

短期 NaHCO_3 胁迫对 3 种冷季型草坪草生理生态特征的影响

宋娅丽, 马志, 王克勤, 张倩, 陈佳钰

(西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224)

摘要: 土壤盐渍化严重威胁草坪草的可持续发展, 选育和种植耐盐草坪草可改良和利用大面积盐渍土壤。以 3 种冷季型草坪草黑麦草 (*Lolium perenne* L.)、高羊茅 (*Festuca arundinacea* L.) 和早熟禾 (*Poa pratensis* L.) 为试验材料, 采用盆栽法研究不同浓度 NaHCO_3 胁迫 (0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%) 对 3 种冷季型草坪草生理生态特征的影响。结果表明: 不同浓度 NaHCO_3 胁迫下 3 种冷季型草坪草草坪外观质量、叶片萎蔫系数、叶片相对含水量、叶片叶绿素含量和 K^+ 含量均随着 NaHCO_3 浓度的增加而逐渐降低, 且浓度越高, 下降越明显; 0.4%~1.0% NaHCO_3 胁迫降低了 3 种冷季型草坪草的地上部分和根系干重, 且随着 NaHCO_3 浓度的增加, 生长受到胁迫的抑制程度显著增大, 根系部分的受抑制程度比地上部分更明显; 不同浓度 NaHCO_3 胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片相对电导率、脯氨酸含量、丙二醛含量和 Na^+ 含量随着 NaHCO_3 胁迫浓度的升高呈上升趋势, 且浓度越高上升越明显; NaHCO_3 浓度 > 0.4% 时, 3 种冷季型草坪草已受到伤害; 黑麦草、高羊茅和早熟禾在不同浓度 NaHCO_3 胁迫下的隶属函数平均值均表现为早熟禾 > 黑麦草 > 高羊茅, 说明 3 种冷季型草坪草抗 NaHCO_3 胁迫的能力均为早熟禾强于黑麦草和高羊茅。

关键词: NaHCO_3 胁迫; 生理生态特征; 冷季型草坪草; 短期

中图分类号: S688.4; Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0299-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.042

Effects of Short-term NaHCO_3 Stress on Physiological and Ecological Characteristics of Three Cold-season Turfgrass Species

SONG Yali, MA Zhi, WANG Keqin, ZHANG Qian, CHEN Jiayu

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: Soil salinization is a serious threat to the sustainable development of turfgrass, and breeding and planting salt-tolerant turfgrass can improve and utilize large area of saline soil. The effects of NaHCO_3 stress at different concentrations (0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1.0%) on the physiological and ecological characteristics of three types of cold-season turfgrass, including ryegrass (*Lolium perenne* L.), tall fescue (*Festuca arundinacea* L.) and kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) were studied by pot experiment. The results showed that the turf quality, leaf wilting score, leaf relative water content, leaf chlorophyll content and K^+ content of the three types of cold-season turfgrass decreased with the increasing of NaHCO_3 concentration, and the higher the concentration, the more obvious the decrease. Dry weight of aboveground and roots of the three types of cold-season turfgrass reduced under 0.4%~1.0% NaHCO_3 stress, and with the increasing of NaHCO_3 concentration, the inhibition degree of growth increased significantly, and the inhibition degree of root system was more obvious than that of aboveground parts. The leaf relative conductivity, proline content, malondialdehyde content and Na^+ content showed an increasing trend with the increasing of NaHCO_3 stress concentration, and the higher the concentration, the more obvious the increase. When NaHCO_3 concentration was greater than 0.4%, three types of cold-season turfgrass were damaged. The average value of subordinate function under different concentrations of NaHCO_3 stress followed the order of kentucky bluegrass > ryegrass > tall fescue, indicating that the resistance of kentucky bluegrass to NaHCO_3 stress was stronger than that of ryegrass and tall fescue.

Keywords: NaHCO_3 stress; physiological and ecological characteristics; cold-season turf grass; short term

收稿日期: 2019-01-08

资助项目: 云南省应用基础研究青年项目 (2016FD044); 西南林业大学科研启动基金 (111443); 云南省高校优势特色重点学科 (生态学) 建设项目 (050005113111)

第一作者: 宋娅丽 (1985—), 女, 山西长治人, 博士, 主要从事生态系统功能研究。E-mail: songyali19851205@sina.com

通信作者: 王克勤 (1964—), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 博士, 主要从事生态系统功能研究。E-mail: wangkeqin7389@sina.com

土壤盐渍化已成为当今全球性的资源环境和生态问题,严重威胁农业的可持续发展^[1]。据估计^[2],世界盐渍土面积约为 $9.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$,占世界陆地面积的 7.6%,且正以每年 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度增加。我国盐渍土面积约 $3.46 \times 10^7 \text{ hm}^2$,盐碱化耕地 $7.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$,约有 20% 耕地发生盐碱化,主要分布在干旱、半干旱地区以及沿海地^[3]。盐碱化土壤中的致害盐类胁迫除了以 NaCl 和 Na_2SO_4 为主的中盐以外,还有以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主的碱性盐。其中,碱性盐对植物的破坏作用明显大于中性盐所造成的盐胁迫^[4],其原因在于碱性盐高 pH 胁迫会破坏土壤结构引起土壤板结,严重抑制植物生长。近年来,随着气候变暖,大量盐碱地面积的增加使得大面积土地资源难以被利用,直接导致灌溉区作物的损失高达 1.1×10^{10} 美元^[5]。对非盐生植物来说,盐胁迫下产生的一系列生长和生理变化是植物耐盐能力的综合体现^[6]。有研究^[7]表明,土壤中盐分通过渗透与离子效应等途径影响种子的萌发,导致植物的水分利用效率降低、气孔关闭、叶绿素降解、碳同化能力减弱、光化学效率降低、植物光合能力下降,使作物生长发育受阻,引起植物体生理功能紊乱,直接影响作物的产量^[1]。同时,盐胁迫还会引起渗透胁迫、离子毒害等原初效应,以及营养亏缺、氧化胁迫等一系列次生胁迫^[8]。但为了减轻盐胁迫对植株造成的伤害,植物会增加渗透调节物质合成和积累来提高其适应能力^[9],维持渗透势的能耗,最终加速植物的衰老和死亡。因此,选育和种植耐盐植物,是改良和利用大面积盐渍土壤最为经济、快捷的措施之一^[10]。

当前,有关植物对盐逆境适应能力的研究已成为全球关注的热点,在植物对盐胁迫响应方面,大多集中于草本、灌木和乔木对氯化物盐土(NaCl 胁迫)的响应^[1,11-12]及对硫酸盐盐土(Na_2SO_4 胁迫)的响应^[13-15],而有关植物在 NaHCO_3 胁迫下的生长表现鲜见报道。草坪作为园林绿化的重要组成部分,对城市环境起着保护、改善和美化的积极作用,其数量和质量已成为衡量当地园林绿化水平和环境质量的标淮,因此选育出耐盐性的草坪草已成为亟待解决的问题。黑麦草、高羊茅和早熟禾均为多年生冷季型草坪草,多为公园、庭院及小型绿地上的先锋草种:黑麦草(*Lolium perenne* L.)成坪速度快、耐践踏、覆盖能力、抗病虫害能力和分蘖能力强^[16];高羊茅(*Festuca arundinacea* L.)耐践踏、耐热,成坪后常绿,适应的土壤范围广,耐粗放管理^[17];早熟禾(*Poa pratensis* L.)抗寒性强、耐阴性和耐旱性差、绿期长、坪质优美、适用性广^[18]。因此,本文采用盆栽法研究不同浓度 NaHCO_3 胁迫(0,0.2%,0.4%,0.6%,0.8%,1.0%)对黑麦

草、高羊茅和早熟禾外观质量、叶片萎蔫系数、地上部分干重、根系干重、根冠比、叶片相对含水量、叶绿素含量、叶片相对电导率、脯氨酸含量、丙二醛含量、 K^+ 含量和 Na^+ 含量的影响,并利用隶属函数法对其耐盐性进行综合评价,揭示 3 种冷季型草坪草相关指标与 NaHCO_3 胁迫之间的关系,以期为 NaHCO_3 类型盐碱地冷季型草坪草品种的选育及推广应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

供试材料为北京克劳沃公司进口的 3 种多年生冷季型草坪草:黑麦草“辉煌”、高羊茅“火凤凰 2 号”和早熟禾“雪狼”,均为价值较高的优良品系。试验地位于西南林业大学生态与水土保持学院温室大棚,整个试验在温室内进行,自然光照,不加温。2017 年 8 月初采用盆栽方法进行播种,种子种植于装有多孔黏土(沙土比为 1:1)的 PVC 管中(直径 10 cm,深 40 cm),放于玻璃温室内进行预培养。待种子发芽后每 2 天浇 1 次水,每 4 天用 Hoagland 营养液浇灌,每星期做 1 次修剪。播种 2 个月后进行 NaHCO_3 胁迫处理,处理 6 周。 NaHCO_3 胁迫浓度分别设置为 0(对照 CK),0.2%,0.4%,0.6%,0.8%,1.0%,共 6 个水平,每个水平 3 次重复。采用盐水灌溉的方法,把 NaHCO_3 配成上述浓度的盐水后定期定量地浇入管中。为减少盐分积累,各个浓度的盐水每 2 天浇 1 次,每次每管 200 mL,盐水浇入管中后多余的盐水从管底自由排出。开始盐处理时为减少盐冲击效应,不同浓度 NaHCO_3 以每 2 天以 0.2% 的浓度逐步增加。

1.2 指标测定

从 2017 年 10 月 5 日开始,在 NaHCO_3 胁迫的第 0,7,14,21,28 天分别测定草坪外观质量(turf quality, TQ)、叶片萎蔫系数(leaf wilting score, LWS)、叶片相对含水量(leaf relative water content, LRWC)和细胞质膜透性(leaf relative conductivity, LRC);试验 28 天结束后测定地上部分干重(shoot biomass, SB)、根系干重(root biomass, RB)、叶绿素含量(chlorophyll content, Chl)、脯氨酸含量(proline content, Pro)、丙二醛含量(malondialdehyde content, MDA)、 K^+ 、 Na^+ 含量,所有指标测定均重复 3 次。

草坪外观质量基于试验过程中草坪草地上部分生长情况按照 1 到 9 的数值来评价,1 为密度低、长势差、质地差(完全枯萎和棕色)的草坪,而 9 为密度高(充满整个 PVC 管)、长势好、均匀整齐、质地好(水分充足、颜色鲜绿)的草坪;叶片萎蔫系数是基于萎蔫状况和叶片颜色按照 1~9 的数值来评价,1 为完全

萎蔫、枯黄的草坪,而9为水分状况好、颜色鲜绿的草坪^[19]。生物量测定采用常规烘干法,叶片相对含水量测定采用常规烘干法,叶绿素含量采用分光光度法,细胞质膜透性采用电导率法,脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法,丙二醛含量采用硫代巴比妥酸比色法,K⁺、Na⁺含量采用火焰光度法^[20]测定。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理和统计分析,One-way ANOVA 进行单因素方差分析,并采用 Duncan 法进行多重比较。

耐受性评价方法采用隶属函数法^[21],评价时3个品种的各指标均使用胁迫第28天时的数据。

(1)各指标的隶属函数值。当指标与植物耐受性呈正相关时:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

当指标与植物耐受性呈负相关时:

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

(2)平均隶属值

$$X = \sum X_i / n$$

式中:U(X_i)为各指标的隶属值;U(X_i)越大耐受性

越强;X_i为某一指标的测定值;X_{max}和X_{min}分别为某一指标的最大值和最小值;X为平均隶属值。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 NaHCO₃胁迫对草坪外观质量(TQ)和叶片萎蔫系数(LWS)的影响

不同浓度 NaHCO₃胁迫对3种冷季型草坪草外观质量(TQ)和叶片萎蔫系数(LWS)的影响显著(图1、图2),TQ和LWC总体上变化一致,即随着NaHCO₃浓度的增加而逐渐降低,且浓度越高下降越明显,较高浓度的NaHCO₃胁迫则表现出显著的抑制作用。当NaHCO₃浓度较低时(0.2%),28天时3种草坪草TQ和LWC与CK相比,分别下降18.4%~23.9%和16.9%~24.7%;而当NaHCO₃浓度较高时(1.0%),3种草坪草TQ和LWC在28天时与CK相比差异性极显著(P<0.01),TQ和LWC分别下降54.8%~70.5%和57.8%~86.4%。3种草坪草的TQ和LWC在早期(0~14天)生长受不同浓度NaHCO₃胁迫影响较小,随着时间的持续,TQ和LWC逐渐降低,在21天时1.0%NaHCO₃胁迫下分别下降27.8%~36.8%和43.7%~60.7%。

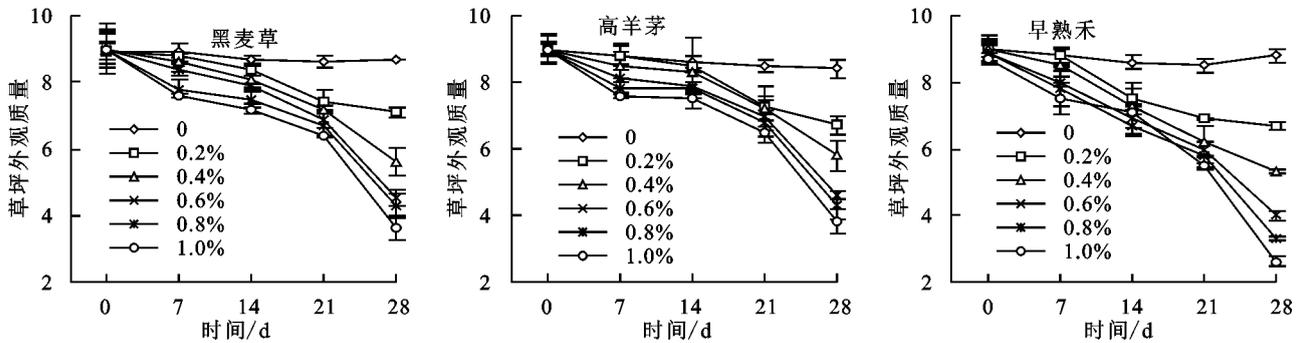


图1 不同浓度 NaHCO₃胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾草坪草外观质量的影响

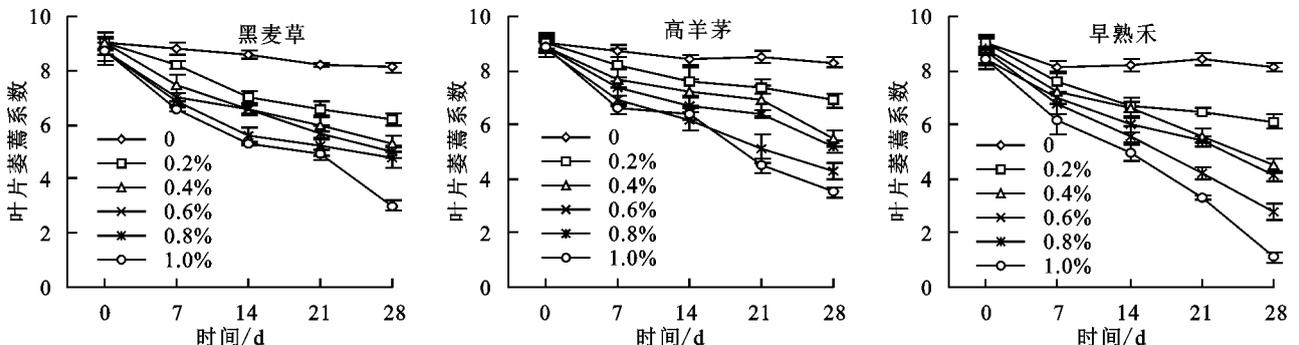


图2 不同浓度 NaHCO₃胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片萎蔫系数的影响

2.2 不同浓度 NaHCO₃胁迫对草坪草生物量的影响

由表1可知,随着NaHCO₃胁迫浓度的增大,3种冷季型草坪草地上部分和根系干重均呈下降趋势,且下降幅度不同。当NaHCO₃浓度为0.2%时,地上部分和根系干重虽有所下降,但与CK相比差异不显著(P<0.05),说明低浓度的NaHCO₃胁迫对3种草坪草幼苗生长的影响不明显。而浓度较高时

(0.4%~1.0%),地上部分和根系干重下降趋势明显,与CK相比差异显著(P<0.05),说明3种草不适宜生长在NaHCO₃浓度超过0.4%的生境内,0.4%~1.0%NaHCO₃胁迫抑制了3种冷季型草坪草的生长,且随着NaHCO₃浓度的增加,生长受到胁迫的抑制程度显著增大。当NaHCO₃浓度为1.0%时,地上部分和根系干重与CK相比分别下降了36.0%~

73.7%和 72.2%~83.7%，说明根系部分的受抑制程度比地上部分更明显。在 1.0%的盐胁迫下，黑麦草地上部分和根系干重的降低量(78.7%)显著高于高羊茅(55.8%)和早熟禾(67.7%)，说明高浓度 NaHCO₃胁迫下黑麦草生物量较其他 2 种草下降更

表 1 不同浓度 NaHCO₃胁迫对 3 种冷季型草坪草地上部分干重、根系干重和根冠比的影响

NaHCO ₃ 浓度/%	地上部分干重/g			根系干重/g			根冠比		
	黑麦草	高羊茅	早熟禾	黑麦草	高羊茅	早熟禾	黑麦草	高羊茅	早熟禾
0	3.19±0.03aA	2.24±0.02aB	1.11±0.02aC	1.68±0.01aA	1.52±0.02aA	0.74±0.02aB	0.53±0.01aB	0.68±0.07aA	0.67±0.02aA
0.2	3.15±0.09aA	2.26±0.01aB	1.14±0.02aC	1.64±0.03aA	1.58±0.05aA	0.53±0.03bB	0.52±0.01aB	0.70±0.02aA	0.47±0.07bB
0.4	2.93±0.05aA	2.16±0.08aB	0.83±0.03bC	1.07±0.04bA	1.26±0.06bA	0.45±0.03bB	0.37±0.09bB	0.58±0.07aA	0.55±0.03aA
0.6	2.58±0.02bA	1.32±0.09bB	0.74±0.01bC	0.92±0.03bA	0.87±0.02cA	0.41±0.02bB	0.36±0.06bB	0.66±0.02aA	0.55±0.05aA
0.8	0.97±0.07cB	1.45±0.01bA	0.60±0.01bC	0.31±0.03cB	0.71±0.03cA	0.32±0.03cB	0.32±0.03bB	0.49±0.02bA	0.54±0.02aA
1.0	0.84±0.02cB	1.43±0.02bA	0.41±0.02cC	0.27±0.02cB	0.37±0.03dA	0.21±0.04cB	0.32±0.04bB	0.26±0.01cB	0.50±0.02abA

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同浓度 NaHCO₃胁迫下相同草坪草差异性显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示相同浓度 NaHCO₃下不同草坪草差异性显著($P<0.05$)。下同。

2.3 不同浓度 NaHCO₃胁迫对草坪草叶片相对含水量和叶绿素含量的影响

由图 3 可以看出,随着 NaHCO₃浓度的增加,3 种冷季型草坪草叶片相对含水量(LRWC)呈显著降低趋势($P<0.05$),NaHCO₃胁迫通过降低 LRWC 对草坪草的生长产生不同程度的抑制。随着 NaHCO₃浓度的提高,各处理 0~14 天时 LRWC 变化幅度较

显著($P<0.05$)。黑麦草、高羊茅和早熟禾的根冠比分别在 NaHCO₃浓度为 0.6%,0.8%和 1.0%时与 CK 相比显著降低($P<0.05$),说明 NaHCO₃胁迫抑制了植株地下部分生物量的积累,改变了根冠之间的分配格局。

小,到 21 天时显著下降($P<0.05$)。在 28 天时 0.4%,0.6%,0.8%和 1.0% NaHCO₃处理下,LRWC 与 CK 相比分别下降 28.8%~37.9%,41.1%~46.4%,44.7%~62.5%和 49.9%~67.9%。

总体来看,不同浓度 NaHCO₃胁迫处理下 3 种冷季型草坪草下降幅度表现为早熟禾>黑麦草>高羊茅。

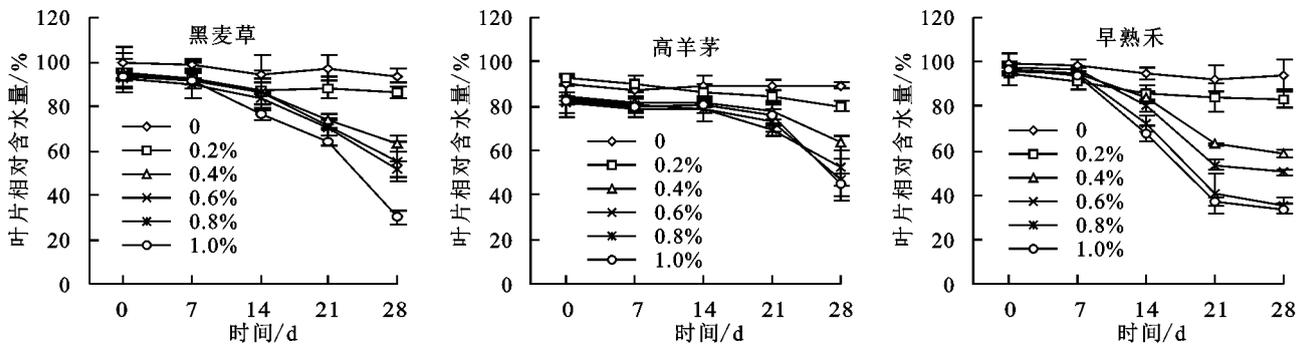


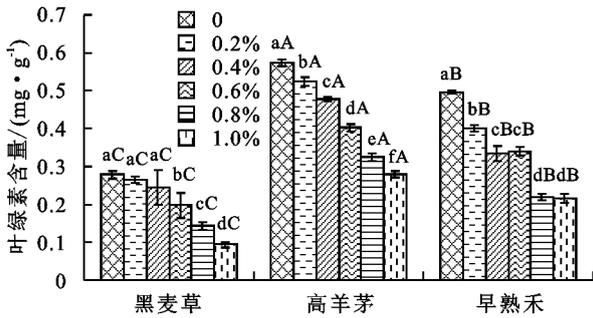
图 3 不同浓度 NaHCO₃胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片相对含水量的影响

由图 4 可以看出,随着 NaHCO₃浓度的增加,3 种冷季型草坪草的叶绿素(Chl)含量呈下降趋势,且 NaHCO₃胁迫浓度越大,与 CK 差异越大。黑麦草的 Chl 含量在 NaHCO₃浓度为 0.6%时显著下降;高羊茅和早熟禾均在 0.2%时显著下降($P<0.05$)。处理 28 天后,1.0%NaHCO₃浓度下黑麦草、高羊茅和早熟禾分别比 CK 下降了 66.2%,51.3%和 56.4%。三者相比,同一 NaHCO₃浓度下,Chl 含量均表现为高羊茅>早熟禾>黑麦草。

2.4 不同浓度 NaHCO₃胁迫对细胞质膜透性和脯氨酸含量的影响

由图 5 可知,随着 NaHCO₃胁迫浓度的升高,3 种冷季型草坪草的叶片相对电导率(LRC)呈上升趋势,且均高于 CK,升高幅度随 NaHCO₃处理浓度的增加而增大。28 天时 0.2% NaHCO₃胁迫处理下,

LRC 增加幅度较小且与 CK 差异不显著($P<0.05$);在 0.4%~1.0% NaHCO₃胁迫处理下,LRC 显著增加($P<0.05$),28 天时与 CK 相比分别增加 7.1%~12.8%和 7.8%~14.0%。由此可知,在较低浓度 NaHCO₃胁迫处理下(0.2%),草坪草细胞膜受害程度不大,而较高浓度 NaHCO₃胁迫(0.4%~1.0%)对叶片细胞膜造成了较大程度的破坏,生理指标上表现为相对电导率增加。随着时间的持续,不同浓度 NaHCO₃胁迫下 LRC 持续增加,说明 NaHCO₃胁迫时间越长,细胞质膜受损伤的程度越重。在同一 NaHCO₃浓度时,3 种冷季型草坪草 LRC 表现为黑麦草>高羊茅>早熟禾,说明 3 种草坪草中早熟禾的耐 NaHCO₃胁迫能力最强。三者比较,耐盐性较强的早熟禾细胞膜透性增大程度较小;相反,耐盐性较弱的黑麦草和高羊茅细胞膜透性增大程度较大。



注:图中不同小写字母表示不同浓度 NaHCO₃胁迫下相同草坪草差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示相同浓度 NaHCO₃胁迫下不同草坪草差异显著($P < 0.05$)。

图 4 不同浓度 NaHCO₃胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片叶绿素含量的影响

脯氨酸(Pro)是植物遇到逆境条件时体内一种重要的渗透调节剂,通常植株体内游离脯氨酸含量并不多,但遭受盐胁迫时,脯氨酸会被盐胁迫诱导而发生

显著变化,以维持细胞渗透势和细胞保护酶活性^[1]。从表 2 可以看出,不同浓度 NaHCO₃胁迫处理下 3 种冷季型草坪草叶片和根系 Pro 含量均显著上升,且随着 NaHCO₃胁迫浓度的增加而显著增加。在 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 和 1.0% NaHCO₃胁迫处理下,3 种冷季型草坪草叶片 Pro 含量分别显著增加了 77.7%, 168.2%, 197.9%, 211.2% 和 258.7% ($P < 0.05$),说明叶片 Pro 的增加量随着 NaHCO₃浓度升高而增加,且早熟禾增加量高于黑麦草和高羊茅;根系 Pro 含量分别显著增加了 33.2%, 66.2%, 138.5%, 153.3% 和 175.9% ($P < 0.05$),说明根系 Pro 的增加量同样随着 NaHCO₃浓度升高而增加,且黑麦草增加量均显著高于高羊茅和早熟禾。说明草坪草可通过提高 Pro 含量,在一定程度上缓解由 NaHCO₃胁迫引起的渗透胁迫。

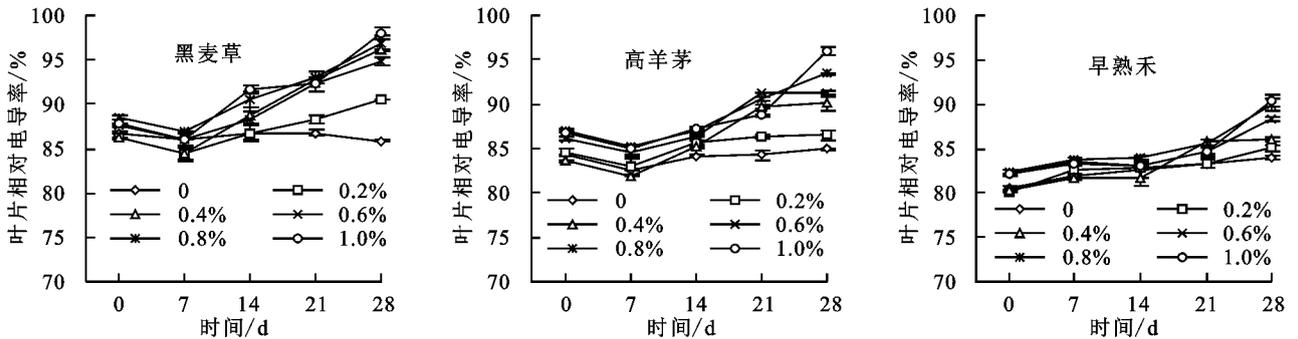


图 5 不同浓度 NaHCO₃胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片相对电导率的影响

表 2 不同浓度 NaHCO₃胁迫对 3 种冷季型草坪草叶片和根系脯氨酸含量的影响

NaHCO ₃ 浓度/%	叶片脯氨酸含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)			根系脯氨酸含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		
	黑麦草	高羊茅	早熟禾	黑麦草	高羊茅	早熟禾
0	67.49±3.93cB	102.93±3.23dA	124.32±7.58eA	37.21±2.03cC	62.5±5.16cB	85.70±7.07eA
0.2	89.43±11.29bC	156.32±4.73cB	309.33±4.38dA	56.56±4.67bC	75.46±1.32cB	108.81±9.32dA
0.4	198.28±0.25aB	200.32±5.34bB	393.23±12.32cA	65.40±1.32bC	95.21±4.36bB	146.02±8.39cA
0.6	202.32±10.23aB	215.23±8.54bB	478.43±8.94bA	94.78±2.56aC	129.05±3.49aB	217.88±6.12bA
0.8	203.23±12.03aB	199.54±7.49bB	545.32±10.53aA	105.90±1.93aC	134.44±9.52aB	223.11±3.41bA
1.0	223.42±9.32aC	295.43±10.64aB	569.43±13.24aA	110.66±1.03aC	142.71±5.36B	258.82±3.85aA

2.5 不同浓度 NaHCO₃胁迫对丙二醛含量的影响

植物器官衰老或在逆境下遭受伤害,往往发生膜脂过氧化作用。丙二醛(MDA)是膜质过氧化的最终分解产物,其含量的高低可反映植物遭受逆境伤害的严重程度^[22]。从图 6 可以看出,NaHCO₃浓度为 0.2% 时,3 种冷季型草坪草的 MDA 含量变化不明显;随着 NaHCO₃浓度的增加,MDA 含量呈递增趋势,0.4%~1.0% NaHCO₃处理的 MDA 含量与 CK 差异性显著($P < 0.05$)。说明 NaHCO₃浓度大于 0.4% 时,3 种冷季型草坪草已受到伤害,体内积累过量的活性氧,引起膜的过氧化,使 MDA 含量上升。处理 28 天后 1.0% NaHCO₃处理下黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片 MDA 与 CK 相比,分别增加 100.5%,

155.7% 和 101.2%;根系 MDA 分别增加 108.9%, 172.2% 和 164.0%。说明根系的变化幅度大于叶片,这可能是因为根系直接处于土壤中,对盐胁迫更加敏感。总体上,不同浓度 NaHCO₃处理下 3 种冷季型草坪草的 MDA 含量及增加量均表现为高羊茅>早熟禾>黑麦草。

2.6 不同浓度 NaHCO₃胁迫对 K⁺、Na⁺ 离子含量的影响

由图 7 和图 8 可以看出,叶片和根系 K⁺ 含量随着 NaHCO₃浓度的升高而逐渐降低,Na⁺ 含量则随着 NaHCO₃浓度的升高而逐渐升高。即使在较低的 NaHCO₃浓度下(0.2%),植株体内的 K⁺ 含量与 CK 相比显著降低,Na⁺ 含量显著升高($P < 0.05$)。在 28 天时,1.0% 的处理

下,黑麦草、高羊茅和早熟禾的叶片 K^+ 含量与 CK 相比分别下降 48%,83.3%和 50%,根系 K^+ 含量分别下降 53.8%,78.6%和 60%;叶片 Na^+ 含量与 CK 相比分别

增加 13.2,5.9,11 倍,根系 Na^+ 含量分别增加 8,5,11 倍。在不同 $NaHCO_3$ 浓度下,叶片 K^+ 和 Na^+ 含量均显著高于根系 ($P < 0.05$)。

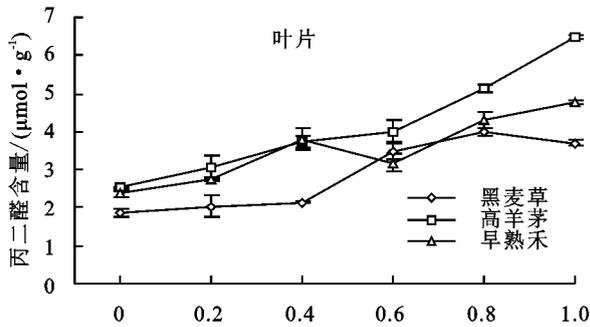


图 6 不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾丙二醛含量的影响

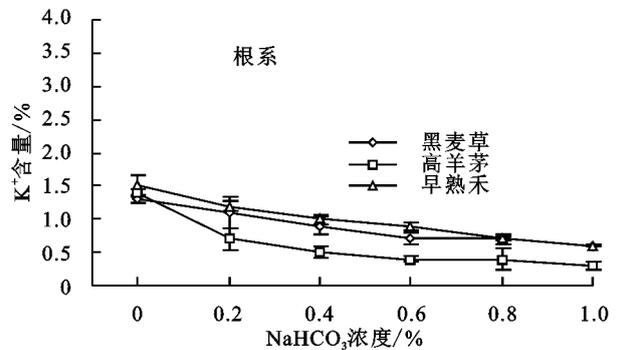
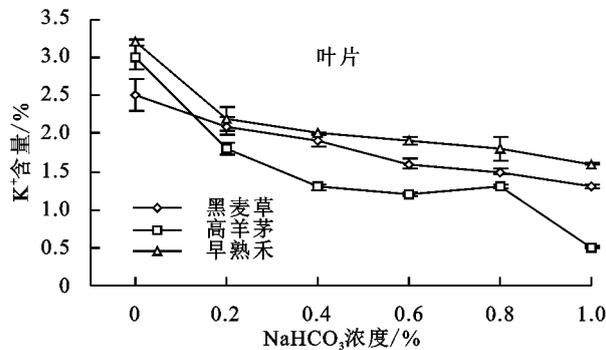
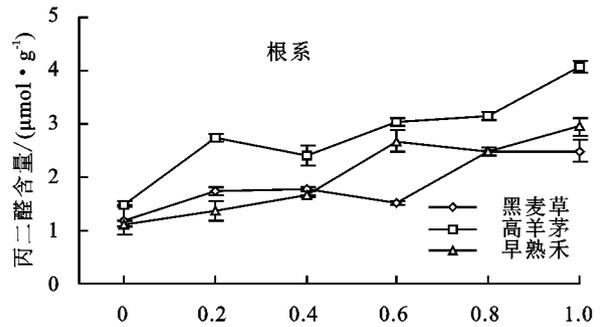


图 7 不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片、根系 K^+ 含量的影响

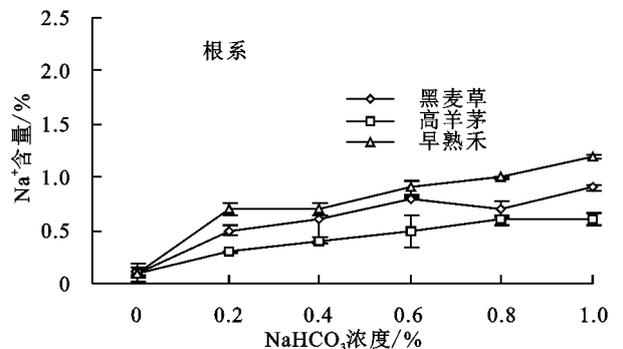
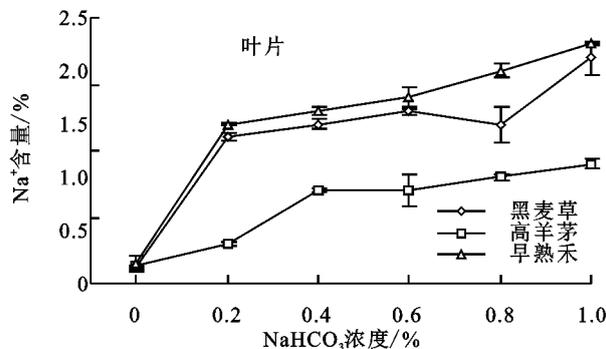


图 8 不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫对黑麦草、高羊茅和早熟禾叶片、根系 Na^+ 含量的影响

2.7 不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫对 3 种冷季型草坪草的耐受性评价

利用模糊数学的隶属函数法对 3 种冷季型草坪草的 12 项生理生态指标进行耐受性的综合评价(表 3),用每种草坪草各项指标不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫下隶属度的平均值作为不同草坪草抗逆性综合鉴定标准,该值越大则抗逆性越强。结果表明,黑麦草、高羊茅和早熟禾在不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫下的隶属函数平均值均表现为早熟禾 $>$ 黑麦草 $>$ 高羊茅,当 $NaHCO_3$ 胁迫浓度达到 1.0% 时,黑麦草、高羊茅和早熟禾的隶属函数平均值分别为 0.43,0.39 和 0.62,表明 3 种冷季型草坪草抗 $NaHCO_3$ 胁迫的能力均为早熟禾强于黑麦草和高羊茅。

3 讨论

植物生长过程对盐胁迫比较敏感,而生长指标作

为植物代谢过程在形态上的综合体现,是植物耐盐性的直接指标^[23]。同一盐类不同盐浓度、不同植物或同一植物不同发育阶段,以及暴露于盐胁迫条件下时间的长短,均可能产生不同的结果,盐分的抑制机理也不相同^[24]。本研究采用草坪草外观质量(TQ)、叶片萎蔫系数(LWC)、地上部分干重、根系干重、根冠比、叶片相对含水量(LRWC)、叶绿素(Chl)含量、叶片相对电导率(LRC)、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量、 K^+ 含量和 Na^+ 含量等指标反映不同浓度 $NaHCO_3$ 胁迫处理下 3 种冷季型草坪草黑麦草、高羊茅和早熟禾的受害情况。试验表明,随着 $NaHCO_3$ 胁迫浓度的增加,3 种冷季型草坪草 TQ、LWC、地上部分、根系干重、根冠比、LRWC、Chl 含量和 K^+ 含量逐渐降低,而 LRC、Pro 含量、MDA 含量和 Na^+ 含量逐渐升高。

表 3 不同浓度 NaHCO₃胁迫对 3 种冷季型草坪草的耐受性综合评价

指标	0			0.2%			0.4%			0.6%			0.8%			1.0%		
	HMC	GYM	ZSH															
TQ	0.44	0	1.00	1.00	0	1.00	0.40	0	1.00	0.17	0	1.00	0	0	1.00	0.17	0	1.00
LWS	0.18	0	1.00	0.63	0	1.00	0.20	0	1.00	0.18	0	1.00	0	0.25	1.00	0.21	0	1.00
SB	0	0.46	1.00	0	0.44	1.00	0	0.37	1.00	0	0.68	1.00	0.57	0	1.00	0.58	0	1.00
RB	0	0.18	1.00	0	0.05	1.00	0.23	0	1.00	0	0.10	1.00	1.00	0	0.97	0.60	0	1.00
R/S	1.00	0	0.06	0.77	0	1.00	1.00	0	0.83	1.00	0	0.83	1.00	0.22	0	0.73	1.00	0
LRWC	0.85	1.00	0	1.00	0	0	0.10	0	1.00	0	0.61	1.00	0	0.29	1.00	1.00	0	0.77
Chl	1.00	0	0.26	1.00	0	0.48	1.00	0	0.62	1.00	0	0.30	1.00	0	0.59	1.00	0	0.34
LRC	1.00	0.57	0	1.00	0.65	0	1.00	0.40	0	1.00	0.46	0	1.00	0.50	0	1.00	0.77	0
L-Pro	0	0.62	1.00	0	0.30	1.00	0	0.01	1.00	0	0.05	1.00	0.01	0	1.00	0	0.21	1.00
R-Pro	0	0.52	1.00	0	0.36	1.00	0	0.37	1.00	0	0.28	1.00	0	0.24	1.00	0	0.22	1.00
L-MDA	0	1.00	0.77	0	1.00	0.70	0	1.00	1.05	0.35	1.00	0	0	1.00	0.28	0	1.00	0.39
R-MDA	0.20	1.00	0	0.28	1.00	0	0.17	1.00	0	0	1.00	3.34	0	1.00	0	0	1.00	0.42
L-K ⁺	1.00	0.29	0	0.25	1.00	0	0.14	1.00	0	0.43	1.00	0	0.60	1.00	0	0.27	1.00	0
R-K ⁺	1.00	0.50	0	0.20	1.00	0	0.20	1.00	0	0.40	1.00	0	0	1.00	0	0	1.00	0
L-Na ⁺	0	0.33	1.00	0.89	0	1.00	0.83	0	1.00	0.86	0	1.00	0.50	0	1.00	0.89	0	1.00
R-Na ⁺	0	0	1.00	0.50	0	1.00	0.67	0	1.00	0.75	0	1.00	0.25	0	1.00	0.50	0	1.00
平均值	0.42	0.40	0.57	0.47	0.36	0.64	0.37	0.32	0.72	0.38	0.39	0.84	0.37	0.34	0.62	0.43	0.39	0.62
耐受性顺序	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1

注: HMC 为黑麦草; GYM 为高羊茅; ZSH 为早熟禾; TQ 为草坪外观质量; LWS 为叶片萎蔫系数; SB 为地上部分干重; RB 为根系干重; R/S 为根冠比; LRWC 为叶片相对含水量; Chl 为叶绿素含量; LRC 为叶片相对电导率; L-Pro 为叶片脯氨酸; R-Pro 为根系脯氨酸; L-MDA 为叶片丙二醛; R-MDA 为根系丙二醛; L-K⁺ 为叶片 K⁺ 含量; R-K⁺ 为根系 K⁺ 含量; L-Na⁺ 为叶片 Na⁺ 含量; R-Na⁺ 为根系 Na⁺ 含量。

在盐渍条件下,植物会通过改变外部形态特征(如落叶和死亡)和降低生长量(如生长缓慢)来适应环境^[25]。本研究结果表明,随着 NaHCO₃ 胁迫浓度的增加,3 种冷季型草坪草 TQ、LWC、地上部分和根系干重逐渐下降。低 NaHCO₃ 胁迫(0.2%)对草坪草地上和地下生长影响较小,但当浓度超过 0.4% 并达到较高浓度 1.0% 时,地上部分和根系干重显著降低,植株表现出叶片失绿黄化,焦枯脱落,甚至出现死亡的状况。说明高浓度的 NaHCO₃ 胁迫严重影响了草坪草的正常生长,这与陆蛮眉等^[26]的研究结果一致。不同植物可通过不同的生物量分配模式来适应盐胁迫,根冠比反映了植物地下部分与地上部分的相关性,试验中随着 NaHCO₃ 胁迫浓度的增加,黑麦草、高羊茅和早熟禾的根冠比均低于 CK,说明草坪草根系积累量减少,且高浓度 NaHCO₃ 胁迫下草坪草的地下部分比根系受胁迫影响更大。这些结果均表明,3 种冷季型草坪草对 NaHCO₃ 胁迫的耐受能力有限,浓度高于 0.4% 的 NaHCO₃ 胁迫则抑制其生长。

本研究中,NaHCO₃ 处理 14、28 天,3 种冷季型草坪草 LRWC 在 0.2% NaHCO₃ 浓度下无显著变化,0.4% 以上时显著下降,并随 NaHCO₃ 胁迫浓度增加而降低。说明在盐分环境中,植物受渗透胁迫会造成一定程度的水分亏缺,并通过植物组织含水量降低而造成生理伤害。叶绿素作为光合色素中重要的色

素分子,其含量会直接影响植物的光合效率,盐胁迫可能破坏植物叶绿体结构,激活叶绿素降解酶活性,使体内叶绿素含量下降,最终造成叶绿素含量下降^[27]。本研究中 3 种冷季型草坪草,在超过 0.4% NaHCO₃ 处理下,Chl 含量均明显低于 CK,并随着 NaHCO₃ 浓度的增加呈下降趋势,这是由于叶绿素水解酶活性增大,Chl 合成减少,分解增加,从而影响光能吸收、转化。说明草坪草叶绿体存在通过降低对光能的捕获而避免盐害的一种适应性机制,即此时叶绿体尚具备一定的利用光能进行光合作用的能力。

逆境条件下,植物叶片细胞膜透性(即相对电导率)是反映细胞膜脂过氧化程度强弱和受破坏程度的重要指标^[28],植物细胞膜对维持细胞的微环境和正常的代谢起着重要作用。当植物受到逆境影响时,细胞膜遭到破坏,膜透性增大,从而使细胞内的电解质外渗,以至于植物细胞浸提液的电导率增大^[20]。本研究发现,随着 NaHCO₃ 胁迫浓度的升高,3 种冷季型草坪草叶片 LRC 总体上呈升高趋势,表明 NaHCO₃ 胁迫导致草坪草相对电导率增大,细胞内的电解质外渗。高浓度 NaHCO₃ 胁迫条件下,3 种冷季型草坪草体内的活性氧的产生和清除平衡状态受到了破坏,从而诱发细胞膜的脂质过氧化。草坪草的 Pro 含量在 NaHCO₃ 胁迫下呈上升趋势,与 NaHCO₃ 浓度呈正相关,且高浓度盐胁迫下上升趋势更显著,说明草坪

草在高盐胁迫下通过产生大量脯氨酸来提高其耐盐性。这一研究结果与马剑等^[1]对文冠果的研究结果相一致。

MDA 是植物细胞膜脂过氧化作用的最终产物,其含量与细胞膜系统的伤害程度密切相关,是常用的膜脂过氧化指标^[29]。本研究发现,MDA 含量在 NaHCO₃ 浓度 0.2% 时没有显著变化;0.4%~1.0% 时 MDA 含量呈增加趋势,此时草坪草膜受到伤害,同时产生大量的自由基,引起膜的进一步过氧化,使 MDA 含量上升,这也在陆銮眉等^[26]的研究中得到证实。对于大多数植物而言,当外界 Na⁺ 浓度超过一定水平时会产生毒害作用。在本研究中,不同浓度 NaHCO₃ 胁迫下,草坪草 Na⁺ 均高于 CK,说明草坪草并不仅通过脯氨酸来调节渗透势,同时以无机离子 Na⁺ 作为主要渗透调节剂。不同 NaHCO₃ 浓度处理下,K⁺ 均显著性下降,且根系小于地上部分,说明草坪草根系促进 K⁺ 向地上部分运输。本研究还发现,在不同 NaHCO₃ 浓度下,草坪草地上部分的 Na⁺ 含量显著高于根部,由此说明,当草坪草被动吸收的 Na⁺ 超过根容纳范围时,只能将其转运至地上部分中,但其叶片 Na⁺ 区域化及对 K⁺ 的选择性转运能力较弱,使植株体内 K⁺、Na⁺ 稳态失衡,产生离子毒害,从而抑制其生长。

通过对草坪草的生理生态指标进行分析,低浓度 NaHCO₃ (0.2%) 对草坪草的生长和生理生化特性受到的影响相对较小,但 NaHCO₃ 浓度为 0.4%~1.0% 时,草坪草的生长及生理生化受到显著影响。这说明草坪草在低浓度的 NaHCO₃ 胁迫下表现出一定适应性和耐受能力,但浓度升高生长受到严重抑制。用每种草坪草各项指标不同浓度 NaHCO₃ 胁迫下隶属度的平均值作为不同草坪草抗逆性综合鉴定标准,该值越大抗逆性则越强,利用模糊数学的隶属函数法对 3 种冷季型草坪草的 12 项生理生态指标进行耐受性的综合评价得出,3 种冷季型草坪草在不同浓度 NaHCO₃ 胁迫下的隶属函数平均值均表现为早熟禾>黑麦草>高羊茅,因此,3 种冷季型草坪草抗 NaHCO₃ 胁迫的能力均为早熟禾强于黑麦草和高羊茅。综上,在土壤盐渍化地区,培育和引种抗 NaHCO₃ 胁迫能力较强的冷季型草坪草早熟禾,可通过生物措施改善盐碱地生态景观,其作用和效果优于黑麦草和早熟禾,这对于提高土壤盐渍化地区土地生产力具有重要而深远的实践意义。

4 结论

(1) 不同浓度 NaHCO₃ 胁迫下 3 种冷季型草坪草 TQ、LWC、LRWC、Chl 含量和 K⁺ 含量随着 NaHCO₃ 浓

度的增加而逐渐降低,且浓度越高下降越明显;

(2) 0.4%~1.0% NaHCO₃ 胁迫降低了 3 种冷季型草坪草的地上部分和根系干重,且随着 NaHCO₃ 浓度的增加,生长受到胁迫的抑制程度显著增大,根系部分的受抑制程度比地上部分更明显;

(3) 不同浓度 NaHCO₃ 胁迫下 3 种冷季型草坪草 LRC、Pro 含量、MDA 含量和 Na⁺ 含量随着 NaHCO₃ 胁迫浓度的升高呈上升趋势,且浓度越高上升越明显;NaHCO₃ 浓度大于 0.4% 时,3 种冷季型草坪草已受到伤害;

(4) 黑麦草、高羊茅和早熟禾在不同浓度 NaHCO₃ 胁迫下的隶属函数平均值均表现为早熟禾>黑麦草>高羊茅,说明 3 种冷季型草坪草抗 NaHCO₃ 胁迫的能力均为早熟禾强于黑麦草和高羊茅。

参考文献:

- [1] 马剑,刘贤德,张芬琴,等.NaCl 胁迫对文冠果生长及生理生化指标的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):182-187.
- [2] 杨志莹,赵兰勇,徐宗大.盐胁迫对玫瑰生长和生理特性的影响[J].应用生态学报,2011,22(8):1993-1998.
- [3] 刘凤歧,刘杰淋,朱瑞芬,等.4 种燕麦对 NaCl 胁迫的生理响应及耐盐性评价[J].草业学报,2015,24(1):183-189.
- [4] 张丽丽,马殿荣,陈温福,等.杂草稻幼苗对 Na₂CO₃ + NaHCO₃ 胁迫响应及其生理基础[J].华北农学报,2011,26(6):102-107.
- [5] Zhou D, Lin Z L, Liu L M. Regional land salinization assessment and simulation through cellular automaton-Markov modeling and spatial pattern analysis[J]. Science of the Total Environment,2012,439(11):260-274.
- [6] Sudhakar C, Lakshmi A, Giridarakumar S. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity [J]. Plant Science,2001,16(3):613-619.
- [7] 张雪,贺康宁,史常青,等.盐胁迫对银水牛果幼苗生长和生理特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):212-217.
- [8] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science,2001,6:66-71.
- [9] 韩志平,张海霞,刘冲,等.NaCl 胁迫对黄花菜生长和生理特性的影响[J].西北植物学报,2018,38(9):1700-1706.
- [10] 朱延凯,王振华,李文昊.不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):298-305.
- [11] 宋娅丽,王克勤,张倩,等.NaCl 胁迫对三种冷季型草坪草种子萌发和幼苗生长的影响[J].草原与草坪,2018,38(1):10-24.
- [12] 李小艳,白瑞琴,蔺予曼,等.NaCl 胁迫对几种柳树生长和生理特性影响的研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2018,29(5):7-14.
- [13] 王红玲,阿不来提·阿不都热依木,齐曼.Na₂SO₄ 胁迫

- 下狗牙根 K⁺、Na⁺ 离子分布及其抗盐性的评价[J]. 中国草地, 2004, 26(5): 37-42.
- [14] 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等. Na₂SO₄ 胁迫对沙枣幼苗生长和光合生理的影响[J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 186-194.
- [15] Nguyen H, Calvo P M, Zwiazek J J. Gas exchange and growth responses of ectomycorrhizal *Picea mariana*, *Picea glauca*, and *Pinus banksiana* seedlings to NaCl and Na₂SO₄[J]. Plant Biology, 2006, 8(5): 646-652.
- [16] 汪霞, 马啸, 张新全, 等. 四种不同钠盐胁迫对多花黑麦草种子萌发的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(4): 44-51.
- [17] 杨志民, 李志华. 矮壮素对高羊茅生长特性影响的研究[J]. 草业科学, 2005, 22(2): 31-33.
- [18] 白小明, 王靖婷, 贺佳圆, 等. 8个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 546-555.
- [19] Turgeon A J. Turfgrass management[C]. 9th ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2011.
- [20] 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: 134-282.
- [21] 宋娅丽, 王克勤, 王莎, 等. 3种冷季型草坪草对持续干旱、高温及其互作的生理生态响应[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 705-717.
- [22] 杜利霞, 董宽虎, 乔志宏, 等. NaCl 胁迫对赖草幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2013, 33(1): 1-10.
- [23] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [24] 鲁艳, 雷加强, 曾凡江, 等. NaCl 处理对梭梭生长及生理生态特征的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 152-159.
- [25] Salter J, Morris K, Bailey P C E, et al. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuc aericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings[J]. Aquatic Botany, 2007, 86(3): 213-222.
- [26] 陆鑫眉, 吴福妹, 张琼, 等. NaCl 胁迫对大黄龙船花生长及生理生化的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2015, 23(3): 262-267.
- [27] Rouhi V, Samson R, Lemeur R, et al. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 117-129.
- [28] 郭艳超, 孙昌禹, 王文成, 等. NaCl 胁迫对芙蓉葵种子萌发和种苗生长的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 158-163.
- [29] Tommasino E, Grifa S, Grunberg K, et al. Malondialdehyde content as a potential biochemical indicator of tolerance *Cenchrus ciliaris* L. genotypes under heat stress treatment[J]. Grass and Forage Science, 2012, 67: 456-459.
- (上接第 179 页)
- [12] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 氮肥调控对白浆土水稻产量效益及氮肥利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 136-140.
- [13] 宋添星, 彭显龙, 刘元英, 等. 实地氮肥管理对寒地水稻品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5): 590-593.
- [14] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 95-100.
- [15] 宋燕燕, 赵秀娟, 张淑香, 等. 水肥一体化配合硝化/脲酶抑制剂实现油菜减氮增效研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 632-640.
- [16] 赵自超, 韩笑, 石岳峰, 等. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦—夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 254-262.
- [17] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氮挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411-1419.
- [18] 孙志梅, 刘艳军, 梁文举, 等. 新型脲酶抑制剂 LNS 与双氰胺配合施用对菜田土壤尿素氮转化及蔬菜生长的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 803-805.
- [19] 李雨繁, 贾可, 王金艳, 等. 不同类型高氮复混(合)肥氮挥发特性及其对氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 615-623.
- [20] 韩蔚娟, 王寅, 陈海潇, 等. 黑土区玉米施用新型肥料的效果和环境效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 307-311.
- [21] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.
- [22] 隗英华, 陈利军, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 773-780.
- [23] 刘建涛, 许靖, 孙志梅, 等. 氮素调控剂对不同类型土壤氮素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2901-2906.
- [24] Lam S K, Suter H, Mosier A R, et al. Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N₂O emission: A double-edged sword? [J] Global Change Biology, 2017, 23: 485-489.