

李艳芳,包国章,刘晓婷,等. 冻融及碱性盐胁迫下紫花苜蓿幼苗的生理响应[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):278-281.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.081

冻融及碱性盐胁迫下紫花苜蓿幼苗的生理响应

李艳芳,包国章,刘晓婷,敖 琪,郑 珏

(吉林大学环境与资源学院,吉林长春 130012)

摘要:以东苜 1 号品种苜蓿为试验材料,在中度碱性盐胁迫下对其幼苗进行冻融处理,以整株幼苗为试验对象,研究幼苗体内蛋白质含量、MDA 含量、脯氨酸含量、POD 活性、SOD 活性。结果表明,碱性盐胁迫下苜蓿幼苗体内产生大量活性氧,MDA 含量升高 10.83%~46.99%,对幼苗造成伤害,致使蛋白质含量减少 1.39%~9.89%,幼苗体内防御机制诱导 POD、SOD 活性增强以抵抗碱性盐伤害;在冻融胁迫下,整个冻融周期内脯氨酸、MDA 含量、POD 活性、SOD 活性均呈先升高后降低的趋势,对 -3℃ 较为敏感,与 10℃ 相比分别增加了 54.94%、76.80%、48.75%、10.80%,具有显著性差异($P<0.05$);低温状态下 MDA 含量增加,幼苗受伤害的程度加剧;冻融及碱性盐双重胁迫作用对紫花苜蓿幼苗的伤害更大。在冻融及碱性盐胁迫下,苜蓿幼苗的各项生理指标发生适应性变化,保证了幼苗的正常生长,表明苜蓿幼苗具有一定耐寒和耐盐碱能力。

关键词:紫花苜蓿幼苗;冻融;碱性盐胁迫;耐寒性;耐盐碱性

中图分类号:S541⁺.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)07-0278-04

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)以“牧草之王”著称,是世界上栽培利用最广泛的豆科牧草。其茎直立,丛生以至平卧,呈四棱形,无毛或微被柔毛,枝叶茂盛,全国各地均有栽培或呈半野生状态,生于田边、路旁、旷野、草原、河岸、沟谷等地。因其植株具有富含蛋白质、产量高、各类家畜喜食等优点,是畜牧业发展中饲料蛋白的重要来源^[1]。

我国是世界上土壤盐渍化较严重的国家之一,土壤盐渍化严重影响我国的农业生产和生态环境。我国盐碱地面积约为 4 000 万 hm^2 ,约占陆地总面积的 25%,仅海岸带、滩涂的面积就超过 667 万 hm^2 ^[2]。我国东北地区土壤盐渍化严重,且春季冻融是该地区最常见的现象,复合环境胁迫对牧草的要求更高。紫花苜蓿作为优质牧草,具有较强的抗寒、抗盐碱能力,抗逆性是决定其能否成功生存并发挥优势生产潜力的重要评价指标^[3]。

近年来,关于苜蓿耐盐性的研究取得了不少成果。龙明秀等研究发现,在盐胁迫下,紫花苜蓿幼苗叶片和根中抗氧化酶的含量增加;盐浓度较低时,叶片内抗氧化酶的含量变化不显著,根的抗氧化能力随着盐浓度的升高而下降^[1]。周瑞莲等研究发现,具有抗寒能力的白三叶在经历冻融过程后,部分恢复正常生长,可见融冻型胁迫引起细胞结冰-融化造成的机械伤害使许多植物无法越冬^[4]。王保平等研究发现,碱性盐对紫花苜蓿的胁迫作用大于中性盐,各种盐的作用强度顺序为 $\text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{NaCl} < \text{NaHCO}_3 < \text{Na}_2\text{CO}_3$ ^[5]。黄新等在紫花苜蓿耐盐转基因方面进行了研究^[6]。目前,国内学者侧重于植物耐盐

碱性或耐寒性的探究,双重胁迫下植物幼苗的生理响应有待进一步研究。选取苜蓿品种东苜 1 号为试验材料,研究冻融及碱性盐双重胁迫下苜蓿幼苗体内蛋白质含量、MDA 含量、脯氨酸含量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化规律,探索紫花苜蓿幼苗的耐寒和耐盐能力,为苜蓿耐寒性和耐盐性评价及寒冷地区盐碱地的改良提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用室内培养皿培养试验法。紫花苜蓿东苜 1 号种子经 7 d 培养后得到供试幼苗。

1.2 试验方法

1.2.1 种苗选育 挑取饱满的种子,采用 0.1% KMnO_4 溶液进行消毒,采用直径为 100 mm 的培养皿培养幼苗。每个培养皿中放入 2 层湿润的滤纸,均匀铺放 100 粒种子,加入适量水使种子浸没,盖盖培养。置于光照恒温培养箱中进行催芽处理,发芽期间可不采用光照。培养至发芽时,采用 12 h 光照,光照时间温度为 25℃,非光照时间温度为 15℃。发芽期每天定量滴加 4 mL 水,分早、中、晚 3 次添加。培养幼苗至长出第 3 片子叶时,选取长势相同的植株进行碱性盐胁迫处理。

1.2.2 盐碱处理 处理浓度为 0、100 mmol/L,即无胁迫、中度胁迫 2 个试验组。

1.2.3 人工模拟冻融试验 对碱性盐处理过的试验组进行冻融处理,处理时间为 2 h。温度分别设置为 10、5、0、-3、0、5、10℃。设置对照组,即加入盐碱溶液而不进行冻融的试验组。根据每个温度下测定指标所需的样量对试验组和对照组进行取样,每组取 3 份平行样,取样后在冰袋上迅速进行测定试验。

1.2.4 生理指标测定方法 采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量,采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量,采用酸性茚三酮比色法^[7]测定脯氨酸含量。分别采用 SOD、POD 试剂盒测定其活性。

收稿日期:2015-11-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:31070286、31270367);吉林省自然科学基金(编号:20150101089JC)。

作者简介:李艳芳(1991—),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事草地生态学研究。E-mail:18769415683@163.com。

通信作者:包国章,教授,主要从事草地生态学研究。E-mail:baogz@jlu.edu.cn。

1.2.5 数据处理 采用 Excel 2007、SPSS 19.0 软件进行数据处理、统计、分析,采用 Origin 8.0 软件对各样的测量数据进行制图。

2 结果与分析

2.1 蛋白质含量的变化

本试验中对照组为纯冻融胁迫试验组,盐碱组为冻融及碱性盐复合胁迫组。由图 1 可知,经 NaHCO_3 处理后,紫花苜蓿幼苗体内蛋白质的含量比对照组低,减少了 1.39% ~ 9.89%。可能是由于碱性盐胁迫下紫花苜蓿幼苗体内蛋白质合成酶的活性降低或遭到破坏,致使蛋白质合成受阻;或者由于蛋白质分解酶活性增强,导致蛋白质被分解,表明碱性盐处理导致植物幼苗体内蛋白质含量下降,这与毛桂莲等对植物耐盐能力的研究结果^[8-9]一致。

在融冻阶段,温度降至 5℃ 时,对照组和盐碱组中苜蓿幼苗体内蛋白质含量均呈下降趋势,10℃ 与 5℃ 相比均有显著性差异($P < 0.05$);温度降至 0℃ 时,2 个组均出现峰值,分别为 10.63、9.87 mg/g, 分别比 5℃ 时增加了 17.59%、13.84%,0℃ 与 5℃ 相比均有显著性差异($P < 0.05$);在 0 ~ -3℃ 时,对照组与盐碱组中的蛋白质含量均呈下降趋势,分别比 0℃ 时降低了 12.14%、12.86%,0℃ 与 -3℃ 相比均有显著性差异($P < 0.05$)。

在冻融阶段,随着温度的回升,苜蓿幼苗体内蛋白质含量均呈上升趋势。温度升至 0℃ 时,蛋白质含量大幅增加,出现了峰值 11.09、10.93 mg/g, 分别比 0℃ 时增加了 18.73%、27.09%,盐碱组变化较为明显,与 -3℃ 相比均有显著性差异($P < 0.05$);0℃ 以上时,随着温度的上升,苜蓿幼苗体内蛋白质含量均有所下降。这与 Fleck 等对冬小麦叶片中蛋白质积累与其抗冻性的研究结果^[10]一致,表明抗冻性强的品种能更有效地刺激积累保护物质,通过增加蛋白质含量有效缓解细胞代谢,抵抗低温。Guy 也得到过类似结论^[11]。

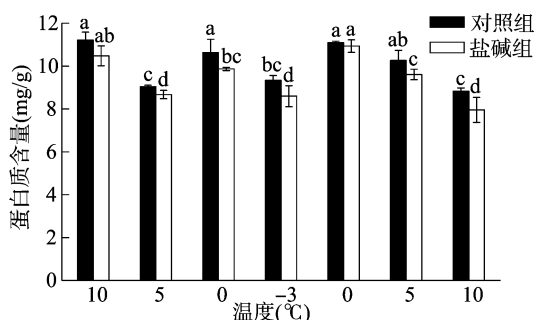


图1 冻融周期对紫花苜蓿幼苗体内蛋白质含量的影响

2.2 MDA 含量的变化

由图 2 可知,经 NaHCO_3 处理后紫花苜蓿幼苗体内的 MDA 含量均高于对照组,比对照组增加了 10.83% ~ 46.99%。可见,经 NaHCO_3 处理后,植物幼苗受到碱性盐胁迫,膜脂过氧化,MDA 含量的增加加剧了膜的损伤。这与尤佳等关于盐生植物黄花补血种子萌发和幼苗生长对盐碱胁迫生理响应的研究结果^[12]一致,在碱性盐胁迫下 MDA 含量升高,MDA 含量越高则膜损伤越大。

在融冻阶段,对照组与盐碱组中紫花苜蓿幼苗体内 MDA 含量的变化趋势一致。随着温度的降低,幼苗体内 MDA 含

量呈上升趋势。对照组与试验组在 -3℃ 时达到峰值,MDA 含量与 10、5、0℃ 时均有显著性差异($P < 0.05$), -3℃ 时含量分别为 20.96、25.76 $\mu\text{mol/L}$,与 10℃ 时相比分别增加了 64.13%、76.80%。

在冻融阶段,对照组与盐碱组植物幼苗体内的 MDA 含量呈下降趋势。温度回升至 10℃ 时,MDA 含量比 -3℃ 时分别降低了 37.83%、42.35%,与 -3℃ 时相比有显著性差异($P < 0.05$),但与融冻阶段 10℃ 时相比无显著性差异。可见,温度越低,植物幼苗体内 MDA 含量越高,这与张文惠等关于低温胁迫对马蹄金抗性生理生化指标影响的研究结果^[13]类似,低温胁迫下植物幼苗体内的 MDA 含量变化显著。

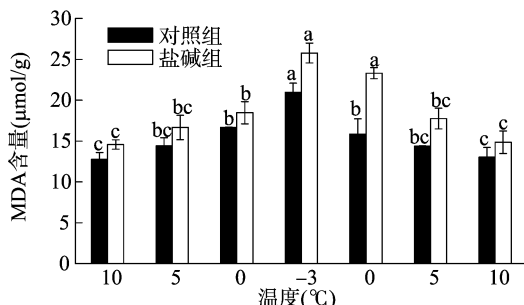


图2 冻融周期对紫花苜蓿幼苗体内 MDA 含量的影响

2.3 脯氨酸含量的变化

由图 3 可知,碱性盐处理组的脯氨酸含量均高于对照组,比对照组增加了 11.07% ~ 45.32%。可见,紫花苜蓿幼苗在碱性盐胁迫下发生了抗逆性反应,导致体内脯氨酸含量升高。这与胡宗英、高文俊等关于盐碱胁迫对紫花苜蓿生理特性影响的研究结果^[14-15]一致。

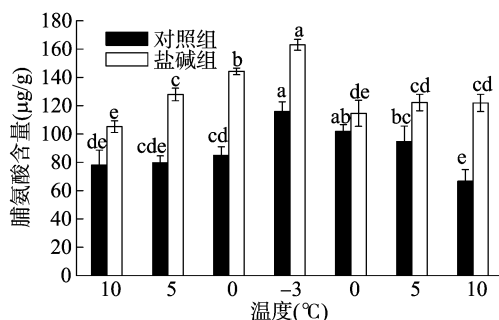


图3 冻融周期对紫花苜蓿幼苗体内脯氨酸含量的影响

由图 3 可知,冻融周期内紫花苜蓿幼苗体内的脯氨酸含量呈先上升后下降的趋势。在融冻阶段,对照组和盐碱组紫花苜蓿幼苗体内的脯氨酸含量均呈上升趋势,在 -3℃ 时出现峰值,分别为 116.03、163.01 $\mu\text{g/g}$,与 10℃ 时相比有显著性差异($P < 0.05$),分别增加了 48.64%、54.94%。在冻融阶段,随着温度的回升,对照组紫花苜蓿幼苗体内的脯氨酸含量呈下降趋势,10℃ 与 -3℃ 时相比有显著性差异($P < 0.05$),下降了 42.53%;随着温度回升至 0℃ 后,碱性盐处理组幼苗体内的脯氨酸含量先下降、后趋于平稳,与 -3℃ 时相比仍具有显著性差异($P < 0.05$),下降了 25.19%。这与李彦奇等关于低温胁迫对 3 种早春短命植物生理生化指标影响的研究结果^[16]一致,植物在低温状态下通过调节脯氨酸含量减缓低温伤害。

2.4 SOD 活性的变化

由图 4 可知,碱性盐处理后紫花苜蓿幼苗体内 SOD 活性

增强,与对照组相比增强了 3.21%~11.01%。可见,碱性盐处理后幼苗迫于碱性盐胁迫,提高了体内 SOD 活性。这与刘滨硕等关于羊草在盐碱胁迫下生理生化响应特征的研究结果^[17]一致,在一定盐碱浓度范围内,SOD 活性随着盐碱浓度的增大而增大。

在融冻阶段,对照组和盐碱组紫花苜蓿幼苗体内的 SOD 活性均随温度降低呈上升趋势。对照组变化不显著,-3℃ 时比 10℃ 时增加了 4.51%。碱性盐处理组中,10~0℃ 时 SOD 活性缓慢增强,0~-3℃ 时 SOD 活性明显增强,-3℃ 与 0℃ 时相比有显著性差异($P<0.05$),增加了 7.14%。可见,幼苗的 SOD 活性在 -3℃ 时反应较敏感,0℃ 以下时温度对幼苗的伤害加剧。在冻融阶段,随着温度的升高,对照组和盐碱组的 SOD 活性均先下降,后趋于平稳,-3℃ 与 0℃ 有显著性差异($P<0.05$),其余各温度之间没有显著性差异。可见,温度回升,幼苗解冻,植株受到的低温胁迫减缓,SOD 活性降低后趋于稳定。叶亚新等对低温胁迫下小麦、玉米、萝卜幼苗超氧化物歧化酶活性影响的研究表明,随着胁迫温度的降低,SOD 活性呈先上升后下降的趋势^[18]。龚束芳等研究表明,在低温胁迫下,偃麦草和高羊茅的 SOD 活性呈缓慢上升趋势^[19]。

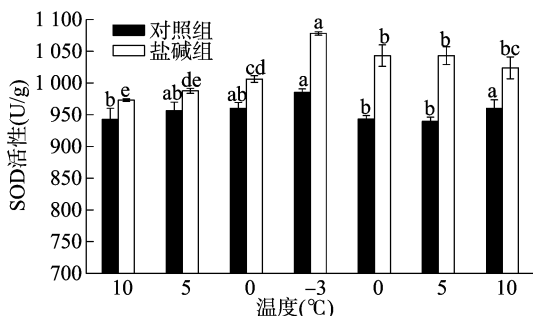


图4 冻融周期对紫花苜蓿幼苗体内 SOD 活性的影响

2.5 POD 活性的变化

由图 5 可知,碱性盐处理组的 POD 活性均高于对照组,增加了 0.48%~6.35%。与其他指标相比,POD 活性在碱性盐胁迫下的变化不是特别明显,但依然呈增加趋势。可见,紫花苜蓿有一定的抗盐碱能力,在碱性盐胁迫下,紫花苜蓿幼苗通过增强 POD 活性抵抗逆境环境。孙伟泽对紫花苜蓿抗盐胁迫的研究也证实了该结论,盐碱胁迫对植物体内的 POD 活性具有促进作用^[20]。

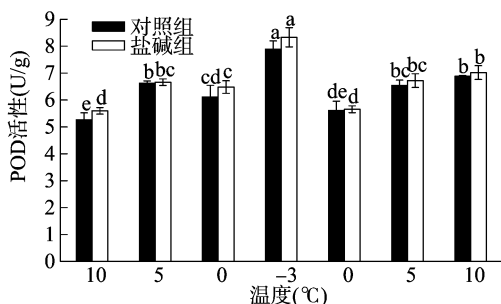


图5 冻融周期对紫花苜蓿幼苗体内 POD 活性的影响

在冻融阶段,对照组与盐碱组 POD 活性均呈上升趋势,在 -3℃ 时较敏感,达到峰值 7.89、8.33 U/g,与 10℃ 时相比具有显著性差异($P<0.05$),分别增加了 49.71%、48.75%。在冻融阶段,温度回升,0℃ 与 -3℃ 时相比 POD 活性急剧下

降,对照组与盐碱组均有显著性差异($P<0.05$),分别减少了 28.90%、32.05%;温度回升至 5℃ 后,POD 活性趋于稳定状态。可见,POD 活性随温度降低而升高,随温度升高而降低,温度回升至 0℃ 以上时趋于稳定,表明适度低温造成植株体内 POD 活性增强。李彦奇等在关于 3 种早春短命植物对低温胁迫影响机制的研究中也得到相似结论^[16]。

3 结论与讨论

3.1 冻融及碱性盐胁迫对紫花苜蓿幼苗中生物膜系统的影响

植物器官在逆境条件下常发生膜脂过氧化作用,MDA 是其产物之一,可与蛋白质、核酸发生反应修饰其特征,抑制蛋白质的合成。通常将 MDA 作为膜脂过氧化指标,其含量多少反映了膜的稳定性与植物受伤害程度^[21]。在冻融及碱性盐双重胁迫下,植物所受的最大伤害是膜脂过氧化。在双重胁迫环境中,细胞膜脂过氧化作用会造成 MDA 累积^[22]。本试验结果表明,紫花苜蓿幼苗的 MDA 含量在碱性盐单因子胁迫、冻融及碱性盐双因子胁迫下均表现出增加的趋势,幼苗生长受到胁迫,在逆境中产生了大量活性氧,致使细胞膜受损,MDA 含量增加。在本试验中 -3~0℃ 低温条件下,双重胁迫下盐碱组与对照组 MDA 含量的变化最为明显。可能的原因解冻过程中低温持续时间较长,苜蓿幼苗细胞膜受到的伤害更为严重,这与已有研究的结果^[23]一致。在逆境条件胁迫下,植物幼苗 MDA 含量随着胁迫程度的加强而逐渐增大,MDA 含量反映了冻融及盐碱胁迫对植物的伤害程度。

3.2 冻融及碱性盐胁迫对紫花苜蓿幼苗体内渗透调节物质的影响

游离脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,植物体通过调节渗透调节物质来维持体内渗透势平衡。在正常条件下,植物体内游离脯氨酸的含量很低,但遇到干旱、低温逆境胁迫时,体内脯氨酸大量累积,且累计指数与植物的抗逆性有关,因此可作为植物抗逆性的一项生化指标^[24]。本研究结果表明,紫花苜蓿幼苗在逆境环境中通过调节脯氨酸含量来维持体内渗透平衡。双重胁迫时的脯氨酸含量远远高于单因子胁迫,表明冻融条件下进行盐碱处理对幼苗的危害更大,这是由于双重胁迫下苜蓿既要通过脯氨酸进行渗透调节,又要抵抗低温伤害,而后者是耗能过程,导致苜蓿生长受抑制。

蛋白质是植物细胞中最丰富的生物大分子,是生物体结构和功能最重要的基础物质之一,作为酶的主要成分可参与细胞的化学反应^[24]。本试验研究发现,冻融及碱性盐双重胁迫下的蛋白质含量低于碱性盐单因子胁迫,这可能是因为碱性盐胁迫下幼苗生长受到抑制,蛋白质合成受阻,或蛋白质合成酶在双重胁迫下被分解,还可能是因为蛋白质合成速率小于分解速率。试验结果中蛋白质的变化规律与其他指标不尽相同,冻融循环过程中蛋白质含量随温度的降低而减少,这可能是因为低温造成植物生长缓慢,受到低温胁迫;持续进行低温胁迫,植物产生抗逆性反应,蛋白质含量随之升高;在 -3℃ 时,由于温度过低造成了冻性伤害,蛋白质含量下降;随着温度回升,苜蓿幼苗解冻,胁迫压力减缓,在抗逆能力的促使下蛋白质含量增加并趋于稳定。王会良等研究植物的抗寒性机理时总结了前人的研究结果,发现多数研究认为低温胁迫会引起蛋白质增加^[25],本试验结果与之一致。

3.3 冻融及碱性盐胁迫对紫花苜蓿幼苗体内保护酶系统的影响

植物处于盐碱、低温等逆境胁迫时,细胞内的活性氧会大量积累,超出正常水平,对细胞造成过氧化伤害。此时植物通过提高抗氧化酶系统的活性来清除活性氧,保护自身免受活性氧的伤害^[26-27]。

SOD 是保护植物细胞免受活性氧伤害的第一道防线,普遍存在于植物体内,具有将超氧阴离子自由基转化为 H_2O_2 的功能,保护植物免受羟自由基的伤害,其活性大小可直接反映植物受活性氧胁迫和耐受活性氧胁迫的能力^[28-29]。本试验结果表明,冻融及碱性盐双重胁迫下苜蓿幼苗体内的 SOD 活性高于碱性盐单一因子胁迫。在冻融胁迫下,碱性盐处理组的变化比对照组更为明显,表明双重胁迫下幼苗受到的伤害更为严重。温度降至 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,对照组与盐碱组的差距更为显著,随着温度的回升差距虽有减小但依然明显,表明冻融过程中的持续低温对幼苗造成损伤,导致活性氧含量过高,此时植物体诱导 SOD 活性增强以减少活性氧的伤害。这与李锐等关于棉花幼苗耐低温能力的研究结果^[30]一致,低温可诱导植物体内 SOD 活性增强。

POD 能够迅速消除植物体内 H_2O_2 造成的伤害,被认为是植物体内保护细胞免受 H_2O_2 伤害的主要酶。本试验结果表明,冻融及碱性盐双重胁迫下苜蓿幼苗体内的 POD 活性增强,在冻融周期内呈先升高、后下降、最后趋于稳定的规律。 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时幼苗体内 POD 活性最大,表现最为敏感,这可能是由于此时幼苗受到的胁迫最为严重,体内产生较多 H_2O_2 ,促使幼苗产生抗逆反应,诱导防御系统中的 POD 活性增强。

4 结论

冻融及碱性盐胁迫下,苜蓿幼苗体内 MDA 含量增加,幼苗体内膜脂过氧化伤害加剧,活性氧大量增加,细胞膜系统受损,苜蓿幼苗通过诱导 SOD、POD 活性的增强,快速消除活性氧,防御超氧阴离子自由基对植物体的伤害。在本试验条件下,苜蓿幼苗仍能继续生长,表明苜蓿幼苗具有一定的抗盐碱和抗寒能力,为寒冷地区盐碱地的利用提供了依据。苜蓿作为优良牧草,对土壤盐渍化环境的适应能力较强,同时具有抗寒能力,在寒冷地区盐碱地的利用中具有良好发展前景。

参考文献:

- [1] 龙明秀,许岳飞,何学青,等. NaCl 胁迫下紫花苜蓿幼苗抗氧化酶活性的研究[J]. 草地学报,2012,20(1):83-87.
- [2] 杨宝灵,姜健,封德全,等. 紫花苜蓿耐盐突变体筛选[J]. 大连民族学院学报,2006,8(3):40-43.
- [3] 吕林有,何跃,赵立仁. 不同苜蓿品种生产性能研究[J]. 草地学报,2010,18(3):365-371.
- [4] 周瑞莲,赵梅,张萍,等. 白三叶和红三叶对人工融冻胁迫的生理响应差异[J]. 生态学杂志,2012,31(6):1334-1340.
- [5] 王保平,董晓燕,董宽虎. 盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响[J]. 草地学报,2013,21(6):1124-1129.
- [6] 黄新,叶红霞,舒小丽,等. 紫花苜蓿耐逆诱变和转基因研究进展[J]. 核农学报,2008,22(5):630-634,644.
- [7] 孔祥生,易现峰. 生物生理学实验技术[M]. 北京:中国农业出版社,2008:186-192.
- [8] 毛桂莲,许兴. 枸杞耐盐突变体的筛选及生理生化分析[J].

西北植物学报,2005,25(2):275-280.

- [9] 王珺,柳小妮. 3个紫花苜蓿品种耐盐突变材料的耐盐性评价[J]. 草业科学,2011,28(1):79-84.
- [10] Fleck R A, Day J G, Clarke K J, et al. Elucidation of the metabolic and structural basis for the cryopreservation recalcitrance of *Vaucheria sessilis*[J]. Cryo Letters,1990,20:271-282.
- [11] Guy C L. Freezing tolerance of plants:current understanding and selected emerging concepts[J]. Canadian journal of botany - revue canadienne de botanique,2003,81(12):1216-1223.
- [12] 尤佳,王文瑞,卢金,等. 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学报,2012,32(12):3825-3833.
- [13] 张文惠,呼天明. 低温胁迫对马蹄金抗性生理生化指标的影响[J]. 吉林农业大学学报,2002,24(5):39-41.
- [14] 胡宗英. 不同盐碱胁迫对披碱草和紫花苜蓿种子萌发的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
- [15] 高文俊,徐静,谢开云,等. Na_2CO_3 和 $NaHCO_3$ 胁迫下冰草的生长及生理响应[J]. 草业学报,2011,20(4):299-304.
- [16] 李彦奇,姚正培,张桦,等. 低温胁迫对三种早春短命植物生理生化指标的影响[J]. 新疆农业科学,2012,49(9):1608-1615.
- [17] 刘滨硕,康春莉,王鑫,等. 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征[J]. 农业工程学报,2014,30(23):166-173.
- [18] 叶亚新,金进,秦粉菊,等. 低温胁迫对小麦、玉米、萝卜幼苗超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(23):244-248.
- [19] 龚束芳,杨涛,董宝龙,等. 低温胁迫对偃麦草与高羊茅抗性生理生化指标的影响[J]. 作物杂志,2010(6):72-74.
- [20] 孙伟泽. NaCl 胁迫对紫花苜蓿七个生理生化指标影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [21] Jaleel C A, Gopi R, Sankar B, et al. Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress[J]. South African Journal of Botany, 2007,2:190-195.
- [22] Du X M, Yin W X, Zhao Y X, et al. The production and scavenging of reactive oxygen species in plants[J]. Chinese Journal of Biotechnology,2001,17(2):121-125.
- [23] 陈冠宜. 盐地碱蓬和小花碱茅对 NaCl 和 Na_2CO_3 抗性的比较研究[D]. 济南:山东师范大学,2011.
- [24] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:190-281.
- [25] 王会良,何华平,龚林忠,等. 植物抗寒性研究进展[J]. 湖北农业科学,2011,50(6):1091-1094,1100.
- [26] 陈亚华,沈振国,刘友良. 低温、高 pH 胁迫对水稻幼苗根系质膜、液泡膜 ATP 酶活性的影响[J]. 植物生理学报,2000,26(5):407-412.
- [27] 刘忠,邓俭英,唐其展,等. 植物抗冷性研究进展[J]. 广西农业科学,2006,37(6):667-670.
- [28] Hernández J A, Ferrer M A, Jiménez A, et al. Antioxidant systems and $O_2^{\cdot-}/H_2O_2$ production in the apoplast of pea leaves. Its relation with salt-induced necrotic lesions in minor veins[J]. Plant Physiology,2001,127(3):817-831.
- [29] Bowler C, Vanmontagu M, Inze D. Superoxide-dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,1992,43:83-116.
- [30] 李锐,李生泉,范月仙. 低温胁迫对棉花幼苗 SOD、CAT 活性的影响[J]. 中国棉花,2008,35(2):18-19.