$MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫对紫花苜蓿幼苗生理的影响

魏晓娜[1],张晨[1],沈迎芳[1,2,3*]

(1.青海民族大学生态环境与资源学院,青海 西宁 810007;2.国家民委青藏高原资源化学与生态环境保护重点实验室,青海 西宁 810007;3.青海省特色经济植物高值化利用重点实验室,青海 西宁 810007)

摘要:【目的】探索$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫对紫花苜蓿生理的影响。【方法】以中苜1号紫花苜蓿幼苗为试验材料,设置200 mmol/L $MgCl_2$、$MgSO_4$模拟中性盐胁迫,研究中苜1号在盐胁迫0、3、6、24 h的生理变化趋势。【结果】随着胁迫时间的延长,$MgCl_2$胁迫下中苜1号幼苗叶绿素(Chl)、丙二醛(MDA)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)含量及过氧化物酶(POD)活性均呈现先上升后下降的趋势。其中,胁迫3 h时,幼苗内Chl、MDA和SP含量达到最大值,均与CK间存在显著性差异,分别比CK上升了57.06%、56.77%和138.95%,胁迫6 h时,幼苗内SS含量和POD活性达到最大值,均与CK间存在显著性差异,分别比CK上升了352.13%和86.41%;在$MgSO_4$胁迫下苜蓿叶片内SS、SP含量和POD活性均呈现先上升后下降的趋势,其中,胁迫3 h时,幼苗内SP和POD活性达到最大值,幼苗内SP含量与CK间存在显著性差异,而POD含量与CK间差异不显著,与CK相比,分别上升了115.88%和15.48%,胁迫6 h时,幼苗内SS含量达到最大值,与CK间存在显著性差异,SS含量上升了1175.64%,而CC和MDA的含量呈现逐渐上升的趋势,在胁迫24 h,Chl和MDA含量达到最大值,均与CK间存在显性差异,分别比CK上升了251.72%和382.71%。利用隶属函数法对两种盐胁迫下中苜1号幼苗内不同生理指标进行综合评价得出,中苜1号紫花苜蓿$MgCl_2$胁迫的平均隶属函数值为0.51,$MgSO_4$胁迫的平均隶属函数值为0.49。【结论】中苜1号幼苗对两种盐的耐受性由强到弱为$MgCl_2$>$MgSO_4$。

关键词:紫花苜蓿;$MgCl_2$;$MgSO_4$;生理指标;隶属函数;耐盐性

中图分类号:S541.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0239-07

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.027

土壤盐碱化是实现农业可持续发展的重大阻碍之一[1],严重制约着植物的生长[2],对农业生产造成巨大损失。研究发现,盐渍土的主要盐组分为Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cl^-和SO_4^{2-}[3]。在世界范围内,大约有3.97亿hm^2的土地受到不同类型盐的影响,如氯化钠(NaCl)、硫酸镁($MgSO_4$)和氯化镁($MgCl_2$)等[4]。而在我国,盐碱地的面积约为0.08亿hm^2[5]。其中,有120万hm^2的盐渍土壤分布在河西走廊,盐渍土中含有硫酸盐和氯化物[6]。我国北方干旱半干旱地区大面积的盐渍土壤以氯化物和硫酸盐为主[7]。其中,柴达木盆地哇玉农场的主要盐分组成为NaCl和$MgCl_2$[8]。青海省德令哈市弃耕地表层土壤存在K^+、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-和CO_3^{2-}[9]等离子。宋玉飞[10]通过利用不同浓度的$MgCl_2$及$MgSO_4$对不同品种的黄瓜幼苗进行处理,发现低浓度盐可促进幼苗的生长,高浓度盐抑制幼苗的生长,不同盐对幼苗的危害由大到小为:NaCl、$MgCl_2$、$MgSO_4$。李占成等[11]通过利用不同浓度的$MgCl_2$对糜子种子进行处理,发现低

收稿日期:2024-05-14;**修回日期:**2024-12-11

基金资助:青海民族大学2023年度校级规划项目(23GH12);青海省昆仑英才"中青年科技人才"托举项目(2023QHSKXRCTJ28)

作者简介:魏晓娜(1998-),女,山东淄博人,硕士研究生。E-mail:1697652839@qq.com

*通信作者,研究方向为青藏高原植物逆境生物学。E-mail:syfnc@126.com

浓度的盐处理能促进种子的萌发而高盐度的盐处理则对种子发芽有抑制作用。目前,相对于钠质盐渍土,镁质盐渍土更难治理。在世界范围内,镁质盐渍土广泛分布于俄罗斯、匈牙利和印度等地[12]。而在我国,镁质盐渍土主要分布于新疆焉耆盆地、开都河流域、木垒、额尔古伦河以南[13],以及甘肃河西走廊[14]等地。同钠质盐渍土相似,镁质盐碱土也可作为备用耕地。因此盐渍土的治理和综合开发、植物耐盐性的提高以及提高作物产量和品质等已成为未来农业发展及环境治理所需面临的重要课题。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是世界上栽培最早、分布最广的一种豆科苜蓿属植物,素有“牧草之王”的称号,是我国栽培面积最大的饲草之一[15]。紫花苜蓿具有适应性强、产量高、品质优、再生能力强和经济效益高等特点,还可以增加土壤含水量[16],有较好的水土保持效果,同时可以降低盐碱土壤水溶性盐总量和土壤的pH[17],因此常用于与作物间作增加作物产量和盐碱地治理,也常用作牛羊的饲草[18]。目前,有关中苜1号紫花苜蓿对NaCl和Na_2SO_4混合中性盐及NaCl、Na_2SO_4、$NaHCO_3$和Na_2CO_3混合盐碱等胁迫耐受性的报道较多,但其幼苗对$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫耐受性的研究报道较少。因此,本试验通过模拟$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫,研究其对中苜1号紫花苜蓿幼苗叶绿素(Chl)含量、渗透调节物质丙二醛(MDA)、可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)积累和过氧化物酶(POD)活性的影响,探究中苜1号紫花苜蓿对$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫的生理响应,以期为中苜1号紫花苜蓿响应$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫的分子机制、镁质盐碱地治理和提高作物产量的研究提供一定的理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试紫花苜蓿品种为中苜1号,试验材料来自青海省德令哈市尕海镇试验地,种子在阴凉通风处保存备用。

1.2 试验方法

1.2.1 紫花苜蓿幼苗的培养 选择籽粒饱满、大小均一的中苜1号紫花苜蓿种子为试验材料。取5 g种子均匀播撒于育苗盘中,用纯水刚好浸没种子,在(22±3)℃条件下萌发。萌发2 d后,挑选长势一致的苜蓿幼苗放入32.5 cm×24.5 cm×4.5 cm的育苗盘中,采用液培法,每盘加入定量的1/4 Hoagland营养液,每3 d换1次,放置于培养架上进行培养,培养室温度22±3 ℃,光暗周期为16/8 h,光照强度为1 625 lx,培养至21 d时换为定量的1/2 Hoagland营养液培养,28 d后进行胁迫试验。

1.2.2 $MgCl_2$及$MgSO_4$中性盐对紫花苜蓿幼苗的胁迫 用1/2 Hoagland营养液分别配置200 mmol/L的$MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫液,在紫花苜蓿苗龄4周时进行胁迫,于胁迫0、3、6、24 h时分别取样,0 h作为对照,液氮速冻后保存于−80 ℃超低温冰箱,以供生理指标测定。

1.3 盐胁迫下紫花苜蓿幼苗生理指标测定与方法

Chl含量采用分光光度法测定[19];MDA含量采用硫代巴比妥酸法测定[20];SS含量采用蒽酮比色法测定[21];SP含量采用考马斯亮蓝比色法测定[22];POD活性采用愈创木酚法[23]。

1.4 数据统计与分析

采用Excel对中苜1号各项指标的数据进行整理,用Origin 2024对中苜1号各项指标数据进行图表绘制,利用SPSS Statistics 27对所测得的生理指标数据进行差异显著性分析,综合影响采用模糊函数中隶属函数分析法。

隶属函数值的计算公式如下:

$$X_{(ij)}=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min})$$[24]

式中:$X_{(ij)}$表示i种类j指标的隶属函数值;X_{ij}表示i种类j指标的测定值;$X_{j\min}$表示第j个指标最小值;$X_{j\max}$表示第j个指标最大值。

2 结果与分析

2.1 $MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫对紫花苜蓿幼苗Chl含量的影响

随着胁迫时间的推移,在$MgCl_2$胁迫下中苜1号幼苗内Chl含量呈现先上升后下降的趋势,在$MgSO_4$胁迫下中苜1号幼苗内Chl含量呈现逐渐上升的趋势,且均高于CK。在$MgCl_2$胁迫3 h时,幼苗内的CC含量达到最大值,与CK之间存在显著差异,Chl含量上升57.06%,胁迫6 h时幼苗内Chl含量与CK之间差异显著,Chl含量上升43.51%,胁迫24 h时,Chl含量与CK不显著,比CK升高了27.02%。在$MgSO_4$胁

迫 24h 时，幼苗内 Chl 的含量达到最大值，且各处理与 CK 间均存在显著差异，胁迫 3 h、6 h 和 24 h 时，Chl 含量分别比 CK 升高 161.61%、173.88%、251.72%。随着胁迫时间的延长，$MgCl_2$ 胁迫下 Chl 含量的增长量小于 $MgSO_4$ 胁迫（图 1）。

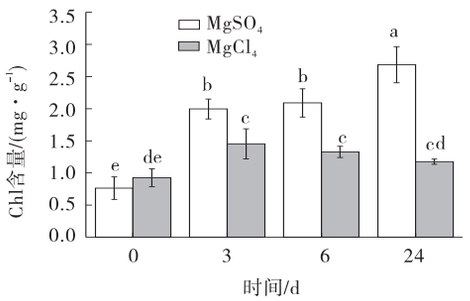

图 1　$MgCl_2$ 及 $MgSO_4$ 胁迫下 Chl 的含量

Fig. 1　Chlorophyll content under $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stress

2.2　$MgCl_2$ 及 $MgSO_4$ 胁迫对紫花苜蓿幼苗内 MDA 含量的影响

随着胁迫时间的推移，$MgCl_2$ 胁迫下中苜 1 号幼苗内 MDA 的含量呈现先上升后下降的趋势。在胁迫 3 h 时，MDA 的含量达到最大值。胁迫 3 h 和 6 h MDA 含量与 CK 间均存在显著差异，与 CK 相比，MDA 含量分别升高了 56.77% 和 28.21%，在胁迫 24h 时 MDA 含量与 CK 间差异不显著，MDA 含量比 CK 下降了 19.02%；在 $MgSO_4$ 胁迫下中苜 1 号幼苗内 MDA 的含量呈现逐渐上升的趋势，均高于 CK。在胁迫 6、24 h 时 MDA 含量与 CK 间存在显著差异，胁迫 3 h 时 MDA 含量与 CK 间差异不显著，胁迫 3、6、24 h 与 CK 相比，MDA 含量上升了 13.95%、139.83% 和 382.71%。在胁迫 3 h 时，$MgCl_2$ 胁迫下中苜 1 号幼苗内 MDA 含量的增长量大于 $MgSO_4$ 胁迫下的增长量；胁迫 6、24 h 时，$MgSO_4$ 胁迫下中苜 1 号幼苗 MDA 含量的增长量大于 $MgCl_2$ 胁迫（图 2）。

2.3　$MgCl_2$ 及 $MgSO_4$ 胁迫对紫花苜蓿幼苗内 SS 含量的影响

随着胁迫时间的推移，在 $MgCl_2$、$MgSO_4$ 胁迫下中苜 1 号幼苗内 SS 的含量均呈现先上升后下降的趋势。在 $MgCl_2$ 胁迫 6 h 时，幼苗内 SS 含量达到最大值，胁迫 3 h 和 6 h 时幼苗内 SS 含量与 CK 之间均存在显著差异，与 CK 相比，幼苗内 SS 含量分别上升了 226.80% 和 352.13%，胁迫 24 h 时 SS 含量与 CK 间差异显著，与 CK 相比，幼苗内 SS 含量下降了 68.01%；在 $MgSO_4$ 胁迫 6 h 时，幼苗内 SS 含量达到最大值，胁迫 3、6 h 幼苗内 SS 含量与 CK 间差异显著，胁迫 24 h 则与 CK 间无显著差异，与 CK 相比，SS 含量分别上升了 700.08%、1175.64% 和 78.16%。在胁迫 3、6 h 时，$MgCl_2$ 胁迫下幼苗体内 SS 含量的增长量均低于 $MgSO_4$ 胁迫下幼苗体内 SS 含量的增长量，在胁迫 24 h 时则相反（图 3）。

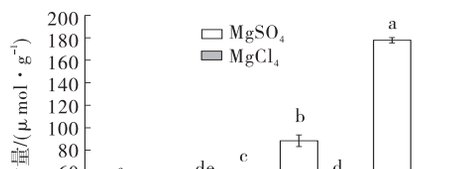

图 2　$MgCl_2$ 及 $MgSO_4$ 胁迫下 MDA 的含量

Fig. 2　Malondialdehyde content under $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stress

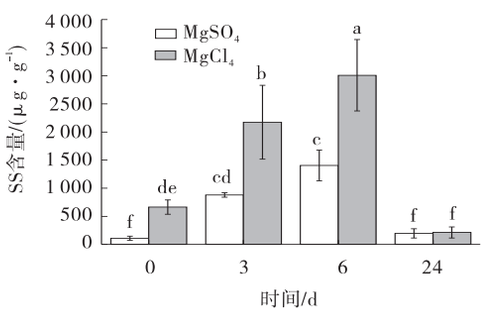

图 3　$MgCl_2$ 及 $MgSO_4$ 胁迫下 SS 的含量

Fig. 3　Soluble sugar content under $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stress

2.4　$MgCl_2$ 及 $MgSO_4$ 胁迫对紫花苜蓿幼苗 SP 含量的影响

随着胁迫时间的推移，在 $MgCl_2$、$MgSO_4$ 胁迫下中苜 1 号幼苗 SP 的含量均呈现先升高后降低的趋势。在 $MgCl_2$ 胁迫 3 h 时，幼苗 SP 的含量达到最大值，与 CK 间存在显著差异，在胁迫 6、24 h 幼苗 SP 含量与 CK 间差异不显著，与 CK 相比，SP 含量分别上升了 138.95%、1.42% 和 2.46%。在 $MgSO_4$ 胁迫 3 h 时，幼苗 SP 的含量达到最大，胁迫 3、6 h 幼苗内 SP 含量与 CK 差异显著，在胁迫 24 h 时幼苗内 SP 含量与 CK 间差异不显著，与 CK 相比，分别上升了 115.88%、68.43% 和 24.13%。在胁迫 3 h 时，$MgCl_2$ 胁迫下幼苗内 SP 含量的增长量均高于 $MgSO_4$ 胁迫下幼苗体内 SP 含量的增长量，在胁迫 6、24 h 时相反（图 4）。

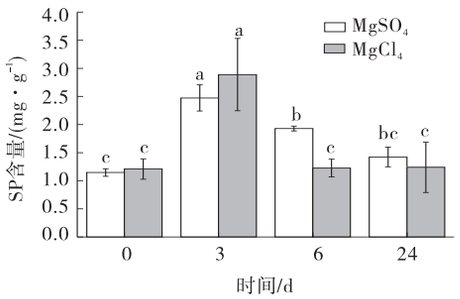

图4 $MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫下SP含量

Fig. 4 Soluble protein content under $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stress

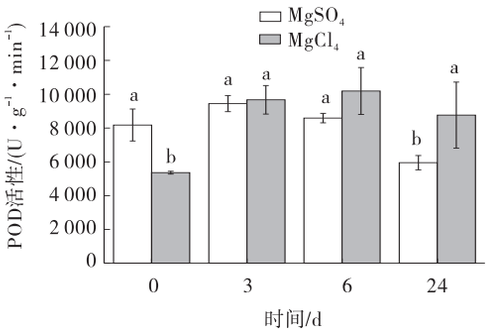

图5 $MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫下POD活性

Fig. 5 Peroxidase activity under $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stress

2.5 $MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫对紫花苜蓿幼苗内POD活性的影响

随着胁迫时间的推移,在$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫下中苜1号幼苗内POD活性均呈现先升高后降低的趋势。在$MgCl_2$胁迫6 h时,幼苗内POD活性达到最高,胁迫3、6 h和24 h幼苗内POD活性与CK间差异显著,与CK比较,分别上升了80.30%、86.41%和63.56%。在$MgSO_4$胁迫3 h时,幼苗内POD的活性最高,胁迫3 h和6 h幼苗内POD活性与CK之间无显著差异,与CK相比,POD活性分别上升了15.48%和5.01%,在胁迫24 h时幼苗内POD活性与CK差异显著,与CK相比,POD活性比CK下降了27.26%。相同浓度下,随着胁迫时间的增长,在$MgCl_2$胁迫下幼苗内POD活性的增长量比在$MgSO_4$胁迫下幼苗内POD的增长量大(图1)。

2.6 $MgCl_2$及$MgSO_4$胁迫对紫花苜蓿幼苗生理指标隶属函数综合评价

对不同$MgCl_2$、$MgSO_4$盐胁迫下幼苗的CC含量、SP含量、MDA含量、SS含量和POD酶活性5项指标进行隶属函数值计算,将各项隶属函数值累加,综合分析$MgCl_2$、$MgSO_4$盐胁迫对中苜1号紫花苜蓿种子萌发的隶属函数值得出,中苜1号幼苗对$MgCl_2$的耐受性更强。

3 讨论

Chl是植物进行光合作用的主要色素,在光合作用的光反应中起核心作用[25]。本研究中,在$MgCl_2$胁迫下,中苜1号幼苗内Chl含量呈现先上升后下降趋势,这与高龙飞等[26]的研究结果基本一致,而在$MgSO_4$胁迫下,中苜1号幼苗内CC含量呈现上升趋势。表明短时间内的盐胁迫可以促进中苜1号中Chl含量的合成,提高其光合作用,并促进其生长;而随着胁迫时间的延长,Chl含量降低,可能是因为盐胁迫阻碍植株吸收水分和矿质营养,导致Chl合成量降低,从而抑制了中苜1号的光合作用。

MDA是细胞在经受逆境条件下所产生的,其含量的高低可反应膜脂过氧化程度的高低,可用来确定膜系统受损严重程度,衡量植物遭受伤害程度,从而

表1 不同胁迫下5个生理指标的隶属函数值及排名

Table 1 Membership function values and rankings of different stress indicators

胁迫类型	胁迫时间/h	Chl	SP	MDA	SS	POD	隶属函数值	平均	排名
$MgCl_2$	0	0.42	0.48	0.40	0.45	0.49	0.45	0.51	1
	3	0.60	0.63	0.60	0.59	0.55	0.59		
	6	0.52	0.65	0.46	0.41	0.43	0.49		
	24	0.63	0.34	0.65	0.34	0.52	0.49		
$MgSO_4$	0	0.62	0.44	0.40	0.43	0.57	0.49	0.49	2
	3	0.59	0.62	0.38	0.44	0.42	0.49		
	6	0.54	0.36	0.39	0.50	0.52	0.46		
	24	0.57	0.59	0.60	0.34	0.42	0.50		

判断植物的抗逆性[27]。本研究中，在$MgCl_2$胁迫下，随着胁迫时间的延长，中苜1号幼苗内MDA的含量呈现先上升后下降的趋势，这与李菡等[28]、王柏柯等[29]的研究结果相似，表明中苜1号幼苗在$MgCl_2$胁迫初期，体内膜系统受损程度持续增加，细胞膜质过氧化严重，抗氧化能力降低，胁迫3 h时膜系统受损程度达到最大。随着胁迫时间的增加，MDA含量降低，表明膜脂过氧化程度降低，膜结构趋于稳定。在$MgSO_4$胁迫下，随着胁迫时间的增强，中苜1号幼苗内MDA的含量也随之增加，这与姬新颖等[30]、高彩婷等[31]的研究结果基本一致，表明在相同浓度的盐胁迫下，随着胁迫时间的延长，中苜1号幼苗叶片质膜系统受到的破坏程度逐步增加。

SS和SP是植物在抗盐碱过程中参与植物渗透调节的有机小分子物质，可使植物在胁迫环境下保持自身水分平衡[32]，其含量越多植物的抗性也越强。本研究中，在$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫下，中苜1号幼苗内SS和SP含量均呈现先上升后下降的趋势，这与王苗苗等[33]、Ren等[34]的研究结果基本一致。故推断盐胁迫初期，中苜1号幼苗通过产生SS和SP等渗透调节物质来调节植株内渗透压平衡；在6 h时，SS和SP含量在此时间点达到最高，这可能是盐胁迫对中苜1号幼苗生长的抑制作用达到最大；而后随着胁迫时间的延长，SS和SP含量逐渐降低，细胞渗透调节能力下降，从而抑制中苜1号幼苗的生长。

植物细胞在受到非生物胁迫相关的各种过程中产生活性氧（ROS），非生物胁迫（包括盐胁迫）破坏活性氧的生成和抗氧化防御系统之间的平衡，从而引发活性氧的过度积累，诱导植物产生氧化应激[35]。POD是清除ROS的活性酶之一，可减少植物在盐胁迫下产生的ROS，其活性的高低可反应植物耐受性的强弱[36]。本研究中，在$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫下，中苜1号幼苗内，POD的活性均呈现先上升后下降的趋势，这与刘昊等[37]、王苗苗等[38]的研究结果基本一致。表明在短时间盐胁迫下，中苜1号幼苗通过提高POD的活性来清除过量的活性氧，以减轻活性氧对细胞膜的伤害。但长时间的盐胁迫，超过了中苜1号幼苗的耐受范围，细胞内活性氧动态平衡被破坏，POD活性降低，细胞清除活性氧的能力下降，中苜1号幼苗的生长从而受到抑制。

4　结论

$MgCl_2$、$MgSO_4$胁迫对中苜1号紫花苜蓿幼苗叶绿素Chl含量、渗透调节物质（MDA、SS、SP）积累和POD活性产生不同的影响。随着盐胁迫时间的延长，中苜1号紫花苜蓿幼苗SS、SP含量和POD活性变化趋势一致；而Chl和MDA含量在两种盐胁迫下变化趋势不同，在$MgSO_4$胁迫胁迫下呈逐渐上升的趋势。利用隶属函数法综合评价得出中苜1号紫花苜蓿幼苗对$MgCl_2$的耐受性更强。

参考文献：

[1] Nouri H, Chavoshi Boruyjeni S, Nirola R, *et al*. Application of green remediation on soil salinity treatment: A review on halophytoremediation[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 107: 97－107.

[2] Dadach M, Ahmed M Z, Bhatt A, *et al*. Effects of chloride and sulfate salts on seed germination and seedling growth of *Ballota hirsuta* Benth. and *Myrtus communis* L. [J]. Plants (Basel), 2023, 12(22): 3906.

[3] Tobe K, Li X, Omasa K. Effects of five different salts on seed germination and seedling growth of *Haloxylon ammodendron* (Chenopodiaceae)[J]. Seed Science Research, 2004, 14(4): 345－353.

[4] Kalhori N, Ying T, Nulit R, *et al*. Effect of four different salts on seed germination and morphological characteristics of *Oryza sativa* L. cv. MR219[J]. International Journal of Advanced Research in Botany, 2018(1): 29－45.

[5] 吴海华，刘元元，喜炜，等. 新疆盐碱耕地改良利用现状与对策建议[J]. 中国农业综合开发，2023(8)：6－8.

[6] 颜霞，金芳，杨凤翔，等. 不同种类盐胁迫对孜然种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草原与草坪，2010，30(4)：71－75.

[7] 刘祖祺，张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京：中国农业出版社，1994：222－223.

[8] 李松阳，王晓丽，王彦龙，等. 柴达木盆地盐碱地土壤离子特征及养分分析[J]. 青海畜牧兽医杂志，2017，47(6)：36－40.

[9] 王启基，王文颖，王发刚，等. 柴达木盆地弃耕地成因及其土壤盐渍地球化学特征[J]. 土壤学报，2004，41(1)：44－49.

[10] 宋玉飞. 3种盐胁迫对黄瓜幼苗生长生理指标的影响

[D]. 太原:山西农业大学,2020.

[11] 李占成,张丽丽,李玮,等. 盐胁迫对糜子种子发芽的影响[J]. 作物杂志,2011(6):122－123.

[12] 彭钼植,吉小敏,姜黎. 温度与$MgCl_2$对罗布白麻种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技,2023(24):95－99.

[13] 李加宏,俞仁培. 镁质盐渍土危害作物生长机理的初步研究[J]. 土壤通报,1997(6):7－8＋21.

[14] 田兆顺,董汉章. 河西走廊镁质碱化盐渍土的初步研究[J]. 土壤,1977(5):13－21.

[15] Ma Q, Xu X, Wang W, *et al*. Comparative analysis of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedling transcriptomes reveals genotype－specific drought tolerance mechanisms [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021 (166): 203－214.

[16] 刘强. 朝阳县北部山区荒坡种植紫花苜蓿的水土保持效果分析[J]. 内蒙古水利,2019(1):24－25.

[17] 刘菊梅,曹博,石春芳等. 紫花苜蓿根际效应对河套灌区土壤盐分和养分的影响[J]. 南方农业学报,2018,49(2):246－252.

[18] 初建香,张立中. 紫花苜蓿的品质特性及其在动物生产中的应用[J]. 中国饲料,2022(11):91－95.

[19] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:74－77.

[20] 叶尚红,张志明,陈疏影. 植物生理生化实验教程[M]. 昆明:云南科技出版社,2004,150－152.

[21] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:104－106.

[22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:142－143.

[23] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导(2版)[M]. 广州:华南理工大学出版社,2006:72－73.

[24] 贾秀峰. 苏打盐碱胁迫对两种苜蓿种子萌发影响及品种耐性综合分析[J]. 草地学报,2019,27(6):1511－1517.

[25] 李玲,何国振. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2021:159－173.

[26] 高龙飞,贾斌,张卫华,等. 盐胁迫下蓝莓叶片生理特性与代谢组学分析[J]. 植物生理学报,2022,58(1):155－164.

[27] 眭静怡,宋雨晴,蔡俊文,等. 盐碱胁迫对红花幼苗的生理影响[J]. 中国野生植物资源,2023,42(11):28－32.

[28] 李菡,李云,任学军,等. 模拟海水胁迫下小麦幼苗的质量及生理响应机制[J]. 核农学报,2023,37(6):1270－1278.

[29] 王柏柯,唐亚萍,李宁,等. 番茄苗期响应盐胁迫的生理特性研究[J]. 新疆农业科学,2014,51(10):1808－1813.

[30] 姬新颖,唐佳莉,李敖,等. 盐胁迫下不同基因型核桃实生幼苗生长及生理响应[J]. 林业科学,2024,60(2):65－77.

[31] 高彩婷,刘景辉,张玉芹,等. 短期盐胁迫下燕麦幼苗的生理响应[J]. 草地学报,2017,25(2):337－343.

[32] Sperdouli I, Moustakas M. Interaction of proline, sugars, and anthocyanins during photosynthetic acclimation of *Arabidopsis thaliana* to drought stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169(6): 577－585.

[33] 王苗苗,赵桂琴,梁国玲,等. 不同耐盐性燕麦对盐胁迫的生理响应[J]. 草业科学,2021,38(11):2200－2209.

[34] Ren W, Chen L, Wang Q, *et al*. Transcriptome and metabolome analysis of upland cotton (*Gossypium hirsutum*) *Seed Pretreatment* with $MgSO_4$ in response to salinity stress[J]. Life, 2022, 12(6): 921.

[35] Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Zulfiqar F, *et al*. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator [J]. Antioxidants, 2020, 9(8): 681.

[36] Zhao D, Wang H, Chen S, *et al*. Phytomelatonin: an emerging regulator of plant biotic stress resistance [J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(1): 70－82.

[37] 刘昊,王倩,徐惠敏,等. 盐胁迫对小果黑核桃幼苗外部形态和生理变化的影响[J]. 天津农学院学报,2021,28(4):1－5.

[38] 王苗苗,赵桂琴,梁国玲,等. 不同耐盐性燕麦对盐胁迫的生理响应[J]. 草业科学,2021,38(11):2200－2209.

Effects of $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stress on physiology of alfalfa seedlings

WEI Xiao-na[1], ZHANG Chen[1], SHEN Ying-fang[1,2,3*]

(1. *The College of Ecological Enviroment and Resources, Qinghai Minzu University, Xining* 810007, *China*; 2. *Key Laboratory of Resource Chemistry and Eco-environmental Protection in Qinghai-Tibet Plateau* (*Qinghai Minzu University*), *State Ethnic Affairs Commission, Xining* 810007, *China*; 3. *Qinghai Provincial Key Laboratory of High value Utilization of Characteristic Economic Plants, Xining* 810007, *China*)

Abstract:【Objective】To explore the effects of $MgCl_2$ and $MgSO_4$ stresses on physiological indexes of alfalfa.【Method】Using Zhongmu No. 1 alfalfa seedlings as experimental materials, 200 mmol/L $MgCl_2$ and $MgSO_4$ were set to simulate the neutral salt stress, and the physiological changes of Zhongmu No. 1 at 0, 3, 6 and 24 h of salt stress were studied.【Result】The results showed that with the extension of stress time, the contents of Chl, MDA, SP, SS and POD activity in Zhongmu No. 1 seedlings increased first and then decreased under the stress of $MgCl_2$, and the contents of Chl, MDA and SP in seedlings reached the maximum value at 3 h stress, all of them are significantly different from CK, compared with CK, they increased by 57.06%, 56.77% and 138.95%, respectively. At 6 h of stress, the SS content and POD activity in seedlings reached the maximum, which were significantly different from those of CK, and increased by 352.13% and 86.41%, respectively. Under the stress of $MgSO_4$, the contents of SS and SP and the activity of POD in alfalfa leaves all showed a trend of first increasing and then decreasing. At 3 h stress, SP and POD activities in seedlings reached the maximum value, and SP content in seedlings was significantly different from CK, while POD content in seedlings was not significantly different from CK, and increased by 115.88% and 15.48% respectively compared with CK. At 6 h stress, SS content in seedlings reached the maximum value, which was significantly different from CK. The content of SS increased by 1175.64%, while the content of Chl and MDA showed a gradual upward trend. At 24 h of stress, the content of Chl and MDA reached the maximum, which showed dominant differences with CK, and increased by 251.72% and 382.71%, respectively, compared with CK. The membership function method was used to comprehensively evaluate different physiological indexes in the seedlings of Zhongmu No. 1 under two salt stresses. The average membership function value of Zhongmu No. 1 alfalfa under $MgCl_2$ stress was 0.51, and the average membership function value of Zhongmu No. 1 under $MgSO_4$ stress was 0.49.【Conclusion】The tolerance of Zhongmu No. 1 seedling to two kinds of salt was in the order from strong to weak: $MgCl_2$ > $MgSO_4$.

Key words: alfalfa; $MgCl_2$; $MgSO_4$; physiological index; membership funvtion; tolerance to salt

(**责任编辑**:康宇坤)