

郭 晖,冯文君,朱红霞,等. 土壤盐胁迫下 4 种园林植物的生理抗性[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):115-118.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.14.032

土壤盐胁迫下 4 种园林植物的生理抗性

郭 晖,冯文君,朱红霞,张家洋

(新乡学院生命科学技术学院,河南新乡 453000)

摘要:为了探讨蔓绿绒(*Philodendron martianum*)、合果芋(*Syngonium podophyllum*)、绿萝(*Scindapsus aureum*)和龟背竹(*M. deliciosa* Liebm)这 4 种园林植物在盐胁迫下的生理抗性规律,采用盆栽试验研究不同盐胁迫下植物的生理抗性特征。结果表明:随着盐处理浓度的增加,蔓绿绒、龟背竹叶片可溶性蛋白含量均随着处理浓度的增加呈现先升后降的变化趋势,之后在高浓度下可溶性蛋白含量有所下降但仍然高于对照,而合果芋、绿萝叶片可溶性蛋白含量则呈现升—降—小幅回升的变化趋势,并在高浓度盐胁迫下可溶性蛋白含量迅速降低且合果芋的可溶性蛋白含量低于对照;蔓绿绒、绿萝和龟背竹叶片游离脯氨酸含量均随着盐处理浓度的增加呈现逐渐增加的趋势,均在 NaCl(300 mmol/L NaCl)处理下达到最大值,而合果芋叶片游离脯氨酸含量则呈现先增加后降低的趋势;随着盐浓度的增大,4 种植物丙二醛含量、相对电导率整体上均不同程度增加,增加幅度依次是合果芋>绿萝>蔓绿绒>龟背竹;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性均随处理浓度的增加先升高后降低。隶属函数分析结果表明,4 种园林植物对盐分的生理抗性依次为龟背竹>蔓绿绒>绿萝>合果芋。

关键词:盐胁迫;园林植物;生理抗性;蔓绿绒;合果芋;绿萝;龟背竹

中图分类号: S682.360.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)14-0115-04

随着工业现代化的发展,灌溉地和塑料大棚面积扩大,土壤次生盐渍化日趋严重,使农业生产的可持续发展受到威胁^[1]。据统计,我国盐渍土总面积约 1 亿 hm^2 ,其中现代盐渍化土壤约 0.37 亿 hm^2 ,残余盐渍化土壤约 0.45 亿 hm^2 ,潜在盐渍化土壤约 0.17 亿 hm^2 ^[2]。土地盐渍化造成了农作物大量减产,甚至绝收。因此,筛选耐盐性植物并应用于盐渍土上栽培是亟待解决的问题。

园林植物不仅具有美化环境的功能,而且具有改善土壤的作用,这在许多国内外学者的研究中得到了证实^[3-4]。其中,全世界广泛栽培的天南星科草本植物在我国各省(区)种植越来越普遍,它们除了广泛应用于室内盆栽观赏外,还可设立成绿色支柱造型,更多用于室外半阴处作地被覆盖,是极具发展潜力的观叶植物。目前对于其研究多集中在繁殖方式和栽培技术等方面^[5-7],关于其抗盐的研究报道尚少。为此,本研究选择 4 种天南星科植物蔓绿绒、合果芋、绿萝和龟背竹为研究对象,采用不同浓度 NaCl 溶液进行处理,研究 4 种植物对 NaCl 的耐受性,以期找到具有一定耐盐胁迫的植物材料,并为今后盐碱化土壤的修复和改良提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

试验于 2016 年 4 月上旬在新乡学院实验实训基地内进

收稿日期:2016-12-08

基金项目:河南省教育厅高等学校科研项目(编号:17A180033);新乡市重点科技攻关项目(编号:CXGG16034)。

作者简介:郭 晖(1982—),男,宁夏彭阳人,硕士,讲师,主要从事植物生态学研究。E-mail:290711657@qq.com。

通信作者:张家洋,硕士,副教授,主要从事生态学研究。E-mail:skxsyzsr@163.com。

行。供试植物蔓绿绒(ML)、合果芋(HG)、绿萝(LL)和龟背竹(GB)均属天南星科,幼苗统一采购于新乡市花卉市场。供试土壤取自河南省新乡市农业科学院农业示范基地,土壤经自然风干后去除杂物、研磨、过 100 目筛,测定其基本理化性质。供试土壤为正常耕作的石灰性轻壤质潮土。土壤(0~15 cm)基本理化性质:有机质含量 9.56%,pH 值 7.83,全氮含量 3.50 g/kg,全磷含量 1.41 g/kg,全钾含量 21.37 g/kg,碱解氮含量 135.43 $\mu\text{g/kg}$,速效磷含量 13.67 $\mu\text{g/kg}$,速效钾含量 210.90 $\mu\text{g/kg}$ 。

1.2 试验设计

盆栽试验在室外防雨棚内进行。试验用盆为棕色不透光塑料盆(上直径 28 cm,下直径 16 cm,高 25 cm,底有小孔),配盆托,并在装盆前于盆底垫铺尼龙纱。根据 NaCl 胁迫浓度不同设 5 个处理,以不加 NaCl 为对照(CK),其他 4 个处理:Na1(50 mmol/L NaCl)、Na2(100 mmol/L NaCl)、Na3(200 mmol/L NaCl)和 Na4(300 mmol/L NaCl)。每盆 1 株,每个处理重复 4 次,共 80 盆,随机区组排列。将各处理浓度的 NaCl 溶液均匀搅拌至准备好的土壤中,装入塑料盆内,每盆装土折合干质量 10 kg。将试验材料预培养 35 d 后选取生长健壮、长势基本一致、无病虫害的植株移栽入塑料盆内进行盐胁迫试验并按常规管理。视盆土干湿状况,定期定量浇水,为防止盐分淋失,浇水后将渗漏到盆托上的盐水或盐土再倒入盆中,从而保持盐分浓度。

1.3 测定指标与方法

于处理后的植物生长稳定期(40 d)对每盆植物进行取叶测定。每株以第 4 张功能叶为采样叶,距叶轴 1/2 半径处避开叶脉采样,每个样品重复 3 次,分别测定如下 6 种生理指标:可溶性蛋白含量(595 nm),采用考马斯亮蓝染色法;游离脯氨酸含量(520 nm),采用酸性茚三酮法;丙二醛含量(532、

600、450 nm),采用硫代巴比妥酸法;相对电导率(浸泡法),借助电导仪;超氧化物歧化酶(SOD)活性(560 nm),采用氮蓝四唑光化还原法,以抑制氮蓝四唑(NBT)光化还原 50% 所需酶量为 1 个酶活单位(U);过氧化物酶(POD)活性(470 nm),采用愈创木酚法,以 1 min 内 $D_{470\text{ nm}}$ 变化(升高) 0.01 为 1 个酶活性单位(U)^[8]。

1.4 数据分析处理

隶属函数法是目前应用比较广泛的数学评定方法,根据模糊数学的原理,利用隶属函数进行综合评价。先求出各生理指标的具体隶属函数值^[9],然后对各隶属函数值进行求和,最后得出隶属函数平均值。基本计算方法如下:

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}); \tag{1}$$

$$\mu(X_i) = 1 - (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}); \tag{2}$$

$$X_i = \sum \mu(X_i) / n。 \tag{3}$$

式中: X_i 为指标 i 的测定值; X_{imin} 、 X_{imax} 分别为 4 种植物某一指标的最小值、最大值; $\mu(X_i)$ 为指标 X_i 的隶属函数值。如果所测指标与抗胁迫呈正相关则用式(1),呈负相关则用式(2),根据式(3)计算隶属函数平均值,该值越大,抗胁迫能力就越强。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对 4 种园林植物可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白是植物体重要的生理生化指标之一,在一定胁迫条件下,该种蛋白在植物某器官中含量越高,表明该部位代谢活动就越旺盛^[10]。从表 1 可以看出,在盐胁迫下,蔓绿绒、龟背竹叶片可溶性蛋白含量均随着处理浓度的增加呈现先升后降的变化趋势,分别在 Na2(100 mmol/L)、Na3(200 mmol/L)处理时达到最大值,表明在中高浓度下,这 2 种植物叶片内可溶性蛋白的含量与胁迫程度呈正相关,这是植物对环境胁迫的适应反应之一,其可溶性蛋白的含量分别是对照的 1.58、1.55 倍;之后在高浓度下,可溶性蛋白含量有所下降,但仍然高于对照,这表明中高浓度的盐处理可能通过诱导蔓绿绒、龟背竹叶片中可溶性蛋白的迅速合成以抵抗逆境胁迫,并且在高浓度的盐处理下具有较好的自我调节能力。合果芋、绿萝叶片可溶性蛋白含量随着处理浓度的增加呈现升—降—小幅回升的变化趋势,均在 Na2(100 mmol/L)处理时达到最大值,分别是对照的 1.52、5.10 倍。其中,在中高浓度盐胁迫下合果芋可溶性蛋白含量迅速降低且低于对照,表明中高浓度的盐胁迫使得合果芋可溶性蛋白合成功能受损,或与之相应的生理代谢受到影响,进而使其适应性的调节能力受到限制。

表 1 NaCl 胁迫对 4 种园林植物可溶性蛋白含量的影响					
植物名称	可溶性蛋白含量(mg/g)				
	CK	Na1	Na2	Na3	Na4
蔓绿绒	3.576	4.150	5.633	5.548	3.952
合果芋	2.543	3.219	3.860	1.586	1.689
绿萝	0.879	2.031	4.482	2.165	2.634
龟背竹	3.831	4.446	5.455	5.945	4.314

2.2 盐胁迫对 4 种园林植物游离脯氨酸含量的影响

游离脯氨酸是植物蛋白质的重要组成部分之一,也是植物体内重要的渗透调节物质之一。研究表明,脯氨酸与从细胞外

向细胞质的运输途径有关,还可以维持细胞液的渗透平衡^[11]。表 2 反映 4 种园林植物叶片游离脯氨酸含量在盐胁迫下的变化趋势。可以看出,蔓绿绒、绿萝、龟背竹叶片游离脯氨酸含量均随着盐处理浓度的增加呈现逐渐增加的趋势,均在 Na4(300 mmol/L)处理下达到最大值,增加幅度明显高于对照组,分别是对照的 5.24、3.36、5.40 倍。而合果芋叶片游离脯氨酸含量则呈现先增加后下降的趋势,即在 Na2(100 mmol/L)处理达到最大值,是对照的 6.88 倍,当达到 Na4 处理浓度时,游离脯氨酸含量迅速下降但仍然高于对照,是对照的 4.86 倍。

由以上分析可知,随着盐处理浓度的增加,蔓绿绒、绿萝和龟背竹叶片游离脯氨酸含量随之升高,且增加幅度依次为龟背竹>蔓绿绒>绿萝,说明这 3 种植物都表现出了良好的抗污染能力,且蔓绿绒因渗透调节物质含量的迅速增加而在细胞适应性代谢调节能力上表现为最强。而合果芋叶片游离脯氨酸含量则在中等处理浓度(Na2)下达到最高值且在高浓度处理下含量有所下降,这说明合果芋对盐胁迫的抵御能力是有一定限度的,存在一定的阈值。

表 2 NaCl 胁迫对 4 种园林植物游离脯氨酸含量的影响					
植物名称	游离脯氨酸含量(mg/g)				
	CK	Na1	Na2	Na3	Na4
蔓绿绒	0.294	0.731	1.179	1.431	1.542
合果芋	0.182	0.896	1.252	1.145	0.884
绿萝	0.412	0.578	0.939	1.052	1.385
龟背竹	0.392	0.779	1.258	1.526	2.117

2.3 盐胁迫对 4 种园林植物丙二醛含量的影响

丙二醛是植物体内膜脂过氧化的产物之一,当植物体受到逆境胁迫时,生物代谢过程产生自由基,会伤害植物细胞膜,影响植物的生长,可见丙二醛是反映膜系统受伤害程度的重要指标之一^[12]。由表 3 可知,随着盐浓度的增大,4 种植物叶片丙二醛含量均呈现逐渐上升的趋势,蔓绿绒、合果芋、绿萝、龟背竹叶片丙二醛含量分别比对照高 17.76%~87.39%、138.21%~372.90%、13.33%~91.79%、17.83%~87.36%。随着盐胁迫浓度的增加,最高浓度时丙二醛增幅大小依次为合果芋(372.90%)、绿萝(91.79%)、蔓绿绒(87.39%)、龟背竹(87.36%)。由此可见,随着处理浓度的增加,4 种植物细胞膜脂受到不同程度的伤害。

表 3 NaCl 胁迫对 4 种园林植物丙二醛含量的影响					
植物名称	丙二醛含量(μmol/g)				
	CK	Na1	Na2	Na3	Na4
蔓绿绒	0.698	0.822	0.894	1.119	1.308
合果芋	0.369	0.879	1.331	1.712	1.745
绿萝	0.780	0.884	1.122	1.388	1.496
龟背竹	0.791	0.932	1.013	1.268	1.482

2.4 盐胁迫对 4 种园林植物相对电导率的影响

生物膜结构和功能的稳定性与植物的抗逆性密切相关。在逆境胁迫下细胞膜受到了损伤,导致渗透物质大量外流,从而引起相对电导率升高^[13]。由表 4 可知,在盐胁迫下,蔓绿绒、合果芋、绿萝和龟背竹叶片的相对电导率均呈现上升的趋势,即从轻度胁迫到重度胁迫,4 种植物叶片的相对电导率逐渐上升,均在处理 4 处达到最大值。在 Na4 胁迫处理下,蔓绿

绒、合果芋、绿萝、龟背竹叶片相对电导率分别是对照的 1.24、1.38、1.29、1.20 倍。

与丙二醛含量变化情况一致,盐胁迫下 4 种植物相对电导率含量均不同程度提高,提高幅度由高到低依次是合果芋>绿萝>蔓绿绒>龟背竹。这表明随着胁迫程度的加剧,4 种植物的正常生理机能造成了不同程度的破坏。

表 4 NaCl 胁迫对 4 种园林植物相对电导率的影响

植物名称	电导率(%)				
	CK	Na1	Na2	Na3	Na4
蔓绿绒	46.427	51.422	53.483	55.338	57.686
合果芋	47.073	53.589	60.288	61.610	64.794
绿萝	46.881	50.510	56.826	60.233	60.639
龟背竹	43.756	47.142	50.038	51.217	52.508

2.5 盐胁迫对 4 种园林植物超氧化物歧化酶含量的影响

超氧化物歧化酶作为植物抗氧化保护系统的第 1 道防线,是防护氧自由基对细胞膜伤害的一种重要保护酶,植物在一定的条件下能提高活性以增强其抗逆能力^[14]。由表 5 可见,在盐胁迫下,蔓绿绒、合果芋、绿萝和龟背竹叶片的 SOD 活性随着盐处理浓度的升高呈现先增加后降低,其中蔓绿绒在 Na3(200 mmol/L)处理时 SOD 活性最高,与对照相比增加 71.64%,之后迅速下降但仍高于对照;而合果芋、绿萝和龟背竹均在 Na2(100 mmol/L)处理时活性最高,与对照相比分别增加 29.24%、32.65%、40.32%,之后迅速下降,在最大处理浓度时酶活性最低且低于对照,说明合果芋、绿萝和龟背竹通过自我调节 SOD 活性来适应胁迫的能力是有限的。

2.6 盐胁迫对 4 种园林植物过氧化物酶活性的影响

过氧化物酶是植物体内活性较高的一种酶,它与植物的呼吸作用、光合作用及生长素的氧化等都有密切关系,它能清除植物体内的过氧化物,可以催化有毒物质的氧化分解,因此过氧化物酶可作为反映植物生理抗性的指标之一^[15]。由表 6

表 7 4 种天南星科植物各项生理指标的隶属函数值

植物名称	可溶性蛋白含量	游离脯氨酸含量	丙二醛含量	相对电导率	超氧化物歧化酶活性	过氧化物酶活性	隶属函数平均值
蔓绿绒	0.927 00	0.821 57	1.000 00	0.905 59	0.721 49	0.684 62	0.843 38
合果芋	0.000 00	0.357 33	0.000 27	0.000 02	0.000 00	0.000 00	0.059 60
绿萝	0.307 76	0.000 00	0.642 09	0.495 70	0.742 98	0.274 47	0.410 50
龟背竹	0.999 94	1.000 00	0.752 08	1.000 02	1.000 00	1.000 00	0.958 67

3 结论与讨论

在盐胁迫下,由于细胞外的水势低于胞内,因而造成细胞内部水分会向外倒流,从而引起细胞失水。植物体为了维持正常生理代谢,细胞可以通过渗透调节作用来降低胞内水势,使细胞内水分保持平衡。可溶性蛋白和游离脯氨酸作为植物体重要的渗透调节物质,其含量的变化可以灵敏地反映植物体对于逆境的抵御能力。研究表明,逆境胁迫能够造成植物体代谢功能的紊乱,进而影响可溶性蛋白的含量^[16]。本研究发现,蔓绿绒和龟背竹叶片可溶性蛋白含量呈现先升后降的趋势,说明低浓度的盐胁迫有利于可溶性蛋白含量的积累,而高浓度下可溶性蛋白合成能力减弱;合果芋、绿萝叶片可溶性蛋白含量则均呈“升—降—小幅回升”的变化趋势,可能是低浓度的盐分作为一种逆境刺激因子促进了可溶性蛋白的合

表 5 NaCl 胁迫对 4 种园林植物超氧化物歧化酶活性的影响

植物名称	SOD 活性(U/g)				
	CK	Na1	Na2	Na3	Na4
蔓绿绒	299.677	369.439	444.106	514.380	390.077
合果芋	329.713	360.277	426.121	374.947	290.723
绿萝	395.065	427.395	524.054	485.457	392.914
龟背竹	423.284	457.923	593.952	520.133	420.980

可见,在盐胁迫下,蔓绿绒、龟背竹 POD 活性均随着盐浓度的升高呈现先升后降趋势,在 Na3(200 mmol/L)处理时 POD 活性最高(分别是对照的 3.80、3.88 倍),之后急剧降低,但仍然明显高于对照(分别是对照的 2.19、1.27 倍);而合果芋、绿萝叶片 POD 活性则在 Na2(100 mmol/L)处理时达到最大值,分别是对照的 3.13、5.34 倍,之后迅速下降且活性接近对照,说明高浓度盐胁迫对其 POD 清除机制已产生了明显的抑制作用。

表 6 NaCl 胁迫对 4 种园林植物过氧化物酶活性的影响

植物名称	POD 活性(U/g)				
	CK	Na1	Na2	Na3	Na4
蔓绿绒	655.689	1 094.230	1 394.554	2 491.247	1 438.054
合果芋	396.965	934.655	1 242.500	541.646	364.243
绿萝	247.330	851.445	1 320.742	653.261	257.785
龟背竹	706.126	1 178.401	2 153.620	2 739.769	896.780

2.7 抗盐能力的比较

利用模糊数学的隶属函数法对合果芋、龟背竹、绿萝和蔓绿绒的抗盐胁迫能力进行综合评价,隶属函数的加权平均值的累加均值越大,抗胁迫能力越强,如表 7 所示,蔓绿绒隶属函数平均值为 0.843 38,合果芋为 0.059 60,绿萝为 0.410 50,龟背竹为 0.958 67。因此,4 种植物抗盐能排序为龟背竹>蔓绿绒>绿萝>合果芋。

成,而当其超过一定浓度时则干扰植物体内的蛋白质代谢,使蛋白质的合成受阻,但随着盐浓度的进一步升高到防御系统的刺激阈值时,合果芋和绿萝的防御机制开始启动,进而生成相应的解毒物质,从而使可溶性蛋白含量有所回升。Smirnoff 等提出,在环境胁迫下植物内源脯氨酸可能具有清除活性氧的作用^[17]。本研究结果表明,游离脯氨酸在盐胁迫下能在 4 种植物叶片内迅速积累,降低细胞内渗透势,增强植物渗透调节能力,保证植物正常生长,这与秦峰梅等在黄花苜蓿上的研究结果一致^[18],再次证实了逆境胁迫能积累高水平的脯氨酸。

在逆境下,细胞膜发生膜脂过氧化作用,而 MDA 是膜脂过氧化作用的产物,因此 MDA 含量常用来表示植物对逆境条件反应的强弱。在本试验中,随着盐浓度的增大,4 种植物丙二醛含量均不同程度增加,尤其是合果芋增加幅度最大,这

表明其细胞膜脂过氧化伤害程度加剧,清除活性氧的能力有所降低,即受到的伤害程度最大。关于植物在盐胁迫处理下 MDA 含量的增加报道很多,如张小艾等研究盐胁迫对二月兰幼苗生理生态的影响,结果显示,随着胁迫浓度的加大,二月兰植株体内累积的 MDA 含量呈先降后升的趋势^[19],与本研究结论不一致。李学强等研究盐碱胁迫对欧李生理特性的影响,结果显示,随着胁迫时间的延长,欧李植株体内累积的 MDA 量增加^[20],与本研究结论一致。由此可以看出,植物在逆境胁迫下体内 MDA 含量的变化情况可因植物种类、胁迫浓度和胁迫时间的不同而有所差异。

生物膜结构与功能的稳定性与植物的抗逆性密切相关。盐胁迫对细胞膜造成了伤害,导致渗透物质大量外流,引起相对电导率升高。原海燕等通过研究 NaCl 胁迫对喜盐鸢尾生理化的影响,表明随着处理浓度的增加相对电导率呈现逐渐上升的趋势^[21]。本研究表明,随着处理浓度的增加,相对电导率逐渐升高,升高幅度因物种而异,变化幅度依次为合果芋 > 绿萝 > 蔓绿绒 > 龟背竹。

土壤盐碱化等不良影响都将影响植物的生长和植物体内活性氧代谢系统的平衡,导致产生大量的氧自由基,破坏膜的完整性,从而使膜的选择丧失,细胞内容物外渗,代谢紊乱,导致一系列有害的生理生化变化。SOD、POD 的协同作用可在植物体内形成清除活性氧的防御系统,使活性氧的产生和清除处于平衡状态,从而使植物细胞免受或减轻伤害。韩玉林研究发现,盐胁迫可导致鸢尾保护性酶活性增强^[22]。张永锋等发现,盐胁迫可引起苗期紫花苜蓿 SOD、POD、CAT 活性的改变^[23]。本研究表明,蔓绿绒、合果芋、绿萝和龟背竹叶片的 SOD、POD 活性均随着处理浓度的升高呈现先升后降趋势,这表明在低浓度胁迫下 SOD、POD 活性的升高是植物对逆境所作出的保护性反应,能及时清除盐胁迫产生的活性氧,而在中高浓度胁迫下,这 2 种酶活性又有所降低,可能是植株受害加重,超过了防御反应的阈值,酶的结构或合成受到影响。其中蔓绿绒的 POD、SOD 在中高盐浓度的处理下,活性迅速增加,增幅较大,显示其清除氧自由基能力增强,表明它们作为抗氧化保护酶发挥着重要作用,之后活性降低但仍然明显高于对照,说明胁迫对抗氧化保护酶清除机制未产生明显的抑制作用。而合果芋、绿萝尽管在低浓度胁迫下具有较强的消除氧自由基的功能,但在较高浓度胁迫下却表现出酶活性降低,甚至低于对照,这一结果表明在重度胁迫下合果芋和绿萝的生理机能受到了较为明显的抑制。

本试验设计都是在盆栽环境下进行的,在自然环境下的盐胁迫对植物生长发育的影响将更加复杂。此外,目前关于盐分对天南星科植物毒性的研究还很少,因此对于其在植物体内的富集、运输、分配,以及机体如何调控胁迫下的生长发育,有必要作进一步研究,以便为盐胁迫污染修复生态工程植物种类的选择提供更科学的依据。4 种天南星科植物的抗盐机制不尽相同,如果仅用 1 项生理生化指标来评价其抗盐性具有片面性,因此,将原来孤立的各项生理生化指标采用统计的方法转换成综合指标进行综合评价是比较合理的选择,只有这样才能得出较准确的结果。本研究选择可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、丙二醛含量、相对电导率、超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性 6 种生理生化指标并利用模糊数学

法进行综合评价,结果得出 4 种天南星科植物抗盐性大小顺序为龟背竹 > 蔓绿绒 > 绿萝 > 合果芋。

参考文献:

- [1] Kovda V A. Loss of productive land due to salinization [M]. Ambio, 1983, 12(2): 91–93.
- [2] 吕盼忠, 李保国. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 356–357.
- [3] Gulzar S, Khan M A, Ungar I A. Salt tolerance of a coastal salt marsh grass [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34(17/18): 2595–2605.
- [4] Gadallah M. Effects of proline and glycinebetaine on *Vicia faba* responses to salt stress [J]. Biologia Plantarum, 1999, 42(2): 249–257.
- [5] 康月惠. 希望蔓绿绒离体快繁技术研究 [J]. 亚热带植物科学, 2012(3): 73–75.
- [6] 叶飞, 建德锋. 合果芋组培苗的生根与移栽技术研究 [J]. 江苏农业科学, 2012, 40(11): 196–197.
- [7] 武勇, 李丽芸. 盐碱地园林植物栽培养护技术 [J]. 山西农业大学学报, 2005, 4(6): 89–90.
- [8] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [9] 魏秀俭. 玉米自交系耐旱性的模糊隶属函数法分析 [J]. 山东农业科学, 2005(2): 25–27.
- [10] Vitoria A P, Da Cunha M, Azevedo R A. Ultrastructural changes of radish leaf exposed to cadmium [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 58(1/2/3): 47–52.
- [11] 朱红霞, 张家洋, 张统. 绿航绿萝和金边吊兰对铅胁迫的生理响应 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 91–97.
- [12] 佟友丽, 冯君伟, 李玉花. 植物抗盐胁迫研究进展 [J]. 生物技术通讯, 2008, 19(1): 138–140.
- [13] 张华新, 宋丹, 刘正祥. 盐胁迫下 11 个树种生理特性及其耐盐性研究 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 168–175.
- [14] Grill E, Winnacker E L, Zenk M H. Phytochelatins: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants [J]. Science, 1985, 230(4726): 674–676.
- [15] Chen J, Zhong J, Gailsbrough P B. Characterization of phytochelatin synthase from tomato [J]. Physiologia Plantarum, 101(1): 165–172.
- [16] 杜喜梅, 张俊莲, 王蒂, 等. 烟草试管苗对盐胁迫的生理响应 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 238–242.
- [17] Smirnoff N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation [J]. New Phytologist, 1993, 125(1): 27–58.
- [18] 秦峰梅, 张红香, 武祎, 等. 盐胁迫对黄花苜蓿发芽及幼苗生长的影响 [J]. 草业学报, 2010, 19(4): 71–78.
- [19] 张小艾, 李名扬, 汪志辉, 等. 重金属及盐碱对二月兰幼苗生长和生理化的影响 [J]. 草业学报, 2013, 22(2): 187–194.
- [20] 李学强, 李秀珍. 盐碱胁迫对欧李叶片部分生理生化指标的影响 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(11): 2288–2293.
- [21] 原海燕, 黄苏珍, 郭智, 等. 锌对镉胁迫下马蔺生长、镉积累及生理抗性的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2111–2116.
- [22] 韩玉林. 铅与盐胁迫对喜盐鸢尾生长及生理抗性的影响 [J]. 西北植物学报, 2008, 28(8): 1649–1653.
- [23] 张永锋, 梁正伟, 隋丽, 等. 盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿生理特性的影响 [J]. 草业学报, 2009, 18(4): 230–235.