

外源水杨酸对野生龙葵幼苗干旱胁迫的缓解效应

常云霞^{1,2}, 徐克东², 杨同文¹, 莫家勇¹, 陈 龙¹

(1. 周口师范学院 生命科学与农学院, 河南 周口 466001;

2. 周口师范学院 植物遗传与分子育种重点实验室, 河南 周口 466001)

摘 要: 利用 20% 的 PEG6000 模拟干旱胁迫, 同时用不同浓度(0、0.5、1.0、1.5、2.0 mmol·L⁻¹)的水杨酸(SA)喷施幼苗, 研究了不同浓度水杨酸处理对于干旱胁迫下野生龙葵幼苗生长的影响。结果表明: 干旱胁迫下, 龙葵幼苗植株变矮、鲜重降低、根长缩短, 叶绿素和可溶性蛋白含量减少, 抗氧化酶活性、游离脯氨酸和丙二醛含量增加; 经 SA 处理干旱胁迫下龙葵幼苗株高、根长和鲜重都有明显增加, 特别是 1.5 mmol·L⁻¹ SA 处理组分别增加 20.8%、28.0% 和 29.7%, 1.5 mmol·L⁻¹ SA 处理组龙葵幼苗叶绿素含量提高 31.9%、脯氨酸含量提高 65.4%, 可溶性蛋白含量提高 42.8%, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)与过氧化氢酶(CAT)活性达到最高, 与对照相比分别增加了 30.2%、87.8% 和 50.3%; SA 处理使丙二醛(MDA)含量降低了 37.8%。综合来看, 适当浓度的 SA 可以缓解干旱对龙葵幼苗造成的伤害, 并以 1.5 mmol·L⁻¹ 外源 SA 缓解效果最好。

关键词: 龙葵; 幼苗; 干旱胁迫; 水杨酸; 缓解效应

中图分类号: S567.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0043-04

Mitigative effects of exogenous salicylic acid on the inhibition of drought stress to wild *Solanum nigrum* seedlings

CHANG Yun-xia^{1,2}, XU Ke-dong², YANG Tong-wen¹, MO Jia-yong¹, CHEN Long¹

(1. College of Life Science and Agronomy, Zhoukou Normal University, Zhoukou, Henan 466001, China;

2. Key Lab of Plant Genetics & Molecular Breeding, Zhoukou Normal University, Zhoukou, Henan 466001, China)

Abstract: By using 20% PEG6000 to simulate drought stress and spraying different concentrations (0, 0.5, 1.0, 1.5 mmol·L⁻¹ and 2.0 mmol·L⁻¹) of salicylic acid (SA), the effects of SA on growth of wild *Solanum nigrum* seedlings under drought stress were studied. The results showed that, under drought stress, the plant height, fresh weight and root length of *Solanum nigrum* seedlings were reduced, and the contents of chlorophyll and soluble protein were decreased, while the contents of proline and MDA and the activities of antioxidase were increased. When the *Solanum nigrum* seedlings under drought stress were treated by SA, the plant height, root length and fresh weight were substantially increased as compared with the control group (drought stress without SA). Especially under the treatment of 1.5 mmol·L⁻¹ SA, they were increased by 20.8%, 28.0% and 29.7%, respectively. Compared with the control, the treatment of 1.5 mmol·L⁻¹ SA increased the contents of chlorophyll, proline and soluble protein by 31.9%, 65.4% and 42.8% respectively, raised the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) by 30.2%, 87.8% and 50.3% respectively, but decreased the content of malonaldehyde (MDA) by 37.8%. It was concluded that proper concentration of exogenous salicylic acid could mitigate the damage of drought stress on *Solanum nigrum* seedlings, and the effect of 1.5 mmol·L⁻¹ SA was optimal.

Keywords: *Solanum nigrum*; seedling; drought stress; salicylic acid; mitigative effect

龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 系茄科 (Solanaceae) 茄属 (*Solanum*) 一年生草本植物, 别名野葡萄、老鸦眼 晴草、苦菜、苦葵。龙葵可全草入药, 味苦、性寒、微甘, 其有效成分主要为生物碱、多糖等。民间及临床

收稿日期: 2013-09-08
基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划资助项目(2011B180057)
作者简介: 常云霞(1978—), 女, 河南漯河人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事植物抗性生理研究。E-mail: changyx618@126.com。
通信作者: 陈 龙(1961—), 男, 教授, 主要从事生物化学与分子生物学研究。E-mail: chenlongzg@126.com。

应用均取其清热解毒、活血散瘀、利水消肿、止咳祛痰之功效^[1-2]。龙葵及其复方制剂在临床上被广泛用于治疗各类肿瘤,被中医学列为十大抗肿瘤中草药之一,其抗肿瘤作用引起了研究人员的重视,并成为了国内外学者的研究热点^[3]。因此近年来市场对龙葵的需求不断增加,但龙葵生长喜温暖湿润的气候,干旱环境严重影响其生长。

水杨酸(Salicylic acid,SA)是植物体内的一种酚类衍生物,参与调节植物的许多生理过程,还能激活植物抗性反应的信号分子调控相关基因表达以提高植物抗性^[4]。研究表明,SA 具有提高植物对非生物逆境的抗性,如缓解重金属对植物的毒害作用^[5],提高植物抗盐性^[6]、抗旱性^[7]等。本实验以野生龙葵为研究对象,系统研究了 SA 对干旱胁迫下龙葵幼苗生长,叶片叶绿素含量、渗透调节性物质、膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量及保护酶系统的影响,以探讨 SA 诱导提高龙葵抗旱能力的机制,为 SA 在龙葵生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本实验所用野生龙葵种子由周口师范学院植物遗传与分子育种重点实验室提供。

1.2 材料培养

选择籽粒饱满、大小一致的野生龙葵种子用 75%的乙醇消毒 1 min,蒸馏水冲洗 3 次,用 1% NaClO 消毒 10 min,蒸馏水冲洗 5 次,然后均匀放在铺有两层滤纸和纱布的直径为 150 mm 培养皿中,每个皿中放 100 粒种子,置于光照培养箱中,温度 26℃,光暗周期为 14 h/10h,光照度 4 000~4 500 lx。每天上午 9 点、下午 5 点用 20 mL 蒸馏水处理使纱布保持湿润。培养 12 d 龙葵幼苗生长到 5 cm 高时,用 20%的 PEG6000 进行干旱胁迫处理,同时用等量不同浓度(0、0.5、1.0、1.5、2.0 mmol·L⁻¹)的水杨酸喷施幼苗,以去离子水培养作为对照(CK),连续培养 5 d,每个处理重复 3 次。

1.3 幼苗相关形态和生理生化指标的测定方法

用称量法测定幼苗的鲜重,用直尺测量幼苗的株高和根长。

叶绿素含量采用分光度法和改良的 Arnon 法^[8]测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法^[8]测定;游离脯氨酸含量采用磺基水杨酸浸提法^[9]测定;MDA 含量采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法^[10]测定;SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)显色法^[11]测定;POD 活性测定采用愈创木酚比色法^[11],以每

分钟内△A₄₇₀变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活性单位(0.01△A·min⁻¹),计算 POD 活性。CAT 活性采用高锰酸钾滴定法^[11]测定。

1.4 数据处理

所有数据均取 3 次重复平均值,采用 SPSS10.0 和 Microsoft Excel 2003 软件进行数据统计分析及作图。采用 Duncan 法进行方差分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗生长的影响

由表 1 可知,野生龙葵幼苗的株高、根长、单株鲜重变化一致,干旱胁迫下均急剧下降,与对照相比根长、株高、单株鲜重分别下降了 24.9%、24.4%、26.4%,下降效果均达到极显著水平。喷施不同浓度 SA 后,野生龙葵幼苗生长量有所增加,且随着 SA 浓度增加呈现先增加后降低的趋势,与 0 mmol·L⁻¹ SA 处理相比,根长分别增加了 9.1%、20.7%、28.0%、23.1%,株高分别增加了 4.4%、13.9%、20.8%、14.6%,单株鲜重分别增加了 9.4%、17.2%、29.7%、23.4%,其中 1.0~2.0 mmol·L⁻¹ SA 处理与 0 mmol·L⁻¹ SA 处理相比幼苗生长量增加效果达到极显著水平。由此说明,适当浓度 SA 处理可以明显促进干旱胁迫下野生龙葵幼苗的生长,其中以 1.5 mmol·L⁻¹ SA 处理效果最好。

表 1 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗生长的影响
Table 1 Effects of SA on growth of wild *Solanum nigrum* seedlings under drought stress

处理浓度 Treatment concentration /(mmol·L ⁻¹)	根长 Root length /cm	株高 Plant height /cm	单株鲜重 Fresh weight /(g·plant ⁻¹)
CK	5.633±0.058aA	6.967±0.153aA	0.290±0.004aA
0	4.233±0.058fE	5.267±0.058cD	0.213±0.012eE
0.5	4.620±0.072eD	5.500±0.100cCD	0.233±0.006dDE
1.0	5.110±0.010dC	6.000±0.100bBC	0.250±0.010cCD
1.5	5.420±0.020bB	6.367±0.058bB	0.277±0.010abAB
2.0	5.210±0.010cC	6.033±0.058bBC	0.263±0.006bcBC

注:表内的大小写字母分别表示同列处理间在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性。下同。

Note: Capital and small letters represent significant differences among treatments at 0.01 and 0.05, respectively. The same below.

2.2 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是重要的光合作用物质,一定范围内,其

量的多少直接影响光合作用的强度,不同胁迫因子对叶绿素的合成和分解均有一定程度的影响^[12]。干旱胁迫导致叶绿体片层膜体结构改变,叶绿素合成速度减慢。由图 1 可知,干旱胁迫下叶绿素含量与对照相比下降了 41.5%,下降效果达到极显著水平。外施不同浓度的 SA 后,野生龙葵幼苗叶片内叶绿素含量显著增加,并随着 SA 浓度增加呈现先增加后略微下降的趋势,其中以 1.5 mmol·L⁻¹SA 处理效果最好,与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比提高 31.9%,并且各个浓度 SA 处理与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比叶绿素含量增加效果均达到极显著差异水平。结果说明适宜浓度的 SA 能够有效提高干旱胁迫下野生龙葵幼苗的叶绿素含量,增强光合作用。

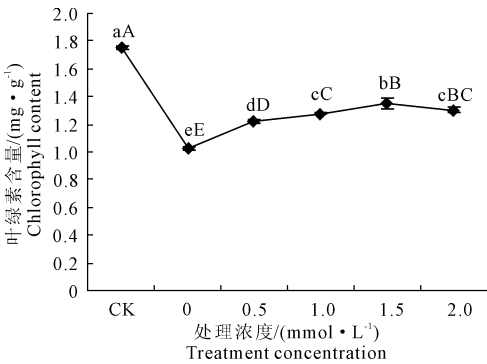


图 1 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig.1 Effects of SA on chlorophyll content in leaves of wild *Solanum nigrum* seedlings under drought stress

2.3 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗渗透调节物质含量的影响

渗透调节是植物在逆境胁迫下降低渗透势、抵抗胁迫的一种重要方式,可溶性蛋白质和游离脯氨酸都是重要的渗透调节物质^[13]。在植物体遭受干旱胁迫时,游离脯氨酸含量通常会升高,因此脯氨酸含量常用作抗旱的生理指标,也用作鉴定植物遭受干旱的程度^[14]。由表 2 可知,干旱胁迫后野生龙葵幼苗体内脯氨酸含量显著上升,与 CK 相比增加了 11.9%,差异达极显著水平,在一定程度上缓解了干旱对龙葵造成的伤害,并且加入 SA 后,脯氨酸含量随着 SA 浓度增加呈现先增加后略微下降的趋势,与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比增加了 37.2%、47.6%、65.4%、55.6%,且各个浓度 SA 处理与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比脯氨酸含量增加效果均达到极显著差异水平。表明 SA 处理能显著提高干旱胁迫下野生龙葵幼苗体内游离脯氨酸含量,增强了其对干旱胁迫的适应性。

表 2 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片渗透调节物质的影响

Table 2 Effects of SA on osmotic adjustment materials in leaves of wild *Solanum nigrum* seedlings under drought stress

处理浓度 Treatment concentration /(mmol·L ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content /(mg·g ⁻¹)	游离脯氨酸含量 Free proline content /(mg·g ⁻¹)
CK	3.833 ± 0.058aA	0.138 ± 0.003fF
0	2.367 ± 0.058eE	0.154 ± 0.004eE
0.5	2.750 ± 0.050dD	0.211 ± 0.004dD
1.0	3.077 ± 0.067cC	0.227 ± 0.007cC
1.5	3.380 ± 0.106bB	0.255 ± 0.003aA
2.0	3.113 ± 0.012cC	0.240 ± 0.001bB

由表 2 可知,干旱胁迫 5 d 后野生龙葵幼苗叶片可溶性蛋白质含量与 CK 相比下降了 38.3%,差异达极显著水平,外施不同浓度的 SA 后,野生龙葵幼苗叶片中可溶性蛋白质含量显著增加,并随着 SA 浓度增加呈现先增加后略微下降的趋势,其中以 1.5 mmol·L⁻¹SA 处理效果最好,可溶性蛋白含量与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比提高 42.8%,并且各个浓度 SA 处理与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比可溶性蛋白含量增加效果均达到极显著差异水平。说明适宜浓度的 SA 能够有效地提高干旱胁迫下野生龙葵幼苗的可溶性蛋白含量。

2.4 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片内抗氧化酶活性的影响

由表 3 可知,干旱导致叶片内抗氧化酶活性增加,与 CK 相比 SOD、POD、CAT 分别增加了 6.8%、18.2%、5.6%,差异均达极显著水平,外施不同浓度 SA 后,抗氧化酶活性又显著增加,并随着 SA 浓度增加呈现先增加后略微下降的趋势,与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比, SOD 活性分别提高 5.3%、16.0%、30.2%、20.0%, POD 活性分别提高 16.9%、45.5%、87.8%、66.4%, CAT 活性分别提高了 30.0%、40.2%、50.3%、43.4%。抗氧化酶活性增加效果均达到极显著差异水平。说明外施 SA 能有效增加干旱胁迫下野生龙葵幼苗清除体内自由基的能力,从而减轻干旱胁迫的伤害。

2.5 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片内 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的主要产物之一,其量的高低和质膜透性的大小都是膜脂过氧化强弱和质膜破坏程度的重要指标^[15]。由图 2 可知,干旱胁迫 5 d 后 MDA 含量与 CK 相比显著提高,增加了 83.5%,差异达极显著水平,说明干旱对野生龙葵幼

苗伤害程度很深,外施不同浓度 SA 后,野生龙葵幼苗叶片内 MDA 含量显著下降,与 0 mmol·L⁻¹SA 处理相比,分别降低了 19.3%、29.2%、37.8%、34.3%,MDA 含量降低效果均达到极显著差异水平。结果说明外施 SA 能够有效阻止干旱胁迫下野生龙葵幼苗体内 MDA 含量的积累,从而减轻干旱胁迫的伤害。

表 3 外源 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of SA on activities of antioxidantase in leaves of wild *Solanum nigrum* seedlings under drought stress

处理浓度 Treatment concentration /(mmol·L ⁻¹)	SOD 活性 SOD activity /(U·g ⁻¹)	POD 活性 POD activity /(0.01△A·min ⁻¹)	CAT 活性 CAT activity /(mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹)
CK	195.33 ± 3.79fF	1.83 ± 0.06fF	0.306 ± 0.001fE
0	208.67 ± 4.51eE	2.16 ± 0.07eE	0.323 ± 0.002eD
0.5	219.67 ± 2.08dD	2.53 ± 0.06dD	0.420 ± 0.005dC
1.0	242.00 ± 3.00cC	3.15 ± 0.04cC	0.453 ± 0.002cB
1.5	271.67 ± 3.06aA	4.06 ± 0.05aA	0.486 ± 0.010aA
2.0	250.33 ± 2.08bB	3.60 ± 0.02bB	0.464 ± 0.002bB

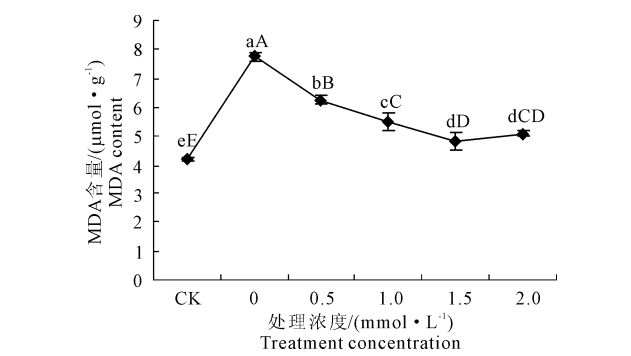


图 2 SA 对干旱胁迫下野生龙葵幼苗叶片内 MDA 含量的影响

Fig.2 Effects of SA on MDA content in leaves of wild *Solanum nigrum* seedlings under drought stress

3 讨论

干旱对植物的影响不仅表现在叶片变褐等外部形态上,更严重的是在细胞的生理生化上发生剧烈的变化,进而影响到植物的生长发育^[14]。本试验结果表明,干旱抑制了野生龙葵幼苗地上部及根系的生长,表现在野生龙葵幼苗株高、单株鲜重、根长等指标显著低于对照。这在糜子幼苗上也有所体现^[16]。外施不同浓度 SA 后,使野生龙葵幼苗的株高、根长、单株鲜重有所增加,缓解了干旱胁迫的伤害作用。

干旱胁迫是影响植物生长发育的主要因子,当植物遭受干旱胁迫时,首先细胞膜受到破坏,细胞膜

透性增大,其次细胞内产生的 O₂⁻、-OH、¹O₂ 和 H₂O₂ 等活性氧自由基(ROS)增加,这些自由基的积累可导致 MDA 含量明显提高,导致细胞遭受氧化危害,植物需动员整个防御系统抵抗干旱胁迫诱导的氧化伤害,而清除系统中 SOD、POD 和 CAT 活性高低就成为控制伤害的决定因素^[17-18]。SOD 是清除生物体内 O₂⁻的唯一酶类^[19],而 POD 和 CAT 是植物体内分解 H₂O₂ 的关键酶。本试验结果表明,干旱胁迫下,龙葵幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 活性增强,并且 SA 处理使三种酶活性进一步增强,这与罗明华的研究结果一致^[4],证明了 SA 能诱导抗氧化酶的生成,清除 ROS 的积累,减少 MDA 的生成,从而减轻对植物的伤害。

干旱胁迫下,植物能够合成渗透调节物质以增强其抗旱性,这是植物适应环境的一种保护性反应^[20],Campos 等^[21]研究认为,干旱胁迫下渗透调节物质脯氨酸的积累增加,有助于清除干旱胁迫条件下植株体内的 ROS,避免细胞膜质过氧化。可溶性蛋白质不仅是渗透调节物质,更是植物体内参与各种代谢的酶类,其量的变化可反映植物受伤害的程度和植物总代谢的水平^[22]。本试验结果表明,外施 SA 后,增加了龙葵幼苗体内的渗透调节物质的量,从而缓解了干旱胁迫对龙葵的伤害。

叶绿体是光合作用的主要场所,是对水分胁迫敏感的细胞器。杜伟莉等^[23]研究认为,干旱胁迫能够加速光合色素的降解,引起光合速率降低。本研究中,干旱胁迫使野生龙葵幼苗叶片中叶绿素含量下降,表明干旱胁迫降低了野生龙葵幼苗的光合潜能,与冯晓敏等研究结果相同^[16]。外施不同浓度 SA 后使叶绿素含量显著增加,这可能是由于在 SA 诱导下,SOD 等抗氧化酶活性提高,及时清除了体内过多的 ROS,使膜脂过氧化程度减弱,MDA 含量减少,一定程度上缓解了活性氧自由基对色素蛋白等生物大分子的攻击。

综上所述,干旱对龙葵幼苗有很大程度的伤害,外施 SA 后,促进了龙葵幼苗的生长,使龙葵幼苗叶片内叶绿素、渗透调节物质含量增加,同时能诱导幼苗体内 SOD 等抗氧化酶的产生,及时清除 ROS,使 MDA 含量下降,减轻对光合色素等生物大分子的攻击,缓解氧化损伤,从而减轻干旱对龙葵幼苗的伤害;其中 1.5 mmol·L⁻¹SA 缓解效果相对较好。但是,SA 缓解干旱胁迫是一个复杂的调控机制,还需进一步研究探讨。

- [20] 武 敏,冯绍元,孙春燕,等.北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J].中国农业大学学报,2009,14(4):98-102.
- [3] 朱良君,张光辉,任宗萍.4种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):164-167.
- [4] 聂卫波,马孝义,王术礼.沟灌土壤水分运动数值模拟与入渗模型[J].水科学进展,2009,20(5):668-675.
- [5] 张新民,王根绪,胡想全.用畦灌试验资料推求土壤入渗参数的非线性回归法[J].水利学报,2005,(1):1-9.
- [6] 费良军.由灌溉水流推进资料确定土壤入渗参数[J].西北水资源与水工程,1993,(4):16-20.
- [7] 刘作新,李 哲,孙中和,等.田间曼宁糙率系数的推求[J].灌溉排水,1998,17(3):5-9.
- [8] 王成志,杨培岭,陈 龙,等.沟灌过程中土壤水分入渗参数与糙率的推求和验证[J].农业工程学报,2008,24(3):43-47.
- [9] 孙西欢,王文焰.多参数沟灌入渗模型的试验研究[J].西北水资源与水工程,1993,4(3):46-51.
- [10] 李雪转,吴争兵.影响土壤入渗能力因素分析[J].山西水利,2009,(4):69-71.
- [11] 闫庆健,李久生.地面灌溉水流特性及水分利用率的数学模拟[J].灌溉排水学报,2005,24(2):62-66.
- [12] 刘 钰,蔡甲冰,白美健,等.黄河下游簸箕李灌区田间灌水技术评价与改进[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(1):32-39.

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 国家中医药管理局,《中华本草》编委会.中华本草[M].上海:上海科学技术出版社,1999.
- [2] 刘世巍,丁建海,刘立红,等.龙葵的化学成分及生物活性研究进展[J].时珍国医国药,2010,21(4):976-978.
- [3] 丁霞,高思国,李冠业.龙葵不同提取部位体外抗肿瘤作用的研究[J].时珍国医国药,2011,22(5):1244-1246.
- [4] 罗明华,罗英,王璞.水杨酸处理对干旱胁迫下丹参幼苗抗氧化能力的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):102-105.
- [5] 常云霞,王红星,陈龙.水杨酸对锌胁迫下小麦幼苗生长抑制的缓解效应[J].西北植物学报,2011,31(10):2052-2056.
- [6] 王俊斌,王海凤,刘海学.水杨酸促进盐胁迫条件下水稻种子萌发的机理研究[J].华北农学报,2012,27(4):223-227.
- [7] 吴晓丽,罗立津,黄丽岚,等.水杨酸和油菜素内酯对花椰菜幼苗生长及抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):168-172.
- [8] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [9] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [10] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 刘萍,李明军.植物生理学实验技术[M].北京:科学出版社,2008.
- [12] 余利平,张春雷,马霓,等.甘蓝型油菜对于干旱和低磷双重胁迫的生理反应Ⅱ:叶片叶绿素含量及叶绿素荧光参数[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):169-175.
- [13] 孙三杰,李建明,姚勇哲,等.亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗渗透调节物质与抗氧化酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):166-171,218.
- [14] 王宝山.植物生理学[M].北京:科学出版社,2004.
- [15] 张娜,赵宝平,张艳丽,等.干旱胁迫下燕麦叶片抗氧化酶活性等生理特性变化及抗旱性比较[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):166-171,218.
- [16] 冯晓敏,张永清,李鹏,等.糜子幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):176-181.
- [17] Jiang Y, Huang B. Drought and heat stress injury to two cool season turf grasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation[J]. Crop Sci, 2001,41:436-442.
- [18] 张智猛,戴良香,宋文武,等.干旱处理对花生品种叶片保护酶活性和渗透物质含量的影响[J].作物学报,2013,39(1):133-141.
- [19] Hosseini Boldaji S A, Khavari Nejad R A, Hassan Sajedi R, et al. Water availability effects on antioxidant enzyme activities, lipid peroxidation, and reducing sugar contents of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Acta Physiol Plant, 2012,34:1177-1186.
- [20] Babita M, Maheswari M, Rao L M, et al. Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinus communis* L.) hybrids [J]. Environ Exp Bot, 2010,69:243-249.
- [21] Campos K F, Carvalho K, Souza F S, et al. Drought tolerance and antioxidant enzymatic activity in transgenic 'Swingle' citrus plants over-accumulating proline [J]. Environ Exp Bot, 2011,72:242-250.
- [22] 韩多红,张勇,晋玲,等.碱性盐及混合盐碱胁迫对蒙古黄芪种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].中草药,2013,43(12):1661-1666.
- [23] 杜伟莉,高杰,胡富亮,等.玉米叶片光合作用和渗透调节对干旱胁迫的响应[J].作物学报,2013,39(3):530-536.