

Zn 盐和干旱胁迫对纹党种子萌发 和幼苗生理特性的影响

叶文斌¹,樊 亮²,叶建龙²

(1.陇南师范高等专科学校 农林技术学院,甘肃 成县 742500;

2.陇南师范高等专科学校数学与信息学院,甘肃 成县 742500)

摘 要:以甘肃道地中药材纹党(*Codonopsis pilosula*)为对象,通过室内砂培方法,研究了不同浓度(10^{-6} mol·L⁻¹, 10^{-5} mol·L⁻¹, 10^{-4} mol·L⁻¹, 10^{-3} mol·L⁻¹) Zn²⁺ 和不同浓度(5%、10%、15%、20%、30%)PEG 模拟干旱胁迫下对纹党种子萌发、幼苗生长、渗透调节物质积累和活性氧代谢的影响。结果表明:低浓度 Zn²⁺ 和 PEG 能显著促进纹党种子萌发和幼苗生长,随着干旱胁迫和 Zn²⁺ 浓度的加剧,种子萌发率显著降低,幼苗生长受阻,纹党种子萌发和幼苗生长能耐受的渗透势临界阈值为 -0.94 MPa;叶片 O₂^{-·} 产生速率和 H₂O₂ 含量明显增加,SOD、POD、CAT 和 APX 活性先升后降,高浓度 Zn²⁺ 和 PEG 处理下 GSH 和 AsA 含量明显降低,幼苗叶片中 Pro、可溶性糖和 MDA 含量随 Zn²⁺ 和 PEG 浓度升高而升高。 10^{-6} 和 10^{-5} mol·L⁻¹ Zn 盐可提高纹党对适度干旱胁迫的适应能力,而 10^{-3} mol·L⁻¹ 的 Zn 盐与干旱胁迫下伤害度达到最大。

关键词: Zn²⁺; PEG; 纹党; 透调节物质; 活性氧代谢

中图分类号: Q945、S567.5+3 **文献标志码:** A

Effects of Zn salt and drought stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Codonopsis pilosula* in Gansu province

YE Wen-bin¹, FAN Liang², YE Jian-long²

(1. School of Agriculture and Forestry Technology, Longnan Teachers College, Chenxian, Gansu 742500, China;

2. School of Mathematics and Information, Longnan Teachers College, Chenxian, Gansu 742500, China)

Abstract: A sand cultivation experiment was conducted to study the effects of Zn²⁺ with different concentrations (10^{-6} mol·L⁻¹, 10^{-5} mol·L⁻¹, 10^{-4} mol·L⁻¹, and 10^{-3} mol·L⁻¹) and PEG-6000 (5%、10%、15%、20%、30%) on seed germination, seedling growth, osmotica accumulation, and active oxygen metabolism of *Codonopsis pilosula*, an authentic Chinese herbal medicine in Gansu province. The results showed that the low concentrations of Zn²⁺ and PEG could significantly enhance seed germination and seedling growth. With the increase of Zn²⁺ and PEG concentrations, the germination rate became decreased significantly, and seedling growth was inhibited. The lowest permeability threshold was -0.94 MPa. O₂^{-·} production rate and H₂O₂ contents in leaf were increased dramatically. In addition, activities of superoxide dismutase, peroxidase, catalase, and ascorbate peroxidase went down after an initial increase. Contents of glutathione and ascorbic acid in leaf were decreased markedly. Levels of proline, soluble sugar and malonaldehyde contents in young seedling leaf went up significantly with the increase of Zn²⁺ and PEG concentrations. It was found that 10^{-6} and 10^{-5} mol·L⁻¹ zinc salt could improve the drought tolerance capability of *Codonopsis pilosula* to moderate stress. 10^{-3} mol·L⁻¹ zinc salt and drought stress caused the maximal damages.

Keywords: Zn²⁺; PEG; *Codonopsis pilosula*; osmotica; active oxygen metabolism

收稿日期:2014-03-16
基金项目:甘肃省中青年基金项目(3YS061-A25-030);陇南师范高等专科学校重点项目(2014LSZK01001)
作者简介:叶文斌(1982—),男,甘肃西和人,硕士,讲师,研究方向为植物生理生态。E-mail:yewenbinbest@sohu.com。

Zn是植物生长必需的微量元素,参与多种酶合成、植物光合作用、糖类和蛋白质的新陈代谢等过程^[1-2]。近年来Zn对植物作用的研究主要集中于Zn在植物体内的吸收、分布、累积以及缺Zn导致的危害^[3-6],毒害作用及其机制的研究也逐渐增多^[7-8],过量的Zn离子进入植物体,扰乱了原有的离子平衡系统,影响正常离子的吸收、运输、渗透以及调节等,造成抗氧化系统代谢过程紊乱^[9-11]。甘肃省是我国中药材主要产区之一,纹党[*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.]是我国传统名贵中药材,主要产于甘肃定西、渭源、陇西、甘谷、平凉、岷县、临潭、卓尼、舟曲,以陇南市文县特产的纹党或晶党质量最好,是中国国家地理标志产品,为甘肃四大名药之一,其种植历史悠久,品质优,种植面积大,故纹党一直作为甘肃的道地药材^[12]。种子和幼苗是纹党一生中极易受外界各种环境因子的影响而产生不同的响应的关键时期,种子萌发和幼苗期对盐分的响应反映了植物适应环境,尤其是适应逆境的生态机制和耐受胁迫的生活史策略,因此,国内外许多学者开展了盐胁迫对干旱地带植物种子萌发影响的研究^[13-14]。近些年随着陇南铅锌矿产经济的迅猛发展,使锌污染对甘肃道地中药材纹党的品质产生了影响,致使作物减产引起学者关注^[3]。为此,以甘肃道地中药材纹党为对象,通过室内用砂培方法,研究了不同浓度Zn和不同浓度PEG模拟干旱胁迫下对纹党种子萌发、幼苗生长、渗透调节物质积累和活性氧代谢的影响,揭示纹党抵抗锌胁迫的内在机理,研究重金属锌对纹党的影响行为,对培育和保护耐盐抗旱的中药纹党植物资源、科学种植与栽培纹党,提高产量和品质,具有现实的农业指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料纹党种子购自甘肃省陇南市文县,用ZnCl₂和蒸馏水配制成 10^{-6} mol·L⁻¹、 10^{-5} mol·L⁻¹、 10^{-4} mol·L⁻¹、 10^{-3} mol·L⁻¹的Zn²⁺培养液,用PEG(聚乙二醇,分子量为6000)配制5%、10%、15%、20%、30%的溶液。

1.2 方法

1.2.1 种子萌发测定 在培养皿(直径12 cm)的底部铺上2张滤纸,准确加入2 mL各浓度Zn²⁺与2 mL各浓度PEG培养液进行旱盐交叉胁迫处理,均匀点播经0.1% HgCl₂消毒并浸种4 h后的纹党种子100粒,重复3次,以蒸馏水培养为对照(CK),置入25℃的光照培养箱中,每天光照12 h,3 d后开始

记录萌发数目,同时计算种子的萌发率、萌发指数并测定初生胚根及下胚轴的长度^[15-16],种子萌发率和种子萌发指数计算参照Leather GR和Einhellig FA^[17]的方法。根据Michel和Kaufmann^[18]文献中PEG溶液浓度与渗透势的关系方程计算渗透势。

计算公式为 $\varphi_s = -(1.18 \times 10^{-2})C - (1.18 \times 10^{-4})C^2 + (2.67 \times 10^{-4})CT + (8.39 \times 10^{-7})C^2T$ 。式中, φ_s 为渗透势, C 表示PEG浓度, T 表示温度;5%、10%、15%、20%、30%的PEG浓度在25℃时的渗透势依次为-0.03、-0.10、-0.24、-0.42 MPa和-0.94 MPa。

1.2.2 幼苗生长测定 参照叶文斌等^[15-16]的方法在250 mL的小烧杯底部铺两张滤纸,以消毒和高温灭菌的沙作为培养基质,每杯培养50株纹党幼苗,5次重复,用上述两者组合的方法加入2 mL各浓度Zn²⁺与2 mL各浓度PEG培养液,以蒸馏水为对照,定时补给Zn²⁺和PEG培养液和蒸馏水,用保鲜膜将烧杯封口,以防止水分蒸发和不同处理间的相互影响。将烧杯置于恒温25℃、12 h·d⁻¹的光照培养箱中培养。第15 d用直尺测定受体作物幼苗的根长、苗高。将根与苗分开,用“排水法^[15]”测定根的体积后,置于105℃的烘箱中杀青30 min,在调至75℃烘至恒重,称其每30株的苗干重和根干重。

1.2.3 渗透调节物质含量和抗氧化系统活性的测定 培养第15 d后取健康生长纹党幼苗植株顶部第2、3片全展叶测定可溶性糖含量、游离脯氨酸的含量和丙二醛含量^[19];依据文献测定超氧阴离子O₂⁻产生速率^[20]和H₂O₂^[21]含量;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性及谷胱甘肽(GSH)和抗坏血酸(AsA)含量的测定方法见参考文献^[19]。

1.3 数据统计与分析

数据用SPSS17.0软件统计分析,用单因素方差分析结合多重比较进行显著性检验,不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 Zn²⁺和PEG模拟干旱胁迫对纹党种子萌发的影响

由表1可知,当没有添加Zn²⁺浓度时,随着PEG浓度的提高,纹党种子的萌发率、萌发指数、初生胚根长和下胚轴长都在逐渐降低。PEG处理下的纹党种子,随PEG浓度增大呈现先上升后下降的趋势,通过计算种子最终累积吸水量由大到小依次是-0.03 MPa > -0.10 MPa > -0.24 MPa > -0.42

MPa > -0.94 MPa,说明纹党种子萌发和幼苗生长能耐受的渗透势临界阈值为-0.94 MPa。在不同浓度的PEG和 $10^{-6}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\sim 10^{-4}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Zn}^{2+}$ 浓度交叉胁迫下,纹党种子的萌发率、萌发指数、初生胚根长和下胚轴长都有不同程度的升高;在不同浓度

的PEG和 $10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Zn}^{2+}$ 处理浓度下,党参种子的萌发率、萌发指数和初生胚根长都有不同程度的降低,表明低浓度的 Zn^{2+} 处理能有效地减轻干旱胁迫对纹党种子的萌发和初生生长。

表 1 Zn^{2+} 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党种子萌发的影响
Table 1 Effects of Zn^{2+} and drought simulated by PEG on seed germination of *Codonopsis pilosula*

Zn^{2+} 浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ Concentration	PEG 浓度/% Concentration	萌发率/% Germination rate	萌发指数(I) Geimination index	胚根长/cm Embryonicroot length	下胚轴长/cm Hypocotyledonary length
CK(0)	CK(0)	95.40a	375.97b	1.05b	0.76b
	5	93.52b	369.67b	1.14a	0.87a
	10	74.48c	289.49c	0.93b	0.53c
	15	44.72d	185.07d	0.53e	0.30d
	20	31.19e	74.19e	0.26f	0.24e
	30	21.21g	54.09f	0.13g	0.13f
10^{-6}	CK(0)	97.10a	395.73a	1.17a	0.90a
	5	95.32a	371.17b	1.15a	0.88a
	10	76.28c	298.34c	1.10a	0.81a
	15	46.32d	196.77d	0.98b	0.33d
	20	33.29e	78.10e	0.29f	0.27d
	30	26.23f	63.14e	0.20f	0.19f
10^{-5}	CK(0)	96.71a	380.93a	1.09a	0.89a
	5	94.82a	367.67b	1.14a	0.87a
	10	78.14c	314.39c	0.97b	0.54c
	15	49.82d	215.07d	0.94b	0.36d
	20	36.25e	89.10e	0.31f	0.28d
	30	28.09f	74.19e	0.29f	0.22e
10^{-4}	CK(0)	90.11b	345.93b	0.90b	0.76b
	5	89.32b	327.67b	0.89b	0.74b
	10	66.27d	284.34c	0.83c	0.51c
	15	40.02d	185.70d	0.54e	0.32d
	20	30.29e	71.10e	0.27f	0.26d
	30	23.72g	69.19e	0.25f	0.20e
10^{-3}	CK(0)	87.18b	331.13b	0.84c	0.66b
	5	73.35c	317.17b	0.74c	0.67a
	10	56.20d	264.39c	0.67d	0.43c
	15	34.42e	145.70d	0.43e	0.23e
	20	24.54g	54.109f	0.19f	0.21e
	30	13.21h	44.109f	0.12g	0.16f

注:表中数据为同一处理的3次重复的平均值;为在不同吸胀时间下每一交互不同处理间的显著性统计检验,不同小写字母表示 $P<0.05$,下同。

Note: Data in the table were calculated by same treatment with three replicates; Significant level at the 0.05 for different lowercase by the single factor test between different reciprocation treatment. Same for other tables.

2.2 Zn^{2+} 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党幼苗生长影响

由表2可以得知纹党植物幼苗的根长、苗高、根体积、根干重和苗干重在PEG和 Zn^{2+} 交互胁迫的处理下表现出了不同的效应,随着 Zn^{2+} 处理浓度的逐

渐升高纹党幼苗生长生物测定指标在低浓度 $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为促进作用, $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度为抑制作用。说明低浓度 Zn^{2+} 能促进纹党幼苗的生物量积累,而浓度过大会引起纹党幼苗生长受

限,使生物量积累减弱,这也可以表明,低浓度 Zn 盐

累的抑制响应,提高纹党幼苗在较为干旱环境中的

可以打破干旱胁迫对纹党幼苗的生长和生物量的积

适应性,增强纹党幼苗在生长过程中的生物量积累。

表 2 Zn ²⁺ 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党幼苗生长的影响						
Table 2 Effects of Zn ²⁺ and drought simulated by PEG on seedling growth of Codonopsis pilosula						
Zn ²⁺ 浓度 Concentration /(mol·L ⁻¹)	PEG 浓度 Concentration /%	根长 Root length/cm	苗高 Seedling height/cm	根体积 Root volume/mL	根干重 Root dry weight/g	苗干重 Seedling dry weight/g
CK(0)	CK(0)	2.91b	5.12b	1.66b	0.25b	1.93a
	5	2.94b	5.39a	1.74a	0.28a	1.99a
	10	2.51c	4.08c	1.31c	0.24b	1.78b
	15	2.24d	2.67d	0.92d	0.21b	1.68b
	20	1.79e	2.32e	0.80e	0.13c	1.35c
	30	1.51f	2.04f	0.71f	0.11c	1.32c
10 ⁻⁶	CK(0)	2.99a	5.36a	1.76a	0.28a	1.95a
	5	2.95a	5.39a	1.75a	0.29a	1.98a
	10	2.57c	4.27c	1.37c	0.26b	1.84b
	15	2.26d	2.77d	0.96d	0.23b	1.71b
	20	1.86e	2.34e	0.83e	0.15c	1.37c
	30	1.59f	2.14f	0.75f	0.13c	1.34c
10 ⁻⁵	CK(0)	2.95a	5.17b	1.68b	0.27b	1.93a
	5	2.96a	5.41a	1.76a	0.29a	1.97a
	10	2.53c	4.14c	1.33c	0.25b	1.79b
	15	2.22d	2.69d	0.94d	0.21b	1.69b
	20	1.80e	2.30e	0.81e	0.12c	1.36c
	30	1.53f	2.07f	0.73f	0.09d	1.33c
10 ⁻⁴	CK(0)	2.90b	5.13b	1.65b	0.23b	1.90a
	5	2.91b	5.33a	1.73a	0.24b	1.89a
	10	2.50c	4.00c	1.27c	0.20b	1.74b
	15	2.14d	2.46d	0.90d	0.17c	1.61b
	20	1.71e	2.24e	0.75e	0.10d	1.24d
	30	1.09g	2.04f	0.60g	0.07e	1.15e
10 ⁻³	CK(0)	2.79c	4.93b	1.56b	0.21b	1.79b
	5	2.39c	4.39b	1.35c	0.18c	1.65b
	10	2.37c	3.67c	1.07d	0.15c	1.57b
	15	2.09d	2.27e	0.82e	0.13c	1.48c
	20	1.59f	1.94f	0.58g	0.08d	1.13e
	30	1.07g	1.84g	0.39h	0.05e	0.93f

2.3 Zn²⁺ 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党幼苗中渗透调节物质、H₂O₂ 含量和 O²⁻产生速率的影响

由表 3 可以看出,在无 Zn²⁺ 的胁迫作用下纹党幼苗随 PEG 浓度的升高,植物体内可溶性糖、丙二醛、游离脯氨酸、H₂O₂ 含量和 O²⁻产生速率在 PEG 浓度为 5%时低于对照组,其他 PEG 浓度与对照相比均有所升高。随着 Zn²⁺ 和 PEG 浓度交互胁迫的强度增加,纹党幼苗植株体内所考察的指标也随胁

迫的升高逐渐呈现出先降低后升高的趋势,Zn²⁺ 浓度在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁵ mol·L⁻¹时纹党幼苗植株体内的可溶性糖、丙二醛、游离脯氨酸、H₂O₂ 含量和 O²⁻产生速率均低于无 Zn²⁺ 的胁迫作用;当纹党在 Zn²⁺ 浓度 10⁻⁴ ~ 10⁻³ mol·L⁻¹时,体内可溶性糖、丙二醛、游离脯氨酸、H₂O₂ 含量和 O²⁻产生速率急剧升高,这说明高浓度的 Zn 盐胁迫会随着 PEG 模拟干旱刺激纹党幼苗产生较多的可溶性糖、脯氨酸和引发叶片中 H₂O₂ 含量的积累,促使植株释放过量的 O²⁻。结果

表明,低浓度 Zn^{2+} 可以打破干旱条件对纹党幼苗的生长和生物量的积累没有好处,反而会产生双重的生长限制,而高浓度的 Zn^{2+} 胁迫对干旱条件下纹党的胁迫。

表 3 Zn^{2+} 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党幼苗中渗透调节物质、 H_2O_2 含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响

Table 3 Effects of Zn^{2+} and drought simulated by PEG on osmoregulation regulatory substance, H_2O_2 content and $\text{O}_2^{\cdot-}$ generating velocity of *Codonopsis pilosula*

Zn^{2+} 浓度 Concentration /(mol·L ⁻¹)	PEG 浓度 Concentration /%	可溶性糖 Dissolubility sugar /(mmol·g ⁻¹)	丙二醛 Malonaldehyde /(mmol·g ⁻¹)	游离脯氨酸 Liberation proline /(μg·g ⁻¹)	$\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率 Generate velocity /(nmol·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	H_2O_2 含量 H_2O_2 contents /(μmol·g ⁻¹)
CK(0)	CK(0)	0.19g	0.009k	151.24i	2.52k	9.97e
	5	0.16g	0.017j	96.32l	2.24l	8.84f
	10	0.27f	0.031i	181.78g	3.78h	13.62d
	15	0.35e	0.097f	213.91a	4.89f	18.56c
	20	0.74c	0.134e	199.76f	7.78a	24.18b
	30	1.79a	2.344a	233.80c	8.15a	33.45a
10 ⁻⁶	CK(0)	0.11h	0.006k	98.64l	2.18l	9.67e
	5	0.13h	0.011k	102.34l	2.04m	7.94f
	10	0.17g	0.019j	167.27h	2.79c	10.82e
	15	0.25f	0.047h	187.69g	3.65h	14.19d
	20	0.54d	0.126e	192.23f	5.98e	20.78c
	30	0.91b	1.245d	210.03f	6.62e	25.34b
10 ⁻⁵	CK(0)	0.13h	0.008k	102.14l	2.23l	10.07e
	5	0.15g	0.013j	111.04l	2.16l	8.97f
	10	0.21f	0.024e	178.74h	3.22i	12.72d
	15	0.32e	0.058h	194.11g	4.12h	15.76d
	20	0.69d	0.129e	195.06g	6.08e	22.39c
	30	0.98b	1.324d	216.48f	6.75d	26.55b
10 ⁻⁴	CK(0)	0.21f	0.013j	134.54k	2.35l	12.07d
	5	0.26f	0.017j	148.30i	2.64k	12.14d
	10	0.38e	0.032i	197.71g	3.72h	13.42d
	15	0.48d	0.077g	212.31f	4.69g	17.36d
	20	0.78c	0.176c	226.96e	6.38e	24.18b
	30	1.21a	1.942b	231.46c	7.15c	28.33b
10 ⁻³	CK(0)	0.39e	0.021e	144.66i	2.68k	13.67d
	5	0.45d	0.027i	158.39i	2.83k	14.94d
	10	0.67c	0.059h	213.24f	4.12h	16.72c
	15	0.85b	0.097f	230.71d	5.39f	19.86c
	20	1.04b	1.124d	269.76b	7.18c	27.38b
	30	1.89a	2.504a	280.52a	8.05a	31.45a

注:表中数据为同一处理的 3 次重复的平均值;在每一交互不同处理间的显著性统计检验,不同小写字母表示 $P < 0.05$ 。

Note:Data in the table were calculated by same treatment with three replicates; Significant level at 0.05 for different lowercase by single factor test between different reciprocation treatments.

2.4 Zn^{2+} 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党幼苗中 SOD、POD 和 CAT、APX 活性和 GSH、AsA 含量的影响

由表 4 可知,无 Zn^{2+} 处理时 PEG 干旱胁迫对纹党幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 和 APX 活性都表现出明显的影响,随着 PEG 浓度的增加,SOD、POD、CAT

和 APX 活性都逐渐表现为先升高后降低的趋势,在 PEG 浓度为 5%时纹党幼苗表现出对几种酶活性的应激升高作用,在高浓度干旱处理下对其活性表现出降低趋势;GSH 含量也表现为先升高后降低的趋势,AsA 含量变化不大。当 Zn 盐和 PEG 干旱胁迫交互作用时,当 Zn^{2+} 处理浓度为较低的 $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$-10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,纹党幼苗叶片中 SOD、POD、CAT、APX 活性和 GSH 含量都与单纯干旱胁迫相比表现出明显的升高,而且随着 PEG 浓度的增加这五种指标都逐渐表现为先升高后降低的趋势,AsA 含量在 Zn^{2+} 为 $10^{-6} - 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度处理与干旱交互胁迫作用下变化不大,但在 $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} - 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理与干旱交互胁迫作用下 AsA 含量急剧降

低,这也说明,AsA 含量在高浓度 Zn 盐和干旱交互胁迫下与正常对照相比具有显著的差异。总之,说明适度的 Zn^{2+} 不但可以促进纹党幼苗提高自身生理代谢活动,同时可以增强在干旱胁迫环境中纹党幼苗的生活力,帮助纹党植物在高旱条件下打破干旱胁迫影响,提高纹党幼苗的抗旱能力。

表 4 Zn^{2+} 和 PEG 模拟干旱胁迫对纹党幼苗中 SOD、POD、CAT、APX 活性和 GSH 和 AsA 含量的影响

Table 4 Effects of Zn^{2+} and drought simulated by PEG on SOD, POD, CAT, APX, GSH, and AsA's contents of *Codonopsis pilosula*

Zn^{2+} 浓度 Concentration /($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	PEG 浓度 Concentration /%	SOD superoxide dismutase /($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\text{Pro}$)	POD Peroxidase /($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	CAT Catalase /($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	APX Ascorbate peroxidase /($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	GSH glutathione /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	AsA Ascorbic acid /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK(0)	CK(0)	4.32c	34.27b	27.12b	18.23c	7.71c	0.21b
	5	6.81a	47.31a	36.37a	24.79b	9.83a	0.27a
	10	4.50b	21.03f	22.33c	20.81c	7.52c	0.29a
	15	4.06d	15.21h	16.82e	13.57e	5.44d	0.28a
	20	3.57f	10.64j	11.40g	9.25f	4.10f	0.26a
	30	2.17i	6.71l	7.70h	4.85h	2.19h	0.24b
10^{-6}	CK(0)	4.37c	36.21b	29.92b	23.23b	8.11c	0.24b
	5	6.97a	50.31a	38.47a	29.19a	10.03a	0.30a
	10	4.58b	28.33d	25.73c	30.91a	9.12b	0.31a
	15	4.23d	19.29f	19.02d	19.57c	6.34d	0.29a
	20	3.97e	13.04i	15.47e	12.85e	5.19e	0.28a
	30	3.47f	8.75k	9.73g	7.25g	3.79f	0.26a
10^{-5}	CK(0)	4.34c	35.11c	27.92b	21.29c	7.90c	0.23b
	5	6.91a	49.67a	37.40a	26.12b	9.07b	0.26a
	10	4.60b	26.63e	23.79c	24.31b	7.82c	0.28a
	15	4.17d	17.22g	17.81e	16.74d	6.09d	0.27a
	20	3.68f	11.17j	13.37f	10.15f	5.02e	0.25b
	30	2.85h	7.70k	8.03h	6.95g	2.76g	0.23b
10^{-4}	CK(0)	3.97e	31.16b	24.96c	20.19c	6.94d	0.17c
	5	3.91e	29.77d	27.48b	19.19c	6.06d	0.15c
	10	3.60f	25.64e	20.74d	18.36c	5.86c	0.12c
	15	3.15g	19.27f	14.11f	15.79d	5.02e	0.10d
	20	2.65h	11.10j	12.33f	10.00f	4.82e	0.09d
	30	2.55h	5.79l	7.93h	6.91g	2.70f	0.07e
10^{-3}	CK(0)	3.87e	29.12d	20.16d	18.85c	5.99d	0.14c
	5	3.57f	26.74e	25.81c	17.13d	5.56d	0.12c
	10	3.45f	24.24e	19.64d	16.16d	5.16e	0.08d
	15	3.00g	17.17g	13.29f	14.49d	4.83e	0.07e
	20	2.67h	9.15k	10.37g	9.02f	3.86f	0.05f
	30	1.63i	3.75m	4.93i	5.04h	2.41h	0.03f

注:表中数据为同一处理的 3 次重复的平均值;在每一交互不同处理间的显著性统计检验,不同小写字母表示。
Note: $P < 0.05$ 。Note: Data in the table were calculated by same treatment with three replicates; Significant level at 0.05 for different lowercase by single factor test between different reciprocation treatments.

3 结论与讨论

生物量是纹党对 Zn 盐和 PEG 模拟干旱交互胁迫响应的综合反映,也是检验纹党植株生长情况直接体现。不同植物在萌发期的耐盐性不同,低浓度的盐胁迫能促进一些植物种子萌发,高浓度的盐胁迫对种子萌发有明显抑制作用^[22]。微量的 Zn^{2+} 被纹党种子和幼苗吸收后,促进在干旱胁迫条件下种子的萌发,提高萌发势,同时有可能结合到植物体内的有关酶活性基团上面,刺激植物的生理活性,提高生活力和对干旱环境的抗性。随 Zn^{2+} 胁迫强度的增加,在较高浓度时纹党种子的萌发率、萌发指数、初生胚根长和下胚轴长都在逐渐降低,纹党植物幼苗的根长、苗高、根体积、根干重和苗干重也表现出强烈浓度效应,但在低浓度 $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时在不同 PEG 模拟干旱条件处理下纹党的种子萌发、幼苗生长都表现出积极的促进作用,说明低浓度的 Zn 盐在一定程度上会解除干旱环境对纹党幼苗的伤害,提高纹党幼苗的耐旱性。维持活性氧代谢平衡是保证纹党植物正常生长发育的重要机制,在纹党遭受干旱胁迫时,活性氧会大量积累并造成膜脂过氧化,叶片中 H_2O_2 含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率升高,刺激渗透溶质进行渗透调节和维持离子的相对均衡而适应干旱的胁迫条件,增强环境的适应能力。低浓度的 Zn 盐会主动刺激处在 PEG 模拟干旱条件下的纹党幼苗积累一些可溶性糖,去降低渗透势以适应外界干旱的环境条件,使幼苗在生长和发育上尽量减轻外界逆境的影响;高浓度的 Zn 盐胁迫会随着 PEG 模拟干旱刺激纹党幼苗积累较多可溶性糖,引起纹党体内脯氨酸的含量显著增加,这双重的胁迫对纹党幼苗器官衰老和伤害,都可能发生膜脂过氧化作用使膜透性改变,叶片中 H_2O_2 含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率也会急剧升高,而且 Zn^{2+} 胁迫和干旱条件还会引起了膜脂过氧化伤害,同时对膜和细胞造成一定的伤害,抑制植物的生长和生物量的积累,这都是抑制纹党幼苗中正常生长的生理过程,降低纹党幼苗活力的原因。

当过量的 Zn^{2+} 进入体内,与某些酶的非活性基团结合或取代其它元素使其变性^[17-18];打破了植物自身的防御平衡,导致细胞 DNA 等大分子物质损伤,甚至造成细胞死亡^[19-20];较高浓度 Zn^{2+} 造成纹党体内 SOD、POD、CAT、APX 酶活性比的不平衡,引起生理生化过程紊乱,并最终导致纹党的伤害,而且还会破坏膜的功能和抑制纹党植物的酶活性,影响到对干旱胁迫的拮抗作用。当纹党幼苗在干旱逐渐增强的条件下,体内氧化产物积累会到一定水平时,

保护性酶活性就会受到抑制,不能有效清除纹党体内的产生的自由基和大量 H_2O_2 ,使其内部 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的增加大于保护性酶清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的速度,这样 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 大量积累会使植物受害逐渐加重,而低浓度或适量 Zn^{2+} 就会促进 SOD、POD、CAT、APX 酶的活性,增强对自由基、 H_2O_2 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的清除能力。纹党体内由抗氧化酶和还原性小分子物质如 AsA、GSH 等组成的抗氧化系统在减轻干旱胁迫伤害中发挥着重要作用,共同保护纹党植物免受活性氧伤害,当高浓度的早盐交互胁迫下,AsA 和 GSH 含量急剧下降可能是 APX 活性提高后在清除 H_2O_2 的过程中消耗的结果,这些都与植物在长期的进化过程中已形成的一系列耐 Zn 和抗旱的机制有关。纹党在大田种植中出现响应和实验室研究虽然具有相似性,但在大田中存在的因素较多,所以要研究清楚纹党在较低的 Zn 盐干扰下的抗旱机理还有很多工作要做。所以研究土壤中锌对干旱条件下纹党生长的影响行为,对干预干旱条件下特殊经济中药材的生产和品质的提高,为科学种植与栽培纹党具有现实的农业指导意义。

参 考 文 献:

- [1] Ramesh S A, Choimes S, Schachtman D P. Over-expression of[J]. *Plant Mol Biol*, 2004, 54(3): 373-385.
- [2] 颜敏华, 张继封, 颜建明, 等. 锌对青花菜叶片光合特性的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(5): 35-39.
- [3] Zheng N, Wang Q, Zhang X, et al. Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao city, China[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 387(1-3): 96-104.
- [4] Küpper H, Zhao F J, McGrath S P. Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant Physiol*, 1999, 119(1): 305-312.
- [5] Cakmak I, Kalaycıoğlu M, Ekiz H, et al. Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: ANATO - science for stability project[J]. *Field Crop Res*, 1999, 60(1): 175-188.
- [6] Kochian L V. Zinc absorption from hydroponic solutions by plant roots [J]. *Dev Plant Soil Sci*, 1993, 55: 45-48.
- [7] Rout G R, Das P. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc[J]. *Agronomie*, 2003, 23(1): 3-11.
- [8] Brune A, Urbach W, Dietz K J. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanisms involved in zinc tolerance[J]. *Plant Cell Environ*, 2006, 17(2): 153-162.
- [9] Raboy V, Dickinson D B. Effect of phosphorus and zinc nutrition on soybean seed phytic acid and zinc[J]. *Plant Physiol*, 1984, 75(4): 1094-1098.
- [10] Kalyanaraman S, Sivagurunathan P. Effect of zinc on some important macro and micro elements in black gram leaves[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1994, 25(13-14): 2247-2259.
- [11] Wang C, Zhang S H, Wang P F, et al. The effect of excess Zn on mineral nutrition and antioxidative response in rapeseed seedlings[J]. *Chemosphere*, 2009, 75(11): 1468-1476.

下降幅度越大,这也可能是水分亏缺抑制了棉花地上部分的生长,叶面积指数降低,蒸腾速率降低的原因。研究还发现海岛棉开花后 30 d 内 P_n 保持较高水平,这一阶段不宜进行水分调亏。

已有研究表明水分亏缺对棉花叶绿素荧光特性有显著影响,刘瑞显等^[16]对棉花花铃期干旱胁迫研究认为,水分亏缺使 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 qP 降低, NPQ 增大。吴甘霖等^[17]研究发现随着水分亏缺程度的增大, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 qP 下降速度加剧。本试验研究结果表明海岛棉在开花后 30 d 出现一个光合作用高峰, Φ_{PSII} 、 qP 显著增大,随着调亏程度增大, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 显著下降。水分轻度调亏下在开花后 20~30 d 阶段,与 CK 相比 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 qP 、NPQ 有不同程度的增加。分析认为,调亏灌溉使海岛棉 PS II、 F_v/F_m 和 qP 下降, PS II 反应中心电子传递受阻,从天线色素捕获的光能用于光化学反应的数量减少, PS II 反应中心的光化学活性降低,从而导致 PS II、 Φ_{PSII} 下降, P_n 显著降低,同时导致过刺激发能的增大,剩余光能会以热的形式散失, NPQ 有增大趋势。说明水分亏缺对海岛棉叶片 PS II 活性中心产生伤害,抑制光合作用的原初反应,这是影响光合速率下降的主要原因。因此,本试验研究认为在海岛棉开花后 30 d 内,不宜进行调亏灌溉,而 30 d 后可轻度调亏灌溉。

参 考 文 献:

[1] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等.沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J].农业工程学报,2004,20(5):97-100.
[2] 马富裕,李蒙春,杨建荣,等.花铃期不同时段水分亏缺对棉花群体光合速率及水分利用效率影响的研究[J].中国农业科学,2002,35(12):1467-1472.

[3] Mitchell P D, Jerie P H, Chalmers D J. The effects of regulated water deficits on pear growth, flowering, fruit growth and yield[J]. J. Amerl Socl Hort, Scil, 1984,109(5):604-606.
[4] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.调亏灌溉对玉米生理生态和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,1998,14(4):81-87.
[5] 孟兆江,卞新民,刘安能,等.调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):182-186.
[6] 王育红,姚宇卿,吕军杰,等.调亏灌溉对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):59-62.
[7] 胡相明,赵艳云.小麦调亏灌溉研究及其应用前景展望[J].山东农业科学,2010,(11):47-50.
[8] 谭念童,林 琪,姜 雯,等.限量灌溉对旱地小麦旗叶光合特性日变化和产量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(4):805-811.
[9] Mitchell P D, Chalmer D J. The effect of Regulated water supply on peach tree growth and yields[J]. J Amer Soc Hort Sci, 1982,107(5):853-856.
[10] 申孝军,陈红梅,孙景生,等.调亏灌溉对膜下滴灌棉花生长、产量及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(1):40-43.
[11] 裴 冬,张喜英,亢 茹,等.调亏灌溉对棉花生长、生理及产量的影响[J].生态农业研究,2000,8(4):52-55.
[12] 孟兆江,卞新民,刘安能,等.棉花调亏灌溉的生理响应及其优化农艺技术[J].农业工程学报,2007,23(12):80-84.
[13] 王育红,姚宇卿,吕军杰,等.调亏灌溉对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):59-62.
[14] 孟兆江,卞新民,刘安能,等.调亏灌溉对棉花生长发育及其产量和品质的影响[J].棉花学报,2008,20(1):39-44.
[15] Attipalli R R, Kolluru V C, Munusamy V. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J]. J Plant Physiol, 2004,161(11):1189-1202.
[16] 刘瑞显,王友华,陈兵林,等.花铃期干旱胁迫下氮素水平对棉花光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J].作物学报,2008,34(4):675-683.
[17] 吴甘霖,段仁燕,王志高,等.干旱和复水对草莓叶片叶绿素荧光特性的影响[J].生态学报,2010,30(14):3941-3946.

(上接第 112 页)

[12] 陈克克.中药党参的研究概况[J].西安文理学院学报(自然科学版),2008,(2):33-39.
[13] Schmidhalter U, Oertli J J. Germination and seedling growth of carrots under salinity and moisture stress [J]. Plant and Soil, 1991, 132:243-251.
[14] 鱼小军,王彦荣,龙瑞军.光照、盐分和埋深对无芒隐子草和条叶车前种子萌发的影响[J].生态学杂志,2006,25(4):395-398.
[15] 叶文斌,樊 亮.党参和黄芪种植地土壤水浸液对玉米化感作用研究种子[J].种子,2013,32(4):29-33,36.
[16] 叶文斌,樊 亮,员汉伯. Pb^{2+} 对甘肃纹党种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].西北农业学报,2012,21(12):142-148.
[17] Leather G R, Einhellig F A. Bioassays in the study of allelopathy [C]//Putnam A R, Tang C S. The Science of Allelopathy. New York:John Wiley & Sons, 1986:133-145.

[18] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. Plant Physiology, 1973,51(5):914-916.
[19] 中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会.现代植物生理学实验指南[M].北京:科学出版社,1999.
[20] Küpper H, Küpper F, Spiller M. In situ detection of heavy metal substituted chlorophylls in water plants[J]. Photosynth Res,1998,58(2):123-133.
[21] Gichner T, Patková Z, Száková J, et al. Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2006,65(3):420-426.
[22] Ma H Y, Liang Z W, Kong X J, et al. Effects of salinity, temperature and their interaction on the germination percentage and seedling growth of *Leymus chinensis* (Trin) Tzve[J]. Acta Ecological Sinica, 2008,28(10):4710-4717.