

干旱胁迫对沙芥幼苗根系形态及 抗氧化酶活性的影响

张希吏, 王 萍, 石 磊, 杨 静

(内蒙古农业大学农学院 内蒙古自治区野生特有蔬菜种质资源与种质创新重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要: 以一年生沙芥幼苗根系为材料, 采用盆栽试验, 测定不同干旱处理下幼苗根系形态特性、渗透调节物质含量、抗氧化系统等生理指标。结果表明, 干旱胁迫下沙芥幼苗根系主根长、主根体积和根冠比随着胁迫天数的延长不断增加, 重度胁迫时分别上升 154.39%、90.69% 和 189.59%。幼苗根系活力在重度胁迫时下降 51.22%, 根系可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量在轻度和中度胁迫时上升, 而重度胁迫时分别下降了 1.65%、4.13% 和 11.84%。根系中的过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸活性随着胁迫程度加剧不断上升, 过氧化物歧化酶(SOD)先上升后下降。丙二醛(MDA)含量和根系质膜透性随着胁迫程度增加逐渐上升到 255.74% 和 122.78%, 复水 3 d 后轻度和中度胁迫下根系中的抗氧化保护系统和渗透调节物质均可恢复到对照水平, 重度胁迫复水 3 d 后只能恢复到轻度胁迫水平, 说明沙芥幼苗根系受到了一定程度的伤害。

关键词: 沙芥幼苗根系; 干旱胁迫; 抗氧化酶活性; 根系活力; 渗透调节物质; 根系形态指标

中图分类号: S332.4; Q945.78 **文献标志码:** A

Root morphology and antioxidant enzyme activity of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn under drought stress

ZHANG Xi-li, WANG Ping, SHI Lei, YANG Jing

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Wild Peculiar Vegetable Germplasm Resource and Germplasm Enhancement, Huhhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: Root tissues of annual *Pugionium cornutum* seedlings under drought stress were used in a pot experiment to investigate the effect of soil water on root morphological characteristics, osmotic regulation substances content, antioxidant enzymes activity and other physiological indexes of seedling root by different drought treatments. The results showed that drought stress increased roots taproot length, root volume and root cap ratio of *Pugionium cornutum* seedlings with the extension of stress days, which under serve stress were elevated by 154.39%, 90.69% and 189.59%, respectively. Root soluble proteins, proline and soluble sugar content were increased under mild and moderate stresses, whereas went down by 1.65%, 4.13% and 11.84% under severe stress, respectively. Additionally, seedling root activity was dropped by 51.22% under severe stress. While the stress levels went up, malondialdehyde (MDA) content and root plasma membrane permeability gradually rose to 255.74% and 122.78%, respectively. Peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and ascorbic acid contents in root became increased under mild and moderate stresses, but were reduced under severe one. Three days after rewatering, the antioxidative defense system and the osmotic regulation substances in *Pugionium cornutum* seedlings root under the mild and moderate water stress could quickly return to control levels, but these indexes under severe stress could only be recovered to the mild stress level, indicating that *Pugionium cornutum* seedlings roots were seriously damaged.

Keywords: *Pugionium cornutum* seedlings root; drought stress; activity of antioxidant enzymes; root activity; osmotic regulation substances; root morphology index

收稿日期: 2015-09-11
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30960236, 31260475, 30560088), 内蒙古农业大学创新(培育)团队(NDPYTD2013-3)
作者简介: 张希吏(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为蔬菜抗旱生理。E-mail: 979140424@qq.com。
通信作者: 王 萍(1968—), 博士, 副教授, 主要从事蔬菜种质资源创新与种质创新研究。E-mail: wangping@imau.edu.cn。

根系是植物吸收土壤水分的主要器官,当土壤水分亏缺时,根系首先感应并迅速发出信号,使整个植株对干旱做出反应,同时植株还能改变根系的形态以适应土壤的干旱^[1],因此,根系是研究植物抗旱性、耐旱性的一个重要组成部分。沙芥(*Pugionium cornutum* (L.) Gaertn)为十字花科沙芥属二年生草本植物,别名山羊沙芥、山萝卜、沙盖、额乐孙萝邦(蒙名)等,为中国的特有种^[2]。沙芥主要分布在毛乌素沙漠及其边缘地区的流动与半流动沙丘上,在甘肃、宁夏、陕西、内蒙古等地区均有分布,其主根发达,是防风固沙的先锋植物,由于其营养成分丰富又无污染,已被作为加工野生蔬菜开发利用。目前,随着人们对野生植物沙芥生态作用和营养价值认知程度的增加,在分类、种子萌发、传粉习性、营养成分在等方面已有一些报道^[3-5],然而对于沙芥根系的形态特征和生理变化对干旱胁迫及复水的动态响应机制不是十分清楚。抗旱植物的抗旱性表现在两个方面,一方面是水分胁迫条件下的存活能力,另一方面是供水以后快速恢复生长的能力。本研究在干旱胁迫和复水条件下,从根系特性包括根系形态特性和根系生理特性方面探讨沙芥幼苗根系对干旱胁迫适应性,了解沙芥幼苗根系在水分胁迫条件下存活能力和供水以后快速恢复生长能力,为阐明沙芥幼苗的抗旱生理机制和人工驯化栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2013年采自鄂尔多斯市毛乌素沙地自然环境下的沙芥种子,试验在内蒙古农业大学日光温室进行。2013年4月下旬将去果皮的沙芥种子进行消毒、浸种,均匀摆入底部覆有滤纸的培养皿中萌发,待胚根长出后播种在PVC花盆,并置于大棚中。花盆的规格为高18 cm,内径15 cm,基质为沙:土壤=4:1,试验用土田间最大持水量12.4%,每盆装沙土1.5 kg。土壤中全氮含量为762.1 mg·kg⁻¹,有效磷含量为28.50 mg·kg⁻¹,速效钾含量为158.0 mg·kg⁻¹,有机质含量为1.95%,pH值为7.81。每盆播种4~5粒,出苗后每盆保证幼苗2株。在幼苗长到六叶一心时进行土壤干旱胁迫处理。干旱胁迫程度按叶片萎焉程度和Hsiao^[6]标准划分:对照(CK)、轻度胁迫(LD)、中度胁迫(MD)、重度胁迫(VD)处理土壤含水量分别占田间最大持水量75%、60%、45%、30%,每个处理3次重复。采用称重法控制水分^[7],于每日早晨6:00和傍晚18:00对花盆进行称重,补充水分至相应的重量范围。干旱胁迫处理7 d后对

幼苗进行复水处理(RW),使土壤含水量逐渐恢复到接近对照水平,持续到第3 d。另外,测定沙芥1年生幼苗的永久萎焉系数(每个梯度3个重复),从10%开始其土壤相对含水量每降低1%时浇透水,观察其恢复情况,一直到复水不能恢复生长(观察12 d内能不能重新生长),此时的土壤相对含水量即为沙芥幼苗的永久萎焉系数。

1.2 测定方法

1.2.1 土壤相对含水量测定

土壤相对含水量(%) = 土壤含水量/田间最大持水量 × 100%; 土壤含水量(%) = $(w_1 - w_2)/(w_2 - w_0) \times 100\%$, 式中, w_0 = 铝盒重, w_1 = 铝盒重 + 风干土样重, w_2 = 铝盒重 + 烘干土样重。

1.2.2 根系形态特性测定 根系主根长度的测定,采用直线法,即从根基部到根尖端的自然长度。侧根数目的测定分四个层次测定,即 ≥ 0.5 cm的侧根数, > 1 cm的侧根数, > 5 cm的侧根数, > 10 cm的侧根数,而侧根长度就是同等级所有侧根长度的综合。根冠比(地上和地下部分干重的比值)用烘干称重法测定。根系活跃吸收表面积和总根吸收面积用甲烯蓝吸附法测定^[8]。根系表面总面积 $S = 2(\pi VL)^{1/2}$, 其中 V 为根体积, L 为根长, S 为表面积^[9]。

1.2.3 根系生理特性的测定 根系活力采用2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)染色法测定,根系质膜透性采用电解质外渗量法测定,根系的抗氧化系统的测定包括过氧化氢酶,丙二醛,过氧化物酶,超氧化物歧化酶,抗坏血酸的测定^[10]。SOD活性采用氮蓝四唑光(NBT)还原法测定,POD活性采用愈创木酚显色法测定,CAT活性采用紫外吸收法测定;MDA含量采用硫代巴比妥酸比色法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝G-250法,可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法,脯氨酸含量用茚三酮显色法测定^[11]。

1.2.4 数据处理 采用Microsoft excel 2013数据分析和SPSS 19.0统计软件进行数据处理和单因素方差分析(Duncan新复极差法, $P = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 干旱-复水对土壤含水量的影响

从图1可以看出,随着干旱胁迫的加剧,土壤的相对含水量呈下降趋势。与对照相比,轻度胁迫时下降4.4%。中度胁迫时下降27.45%。在重度胁迫时,土壤的含水量只有18.23%,与对照相比下降了55.45%,变化趋势明显。在复水修复后,土壤含水量在不断上升,逐渐恢复到对照水平。

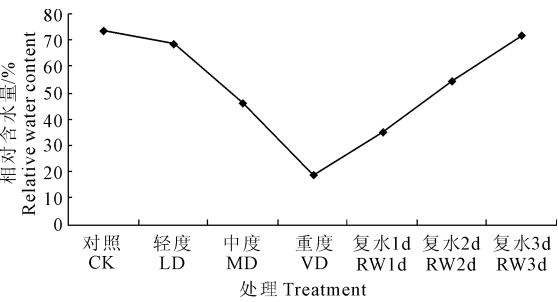


图 1 干旱 - 复水对土壤含水量的影响

Fig.1 Effects of drought/rewatering on soil water content

2.2 干旱胁迫下沙芥幼苗根系形态特性变化

干旱胁迫下,沙芥幼苗根系主根长、主根体积和根冠比随着胁迫天数的延长,呈现出上升趋势(表 1),与对照相比,轻度胁迫时分别上升 25.98%、32.55%和 49.05%,重度胁迫时分别上升 154.39%、90.69%和 189.59%,明显表现出干旱胁迫的适应性。而根系表面积、侧根长度、总根吸收面积在轻度干旱胁迫和中度胁迫处理下,与对照相比呈现上升的趋势,重度胁迫时开始下降。对沙芥幼苗进行复水发现,随着复水时间的延长,轻度、中度和重度胁迫下主根长、主根体积、根系表面积、侧根长度不断增大,与对照相比差异不显著($P > 0.05$)。根系总

根吸收面积不断增加,与对照相比差异显著($P < 0.05$)。轻度和中度胁迫下根冠比不断下降,逐渐恢复到对照水平,重度胁迫下的根冠比只接近轻度胁迫水平。

2.3 干旱胁迫下沙芥幼苗根系活力和根中渗透调节物质含量的变化

由表 2 看出,轻度和中度胁迫处理,根系中可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖在轻、中度胁迫下表现出上升趋势,而在重度胁迫下比中度胁迫分别下降了 1.65%、4.13%和 11.84%,但都远远高于对照水平。这说明沙芥幼苗的根系在干旱胁迫的逆境下,会造成根系中渗透物质的外渗和积累,而胁迫加剧的条件下,根系的这种自我保护系统会受到损害,从而使所含的渗透调节物质开始下降。沙芥幼苗根系活力随着胁迫程度的增加而不断下降,中度和重度胁迫时分别下降了 19.51%和 51.22%。从幼苗根系复水修复数据可以看出,根系中的渗透调节物质的含量随着复水时间的延长而不断下降,轻度和中度胁迫下的沙芥幼苗根系在复水 3 d 就可以恢复到对照水平,重度胁迫在复水修复 3 d 时,缓慢恢复到轻度胁迫的水平。

表 1 干旱胁迫下沙芥幼苗根系形态指标的变化

Table 1 Changes in morphology of seedling root of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. under drought stress (mean $\pm$ SE)

处理 Treatment	主根长 Total root length /cm	主根体积 Total root volume /cm ³	根系表面积 Total root surface area /cm ²	根冠比 Root/shoot ratio /%	侧根长度 Lateral root length /cm	根系总根吸收面积 Total root absorption area of root system/cm ²
对照 CK	8.20 $\pm$ 0.35a	0.43 $\pm$ 0.02a	44.24 $\pm$ 0.625a	4.88 $\pm$ 0.23a	18.73 $\pm$ 0.51ab	0.81 $\pm$ 0.02b
轻度 LD	10.33 $\pm$ 0.30a	0.57 $\pm$ 0.05a	44.43 $\pm$ 0.63a	7.28 $\pm$ 0.35b	17.56 $\pm$ 0.30a	0.62 $\pm$ 0.07a
复水 3d RW3d	10.35 $\pm$ 1.20a	0.60 $\pm$ 0.04a	44.50 $\pm$ 0.60a	5.32 $\pm$ 0.40a	17.58 $\pm$ 1.2a	0.75 $\pm$ 0.042a
中度 MD	13.80 $\pm$ 0.15b	0.75 $\pm$ 0.10a	56.70 $\pm$ 0.81a	12.55 $\pm$ 0.13c	39.83 $\pm$ 1.97bc	0.48 $\pm$ 0.011c
复水 3d RW3d	14.20 $\pm$ 0.76a	0.80 $\pm$ 0.54a	57.10 $\pm$ 2.76a	10.43 $\pm$ 1.02a	40.03 $\pm$ 3.90a	0.79 $\pm$ 0.05a
重度 VD	20.86 $\pm$ 0.50c	0.82 $\pm$ 0.04a	54.08 $\pm$ 1.06a	33.68 $\pm$ 1.10d	39.27 $\pm$ 0.17c	0.15 $\pm$ 0.09d
复水 3d RW3d	21.13 $\pm$ 0.70a	0.93 $\pm$ 0.07a	54.66 $\pm$ 2.43a	10.02 $\pm$ 0.73a	40.08 $\pm$ 1.29a	0.54 $\pm$ 0.07a

注:同列中不同小写字母表示差异性显著水平为 $P < 0.05$ 。下同。

Note: Column with different small letters indicates a significant difference level ($P < 0.05$). The same as below.

2.4 干旱胁迫下沙芥幼苗根系中抗氧化保护系统和膜脂过氧化物变化

从表 3 可以看出,沙芥根系中的过氧化物酶(POD)、过氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸含量在轻度和中度胁迫时,表现出上升趋势,重度胁迫时开始下降,与对照相比差异显著($P < 0.05$)。重度胁迫时超氧化物歧化酶(SOD)下降 5.41%,过氧化氢酶(CAT)上升了 57.9%。过氧

化物酶(POD)和抗坏血酸活性大于对照水平,分别比中度胁迫上升了 2.59%和 18.02%。

沙芥幼苗根系中的丙二醛(MDA)含量显著上升,与对照相比,中度和重度胁迫时分别上升了 147.77%和 255.74%。根系的质膜透性随着胁迫程度的加剧不断上升,到重度胁迫时上升了 122.78%。MDA 的含量在干旱胁迫下逐渐增加,根系质膜透性增大,这两个量的变化趋势相同,对沙芥幼苗根系进

行复水修复可以看出,根系中的抗氧化酶和膜质过氧化物随着复水时间的延长而不断下降,轻度和中度胁迫下的 SOD、POD、CAT 酶的活性在复水 3 d 后可恢复到对照水平,重度胁迫在复水修复 3 d 后只能缓慢恢复到轻度胁迫水平,不能恢复到对照水平。

表 2 干旱胁迫下沙芥幼苗根系中根系活力和渗透调节物质含量的变化

Table 2 Changes in root activity and osmolytes of <i>Pugionium cornutum</i> (L.) Gaertn. seedlings under drought stress (mean ± SE)				
处理 Treatment	根系活力 Root activity /(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content of root /(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Content of the soluble protein of root /(mg·g ⁻¹)	脯氨酸含量 Proline content of root /(mg·g ⁻¹)
对照 CK	82.0 ± 0.21a	0.226 ± 0.01a	18.96 ± 0.41a	0.609 ± 0.02a
轻度 LD	78.0 ± 1.30b	0.662 ± 0.03ab	19.23 ± 0.20a	0.628 ± 0.04a
复水 3d RW3d	81.0 ± 0.72a	0.301 ± 0.02a	18.46 ± 1.34a	0.613 ± 0.05a
中度 MD	66.0 ± 0.89c	1.630 ± 0.18b	24.23 ± 0.19c	0.702 ± 0.02c
复水 3d RW3d	81.2 ± 2.10a	0.380 ± 0.06a	19.03 ± 0.96a	0.612 ± 0.04a
重度 VD	40.0 ± 0.41d	1.437 ± 0.50d	23.83 ± 0.15b	0.673 ± 0.05b
复水 3d RW3d	69.6 ± 5.30a	0.653 ± 0.04a	19.42 ± 0.85a	0.625 ± 0.02a

表 3 干旱胁迫下沙芥幼苗根系中抗氧化保护系统和膜脂过氧化物的变化

Table 3 Changes in antioxidants and membrane lipid peroxide of <i>Pugionium cornutum</i> (L.) Gaertn. seedlings under drought stress (mean ± SE)						
处理 Treatment	过氧化物歧化酶 SOD /(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	过氧化氢酶 CAT /(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	过氧化物酶 POD (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	丙二醛 MDA /(mmol·g ⁻¹)	根系质膜透性 CMP /%	抗坏血酸 VC /(mg·g ⁻¹)
对照 CK	114.60 ± 0.65b	151.06 ± 1.50a	436.80 ± 15.04c	14.80 ± 0.10a	38.18 ± 0.17a	5.46 ± 0.38ab
轻度 LD	114.98 ± 1.10bc	166.27 ± 4.21b	438.75 ± 22.35b	18.96 ± 0.21b	38.94 ± 0.21a	8.23 ± 0.25b
复水 3d RW3d	114.57 ± 1.02a	153.36 ± 1.24a	437.10 ± 29.04a	14.74 ± 1.25a	38.42 ± 0.85a	5.65 ± 0.63a
中度 MD	115.98 ± 0.60c	224.40 ± 5.20c	851.75 ± 35.20c	36.47 ± 2.50c	47.91 ± 0.87ab	16.53 ± 0.11c
复水 3d RW3d	114.52 ± 0.85a	159.05 ± 12.43a	459.21 ± 38.01a	15.30 ± 1.42a	39.04 ± 1.03a	6.01 ± 0.43a
重度 VD	108.40 ± 2.20ab	238.53 ± 2.50d	829.65 ± 60.12d	52.65 ± 1.86d	85.36 ± 0.33c	13.55 ± 0.35d
复水 3d RW3d	112.76 ± 0.85a	173.60 ± 14.90a	497.05 ± 38.09a	21.54 ± 1.96a	42.01 ± 3.24a	9.01 ± 0.75a

3 讨 论

根系作为吸收水分的主要器官,与植物抗旱性密切相关,因此,常把根系特征作为植物抗旱性的重要组成部分。植物的根系形态如根系生物量、根长密度、根体积是衡量植物抗旱性的重要指标,影响植物土壤水分的吸收和利用^[12-13]。多数研究认为,发达的根系可提高植物吸水效率,增强其抗旱性能,抗旱性较强的植物具有较大的根系生物量、体积和表面积^[14-15]。Smucker^[16]研究发现,当土壤含水量降低时,植物为了寻找更多的水源,由地上部向根部运输的同化物增加,根系生长加快,根冠比增大。本研究中在轻、中度干旱胁迫下,沙芥幼苗的根系主根长、根系总表面积、根系体积、根冠比在逐渐增加,来增强对逆境的适应能力,但是在重度胁迫下,主根长、根系总表面积、根系体积变化不大,根冠比增加。说明干旱条件下,幼苗的叶、茎生长被抑制,光合产物优先分配给根系,使得根继续伸长。轻微的干旱胁迫使沙芥幼苗根系的生长加快,随着胁迫时间的

延长,沙芥幼苗的根系生长发育受到抑制。根系活力表示根系新陈代谢活动的强弱,是反映根系吸水能力的一项综合指标^[17]。本研究中轻度和中度胁迫下沙芥幼苗的根系活力逐渐上升,但在干旱程度加剧时不断下降。

丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化的产物之一,MDA 含量的高低在一定程度上能反映膜过氧化作用水平和膜结构的受害程度^[18]。本研究中沙芥幼苗根系中 MDA 含量随着干旱时间的延长逐渐升高。在胁迫初期,MDA 含量上升缓慢,表明在轻度和中度干旱胁迫下,根系的膜脂过氧化程度轻,而在重度胁迫下,MDA 含量上升加剧,表明根系的膜脂过氧化加剧,细胞膜系统受到了破坏,影响了根系的正常生命活动,同时根系中的质膜透性也在不断增加,这个结果与杜润峰等^[19]对达乌里胡枝子研究结论相同。

抗氧化保护性酶可以作为作物抗旱的鉴定指标,当植物处于干旱条件下时,植物会通过提高抗氧化酶的活性来适应干旱环境^[20-21]。本研究中,沙

芥幼苗根系随着干旱程度的加剧,根系中 SOD、POD、CAT 活性均呈上升趋势,在轻度和中度胁迫时抗氧化酶活性缓慢上升,重度胁迫时开始下降,这之前上述文献所得结果一致^[18-19]。随着对沙芥幼苗进行复水修复实验,复水后根系 SOD、POD、CAT 活性均有一定程度下降,显示出一定的补偿效应,表明复水能不同程度地缓解干旱胁迫对根系的伤害。轻度和中度胁迫可以很快地恢复到对照水平,表明因活性氧引起的膜脂过氧化和氧化还原平衡紊乱得到了修复。而重度胁迫只能缓慢恢复到轻度胁迫水平,表明沙芥的根系受到了一定程度的损伤。

渗透调节是植物在水分胁迫下降低渗透势和维持一定膨压、抵御逆境胁迫的一种重要方式,可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸是植物理想的渗透调节物质,并与植物的抗逆性有关^[22]。本研究中沙芥幼苗根系在干旱胁迫下可溶性糖含量、可溶性蛋白、脯氨酸含量随胁迫程度的增大而不断增加,减少干旱胁迫对沙芥根系造成的损伤,起到保护作用。重度胁迫时含量下降,说明沙芥幼苗根系细胞受到了损伤,不能很好地对逆境的胁迫做出相应的保护措施。在复水试验中,沙芥幼苗根系的渗透调节物质含量随着胁迫程度的变化做出相应的调节,表现出沙芥幼苗根系具有较强的抗旱适应性,这与裴宗平等^[23]研究结果相似。通过复水试验得知,土壤相对含水量降到 5.4% 时,沙芥幼苗仍然有一定的存活能力,复水后会有新叶长出。一年生沙芥实生苗的永久萎蔫系数为 5.3% (土壤相对含水量),根系萎蔫系数表明了植物对水分的最低要求,反应了在持续脱水状况下维持水分的平衡能力,可用来表示植物的抗旱性。王晶英^[24]等对水曲柳等树种的根系萎蔫系数研究得出旱柳的根系萎蔫系数为 8% 左右,具有较好的抗旱能力,而沙芥的系数比其小。

综上所述,干旱胁迫对沙芥幼苗根系造成了一定的伤害,引起了根系活力明显下降,根系 SOD、POD、CAT 活性、质膜透性、MDA 含量、脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量明显升高,并且随着干旱胁迫程度的增强,下降幅度也逐渐增大。干旱胁迫后复水,在轻度和中度胁迫明显能缓解干旱胁迫沙芥幼苗根系造成的损伤,根系活力上升,根系 SOD、POD、CAT 活性、质膜透性、MDA 含量、脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量可以恢复到正常对照水平,但是在重度胁迫复水只能恢复到轻度胁迫水平,另外轻、中度胁迫后复水的补偿效应要大于重度胁迫。沙芥在干旱和复水条件下有较好的抗旱性,为今后植物的抗旱基因筛选提供种植资源,也可为沙芥的人工驯化栽培提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 李鲁华,李世清,翟军海,等.小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J].西北植物学报,2001,21(1):1-7.
- [2] 赵一之.沙芥属的分类校正及其区系分析[J].内蒙古大学学报(自然科学版),1999,30(2):197-199.
- [3] 张卫华.沙芥种子发芽生理的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2004.
- [4] 黄修梅,郝丽珍,胡宁宝,等.中国特有种——沙芥繁育系统和传粉生物学研究[J].西北植物学报,2009,29(11):2232-2237.
- [5] 贺勇鹏,杨忠仁,宋兆伟,等.沙芥属蔬菜不同苗龄植株叶片营养成分含量变化规律的研究[J].内蒙古农业大学学报,2009,30(3):87-89.
- [6] Hsiao T C. Reecho polyribosome[J]. Physiology, 1970,46:281-286.
- [7] 丁 红,张智猛,戴 良.干旱胁迫对花生根系生长发育和生理特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(6):1586-1592.
- [8] Johnson L D, Marquez J, Lamb J F S. Root morphing of alfalfa plant introductions and cultivars[J]. Crop Sci,1998,38(2):497-502.
- [9] 明 凤,郑先武,朱国华,等.水稻耐低磷有关性状的分子标记[J].科学通报,1999,44(23):2514-2518.
- [10] 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,1985:67-70.
- [11] 赵世杰,史国安,董新纯.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002:138-139.
- [12] Coners H, Leuschner C. In situ measurement of fine root water absorption in three temperate tree species:Temporal variability and control by soil and atmospheric factors[J]. Basic and Applied Ecology, 2005,6:395-405.
- [13] Zhao C X, Deng X P, Shan L. Changes in root hydraulic conductivity during wheat evolution[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005,47:302-310.
- [14] 董桂春,王余龙,王坚刚.不同类型水稻品种间根系性状的差异[J].作物学报,2002,28(6):749-755.
- [15] 杨秀红,吴宗璞,张国栋.对肥水条件反应不同的大豆品种根系性状的比较研究[J].中国油料作物学报,2001,23(3):23-29.
- [16] Smucker A J M, Aiken R M. Dynamic root response to water deficits[J]. Soil Science,1992,154:281-289.
- [17] 薛建永,张文辉,刘新成.不同能源柳无性系对土壤镉污染的抗性研究[J].植物研究,2008,28(4):491-496.
- [18] 梁新华,史大刚.干旱胁迫对光果甘草幼苗根系 MDA 含量及保护酶 POD、CAT 活性的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):108-110.
- [19] 杜润峰,郝文芳.达乌里胡枝子抗氧化保护系统及膜脂过氧化对干旱胁迫及复水的动态响应[J].草业学报,2012,21(2):51-61.
- [20] 李 云,李维平,李秀峰.不同品种冬小麦的抗旱性鉴定与分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):17-20.
- [21] 朱永波,张仁和,卜令铎.玉米苗期抗旱性鉴定指标的研究[J].西北农业学报,2008,17(3):143-146.
- [22] Babita M, Maheswari M, Rao L M, et al. Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinuscommunis* L.) hybrids. Environmental and Experimental Botany, 2010,69:243-249.
- [23] 裴宗平.干旱胁迫及复水对矿区生态修复草本植物生理特性的影响[J].江苏农业科学,2013,41(7):362-364.
- [24] 王晶英,王 晨.水曲柳等树种光合、耗水及萎蔫系数比较研究[J].林业科技,2010,35(3):10-14.