

干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁 苗期生理特性的影响

高亚宁^{1,2}, 轩正英^{1,2}, 张凯浩^{1,2}, 李 玉¹, 常 娇¹,
阿依买木·沙吾提^{1,2}, 马国财³

(1.塔里木大学园艺与林学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2.塔里木大学南疆特色果树高效优质栽培与深加工技术
国家地方联合工程实验室, 新疆 阿拉尔 843300; 3.塔里木大学分析测试中心, 新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:以干旱敏感型芜菁(WJC106)和抗旱型芜菁(WJC129)为试验材料,采用盆栽自然干旱方法,研究干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期丙二醛含量、相对电导率、抗氧化酶活性、渗透调节物质、光合荧光以及叶片气孔形态特征的影响。结果表明:干旱胁迫显著增加芜菁苗期丙二醛含量和相对电导率,WJC106的增幅分别为59.71%和27.05%,WJC129分别为54.52%和20.06%,其细胞膜受损程度较大。WJC129有较强的调节能力,在干旱胁迫下其抗氧化酶活性和渗透调节物质的含量显著高于WJC106。干旱胁迫下WJC106和WJC129脯氨酸增幅分别为85.22%和88.97%,可溶性蛋白增幅分别为32.51%和58.26%,脯氨酸和可溶性蛋白起主要渗透调节作用。干旱胁迫除对芜菁有效光量子产量影响不明显之外,对叶绿素含量、光合及荧光参数均造成负面影响,其中WJC106受影响较大,WUE下降了71.5%,而WJC129光合及荧光各项指标相对比较稳定,WUE反而增加了18.2%。干旱胁迫使两个不同抗旱类型的芜菁苗期叶片气孔变小,保卫细胞变薄,气孔开度和气孔张开率显著减小。在干旱胁迫下,抗旱型芜菁的气孔开度、气孔张开率和气孔保卫细胞厚度著大于干旱敏感型,仍能维持较高的光合作用。WJC129抗旱型芜菁叶片表面有蜡质层覆盖,使其抗旱性增加。

关键词:芜菁;干旱胁迫;生理响应;气孔特征;抗旱类型

中图分类号:S631.3 **文献标志码:**A

Effects of drought stress on physiological traits of different drought-resistant turnip seedlings

GAO Yaning^{1,2}, XUAN Zhengying^{1,2}, ZHANG Kaihao^{1,2}, LI Yu¹,
CHANG Jiao¹, AYIMAIMU · Shawuti^{1,2}, MA Guocai³

(1.College of Horticulture and Forestry Sciences, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China;

2.The National-Local Joint Engineering Laboratory for Efficient and High-Quality Cultivation and Deep Processing

Technology of Characteristic Fruit Trees in Southern Xinjiang, Alar, Xinjiang 843300, China;

3.Analysis and Testing Center, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: Drought sensitive variety (WJC106) and drought resistant variety (WJC129) were used as experimental materials in this study to examine the physiological response of different drought resistant types of turnips to drought stress at seedling stage. The effects of drought stress on malondialdehyde, relative conductivity, antioxidant enzyme activity, osmoregulation substances, photosynthetic fluorescence and leaf stomatal morphological characteristics were examined. The results showed that drought stress significantly increased the MDA content and relative conductivity of turnip seedlings. Drought-sensitive increases were 59.71% and 27.05%. The drought-resistant types were 54.52% and 20.06%, and their cell membranes were damaged to a large extent. And drought resistant varieties had strong regulation ability. Under drought stress, the activity of antioxidant enzymes and the content of os-

moregulation substances were significantly higher than those of drought sensitive varieties. The increases of WJC106 and WJC129 proline under drought stress were 85.22% and 88.97% and soluble protein increments were 32.51% and 58.26%. Proline and soluble protein played the main role in osmoregulation. Drought stress had a negative impact on chlorophyll content, photosynthesis and fluorescence parameters, except that it had no obvious impact on yield of effective light quanta of turnips. WJC106 was greatly affected, and *WUE* decreased by 71.5%, while WJC129 had relatively stable photosynthetic and fluorescence indicators, and *WUE* increased by 18.2%. Drought stress reduced leaf stomata, guard cells, stomatal opening and stomatal opening rate of two different drought resistant types of turnips at seedling stage. The stomatal characteristic value of drought resistant turnip was significantly higher than that of drought sensitive turnip while still maintaining high photosynthesis. The leaf surface of drought-resistant turnip (WJC129) was covered with a waxy layer, which increased its drought resistance. The surface of the leaf was covered with a waxy layer, which increased its drought resistance.

Keywords: turnip; drought stress; physiological response; stomatal characteristic; drought-resistant variety

芜菁 (*Brassica rapa*. L) 别名蔓菁、圆根、盘菜等,由油用亚种演化而来,隶属于十字花科芸薹属^[1]。其维吾尔语又称为恰玛古,是生长在新疆天山南部、塔里木盆地西北,具有药用、食用、饲用三大应用价值的 2 a 生草本植物^[2-3]。新疆属于极旱地区,土地沙漠化严重、日照时间长、水分蒸发量大,大多数土地为山脉、戈壁和沙漠^[4]。芜菁虽耐瘠薄、耐干旱,有较强的适应性,但长时间的干旱少雨仍会在一定程度上对芜菁的叶片及肉质根生长发育造成严重影响。众多研究表明,干旱胁迫可引起植物的生理生化过程损害,如细胞膜结构^[5]、关键酶活性^[6]、活性氧合成与积累^[7]、气孔调节和其他气体交换特性^[8]。植物细胞可以调控基因的表达、产生新的蛋白质,进而引起植物生理和代谢上的变化来应对干旱胁迫^[9]。例如降低净光合速率,改变植物代谢途径,累积可溶性物质,合成脯氨酸、甜菜碱等渗透调节物质,分解体内原有的蛋白质,同时合成参与各种代谢调节相关的酶^[10]。Jabeen 等^[11]研究表明干旱胁迫导致芜菁的生长量(根和茎的干质量与鲜质量、根长与茎长)、色素含量(叶绿素 a、b 和总叶绿素)、总酚和抗坏血酸含量减少,显著增强了芜菁叶片与根部的游离脯氨酸、甜菜碱、丙二醛、过氧化氢的含量以及提高了其过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性。

当前在芜菁的营养品质、遗传多样性和非生物胁迫等多方面都开展了大量的研究^[1-3,11],但鲜有关于芜菁抗旱性方面的研究。本试验选取前期筛选出的 1 个抗旱型资源和 1 个干旱敏感型资源,采用盆栽自然干旱法,研究不同抗旱类型芜菁在苗期干旱胁迫下的生理生化变化,旨在深入研究芜菁抗旱生理机制奠定基础,为芜菁抗旱品种选育及抗旱栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试材料为本课题组前期获得的干旱敏感型资源 WJC106 和抗旱型资源 WJC129,采取盆栽自然干旱的方法进行试验。于 2021 年 8 月在塔里木大学园艺试验站智能温室中进行育苗。分别将种子播种于装有 125 g 混合基质(草炭、蛭石、园土按 2:2:1 体积混合)的营养钵中(每个营养钵播 3 粒),每份试材共播 90 个营养钵。育苗期间采取正常管理,当幼苗长出第 2 片真叶时进行定苗,每盆保留 1 株苗。待幼苗长至四叶一心时,采用自然干旱的方法进行干旱处理。共设置对照组(CK)和干旱组(T)两个处理,各 3 次重复,每个重复 15 株。对照组:土壤相对含水量保持在 70%~80%之间;干旱组:干旱处理前浇一次透水,之后不再浇水让其自然干旱。直到幼苗叶片出现严重萎蔫时(干旱第 10 d)试验结束。

1.2 测定指标与方法

干旱处理结束后采用组内随机取样的方法,选取植株第 4 片长势一致的叶片测定其生理指标,每个重复 5 片,每个处理 3 次重复共 15 片叶。参考李合生^[12]的方法测定其相对电导率、总叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛和游离脯氨酸含量。采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒测定超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性。

采用组内随机取样的方法,每个处理选取 6 株,每株重复 3 次。采用便携式光合仪(Licor-6400, Licor 公司,美国)在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照强度下,于 9:00—11:00 测定第 4 片真叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO_2 浓

度(C_i)等光合参数,并计算植株单叶水分利用率($WUE=P_n/T_r$)。待第 2 片真叶暗适应 30 min 后,采用便携式脉冲调制叶绿素荧光仪(FluorPen FP 100,捷克)测定其 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII 的量子效率(F_v/F_o)、PSII 有效光量子产量(F'_v/F'_m)和非光化学猝灭系数(NPQ)等荧光参数。

采用发射扫描电子显微镜(APREO-S, Thermo Fisher Scientific 公司,美国)对叶片的气孔特征进行观察,并用 Image Pro Plus 软件进行指标测量。每个叶片随机选取 10 个视野,主要测量气孔张开长度、气孔张开宽度、气孔长度、气孔宽度、气孔开度、保卫细胞厚度、气孔密度。气孔开度=气孔张开长度×气孔开张宽度× $\pi/4$,气孔密度=视野下气孔数/视野下的面积^[13]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft excel 2019 软件进行数据整理,用 SPSS 25.0 及 Origin 9.0 软件对试验数据进行分析及作图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期丙二醛含量及相对电导率的影响

丙二醛作为膜脂氧化的最终分解产物,可反映膜系统的受伤害程度和抗旱性强弱,同时对细胞产生毒害作用^[13];相对电导率是衡量细胞膜透性的重要指标^[14-15]。如图 1 所示,两个芜菁资源在干旱胁迫下,其苗期叶片丙二醛含量和相对电导率相对于对照组均呈现出显著上升趋势。图 1A 显示,与对照组相比,WJC106 在干旱胁迫下的丙二醛增量

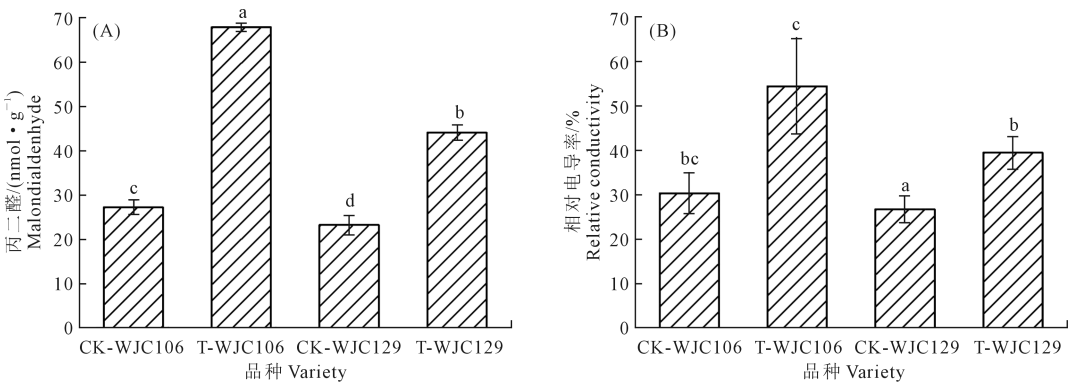
显著高于 WJC129,增幅分别为 59.71%和 54.52%。图 1B 显示,WJC106 和 WJC129 在干旱胁迫下相对电导率值与对照组相比,分别增加了 27.05%和 20.06%。干旱胁迫下,干旱敏感型的 WJC106 芜菁苗期细胞膜受损程度大于抗旱型的 WJC129。

2.2 干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期抗氧化酶活性的影响

如图 2 所示,干旱胁迫使两个不同抗旱类型芜菁苗期的 SOD、POD 和 CAT 活性增加。图 2A、2B 表明,与对照组相比,WJC129 芜菁幼苗叶片的 SOD、POD 活性受干旱胁迫的影响呈显著增加趋势,而 WJC106 叶片的 SOD 和 POD 活性与对照组无显著差异。从图 2C 可以看出,相比于对照组,两个不同抗旱类型芜菁在干旱胁迫下的 CAT 活性均显著增加,且干旱下 WJC129 的 CAT 活性显著大于 WJC106。抗旱型的 WJC129 芜菁苗期保护酶活性变化大于干旱敏感型的 WJC106。

2.3 干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期渗透调节的影响

图 3A、3B 显示,干旱胁迫下 WJC106 和 WJC129 两个芜菁的脯氨酸和可溶性蛋白含量均显著高于对照组,其脯氨酸增量分别为 85.22%和88.97%,可溶性蛋白增量为 32.51%和 58.26%。图 3C 显示,干旱条件下两个不同抗旱类型芜菁苗期叶片可溶性糖含量均增加,但无显著差异。由此可知,干旱胁迫使芜菁苗期渗透调节物质含量增加,且 WJC129 渗透调节物质变化量高于 WJC106,抗旱型芜菁苗期在受到干旱胁迫时的渗透调节能力强于干旱敏感型;同时脯氨酸和可溶性蛋白在干旱胁迫下较为敏感,起主要渗透调节作用。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at $P<0.05$, the same below.

图 1 干旱胁迫对芜菁苗期丙二醛含量及相对电导率的影响

Fig.1 Effects of drought stress on MDA and relative electrical conductivity of turnips seedling

2.4 干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁幼苗叶绿素含量及光合荧光参数的影响

如表 1 所示,干旱胁迫使两个不同抗旱类型芜菁苗期叶绿素含量显著降低,且 WJC129 叶绿素含量高于 WJC106。与对照组相比,两个芜菁处理组 P_n 和 T_r 呈现出显著降低。干旱胁迫下 WJC106 的 G_s 值显著低于对照组,而 WJC129 对照组与干旱组的 G_s 值无显著差异。两个不同抗旱类型芜菁 C_i 变化量不尽相同,抗旱型 WJC129 芜菁在干旱胁迫下呈现为下降趋势,而干旱敏感型 WJC106 表现为显

著升高。两个资源的水分利用效率变化量也有不同变化趋势,在干旱胁迫的影响下,WJC106 干旱敏感型芜菁的 WUE 表现为显著降低,而 WJC129 抗旱型资源出现显著增加的趋势。

由表 2 可以看出,与对照组相比,干旱胁迫降低两个芜菁处理组的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F'_v/F'_m 和 NPQ ,且 WJC106 的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 NPQ 和 WJC129 的 F_v/F_o 均表现出显著的差异。两个芜菁处理组的有效光量子产量 F'_v/F'_m 均无明显的变化差异。干旱敏感型芜菁苗期的叶绿素荧光参数受干旱胁迫的影响较大。

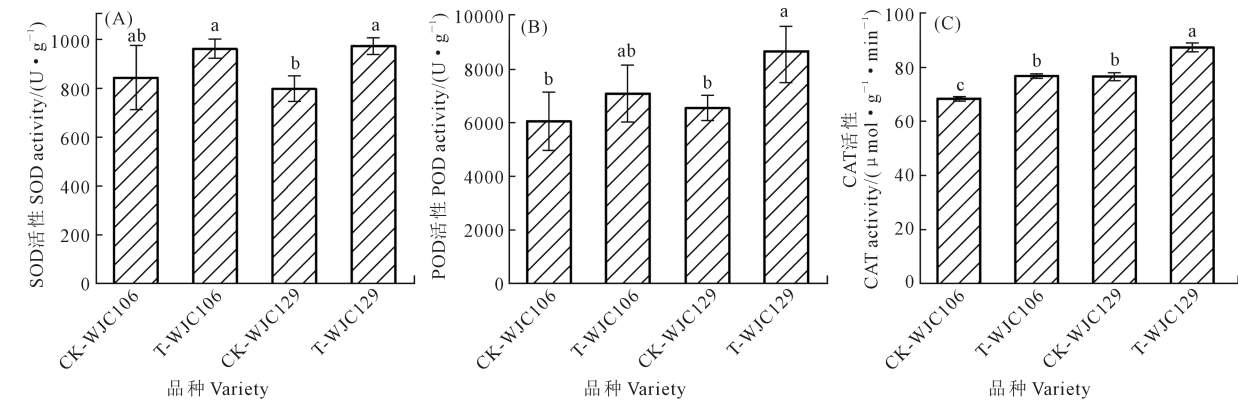


图 2 干旱胁迫对芜菁苗期抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of drought stress on antioxidant enzyme activity of turnips seedling

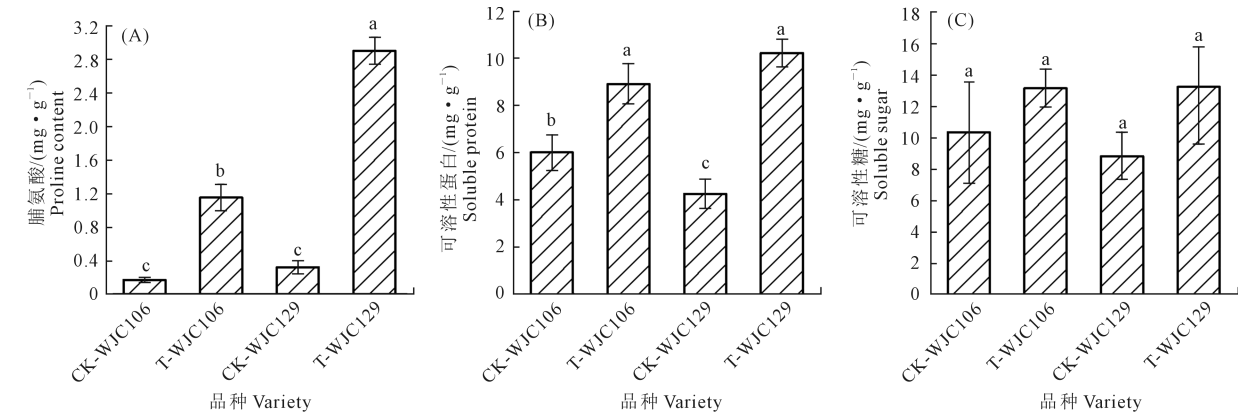


图 3 干旱胁迫对芜菁苗期渗透调节物质含量的影响

Fig.3 Effects of drought stress on contents of osmotic regulation substances of turnips seedling

表 1 干旱胁迫对芜菁苗期叶绿素含量及光合参数的影响

Table 1 Effects of drought stress on chlorophyll and photosynthetic parameters of turnips seedling

处理 Treatment	叶绿素 Chlorophyll /(mg · g ⁻¹)	净光合速率 P _n /(μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	气孔导度 G _s /(mmol · m ⁻² · s ⁻¹)	胞间 CO ₂ 浓度 C _i /(μmol · mol ⁻¹)	蒸腾速率 T _r /(mmol · m ⁻² · s ⁻¹)	水分利用效率 WUE
CK-WJC106	1.36±0.405a	13.32±2.33a	0.34±0.05a	414.89±8.11b	2.39±0.31a	5.55±0.38c
T- WJC106	0.89±0.269c	1.62±0.74c	0.12±0.04b	471.04±22.99a	1.16±0.31b	1.58±0.68d
CK-WJC129	1.43±0.391a	11.18±3.86a	0.19±0.05b	368.24±52.24c	1.95±0.5a	6.06±2.73b
T-WJC129	1.05±0.277b	7.94±2.84b	0.10±0.01b	324.74±57.00d	1.24±0.13b	7.16±2.32a

注:数值为均值±标准差。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note: The data are represented by mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at $P<0.05$, the same below.

2.5 干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期叶片气孔形态的影响

表 3 为干旱胁迫对不同抗旱类型芜菁苗期叶片气孔特征值的影响,图 4 为干旱胁迫对芜菁苗期叶片气孔形态的影响。由表 3 和图 4(A~D)可知,干旱胁迫使两个不同抗旱类型的芜菁苗期叶片气孔张

开长度、气孔张开宽度、气孔长度、气孔宽度、保卫细胞厚度和气孔开度极显著降低。干旱胁迫下, WJC129 抗旱型芜菁苗期叶片气孔开度的降幅显著小于 WJC106,降幅分别为 65.90%和 87.32%,并且气孔张开长度、气孔张开宽度、气孔长度、气孔宽度和保卫细胞厚度降幅也是 WJC129 明显小于 WJC106。表 3 与图 4(E~H)结合更直观可知,干旱胁迫下 WJC106 芜菁苗期叶片的气孔张开率极显著降低,而 WJC129 芜菁无明显差异。从气孔密度上看, WJC106 呈极显著增加, WJC129 无显著差异。干旱敏感型 WJC106 芜菁苗期叶片受干旱胁迫的损害较大。从图 4(C、D)和图 4(G、H)可以观察到 WJC129 抗旱型芜菁叶片表面有蜡质层覆盖,蜡质晶体呈管状形态。

表 2 干旱胁迫对芜菁苗期荧光特性的影响

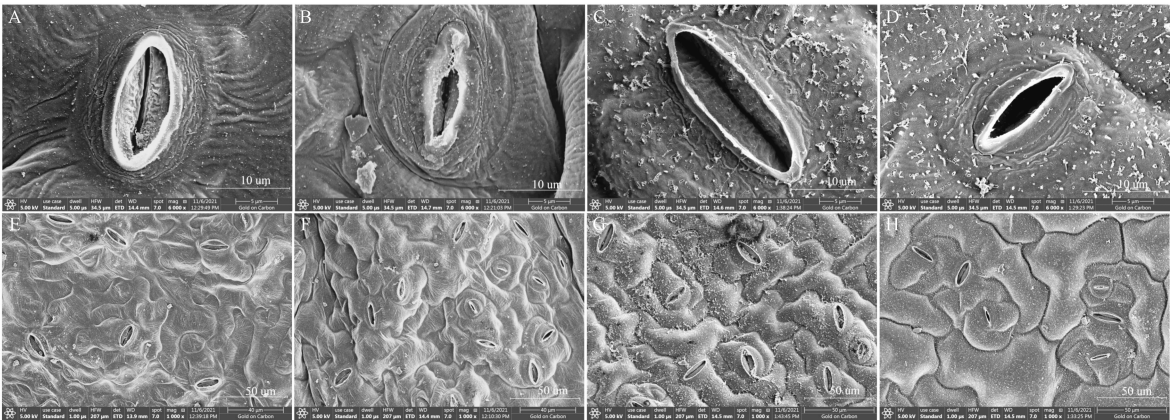
Table 2 Effects of drought stress on fluorescence characteristics of turnips seedling

处理 Treatment	PSII 最大光 化学效率 F_v/F_m	PSII 光化学 潜在活性 F_v/F_o	PSII 有效光 量子产量 F'_v/F'_m	非光化学 猝灭系数 NPQ
CK-WJC106	0.79±0.01a	3.68±0.25b	0.56±0.04a	0.88±0.13a
T- WJC106	0.69±0.05b	2.33±0.64c	0.54±0.09a	0.84±0.04b
CK-WJC129	0.80±0.02a	4.04±0.47a	0.53±0.04a	0.89±0.07a
T-WJC129	0.78±0.01a	3.46±0.06b	0.51±0.03a	0.87±0.10a

表 3 干旱胁迫对芜菁苗期叶片气孔特征值的影响

Table 3 Effects of drought stress on stomatal eigenvalue of turnips seedling

处理 Treatment	气孔张开长度 Stomatal opening length/ μm	气孔张开宽度 Stomatal opening width/ μm	气孔长度 Stomatal length/ μm	气孔宽度 Stomatal width/ μm	保卫细胞厚度 Guard cell thickness/ μm	气孔开度 Stomatal aperture/ μm^2	气孔开张率 Stomatal width/%	气孔密度 Stomatal density /(个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)
CK-WJC106	17.53±2.47a	5±2.48a	21.78±3.13a	9.12±2.59a	3.58±0.93a	71.21±40.53a	0.94±0.09a	213.98±28.85b
T- WJC106	6.4±2.44c	1.62±0.71b	12.06±4.02b	4.95±3.19b	1.11±0.42b	9.03±6.07b	0.48±0.08b	384.97±29.2a
CK-WJC129	18.39±3.46a	5.37±2.34a	21.97±3.35a	8.13±2.01a	3.08±0.98a	80.18±41.51a	0.91±0.1a	237.75±31.14a
T-WJC129	11.76±3.56b	2.73±1.26b	16.14±2.74b	5.21±1.79b	1.58±0.58b	27.34±17.3b	0.78±0.16a	207.87±28.46a



注:A 为对照组 WJC106 芜菁苗期叶片下表皮单个气孔形态;B 为干旱胁迫下 WJC106 芜菁苗期叶片下表皮单个气孔形态; C 为对照组 WJC129 芜菁苗期叶片下表皮单个气孔形态;D 为干旱胁迫下 WJC129 芜菁苗期叶片下表皮单个气孔形态;E 为对照组 WJC106 芜菁苗期叶片下表皮气孔形态;F 为干旱胁迫下 WJC106 芜菁苗期叶片下表皮气孔形态;G 为对照组 WJC129 芜菁苗期叶片下表皮气孔形态;H 为干旱胁迫下 WJC129 芜菁苗期叶片下表皮气孔形态。

Note: B: A single stomatal morphology of the epidermis of the leaves at the seedling stage of turnip WJC106 in the control group;B: A single stomata morphology of the epidermis of the epidermis of the leaves at the seedling stage of turnip WJC106 under drought stress; C: A single stomatal morphology of the epidermis of the leaves at the seedling stage of turnip WJC129 in the control group; D: A single stomata morphology of the epidermis of the leaves at the seedling stage of turnip WJC129 under drought stress; E: The stomata morphology of the epidermis at the seedling stage of the control group WJC106 turnip; F: The stomata morphology of the epidermis of the leaves at the seedling stage of turnip WJC106 under drought stress; G: The stomata morphology of the epidermis of the leaves at the seedling stage of the control group WJC129 turnip; H: The stomata morphology of the epidermis of the leaves at the seedling stage of turnip WJC129 under drought stress.

图 4 干旱胁迫对芜菁苗期叶片气孔特征的影响

Fig 4 Effects of drought stress on stomatal eigenvalue of turnips seedling

3 讨论与结论

环境在植物的生长发育过程中起着至关重要的作用,而水分因子更是占具主导地位^[16]。本试验表明,干旱胁迫使茺菁苗期的丙二醛含量和相对电导率显著增加,细胞膜结构受损,这与人研究结果一致^[11]。本试验中 WJC106 干旱敏感型茺菁苗期叶片的丙二醛含量和相对电导率的增量显著高于 WJC129 抗旱型资源。干旱敏感型的茺菁苗期细胞膜受损程度大于抗旱型,严重影响细胞中物质的进出,破坏细胞代谢的稳定性,同时表明茺菁幼苗的抗旱性越强,电解质外渗量小,膜脂过氧化程度越低,其相对电导率和 MDA 积累量越低。

当植物受到干旱胁迫时,干旱信号会促进脯氨酸和可溶性糖等代谢物质的产生,激发抗氧化系统以维持氧化还原稳态,并通过过氧化物酶防止细胞损伤和膜完整性的破坏^[17]。SOD、POD 和 CAT 是保护酶系统中最重要的三种酶,其中 SOD 催化两个超氧自由基发生歧化反应形成 O₂ 和 H₂O₂,产生的 H₂O₂再由 POD 和 CAT 分解除去^[18]。三种酶协同作用有助于抵抗氧化损伤,维持细胞膜的稳定性和完整性。本研究中,干旱胁迫使两个不同抗旱类型茺菁苗期的 SOD、POD 和 CAT 活性增加,并且抗旱型茺菁抗氧化酶活性的增幅显著大于干旱敏感型。可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸是植物主要的渗透调节物质,干旱胁迫下可通过渗透调节使植物维持一定的膨压,从而维持细胞生长、气孔开放和光合作用等生理过程、增强抗旱性^[19]。本研究中两个不同抗旱类型茺菁苗期的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量在干旱条件下均表现出增加趋势,但可溶性糖增幅差异不显著,且抗旱型 WJC129 渗透调节物质含量高于干旱敏感型 WJC106,表明茺菁苗期可通过增加其渗透调节物质提高其抗旱性,且脯氨酸和可溶性蛋白在干旱胁迫下较为敏感,起主要的渗透调节作用。

干旱胁迫严重影响植物的光合荧光变化。干旱通常以多种方式来阻碍光合作用,主要包括气孔因素和非气孔因素^[20]。若 P_n 、 G_s 、 C_i 均下降,是由于气孔因素限制所致; P_n 、 G_s 降低,而 C_i 升高,则表明是非气孔因素限制所致^[21]。本试验中,干旱胁迫使两个不同抗旱类型茺菁苗期 P_n 、 G_s 和 T_r 呈现出显著的降低,但 C_i 变化量不尽相同,抗旱型 WJC129 茺菁 C_i 显著下降,而干旱敏感型 WJC106 表现为显著升高,说明 WJC129 抗旱型茺菁苗期光合作用降低的主要因素是气孔因素,而非气孔因素是 WJC106 干

旱敏感型光合速率降低的主要原因。另外本试验显示,干旱敏感型 WJC106 在干旱胁迫时其 WUE 表现为显著降低,而 WJC129 抗旱型茺菁的 WUE 则显著增加,主要原因是由于 WJC129 通过降低叶片的 T_r 使 WUE 提高,这也是植物在逆境环境下的一种保护机制。这与李泽等^[22]的研究认为植物 WUE 与其形态结构、同化方式、气孔调控方式、适应与保护机制和物质同化积累与分配模式等有关比较相似,不同茺菁在干旱胁迫下 WUE 的表现不一致。干旱同时也严重影响植物的光反应和暗反应,叶绿荧光参数可以反映叶片对光能的吸收、传递和转换情况^[23]。本研究中干旱胁迫降低两个茺菁资源的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F'_v/F'_m 和 NPQ ,使其受到光抑制,光合机构活性降低。但在干旱下 WJC129 的 F_v/F_m 、 F'_v/F'_m 和 NPQ 与对照组相比无显著差异,仍维持在较高水平,说明抗旱型 WJC129 苗期叶片受干旱伤害程度较小,并未严重影响光能利用率。

气孔是植物进行气体交换的重要器官,是水汽蒸腾和 CO₂ 进出的主要通道,受干旱影响,气孔可能会关闭^[24],以减少水分损失。本研究中干旱胁迫使两个不同抗旱类型的茺菁苗期叶片气孔变小,保卫细胞变薄,气孔开度显著减小。抗旱型茺菁气孔张开率显著大于干旱敏感型的,仍能维持较高的光合作用。干旱状态下干旱敏感型 WJC106 茺菁叶片表皮细胞出现重叠褶皱和起伏,影响气孔开度和植物蒸腾,而抗旱型 WJC129 表皮细胞无明显起伏,并且其表面附有蜡质层,蜡质晶体呈管状形态。前人研究表明,蜡质是通过防止非气孔性水分的流失,使得植物体蒸腾作用得以下降,从而能够更好地维持植物体的水分来抵御干旱胁迫^[25]。故抗旱型 WJC129 通过表面附有的蜡质层来增加其抗旱性。

综上所述,干旱敏感型茺菁苗期细胞膜受损程度大于抗旱型,且抗旱型茺菁有较强的自我恢复与协调能力,通过增加抗氧化酶活性和渗透调节物质含量来抵御干旱胁迫。渗透调节物质中,脯氨酸和可溶性蛋白在干旱胁迫下较为敏感,起主要的调节作用。干旱胁迫降低茺菁的光合荧光参数,气孔特征值下降,光合机构活性降低;抗旱型茺菁的各光合特性指标降幅均低于干旱敏感型,气孔特征值也显著大于干旱敏感型,故仍能维持较高的光合作用。抗旱型茺菁表皮附有蜡质层,从而增加其抗旱性。

参 考 文 献:

[1] 任延靖, 赵孟良, 韩睿. 不同茺菁种质资源营养成分分析及评价[J]. 中国食品学报, 2021, 21(11): 159-173.
REN Y J, ZHAO M L, HAN R. Analysis and evaluation of nutrient

- components of different *Brassica rapa* L. ssp. *rapa* resources [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21 (11): 159-173.
- [2] 庄红梅, 刘会芳, 韩宏伟, 等. 新疆芜菁硫甙葡萄糖苷的组分鉴定与分析[J]. 西北农业学报, 2019, 28(1): 79-88.
- ZHUANG H M, LIU H F, HAN H W, et al. Component identification and analysis of glucosinolate in Xinjiang turnip [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(1): 79-88.
- [3] 马国财, 李雅雯, 王丽君, 等. 不同种质资源芜菁花朵香气成分的研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 161-164.
- MA G C, LI Y W, WANG L J, et al. Aroma components of *Brassica rapa* flowers from different germplasm resources [J]. China Brewing, 2017, 36(11): 161-164.
- [4] 李东, 由亚男, 马长发, 等. 干旱区绿洲城镇空间贫困分异特征及其影响因素分析——以新疆南疆三地州为例[J]. 世界地理研究, 2018, 27(3): 86-98.
- LI D, YOU Y N, MA C F, et al. Analysis on the differentiation characteristics of spatial poverty and its influencing factors in the oasis towns of arid areas——Taking three South Xinjiang districts as an example [J]. World Regional Studies, 2018, 27(3): 86-98.
- [5] KOSAR F, AKRAM N A, ASHRAF M. Exogenously-applied 5-aminolevulinic acid modulates some key physiological characteristics and antioxidative defense system in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under water stress [J]. South African Journal of Botany, 2015, 96: 71-77.
- [6] KAMANGA R M, MBEGA E, NDAKIDEMI P. Drought tolerance mechanisms in plants: physiological responses associated with water deficit stress in *Solanum lycopersicum* [J]. Advances in Crop Science and Technology, 2018, 6(3): 362.
- [7] NOORI M, AZAR A M, SAIDI M, et al. Evaluation of water deficiency impacts on antioxidant enzymes activity and lipid peroxidation in some tomato (*Solanum lycopersicum* L.) lines [J]. Indian Journal of Agricultural Research, 2018, 52(3): 228-235.
- [8] AHAMMED G J, LI X, YANG Y X, et al. Tomato WRKY81 acts as a negative regulator for drought tolerance by modulating guard cell H_2O_2 -mediated stomatal closure [J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 171: 103960.
- [9] ZHU J K. Salt and drought stress signal transduction in plants [J]. Annual Review of Plant Biology, 2002, 53: 247-273.
- [10] VERSLUES P E, SHARP R E. Proline accumulation in maize (*Zea mays* L.) primary roots at low water potentials. II. Metabolic source of increased proline deposition in the elongation zone [J]. Plant Physiology, 1999, 119(4): 1349-1360.
- [11] JABEEN M, AKRAM N A, ASHRAF M, et al. Thiamin stimulates growth and secondary metabolites in turnip (*Brassica rapa* L.) leaf and root under drought stress [J]. Physiologia Plantarum, 2021, 172 (2): 1399-1411.
- [12] 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: 182-195.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 182-195.
- [13] HE X S, XU L C, PAN C, et al. Drought resistance of *Camellia oleifera* under drought stress: changes in physiology and growth characteristics [J]. PLoS One, 2020, 15(7): e0235795.
- [14] 刘洋, 王娟, 白婷玉, 等. 4种园林植物幼苗对干旱胁迫的生长和生理响应 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(4): 173-179.
- LIU Y, WANG J, BAI T Y, et al. Growth and physiological responses of seedlings of four garden plants to drought stress [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(4): 173-179.
- [15] 赵广兴, 徐天渊, 李王成, 等. 白茎盐生草幼苗对干旱胁迫的响应研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(4): 195-202.
- ZHAO G X, XU T Y, LI W C, et al. Response of *Halogeton arachnoides* seedling to drought stress [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(4): 195-202.
- [16] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants [J]. Cell, 2016, 167(2): 313-324.
- [17] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought [J]. Science, 2020, 368 (6488): 266-269.
- [18] LEVITT J. Responses of plants to environmental stresses [J]. Chilling Freezing & High Temperature Stress, 1980, 1(5): 3642-3645.
- [19] SUBBARAO G V, CHAUHAN Y S, JOHANSEN C, et al. Patterns of osmotic adjustment in pigeonpea — its importance as a mechanism of drought resistance [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(3/4): 239-249.
- [20] WINTER K, SCHRAMM M J. Analysis of stomatal and nonstomatal components in the environmental control of CO_2 exchange in leaves of *Welwitschia mirabilis* [J]. Plant Physiology, 1986, 82(1): 173-178.
- [21] 季杨, 张新全, 彭燕, 等. 干旱胁迫对鸭茅幼苗根系生长及光合特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2763-2769.
- JI Y, ZHANG X Q, PENG Y, et al. Effects of drought stress on the root growth and photosynthetic characters of *Dactylis glomerata* seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2763-2769.
- [22] 李泽, 谭晓风, 卢锟, 等. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1515-1524.
- LI Z, TAN X F, LU K, et al. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1515-1524.
- [23] 李素, 万林, 李心昊, 等. 3种类型油菜对干旱胁迫的生理响应 [J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 563-572.
- LI S, WAN L, LI X H, et al. Physiological response of 3 *Brassica* species to drought stress [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(4): 563-572.
- [24] REYNOLDS-HENNE C E, LANGENEGGER A, MANI J, et al. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes [J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(1): 37-43.
- [25] 景岚, 王丽芳, 康俊, 等. 向日葵品种叶片组织结构与抗锈病的关系 [J]. 植物保护, 2009, 35(2): 81-84.
- JING L, WANG L F, KANG J, et al. Leaf tissue structure of sunflower cultivars in relation to their resistance to rust disease [J]. Plant Protection, 2009, 35(2): 81-84.