种为豫花9719和豫花9326,由山东省花生研究所提供。在前期试验中,豫花9719对高温和干旱敏感,豫花9326对高温和干旱不敏感。

1.2 方法

1.2.1 幼苗培养 选取大小一致的上口为8 cm²的方形塑料盒,标号后称重(W1)并记录,在每个盒内装入相同重量(W2)的营养土,每个盒内加入相同体积的水。分别选取大小一致、籽粒饱满的两个花生品种的种子,播种在盛有营养土的方形塑料盒中,每盒播种4粒,置于28℃/25℃(昼/夜),光照12 h·d⁻¹

的培养室培养,每5 d加一次 Hoagland 营养液 50 mL,培养期间注意及时加等量的水。待第一对真叶展开时定苗,每盒留2株,保留的花生苗整体长势一致,然后进行高温和干旱复合胁迫处理。

1.2.2 幼苗处理 对照组:幼苗继续在 28℃/25℃ (昼/夜),光照 12 h·d⁻¹ 的培养室培养。称量每个方形塑料盒带土带苗的重量(W3),根据 W1、W2、W3 计算土壤含水量,含水量=(W3-W1-W2)/(W3-W1)×100%,使土壤保持湿润,调整含水量为 70%~75%。

高温和干旱复合胁迫处理组:将幼苗置于 45℃/25℃ (昼/夜),光照 12 h·d⁻¹ 的培养室培养,调整土壤含水量保持在 35%~40% (采用整体称重法对塑料盒内的土壤含水量进行监测,实时补水调控至设定水平)。

对照组及处理组除了幼苗的培养温度和土壤含水量不同外,其他条件均保持相同。

处理 10 d 后取样,测定对照组、高温和干旱复合胁迫处理组花生幼苗的各项指标。

1.3 项目测定

1.3.1 生长指标的测定 株高测量:选取 10 株长势一致的植株用直尺测量从根基至叶片最上部的长度;干重:将测量完株高的 10 株幼苗地上部分进行 105℃ 杀青,80℃ 烘干 48 h 后称重。

1.3.2 生理指标的测定 用 Unispec 光谱仪测定花生幼苗第一对真叶的反射光谱,根据得到的反射光谱值计算以下指标的相对含量:根据 Sims 和 Gamon^[19] 的方法计算花青素和叶绿素;根据 Styliniski 等^[20] 方法计算类胡萝卜素;根据 Sims 和 Amon^[21] 方法计算

叶片相对含水量;根据 Penuelas 等^[22] 方法计算光化学反射指数 PRI 值。用 PEA Pocet 叶绿素荧光仪测定叶片(暗处理 20 min)的光化学指数(PI)。用 CI-RAS-2F 便携式光合测定仪测定花生幼苗第一对真叶的净光合速率(Pn)和气孔导度(Gs)。以上各指标每组选取 5 片进行测定。

根据 Aebi^[23] 方法测定花生幼苗的 CAT 活性;根据邹琦^[24] 方法测定可溶性蛋白含量、MDA 含量以及 SOD 活性;根据陈建勋^[25] 的方法用 DDS-307 电导率仪测定相对电导率;根据 Caldwell 等^[26] 方法测定类黄酮含量。

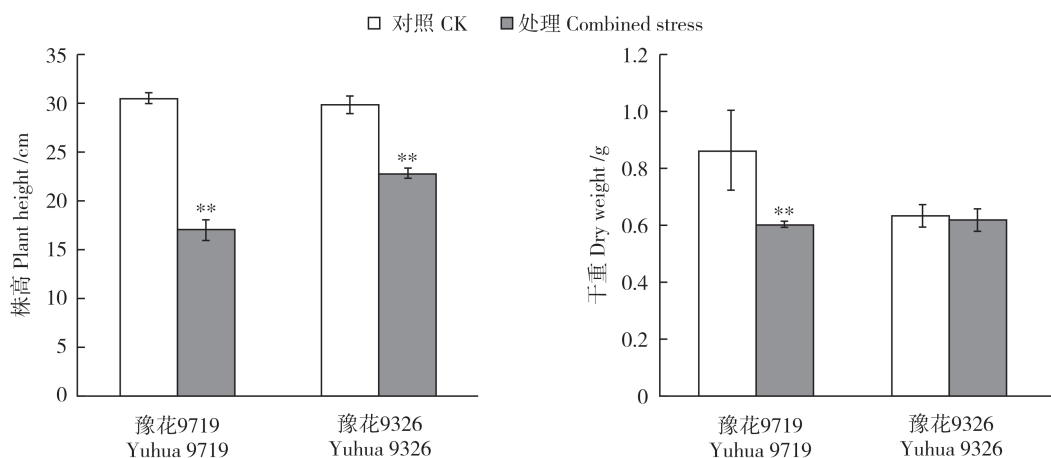
1.4 数据分析

采用 Excel 和 IBM SPSS Statistics 软件进行试验数据处理、作图及差异性分析,每种处理分 3 组,即 3 次重复,数据取重复测定的平均值。

2 结果与分析

2.1 高温干旱复合胁迫对幼苗株高及干重的影响

作物的株高和干重等生长指标可以直接反映植株的生长情况。从图 1 可以看出,高温和干旱复合胁迫处理组豫花 9719 和豫花 9326 的株高分别比各自的对照组低 44.3% 和 33.6%,与对照组间的差异均达极显著水平;干重分别比相应对照组低 30.2% 和 1.6%,豫花 9719 的干重与对照组间差异达极显著水平,而豫花 9326 与对照组间无显著差异。可见,高温和干旱复合胁迫处理极大地抑制了豫花 9719 和豫花 9326 株高生长,对豫花 9719 干物质量的积累影响显著,对豫花 9326 干物质量的积累影响甚微。



注:**表示与对照差异极显著($P < 0.01$)

Note: ** indicate extremely significant ($P < 0.01$) to control

图1 高温和干旱复合胁迫处理对花生幼苗株高和干重的影响

Fig. 1 Effects of high temperature and drought combined stress treatment on plant height and dry weight of peanut seedlings

2.2 高温干旱复合胁迫对幼苗叶片色素含量的影响

叶绿素、类胡萝卜素和花青素是三种主要的植物色素。其中叶绿素和类胡萝卜素在光的吸收、传递和转化过程中起着非常重要的作用,其含量的高低直接影响光合效率。而花青素则能提高植物抗氧化能力和增强植物抗逆性^[27]。

由表1可知,高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719花生幼苗叶片中叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和花青素的含量分别比其对照组低4.88%、3.13%、1.09%和18.14%,其中,叶绿素a的降幅达显著水平,花青素的降幅达极显著水平。而豫花9326花生幼苗在高温、干旱的条件下,叶绿素a、叶绿素b的含量分别比其对照组高19.44%和3.39%,其中,叶绿素a的增幅达极显著水平;胡萝卜素、花青素含量比其对照组分别低7.07%和7.92%,均无显著差异。可见高温和干旱复合胁迫抑制了豫花9719花生幼苗中叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和花青素的合成,而对豫花9326的叶绿素a和叶绿素b的合成反而有促进作用。

2.3 高温和干旱复合胁迫对花生幼苗叶片PRI和PI的影响

PRI(光化学反射植被指数)与Pn(净光合速率)存在较高的正相关关系^[28-30],能够反应光合作用的强弱。由表1可知,高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719的PRI值比其对照低组12%,降幅达极显著水平;豫花9326的PRI值有所降低,但仅比其对照组低1.59%,差异不显著。PI是指以吸收光能为基

础的性能指数,即综合活力指数,PI的高低能反映PSII功能的强弱。由表1可知,复合胁迫处理下两品种PI值均降低,与相应对照相比,豫花9719和降低50.31%,降幅达极显著水平,豫花9326则降低10.74%,差异不显著。高温和干旱有可能导致豫花9719的PSII功能受损,进而导致豫花9719的PI值大幅降低。

2.4 高温和干旱复合胁迫对花生幼苗叶片Gs和Pn的影响

气孔是植物与外界环境进行水分和气体交换的主要门户。Gs(气孔导度)代表的是气孔的张开程度,可直接影响植物的呼吸作用、蒸腾作用及光合作用。气孔的闭合受光照、温度、CO₂、空气湿度、水分胁迫、及内在因子的综合影响^[31]。植物可以通过调整气孔导度来适应高温、干旱等逆境。由表1可知,高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719的Gs比其对照组低75.2%,降幅达极显著水平;豫花9326的Gs比其对照组低3.95%,降幅不显著。高温和干旱的复合逆境能够引起花生关闭气孔的应激反应,对豫花9719抑制程度远高于豫花9326。

Pn(净光合速率)是衡量植物光合能力的重要参数^[32]。由表1可知,复合胁迫处理组豫花9719的Pn值比其对照组低72.3%,降幅达极显著水平;处理组豫花9326的Pn值比其对照组低21.57%,降幅不显著。

2.5 高温和干旱复合胁迫对花生幼苗叶片可溶性蛋白和含水量的影响

表1 高温和干旱复合胁迫处理对光合作用相关指标的影响

Table 1 Effects of high temperature and drought combined stress on photosynthesis related indexes

指标 Index	豫花9719 Yuhua 9719		豫花9326 Yuhua 9326	
	对照 CK	复合胁迫 Combined stress	对照 CK	复合胁迫 Combined stress
叶绿素a Chl a content	0.41±0.02	0.39±0.02*	0.36±0.04	0.43±0.01**
叶绿素b Chl b content	0.00064±0.00002	0.00062±0.00001	0.00059±0.00009	0.00061±0.00006
类胡萝卜素 Carotenoid content	18.3±0.5	18.1±0.9	18.4±1.8	17.1±1.0
花青素 Anthocyanidin content	7.00±0.32	5.73±0.33**	6.31±1.13	5.81±0.38
光化学反射指数 PRI	-0.175±0.007	-0.196±0.003**	-0.189±0.019	-0.192±0.012
光化学指数 PI	7.97±0.14	3.96±1.11**	5.12±0.41	4.57±0.30
Gs/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	63.3±4.8	15.7±2.1**	60.7±2.64	58.3±4.58
Pn/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	6.57±0.47	1.82±0.36**	5.47±0.51	4.29±0.35

注: *和**分别表示与对照差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)

Note: * and ** indicate significant difference ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) to control respectively

可溶性蛋白是植物体内的重要渗透调节物质和营养物质,对细胞起保护作用,降低逆境对植株带来的伤害。由表2可知,高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719和豫花9326叶片中的可溶性蛋白含量分别比各自对照组高104.5%和271.33%,增幅分别达显著和极显著水平。可见,高温、干旱促进了豫花9719和豫花9326幼苗中可溶性蛋白的合成。而豫花9719和豫花9326幼苗叶片含水量分别比各自对照组低0.1%和0.05%,差异均不显著。

2.6 高温和干旱复合胁迫对幼苗MDA和相对电导率的影响

MDA是膜脂过氧化作用的主要产物之一,是判断膜脂过氧化的重要指标。由表3可知,在高温、干旱条件下,豫花9719和豫花9326幼苗中MDA含量均比其对照组高。豫花9719高93.1%,增幅达显著水平;豫花9326高5.53%,增幅不显著。由此可见,复合胁迫条件下,豫花9719膜脂质高度过氧化,MDA大量累积,而豫花9326的抗氧化能力较强,MDA累积较少。

植物叶片的相对电导率是一项反映细胞膜透性的基本指标。在逆境胁迫下,一般植物细胞膜的

透性变大,电导率升高。高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719幼苗的相对电导率比对照组高29.93%,增幅达显著水平;豫花9326幼苗的相对电导率比对照组高6.29%,差异不显著。

2.7 高温和干旱复合胁迫对幼苗类黄酮含量的影响

类黄酮作为一类重要的植物次生代谢产物,在植物生长发育、生理生化代谢、应激抗逆反应以及抗性物质鉴别等方面扮演着重要角色^[33]。由表3可知,高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719和豫花9326的幼苗中类黄酮含量分别比各自对照组高41.00%和48.96%,增幅分别达显著和极显著水平。

2.8 高温和干旱复合胁迫对SOD和CAT的影响

SOD和CAT能够清除活性氧(ROS),维持细胞正常代谢。从表3可以看出,高温和干旱复合胁迫处理组豫花9719幼苗的SOD和CAT活性分别比对照组低0.91%和3.29%,差异均不显著。高温和干旱复合胁迫处理组豫花9326幼苗的SOD和CAT活性分别比对照组高70.11%和68.8%,增幅均达显著水平,可见高温、干旱显著促进了豫花9326幼苗中SOD和CAT的活性。

表2 高温和干旱复合胁迫处理对可溶性蛋白和含水量的影响

Table 2 Effects of high temperature and drought combined stress on the content of soluble protein and water

指标 Index	豫花9719 Yuhua9719		豫花9326 Yuhua 9326	
	对照	复合胁迫	对照	复合胁迫
	CK	Combined stress	CK	Combined stress
含水量/% Moisture content	1.905±0.007	1.903±0.010	1.899±0.003	1.898±0.006
可溶性蛋白 Soluble protein content /(mg·g ⁻¹ FW)	29.1±4.8	59.5±7.9*	29.3±5.2	108.8±15.6**

注:*和**分别表示与对照差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)

Note: * and ** indicate significant difference ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) to control respectively

表3 高温和干旱复合胁迫处理对活性氧代谢相关指标的影响

Table 3 Effects of high temperature and drought combined stress on ROS metabolism indexes

指标 Index	豫花9719 Yuhua9719		豫花9326 Yuhua9326	
	对照	复合胁迫	对照	复合胁迫
	CK	Combined stress	CK	Combined stress
类黄酮 Flavonoid content /(A330·g ⁻¹ FW)	11.61±1.82	16.37±1.91*	8.15±0.78	12.14±0.63**
MDA /(nmol·g ⁻¹ FW)	2.03±0.19	3.92±0.96*	3.80±0.43	4.01±0.84
相对电导率 Relative conductivity /%	13.7±0.9	17.8±1.7*	14.3±0.6	15.2±1.4
SOD /(U·g ⁻¹ FW)	33.0±1.1	32.7±5.3	37.8±4.9	64.3±7.5*
CAT /(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	42.6±3.7	41.2±4.1	51.6±5.5	87.1±8.3*

注:*和**分别表示与对照差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)

Note: * and ** indicate significant difference ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) to control respectively

3 结论与讨论

豫花 9719 和豫花 9326 是本课题组在前期试验种植中筛选到的对高温和干旱有不同响应的两个花生品种,其中,豫花 9719 对高温和干旱敏感,豫花 9326 对高温和干旱不敏感。在本研究中发现,高温和干旱复合胁迫处理极显著地抑制了豫花 9719 的株高生长和干物质量的积累,对于豫花 9326 的影响,只是抑制其株高生长,改变了植株形态,但对其干物质量的积累几乎没有影响。本研究得出的两种花生品种的生长指标差异与前期种植观察结果相一致,即豫花 9719 为高温和干旱敏感型品种,豫花 9326 为高温和干旱抗性品种。

植物受到非生物逆境时,会启动自身的防御系统来调控代谢途径,比如提高有益代谢物质可溶性蛋白的含量。在逆境胁迫下,植物体内一些正常蛋白质合成受到抑制的同时也会有一些新的蛋白质即胁迫蛋白的产生,总体使得可溶性蛋白质的含量增加^[34]。可溶性蛋白会给植物细胞内的水分子提供结合基质,以增加细胞中束缚水的含量,提高细胞保水力,起到了防脱水的作用^[35]。在高温和干旱复合胁迫的环境下,豫花 9719 和豫花 9326 花生幼苗中的可溶性蛋白分别呈现显著和极显著的增加,以此抵御逆境,其结果与多数植物的逆境胁迫的研究相同^[17,36]。本研究中,高温和干旱复合胁迫处理后的豫花 9719 和豫花 9326 花生幼苗中的相对含水量均未发生显著性降低,这可能与两种花生品种中可溶性蛋白等渗透调节物质的增加有关。花青素可以增强植物对生物胁迫和多种非生物胁迫的抵抗力^[27]。在转 *Del* 基因烟草耐盐性^[37],转 *T2-Ros1* 基因烟草的耐低温性^[38]等的研究中均发现花青素高量表达可以显著增加植株抵御逆境胁迫的能力。本研究中,在高温和干旱的复合胁迫条件下,豫花 9719 花青素含量极显著降低,不利于其对逆境的抵御。在逆境胁迫中,多数植物体内 ROS(活性氧)的含量会增加,打破了植物体内 ROS 产生和清除的动态平衡。为了抵御逆境,植物在进化过程中也形成了由 SOD(超氧化物歧化酶)和 CAT(过氧化氢酶)等组成的抗氧化酶保护系统,可以有效清除 ROS,提高植物抗逆性^[39]。在高温和干旱复合胁迫处理下,豫花 9719 的 SOD 和 CAT 降低,但不显著,MDA 含量和相对电导率显著增加,说明豫花 9719 膜脂高度过氧化导致细胞膜透性增加,其 ROS 的生产能力高于清除能力;豫花 9326 的 SOD 和 CAT 与对照相比显著增高,MDA 含量和相对电导率均无显著增加,ROS 的

生产和消除处于相对稳态。豫花 9326 的类黄酮物质在高温、干旱逆境下极显著增加,在抗氧化过程中也发挥了极其重要的作用。豫花 9326 可以通过较强的抗氧化防御系统抵御逆境,此结果与李玲玲^[36]的研究相一致。

高温、干旱均可降低植物的光合作用。本研究中,在高温和干旱复合胁迫下,豫花 9719 的净光合速率 P_n 极显著下降,与高焕晔^[40]的研究结果相一致。豫花 9326 的净光合速率 P_n 也有所下降,但不显著,其 PRI 和 PI 也均下降不显著,说明豫花 9326 PSII 的光能吸收和传递功能受影响不大。高温和干旱对豫花 9326 的 G_s 的抑制作用也较小,这可能与豫花 9326 可溶性蛋白的极显著增加有关,可溶性蛋白发挥了极强的渗透调节能力,使得植株在高温、干旱的逆境中保持了较稳定的水分,没有形成环境水分下降,能够进行正常的气体交换,维持较为平衡的呼吸作用和光合作用。在高温、干旱逆境下,豫花 9719 的 G_s 显著下降和可溶性蛋白显著增加,可能是其叶片含水量无显著变化的主要原因。 G_s 显著下降影响蒸腾作用、呼吸作用和光合作用之间的平衡,进而导致豫花 9719 的 P_n 极显著下降。在本研究中,高温和干旱复合胁迫处理组的豫花 9719 和豫花 9326 的叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量与对照组相比,均无显著差异。豫花 9719 和豫花 9326 叶绿素 a 含量的变化差异极大。高温、干旱条件下豫花 9719 叶绿素 a 含量比其对照组显著降低,高温和干旱的复合胁迫条件有可能破坏了豫花 9719 的叶绿体结构或是抑制了叶绿素的合成,从而影响其光合速率。而高温和干旱的复合胁迫处理组豫花 9326 的叶绿素 a 含量比其对照组极显著增高,逆境胁迫中叶绿素含量增加,此研究结果与高焕晔^[40]的水稻实验相一致。

本研究中,在高温和干旱复合胁迫条件下,豫花 9326 幼苗的 SOD 和 CAT 活性分别比豫花 9719 高 49.14% 和 52.7%;豫花 9326 幼苗的光合生理指标 PRI、PI、 G_s 、 P_n 均比豫花 9719 高,其中 G_s 值高 73.07%, P_n 值高 57.58%。由此可见,豫花 9326 对高温和干旱复合胁迫抗性较豫花 9719 高,主要得益于其较为强大的抗氧化防御系统及光合系统。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Dahe Q, Plattner G K. Climate change 2013—The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK:

- Cambridge University Press, 2013.
- [2] 张丽霞, 尹季显. 气候变暖对农作物物候、光合生理特性和产量影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(29): 201–203, 218. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2015.29.072.
- [3] 肖万欣, 王延波, 谢甫绶, 等. 高温和干旱胁迫下, 植物叶片光合系统变化、气孔运动及其调控研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2012(6): 29–33. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1728.2012.06.008.
- [4] 付景, 孙宁宁, 刘天学, 等. 高温胁迫对玉米形态、叶片结构及其产量的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(1): 46–53.
- [5] 张瑜, 严琳玲, 罗小燕, 等. 高温胁迫下蝴蝶豆的生理响应和耐热性评价[J]. 种子, 2017, 36(11): 44–48.
- [6] 陈炼, 邬婷, 陈燊, 等. 温度对福寿螺抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响[J]. 动物学杂志, 2019, 54(5): 727–735.
- [7] 顾帆, 季梦成, 顾翠花, 等. 高温干旱胁迫对黄薇抗氧化防御系统的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 894–901.
- [8] 程邵丽. 温度对白及光合特性及生理生化指标的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [9] 王彬, 田正凤, 应彬彬, 等. 高温胁迫对樟树光合性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(1): 47–53.
- [10] 杨阳, 申双和, 马绎皓, 等. 干旱对作物生长的影响机制及抗旱技术的研究进展[J]. 科技通报, 2020, 36(01): 8–15.
- [11] IPCC. Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge & New York: Cambridge university Press, 2014.
- [12] 孙爱清, 张杰道, 万勇善, 等. 花生干旱胁迫响应基因的数字表达谱分析[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 1045–1053.
- [13] 张立宁. 当前夏播花生缺苗原因分析[J]. 农药市场信息, 2017(18): 53.
- [14] Bhatnagar-Mathur P, Devi M J, Reddy D S, et al. Stress-inducible expression of At DREB1A in transgenic peanut (*Arachis hypogaea* L.) increases transpiration efficiency under water-limiting conditions [J]. Plant Cell Rep, 2007, 26(12): 2071–2082. DOI: 10.1007/s00299-007-0406-8.
- [15] Govind G, Harshavardhan V T, Patricia J K, et al. Identification and functional validation of a unique set of drought induced genes preferentially expressed in response to gradual water stress in peanut [J]. Mol Genet Genomics, 2009, 281(6): 591–605. DOI: 10.1007/s00438-009-0432-z.
- [16] 张甜, 戴常青, 王铭伦, 等. 干旱胁迫下冠菌素对花生幼苗叶片光合特性及内源激素含量的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2018, 35(3): 207–212.
- [17] 张晓晶, 鹿捷, 郑永美, 等. 高温胁迫对不同花生品种生理指标的影响[J]. 花生学报, 2015, 44(2): 18–23.
- [18] Rizhsky L, Liang H J, Shuman J, et al. When defense pathways collide. The response of *Arabidopsis* to a combination of drought and heat stress. [J]. Plant Physiol, 2004, 134(4). DOI: 10.1104/pp.103.033431
- [19] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sens Environ, 2002, 81: 337–354.
- [20] Styliniski C, Gamon J, Oechel W. Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species [J]. Oecologia, 2002, 131(3): 366–374. DOI: 10.1007/s00442-002-0905-9.
- [21] Sims D A, Gamon J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features[J]. Remote Sens Environ, 2003, 84: 526–537.
- [22] Penuelas J, Filella I, Gamon J A. Assessment of Photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance[J]. New Phytol, 1995, 131: 291–296.
- [23] Aebi H. Catalase *in vitro* [J]. Methods Enzymol, 1984, 105: 121–126. DOI: 10.1016/s0076-6879(84)05016-3.
- [24] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [25] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 64–66.
- [26] Caldwell M M, Bjorn L O, Bornman J F, et al. Effects of increased solar ultraviolet on terrestrial ecosystem [J]. J Photochem Photobiol, 1998, 46: 40–52.
- [27] 王鸿雪, 刘天宇, 庄维兵, 等. 花青素苷在植物逆境响应中的功能研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2020, 28(1): 174–183.
- [28] 田春燕, 黄春燕, 郭晓飞, 等. 基于植被指数的棉花冠层光合有效辐射截获量和叶片净光合速率估算研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(6): 981–987.
- [29] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sens Environ, 1992, 41(1): 35–44.
- [30] 王小平, 赵传燕, 郭锐, 等. 黄土高原半干旱区春小

- 麦冠层光谱对不同程度水分胁迫的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 417-423. DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2014.03.019.
- [31] 刘琴, 孙辉, 何道文. 干旱和高温对植物胁迫效应的研究进展[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 364-368. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5072.2005.04.006.
- [32] 王明援, 刘宁, 李波, 等. 不同光强对6个欧美杨无性系苗期生长及光合特性的影响[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 123-130. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.016
- [33] Harborne J B, Williams C A. Advances in flavonoid research since 1992[J]. Phytochemistry, 2000, 55(6): 481-504.
- [34] 李妮亚, 高俊凤, 汪沛洪. 小麦幼芽水分胁迫诱导蛋白的特征[J]. 植物生理学报, 1998(1): 65-71.
- [35] 李力, 刘玉民, 王敏, 等. 3种北美红枫对持续高温干旱胁迫的生理响应机制[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6471-6480. DOI: 10.5846/stxb201303070370.
- [36] 李小玲, 韩洁, 侯瑶, 等. 干旱高温互作下高山杜鹃幼苗生理生化变化研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31(5): 17-22.
- [37] Naing A H, Park K I, Ai T N, et al. Overexpression of snapdragon *Delila* (*Del*) gene in tobacco enhances anthocyanin accumulation and abiotic stress tolerance [J]. BMC Plant Biol, 2017, 17(1): 65. DOI: 10.1186/s12870-017-1015-5.
- [38] Naing A H, Ai T N, Lim K B, et al. Overexpression of *Rosea1* from snapdragon enhances anthocyanin accumulation and abiotic stress tolerance in transgenic tobacco [J]. Front Plant Sci, 2018, 9: 1070. DOI: 10.3389/fpls.2018.01070.
- [39] 韩一林, 王鑫朝, 许馨露, 等. 毛竹幼苗抗氧化酶和 AsA-GSH 循环对高温干旱及协同胁迫的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 268-276.
- [40] 高焕晔, 宗学风, 吕俊, 等. 高温干旱双重胁迫下水稻灌浆结实期的光合生理变化[J]. 三峡生态环境监测, 2018(2): 68-76.

(责任编辑:王丽芳)