

# Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>短期胁迫对 3 种冷季型草坪草幼苗生长及生理特性的影响

宋娅丽, 陈佳钰, 王克勤, 张倩, 马志

(西南林业大学生态与水土保持学院, 云南昆明 650224)

**摘要:**以 3 种冷季型草坪草多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)为试验材料,采用盆栽法研究了不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫(0.0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%)对 3 种冷季型草坪草生长及生理特性的影响。结果表明:不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>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、叶绿素含量含量和 K<sup>+</sup>含量随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度的增加而逐渐降低,且浓度越高下降越明显;不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下,3 种冷季型草坪草叶片相对电导率、脯氨酸含量、Na<sup>+</sup>含量和丙二醛含量随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫浓度的升高呈上升趋势,且浓度越高上升越明显;0.4%~1.0% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫,降低了 3 种冷季型草坪草的地上部分、根系干重和根冠比,且随着 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>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 种草不适宜生长在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度超过 0.4%的生境内,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度大于 0.4%时,3 种冷季型草坪草已受到明显伤害;多年生黑麦草、高羊茅和草地早熟禾在不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下的隶属函数平均值均表现为草地早熟禾>高羊茅>多年生黑麦草,说明草地早熟禾对 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫具有较强的耐受性。

**关键词:**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫;生理特性;冷季型草坪草;短期

**中图分类号:**Q945.78;S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2019)05-0010-10

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyyep.2019.05.002

近年来,伴随着气候变暖,世界盐渍化程度不断加重,使农业用地约有 20%受影响,预计 2050 年这个数字将会超过 50%<sup>[1]</sup>。土壤盐渍化严重制约了农作物的生长发育,导致农作物产量降低,对农业生产造成了巨大的经济损失<sup>[2]</sup>。在高盐分盐渍土地地区,植物的生长受到限制,故现阶段对耐盐植物的筛选和应用已成为盐碱地区植被恢复与重建的重要研究。已有研究表

明,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幅度是植物耐盐能力的综合体现<sup>[3]</sup>,其中草坪外观质量、叶片萎蔫系数、叶片水分特征、叶绿素含量和渗透调节物质的变化以及植物对 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>选择性吸收程度的高低是影响植物耐盐能力的重要因素。

培育草坪是土地绿化和改善土壤土质的主要方法之一,草坪草对城市环境起着保护,改善和美化的作用,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准<sup>[4]</sup>。国内外有关草坪草盐胁迫的研究主要集中在盐分对植物的生理伤害,植物的耐盐机制及耐盐基因的相关研究上,如对结缕草属(*Zoysia*)、红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)、白颖苔草(*Carex rigescen*)、海滨雀稗(*Paspalum vaginatum*)的耐盐性研究,对结缕草属(*Zoysia*)的耐盐性种质资源筛选研究以及对假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)的耐盐性评价等,但研究多集中于 NaCl 胁迫或 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>胁迫下,有关草坪草在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下幼苗生长及生理特性的研究报道较少<sup>[4-9]</sup>。

**收稿日期:**2019-02-23; **修回日期:**2019-03-12

**基金项目:**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)资助

**作者简介:**宋娅丽(1985-),女,山西长治人,讲师,博士,研究方向为植物逆境生理生态学。

E-mail: songyali19851205@sina.com

王克勤为通讯作者。

E-mail: wangkeqin7389@sina.com

多年生黑麦草(*Lolium perenne*),高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)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,多年生黑麦草耐践踏、成坪速度快,覆盖能力、抗病虫害能力和分蘖能力强;高羊茅耐热耐践踏,成坪后常绿,适应的土壤范围广;草地早熟禾耐阴性和耐旱性差、抗寒性强、绿期长、坪质优美,适用性广<sup>[11]</sup>。以多年生黑麦草,高羊茅和草地早熟禾为研究对象,对其耐盐性进行分析和评价,以期对  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  类型盐碱地冷季型草坪草品种的选育及推广提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

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辉煌黑麦草(*Lolium perenne* cv. Brilliant)、火凤凰 2 号高羊茅(*Festuca arundinacea* cv. Fire phoenix)、雪狼早熟禾(*Poa pratensis* cv. Snow Wolf),均为价值较高的优良品系。

### 1.2 试验设计

试验在西南林业大学生态与水土保持学院玻璃温室内进行,自然光照,不加温。2018 年 4 月初采用盆栽方法进行播种,种子种植于装有多孔粘土(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 d 浇水 1 次,每 4 d 用 Hoagland 营养液浇灌,每星期做 1 次修剪。播种 2 个月后 2018 年 6 月初进行  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫处理,各处理  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 0%(对照)、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1%,共 6 个水平,每个水平 3 个重复。采用盐水灌溉的方法,把  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  配成不同浓度的盐水后定期定量地浇入管中。为减少盐分积累,不同浓度的盐水每 2 d 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,盐浓度每 2 d 以 0.2% 的浓度逐步增加。

### 1.3 指标测定

在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫的第 0、7、14、21、28 d 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)、叶片相对电导率(Leaf relative conductivity, LRC)。

28 d 试验结束后分别测定叶绿素含量(Chl)、地上部分干重(Shoot biomass, SB)、根系干重(Root bio-

mass, RB)、脯氨酸含量(Pro)、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  含量、丙二醛含量(MDA),所有指标的测定均重复 3 次。

草坪外观质量基于试验过程中草坪草地上部分生长状况按照 1~9 的数值来评价,1 是密度低、长势差、质地差(完全枯萎和棕色)的草坪,而 9 是密度高(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 是完全萎蔫、枯黄的草坪,而 9 是水分状况好、颜色鲜绿的草坪。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、生物量测定采用常规烘干法、叶片相对电导率采用电导率法、脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  含量采用火焰光度法、丙二醛含量采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[12]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 19.0 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 Duncan 进行多重比较( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫对草坪草生长的影响

2.1.1 草坪外观质量 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对 3 种冷季型草坪草外观质量(TQ)的影响显著(图 1),TQ 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加而逐渐降低,且浓度越高下降越明显。当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度较低时(0.2%~0.4%),0~14 d TQ 与 CK 相比差异性不显著;14 d 时较高浓度的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫(0.6%~1.0%)则表现出显著的抑制作用。试验 28 d 时,多年生黑麦草,高羊茅和草地早熟禾在 0.2%~1.0%的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下,TQ 与 CK 相比分别下降 18.9%~68.6%,21.9%~64.6%和 18.0%~88.8%。高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫(1.0%)下,3 种草坪草的降低速度表现为草地早熟禾 > 多年生黑麦草 > 高羊茅。

2.1.2 叶片萎蔫系数 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片萎蔫系数(LWS)与 TQ 变化一致(图 2),即 LWC 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加而逐渐降低。14 d 时,0.2%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下的多年生黑麦草 LWS 与 CK 相比差异显著,而高羊茅和草地早熟禾到 21 d 才与 CK 差异显著( $P < 0.05$ )。3 种草坪草的 LWC 在早期(0~7 d)生长时受不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫影响较小,随着时间的持续,LWC 逐渐降低;28 d 时多年生黑麦

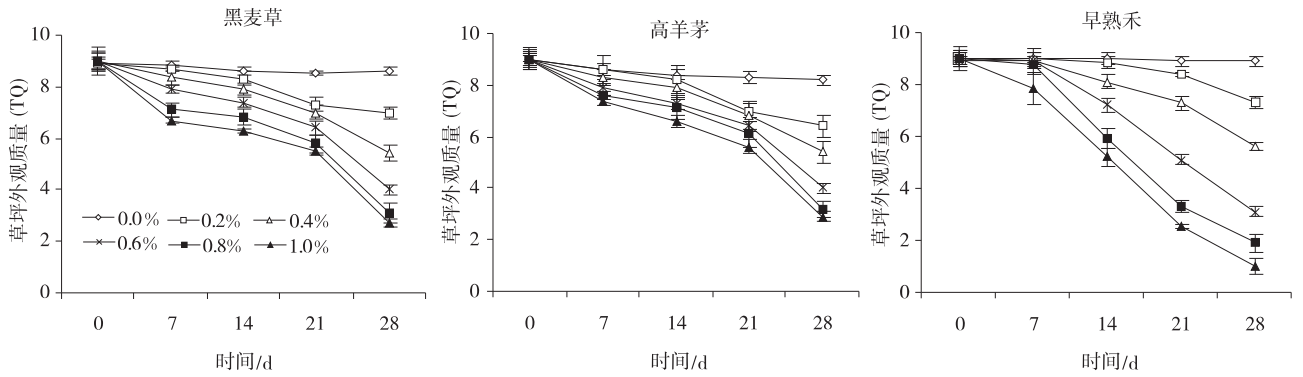


图 1 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草的外观质量

Fig. 1 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on turfgrass quality of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

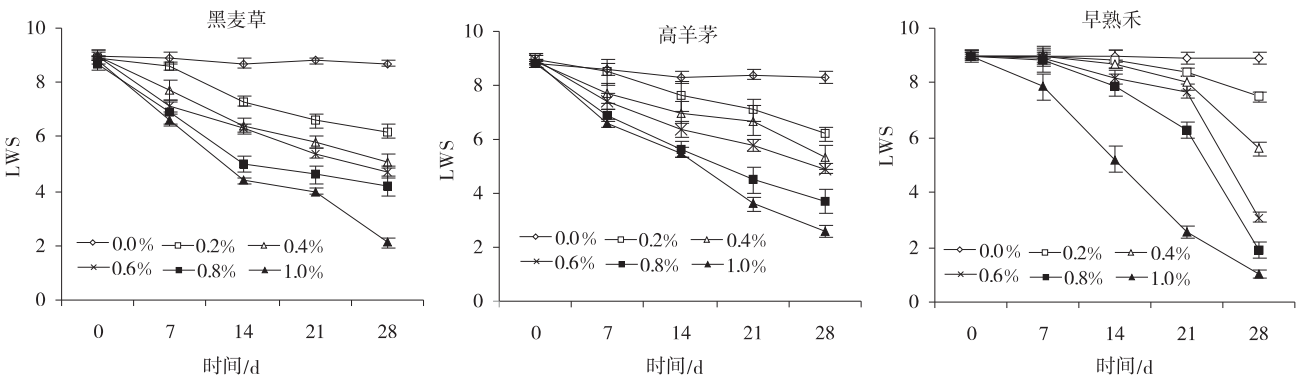


图 2 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片的 LWS

Fig. 2 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on leaf wilting score of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

草,高羊茅和草地早熟禾在 1.0%浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下与 CK 相比分别降低 75.9%,68.7%和 88.8%。

2.1.3 叶片相对含水量 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加,3 种冷季型草坪草叶片的 LRWC 在 0.4%~1.0%的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下呈显著降低趋势 ( $P < 0.05$ )。0.2%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下,多年生黑麦草和高羊茅随着时间的持续,LRWC 与 CK 相比未表现出显著的差异性,而草地

早熟禾从 21 d 开始与 CK 相比差异显著 ( $P < 0.05$ )。在 28 d 时 3 种冷季型草坪草在 0.4%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  处理下,LRWC 与 CK 相比分别下降了 32.7%~67.9%,28.8%~49.8%和 36.0%~67.8%。不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草 LRWC 下降幅度表现为草地早熟禾 > 多年生黑麦草 > 高羊茅(图 3)。

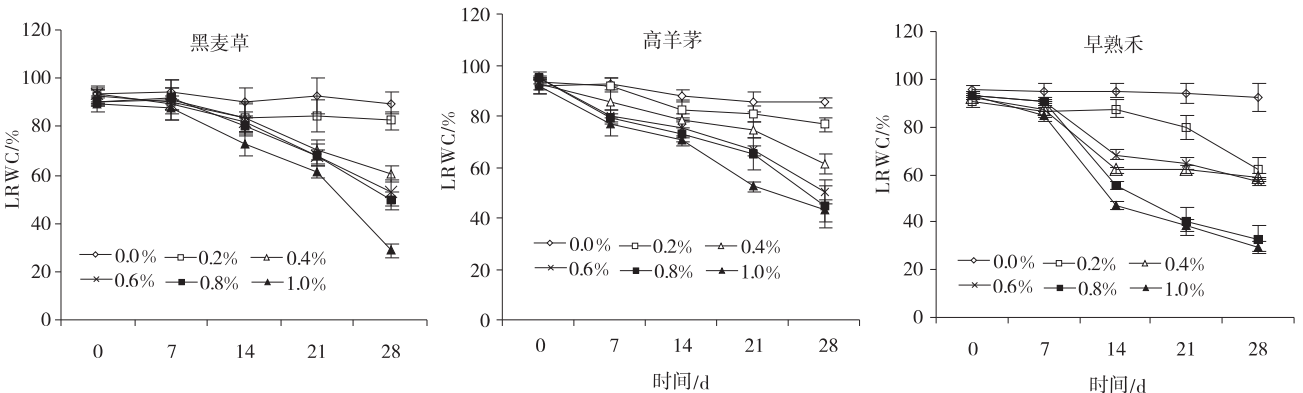


图 3 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草的 LEWC

Fig. 3 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on relative water content of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

2.1.4 叶绿素含量 3 种冷季型草坪草的 Chl 含量随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加呈显著下降趋势 ( $P < 0.05$ )。多年生黑麦草和高羊茅的 Chl 含量均在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 0.2% 时显著下降; 而草地早熟禾在 0.4% 时显著下降 ( $P < 0.05$ )。0.2%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下多年生黑麦草和高羊茅与 CK 相比分别下降 28.4%~66.8% 和 9.1%~69.5%, 0.4%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下草地

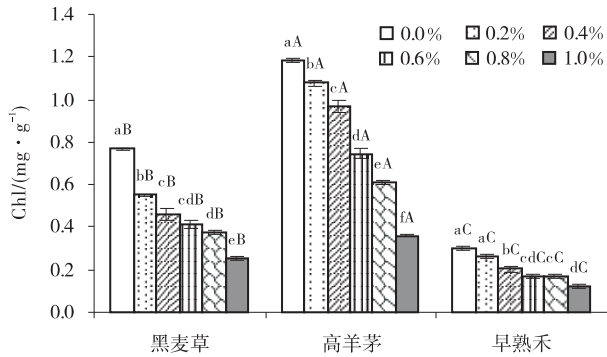


图 4 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片的 Chl 含量

Fig. 4 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on leaf chlorophyll content of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

注: 不同小写字母表示不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下相同草坪草差异性显著 ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示相同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  下不同草坪草差异性显著 ( $P < 0.05$ )

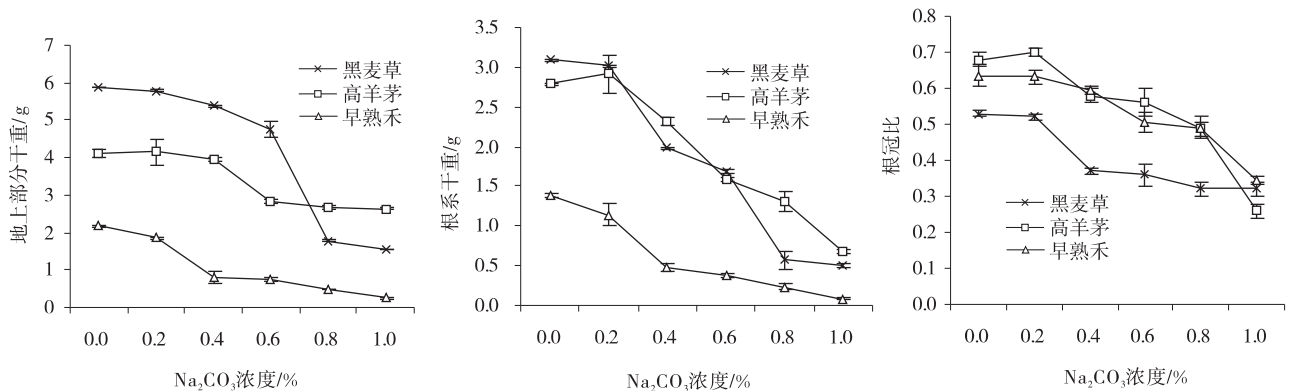


图 5 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草的地上部分干重、根系干重和根冠比

Fig. 5 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on aboveground biomass, root biomass and root to aboveground biomass ratio

2.2 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对草坪草渗透调节物质的影响

2.2.1 叶片相对电导率 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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。除高羊茅在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 0.2% 时小于 CK 外, 其他各  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下处理 28 d 时, 3 种冷季型草坪

早熟禾则下降了 32.7%~60.3%。三者相比较, 相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下, Chl 含量均表现为高羊茅 > 多年生黑麦草 > 草地早熟禾 (图 4)。

2.1.5 生物量 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度的增大, 3 种冷季型草坪草地上部分干重, 根系干重和根冠比均呈下降趋势, 且下降幅度不同。当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 0.2% 时, 3 种冷季型草坪草地上部分和根系干重虽有所下降, 但与 CK 相比差异不显著 ( $P < 0.05$ ); 当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度上升为 0.4%~1.0% 时, 与 CK 相比较差异显著 ( $P < 0.05$ )。说明 3 种草不适宜生长在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度超过 0.4% 的生境内, 0.4%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫抑制了 3 种冷季型草坪草的生长, 且随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加, 生长受到胁迫的抑制程度显著增大。当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 1.0% 时, 地上部分干重, 根系干重和根冠比与 CK 相比分别下降了 73.6%~88.2%, 83.8%~93.6% 和 39.6%~61.8%, 说明根系部分的受抑制程度比地上部分更明显, 地上部分和根系干重的降低量表现为: 草地早熟禾 > 多年生黑麦草 > 高羊茅。3 种冷季型草坪草的根冠比在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 0.4%~1.0% 时与 CK 相比显著降低 ( $P < 0.05$ ), 说明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫在降低植株地上部分生物量的积累的同时, 也抑制了根系的积累, 且抑制作用表现为根系高于地上部分, 改变了根冠之间的分配格局 (图 5)。

草的 LRC 均高于 CK, 升高幅度随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加而增大。0.4%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  处理下, 28 d 时 LRC 显著增加 ( $P < 0.05$ ), 多年生黑麦草, 高羊茅和草地早熟禾与 CK 相比分别增加了 6.2%~9.0%, 6.1%~12.0% 和 4.1%~8.8%。说明较高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 LRC 持续增加,说明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫时间越长,细胞质膜受损伤的程度越重(图 6)。

2.2.2 脯氨酸含量 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加而显著增加( $P < 0.05$ )。在 0.2%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫处理下,多年生黑麦草,高羊茅和草地早熟禾叶片 Pro 含量分别显著增加了 19.4%

~178.8%,9.0%~118.5%和 7.0%~194.9% ( $P < 0.05$ ),草地早熟禾增加量高于多年生黑麦草和高羊茅;根系 Pro 含量分别显著增加了 28.3%~173.7%,20.7%~100.1%和 6.3%~160.9% ( $P < 0.05$ ),多年生黑麦草增加量均显著高于高羊茅和草地早熟禾。说明草坪草可通过提高 Pro 含量,在一定程度上缓解由  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫引起的渗透胁迫,且提高量表现为叶片高于根系(图 7)。

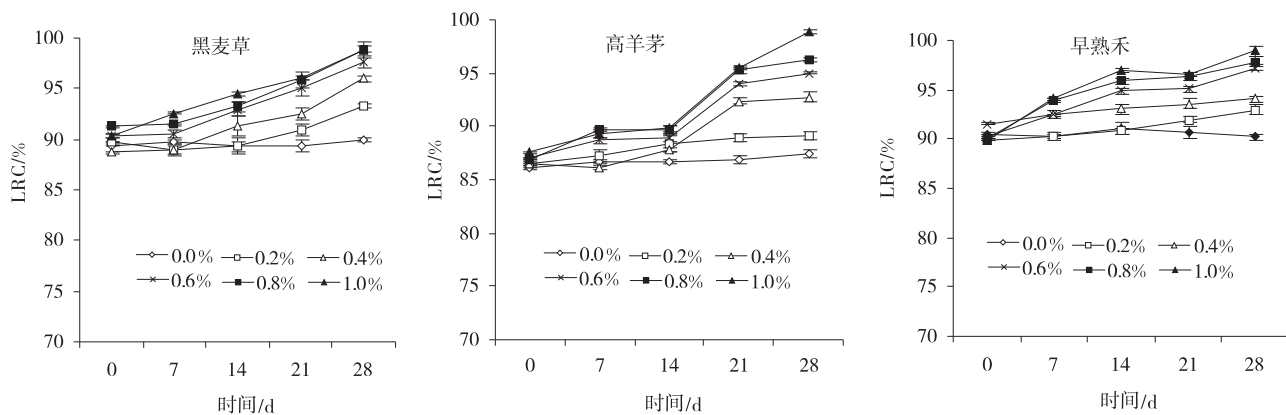


图 6 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片的 LRC

Fig. 6 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on relative conductivity of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

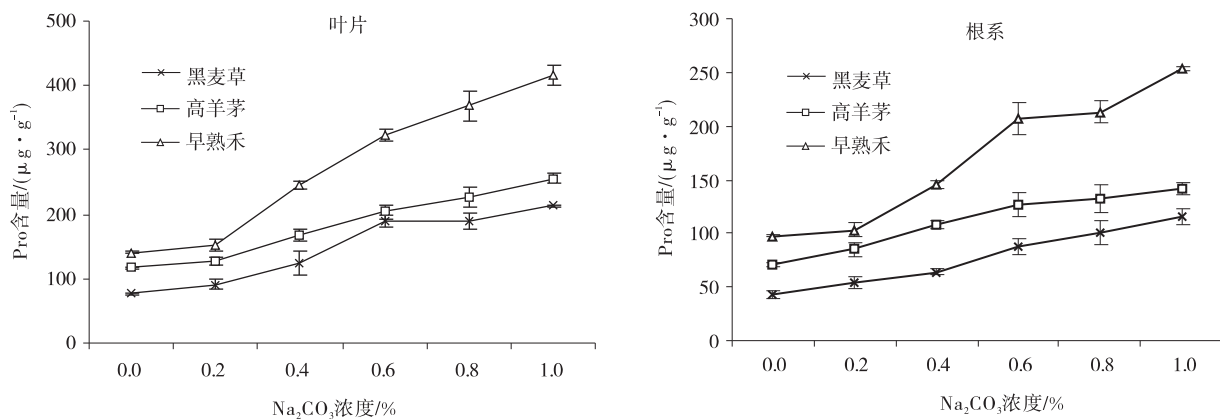


图 7 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片和根系的 Pro 含量 ( $\bar{X} \pm \text{SD}$ )

Fig. 7 Effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations on proline contents in leaf and root ( $\bar{X} \pm \text{SD}$ )

2.2.3  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  含量 叶片和根系  $\text{K}^+$  的含量随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的升高而降低,  $\text{Na}^+$  含量则随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的升高而逐渐升高。即使在较低的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下(0.2%),植株体内的  $\text{K}^+$  含量与 CK 相比显著降低,  $\text{Na}^+$  含量显著升高( $P < 0.05$ )。在 28 d 时,1.0% 的处理下,3 种冷季型草坪草的叶片  $\text{K}^+$  含量与 CK 相比分别下降 48.2%,83.2%和 75.4%,根系  $\text{K}^+$  含量分别下降 54.3%,78.0%和 61.9%;叶片  $\text{Na}^+$  含量与 CK 相

比分别增加 5.0,5.9 和 10.7 倍,根系  $\text{Na}^+$  含量分别增加 8.3,5.6 和 11.3 倍。在不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下,叶片  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  含量均显著高于根系(图 8,9)。

### 2.3 不同浓度 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫对草坪草 MDA 的影响

随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加,3 种冷季型草坪草的 MDA 含量呈递增趋势(图 10)。0.4%~1.0% 浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  处理的叶片 MDA 含量与 CK 差异显著( $P < 0.05$ ),表明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度大于 0.4% 时,3 种冷季型草

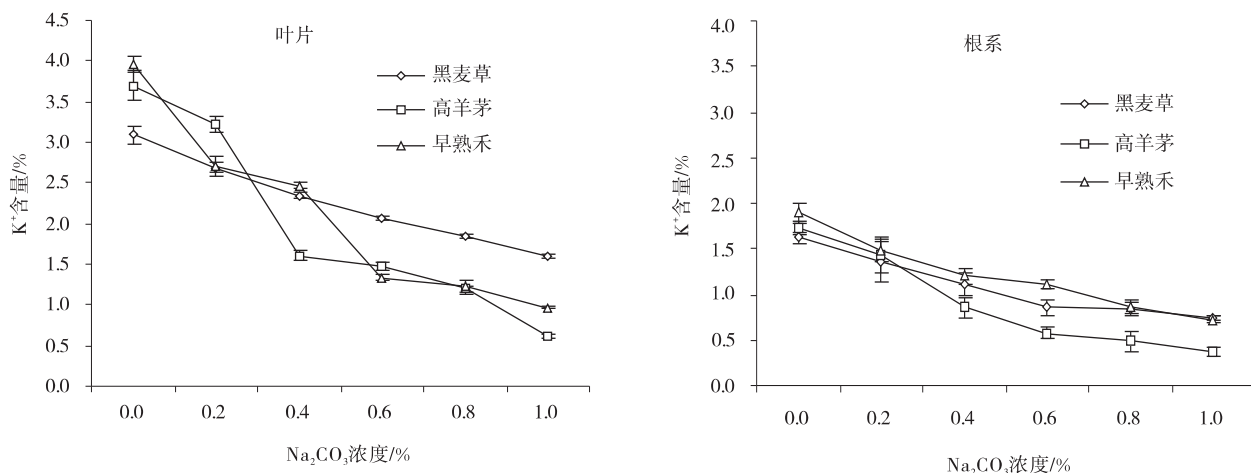


图 8 不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片、根系的 K<sup>+</sup> 含量

Fig. 8 Effect of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress with different concentrations on K<sup>+</sup> contents in leaf or root of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

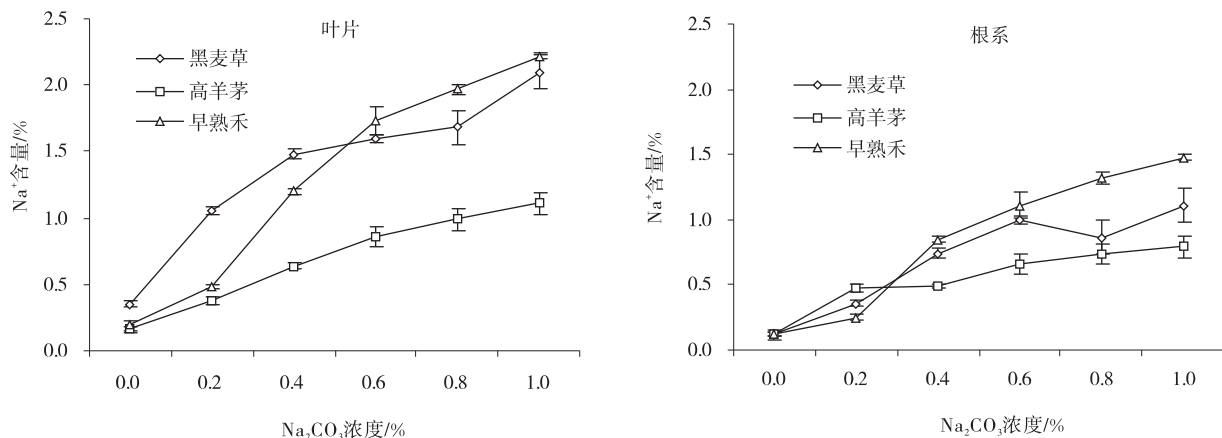


图 9 不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下 3 种冷季型草坪草叶片、根系的 Na<sup>+</sup> 含量

Fig. 9 Effect of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress with different concentrations on Na<sup>+</sup> content in leaf and root of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

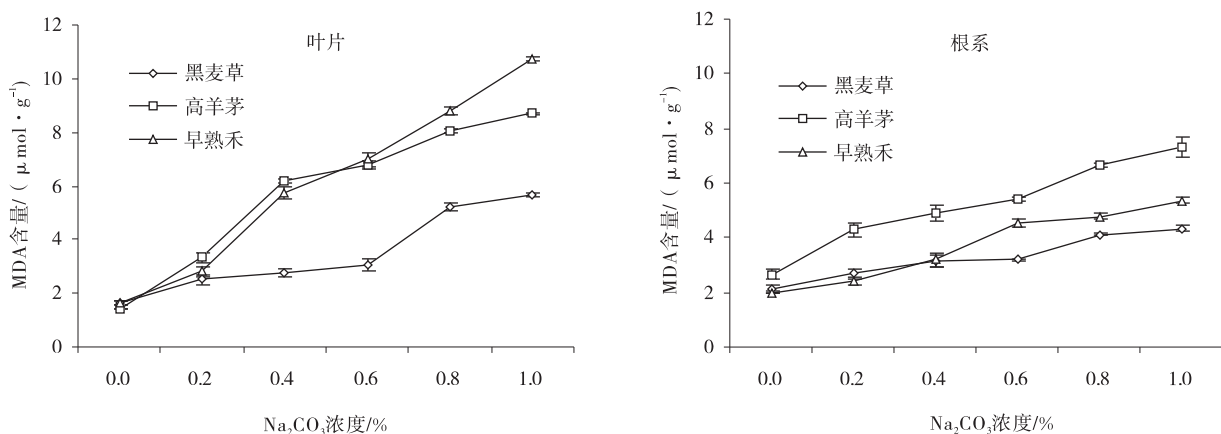


图 10 不同浓度 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>胁迫下 3 种冷季型草坪草的 MDA 含量

Fig. 10 Effect of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress with different concentrations on malealdehyde content of ryegrass, tall fescue and Kentucky bluegrass

坪草已受到伤害,体内积累过量的活性氧,引起膜的过氧化,使叶片 MDA 含量上升。根系 MDA 含量则在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度上升为 0.6% 时与 CK 差异显著 ( $P < 0.05$ )。处理 28 d 后 1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  处理下多年生黑麦草,高羊茅和草地早熟禾叶片 MDA 与 CK 相比,分别增加 246.3%,520.7% 和 549.1%;根系 MDA 分别增加 104.1%,176.0% 和 169.0%,叶片的变化幅度大于根系。

#### 2.4 不同浓度 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫对草坪草的耐受性评价

利用隶属函数法对 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 1),用每种草坪草各项指标 0.2%~1.0% 浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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,该值越大抗逆性则越强。结果表明,3 种冷季型草坪草在 0.2%~1.0% 浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下的隶属函数平均值分别为 0.37,0.38 和 0.69,表现为草地早熟禾 > 高羊茅 > 多年生黑麦草,表明 3 种冷季型草坪草中草地早熟禾抗  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫的能力强于多年生黑麦草和高羊茅。

表 1 不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对 3 种冷季型草坪草的耐受性综合评价

Table 1 Comprehensive evaluation on  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress with different concentrations of 3 cool season turfgrasses

指标	多年生黑麦草	高羊茅	草地早熟禾
TQ	0.30	0.40	0.60
LWS	0.48	0.48	0.60
LRWC	0.46	0.32	0.79
SB	0.17	0.22	1.00
RB	0.24	0.02	1.00
根冠比	0.86	0.21	0.13
Chl	0.57	0.00	1.00
LRC	0.87	0.00	0.76
叶片脯氨酸	0.00	0.29	1.00
根系脯氨酸	0.00	0.40	1.00
叶片丙二醛	0.00	0.87	0.85
根系丙二醛	0.05	1.00	0.23
叶片 $\text{K}^+$	0.23	0.76	0.47
根系 $\text{K}^+$	0.35	0.83	0.00
叶片 $\text{Na}^+$	0.89	0.00	0.77
根系 $\text{Na}^+$	0.52	0.20	0.80
平均值	0.37	0.38	0.69
耐受性顺序	3	2	1

### 3 讨论

盐碱化土壤中的致害中等盐类胁迫除了 NaCl 和

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  等以外,还有以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  为主的碱性盐。 $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$  等碱性盐比中性盐更复杂、更具生态破坏力,所造成的碱胁迫对植物的破坏作用明显大于中性盐所造成的盐胁迫<sup>[13]</sup>。试验通过对草坪草的生长及生理特性指标进行分析得到,随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度的增加,3 种冷季型草坪草 TQ、LWC、LRWC、Chl 含量、地上部分、根系干重、根冠比和  $\text{K}^+$  含量逐渐降低,LRC、Pro 含量、 $\text{Na}^+$  含量和 MDA 含量逐渐升高。低浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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。

植物对盐胁迫的敏感性主要通过幼苗外部形态的变化(生长缓慢、落叶和死亡)和生长变化(渗透调节物质含量增加)而表现<sup>[14]</sup>。试验中幼苗外部形态的变化体现在不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 TQ、LWC、LRWC 和 Chl 含量的降低上,同时植株在高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下(0.8%~1.0%)表现出叶片失绿黄化,焦枯脱落,甚至死亡的状况。表明高浓度的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫严重影响了草坪草的正常生长,这与张雪等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。不同植物可通过调整生物量分配适应环境胁迫,因此,生物量提供了一个评估盐胁迫程度和植物抗性的可靠指标<sup>[16]</sup>。低盐胁迫(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% 时,对地上和根系生长产生显著影响,各部分生物量显著降低,尤其在高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下(1.0%),说明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度越高,草坪草生长受抑制现象越明显,与崔惠<sup>[17]</sup>对 8 种草坪草的研究结果一致。多年生黑麦草和高羊茅在 0.8% 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度时生物量下降超过 50%,草地早熟禾在 1.0% 时下降 90.9%,说明此时盐浓度对草坪草的伤害已达到临界值。试验中 3 种冷季型草坪草的根冠比在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 0.4% 时与 CK 相比显著降低 ( $P < 0.05$ ),说明草坪草根系积累量减少,高浓度的盐胁迫草坪草的地下部分比地上部受胁迫影响更大<sup>[18]</sup>。

另外,植物对盐胁迫的敏感性还可通过幼苗的生理特性变化(积累渗透调节物质)来反映<sup>[13]</sup>。盐胁迫下植物叶片的细胞膜相对透性通常用叶片的相对电导率表示<sup>[19]</sup>,植物细胞膜在盐胁迫下遭到破坏,质膜透性增大,从而使植物细胞浸提液的电导率增大<sup>[12]</sup>。随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度的升高,3 种冷季型草坪草叶片相

对电导率总体上呈升高趋势,且高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  处理的膜透性显著高于低浓度,表明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫导致草坪草电导率相对增大,细胞内的电解质外渗。这一研究结果与马剑等<sup>[20]</sup>对文冠果(*Xanthoceres sorbifolia*)、张淑艳等<sup>[21]</sup>对 5 种草地早熟禾的研究结果相一致。Pro 是植物遇到逆境条件时体内产生的一种重要的渗透调节剂,植物在逆境中为了抵抗伤害,常产生渗透调节物质脯氨酸来应答盐胁迫,以保持原生质与环境的渗透平衡性,保持生物大分子结构的稳定性来维持细胞正常的渗透势<sup>[20]</sup>。不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫处理下 3 种冷季型草坪草叶片和根系 Pro 和  $\text{Na}^+$  含量均显著上升,说明草坪草不但依靠脯氨酸来调节渗透势,也同时有无机离子  $\text{Na}^+$  作为主要渗透调节剂。这与鲁艳等<sup>[22]</sup>对大果白刺幼苗(*Nitraria roborowskii*)的研究结果一致。草坪草的 Pro 含量与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度呈正相关,且高浓度盐胁迫下上升趋势更显著,推测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。

对于大多数植物,当外界  $\text{Na}^+$  浓度超过一定水平时会产生毒害作用。研究中,即使较低的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下(0.2%),植株体内的  $\text{K}^+$  含量与 CK 相比显著降低, $\text{Na}^+$  含量显著升高( $P < 0.05$ )。此外,在不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下,草坪草叶片  $\text{Na}^+$  含量显著高于根部,说明当草坪草被动吸收的  $\text{Na}^+$  超过根容纳范围时,只能将其转运至地上部分中。植物能从介质中吸收大量  $\text{Na}^+$ ,并将其区域化至叶片的液泡中,一方面可降低细胞渗透势,增强细胞吸水能力;另一方面可降低  $\text{Na}^+$  在细胞质中过量积累,减轻对细胞的毒害作用<sup>[23]</sup>。但草坪草液泡区域化能力有限, $\text{Na}^+$  便会在细胞质积累,对植株造成离子毒害,从而抑制其生长。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,草坪草根部分被吸收的大量  $\text{Na}^+$  转运并积累在地下部叶片,但其叶片  $\text{Na}^+$  区域化及对  $\text{K}^+$  的选择性转运能力较弱;同时草坪草内积累的大量  $\text{Na}^+$  会抑制细胞对  $\text{K}^+$  的吸收,从而使  $\text{K}^+$  含量下降,导致  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  稳态失衡。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  选择性吸收和选择性转运能力是衡量植物耐盐性的重要指标,不同植物对离子的选择性吸收和转运能力有所不同<sup>[15]</sup>。在 1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下,草坪草  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  选择性吸收能力最大,类似结果在岳利军等<sup>[24]</sup>对沙芥(*Pugionium cornutum*)的研究中也有报道。

盐胁迫引起植物细胞离子失衡和渗透胁迫往往导致氧化伤害,其中膜脂的过氧化作用是最直接的氧化伤害,MDA 被认为是膜脂过氧化的产物,其含量的高低可反映植物遭受逆境伤害的严重程度<sup>[25]</sup>。植物在遭受干旱、低温、盐碱等胁迫时,会导致体内 MDA 含量增加<sup>[26]</sup>,许多植物在盐胁迫下均表现出 MDA 含量增加<sup>[19]</sup>。试验与前人研究结果相一致,即随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  处理浓度(0.2%~1.0%)升高,3 种冷季型草坪草 MDA 含量呈增加趋势,表明草坪草体内活性氧的产生与清除平衡状态受到破坏,并且引起膜脂过氧化损伤,而细胞膜脂的损伤,导致细胞内可溶性物质外渗,可能破坏细胞内酶及代谢作用原有的区域,细胞代谢紊乱,导致植株出现毒害症状,最终抑制草坪草的生长。

通过对 3 种冷季型草坪草的幼苗生长和生理特性进行分析,低浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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,该值越大抗逆性则越强,利用隶属函数法对 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  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下的隶属函数平均值均表现为草地早熟禾 > 高羊茅 > 多年生黑麦草,因此,3 种冷季型草坪草抗  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫的能力均为草地早熟禾强于高羊茅和多年生黑麦草。在土壤盐渍化地区,培育和引种抗  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫能力较强的冷季型草坪草地早熟禾,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,其作用和效果优于多年生黑麦草和高羊茅。

## 4 结论

不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草 TQ、LWC、LRWC、Chl 含量和  $\text{K}^+$  含量随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加而逐渐降低,且浓度越高下降越明显;不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下 3 种冷季型草坪草 LRC、Pro 含量、 $\text{Na}^+$  含量和 MDA 含量随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度的升高



呈上升趋势,且浓度越高上升越明显;0.4%~1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫降低了3种冷季型草坪草的地上部分,根系干重和根冠比,且随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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;3种冷季型草坪草不适宜生长在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度超过0.4%的生境内,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度大于0.4%时,3种冷季型草坪草已受到明显伤害;多年生黑麦草,高羊茅和草地早熟禾在不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下的隶属函数平均值均表现为草地早熟禾 > 高羊茅 > 多年生黑麦草,说明3种冷季型草坪草中草地早熟禾抗  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫的能力强于高羊茅和多年生黑麦草。

#### 参考文献:

- [1] Vnocur B, Altman A. Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2005, 16: 123-132.
- [2] 卢艳敏, 苏长青, 李会芬. 不同盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草业学报*, 2013, 22(4): 123-129.
- [3] 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.
- [4] 张飞, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 干旱区典型绿洲土壤盐渍化特征分析—以渭干河-库车河三角洲为例[J]. *草业学报*, 2007, 16(4): 34-40.
- [5] 胡化广, 张振铭, 吴东德, 等. 复盐胁迫对结缕草 (*Zoysia Willd.*) 生理和生长的影响研究[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(7): 1224-1229.
- [6] 贾新平, 邓衍明, 孙晓波, 等. 盐胁迫对海滨雀稗生长和生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(12): 204-212.
- [7] 黄春琼, 刘国道, 白昌军. 41份结缕草属种质资源耐盐性评价[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(7): 1260-1266.
- [8] 王红玲, 阿不来提·阿不都热依木, 齐曼.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  胁迫下狗牙根  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  离子分布及其抗盐性的评价[J]. *中国草地学报*, 2004, 26(5): 37-42.
- [9] 徐静, 董宽虎, 高文俊, 等. NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  胁迫下冰草幼苗的生长及生理响应[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(1): 36-41.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 134-282.
- [13] 张丽丽, 马殿荣, 陈温福, 等. 杂草稻幼苗对  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  +  $\text{NaHCO}_3$  胁迫响应及其生理基础[J]. *华北农学报*, 2011, 26(6): 102-107.
- [14] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681.
- [15] 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.
- [16] Wang J, Huang X, Zhong T, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 673-684.
- [17] 崔惠.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对几种草坪草生理特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2005, 36(3): 232-234.
- [18] 刘春芳, 苏加楷, 黄文惠. 禾本科牧草耐盐性的研究[J]. *中国草地*, 1992, 13(6): 12-17.
- [19] 吴晓凤, 倪沛, 杨涛, 等. 10种菊科植物的抗旱性与抗盐性评价[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 1959-1968.
- [20] 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.
- [21] 张淑艳, 包桂荣, 白长寿, 等. 几种草地早熟禾种子萌发期耐盐性的比较研究[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2002, 17(2): 123-126.
- [22] 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.
- [23] 潘雅清. 四翅滨藜耐盐抗旱的生理机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [24] 岳利军, 袁坤, 李海伟, 等. 荒漠植物沙芥苗期对不同浓度 NaCl 的适应机制[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 144-152.
- [25] Castelli S L, Grunberg K, Mufioz N, et al. Oxidative damage and antioxidant defenses as potential indicators of salt-tolerant *Cenchrus ciliaris* L. genotypes[J]. *Horticulture*, 2010, 205: 622-626.
- [26] Rybus-Zajac M, Kubis J. Effect of UV-B radiation on antioxidative enzyme activity in cucumber cotyledons[J]. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 2010, 52: 97-102.

# Effects of short-term $\text{Na}_2\text{CO}_3$ stress on growth and physiological characteristics of three cool season turfgrasses

SONG Ya-li, CHEN Jia-yu, WANG Ke-qin, ZHANG Qian, MA Zhi

(College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The effects of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress (0.0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1.0%) on the growth and physiological characteristics of 3 cold season turfgrasses, including ryegrass (*Lolium perenne*), tall fescue (*Festuca arundinacea*) and Kentucky bluegrass (*Poa pratensis*) were studied by pot experiment. The results showed that: the turf quality, leaf wilting score, leaf relative water content, leaf chlorophyll content and  $\text{K}^+$  content decreased with increase of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration. The leaf relative conductivity, proline content,  $\text{Na}^+$  content and malondialdehyde content showed an increasing trend with the increase of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration. Aboveground biomass dry weight of root system and ratio of aboveground biomass to root dry weight of tested turfgrasses were reduced under 0.4% to 1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress, and with the increase of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration, the inhibition degree on growth increased significantly, especially on roots. 3 turfgrasses could not tolerate the habitat where the concentration of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  was over 0.4%. 3 turfgrasses were injured when  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration was greater than 0.4%. The average value of subordinate function under different concentrations of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress was Kentucky bluegrass > tall fescue > ryegrass, which indicated that the tolerance of Kentucky bluegrass to  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress was stronger.

**Key words:**  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress; physiological characteristics; cold season turf grass; short term