

NaCl 胁迫对杂交狗牙根品种‘苏植 2 号’和‘Tifgreen’ 生长及 Na⁺ 和 K⁺ 积累的影响

陈静波^{1,2}, 牛佳伟^{1,2}, 田海燕³, 宗俊勤¹, 高艳芝^{1,2}, 刘建秀^{1,①}

[1. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省盐土生物资源研究重点实验室, 江苏 南京 210014;
2. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095; 3. 江苏大丰盐土大地农业科技有限公司, 江苏 大丰 224145]

摘要: 对 0(对照)和 20 g · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下杂交狗牙根(*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) 品种‘苏植 2 号’(‘Suzhi No. 2’)和‘Tifgreen’不同部位的生长状况以及 Na⁺ 和 K⁺ 积累的差异进行了研究,并分析了 2 个品种间 Na⁺、K⁺ 转运调控机制的差异。结果显示:在 NaCl 胁迫条件下,2 个品种的叶片相对枯黄率、地下茎和根系的相对干质量、叶片和根系的 Na⁺ 含量和 Na⁺/K⁺ 比以及钠钾选择性转运系数增加;修剪茎叶及冠层和地上部的相对干质量、植株相对总干质量以及叶片和根系的 K⁺ 含量均降低,但茎叶含水量无显著变化。NaCl 胁迫条件下,不同土层中 2 个品种的根系相对干质量均不同程度增加,且 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中根系干质量的增幅大于 0 ~ 20 cm 土层;在 0 ~ 20 cm 土层中 2 个品种根系的分配比例均有所降低,而在 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中则不同程度提高。与‘Tifgreen’相比,NaCl 胁迫条件下‘苏植 2 号’叶片相对枯黄率、Na⁺ 含量和 Na⁺/K⁺ 比更低,修剪茎叶及冠层和地上部的相对干质量、植株相对总干质量、叶片 K⁺ 含量和钠钾选择性转运系数更高;在 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中‘苏植 2 号’根系相对干质量显著高于‘Tifgreen’,根系分配比例总体也高于‘Tifgreen’。综合比较结果表明:‘苏植 2 号’的抗盐性强于‘Tifgreen’,可能与其深层根系分配量更高和钠钾选择性转运能力较强有关。

关键词: 杂交狗牙根; 盐胁迫; 生长; 根系分布; 离子调控; 品种‘苏植 2 号’

中图分类号: Q945.78; S543⁺.9; S688.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)03-0045-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.03.06

Effect of NaCl stress on growth and Na⁺ and K⁺ accumulation of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) CHEN Jingbo^{1,2}, NIU Jiawei^{1,2}, TIAN Haiyan³, ZONG Junqin¹, GAO Yanzhi^{1,2}, LIU Jianxiu^{1,①} (1. Jiangsu Province Key Laboratory for Bioresources of Saline Soils, Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Jiangsu Dafeng Saline Land Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Dafeng 224145, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, **23**(3): 45-51

Abstract: Growth status and Na⁺ and K⁺ accumulation of different parts of cultivar ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) under conditions of 0 (control) and 20 g · L⁻¹ NaCl (stress treatment) were researched, and differences of Na⁺ and K⁺ regulation mechanism between two cultivars were analyzed. The results show that under NaCl stress condition, relative percentage of leaf firing, relative dry weights of rhizome and root, Na⁺ content and Na⁺/K⁺ ratio in leaf and root and selective transportation coefficient of Na⁺ and K⁺ of two cultivars increase, relative dry weights of shoot clipping, crown and above-ground part, relative total dry weight of plant and K⁺ content in leaf and root decrease, while there is no significant change in water content of shoot. Under NaCl stress condition, relative dry weight of root of two cultivars in different soil layers

收稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31101567); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD13B09; 2012BAB03B04); 江苏省盐土生物资源研究重点实验室开发基金项目(JKLBS2013001)

作者简介: 陈静波(1977—),男,浙江余姚人,博士研究生,助理研究员,主要从事草坪草抗逆性研究。

①通信作者 E-mail: turfunit@aliyun.com

increases with different degrees, the increase range of root dry weight in soil layers of 20–40 and 40–60 cm is bigger than that in soil layer of 0–20 cm. Root distribution percentage of two cultivars in soil layers of 0–20 cm slightly decreases, while that in soil layers of 20–40 and 40–60 cm increases with different degrees. Compared with ‘Tifgreen’, relative percentage of leaf firing, Na^+ content and Na^+/K^+ ratio in leaf of ‘Suzhi No. 2’ are lower, and relative dry weights of shoot clipping, crown and above-ground part, relative total dry weight of plant, K^+ content in leaf and selective transportation coefficient of Na^+ and K^+ of ‘Suzhi No. 2’ are higher under NaCl stress condition. In soil layers of 20–40 and 40–60 cm, relative dry weight of root of ‘Suzhi No. 2’ is significantly higher and its root distribution percentage is generally higher than those of ‘Tifgreen’. The comprehensive comparison result shows that salinity-tolerance of ‘Suzhi No. 2’ is higher than that of ‘Tifgreen’, which might be associated with higher distribution amount of deep root and stronger selective transportation capacity of Na^+ and K^+ .

Key words: hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*); salinity stress; growth; root distribution; ion regulation; cultivar ‘Suzhi No. 2’

随沿海滩涂和内陆干旱地区的不断开发,对其园林景观的建设也逐渐引起人们的重视,其中草坪的应用也成为其建设内容之一。由于这些区域的土壤通常盐碱度较高,严重限制草坪生长,并造成草坪质量下降,甚至可导致草坪成片死亡^[1];另外,由于水资源紧张,草坪灌溉使用含盐非饮用水和冬季使用公路融雪盐均导致土壤的次生盐碱化、扩大了盐碱地面积,也加剧了草坪盐害的发生频率^[2]。因此,加快抗盐草坪草的育种进程及选育抗盐优质草坪草新品种是解决草坪盐害问题的关键^[3-5]。

狗牙根(*Cynodon* spp.)是国内外应用最广泛的暖季型草坪草,主要应用于热带、亚热带以及暖温带地区的球场、公园及公路的绿化,也是常见的水土保持植物和优良牧草之一^[1,6]。目前国内生产上最常用的狗牙根品种为引自美国的由非洲狗牙根(*C. transvaalensis* Burt-Davy)和普通狗牙根[*C. dactylon* (Linn.) Pers.]杂交而成^[7]的杂交狗牙根(*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*)“Tif系列”品种,包含‘Tifway’、‘Tifgreen’和‘Tifdwaf’等品种。

Marcum等^[8]和陈静波等^[9]对一些常见暖季型草坪草进行了抗盐性评价,认为狗牙根的抗盐性强于假俭草[*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.]、结缕草(*Zoysia japonica* Steud.)、野牛草[*Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm.]、双穗雀稗(*Paspalum distichum* Linn.)和百喜草(*P. notatum* Flügge)等草坪草,但弱于沟叶结缕草[*Zoysia matrella* (Linn.) Merr.]、海雀稗(*Paspalum vaginatum* Sw.)和侧钝叶草[*Stenotaphrum secundatum* (Walt.) Kuntze]等草坪草,抗盐性在暖季型草坪草中居于中等。与冷季型草坪草相比,狗牙根的抗盐性强于大多数的冷季型草坪草,如 *Festuca*

arundinacea Schreb.、黑麦草(*Lolium perenne* Linn.)、多花黑麦草(*L. multiflorum* Lam.)、匍匐翦股颖(*Agrostis stolonifera* Linn.)和草地早熟禾(*Poa pratensis* Linn.)等,而与碱茅属(*Puccinellia* Parl.)植物的抗盐性接近^[2]。

盐胁迫条件下,植物主要受到离子毒害和渗透胁迫,导致生长势降低且叶片逐渐黄化,严重时可致植株死亡。普通狗牙根在高盐胁迫条件下会出现典型的盐害症状,如叶片黄化和地上部分生长势减弱,草坪质量下降,但一定盐度对其根系生长有促进作用^[9];从生理特征看,狗牙根细胞内 Na^+ 含量增加、 K^+ 含量降低,渗透势下降,脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质等渗透调节物质积累^[10]。Marcum等^[11]认为: Na^+ 分泌能力较强的狗牙根品种叶片的 Na^+ 含量较低,抗盐性则较强。Chen等^[12]认为:普通狗牙根品种‘C291’的盐分泌能力较弱,但其体内从根系到叶片的钠钾选择性运输能力比较强,即具有控制 Na^+ 而选择 K^+ 向叶片运输的机制。

目前常用的杂交狗牙根多为20世纪60年代前后选育的老品种,抗盐性较差,在盐碱地上种植后景观质量较差^[13]。作者所在的课题组以抗盐优质国审狗牙根品种‘阳江’(‘Yangjiang’)为父本,与非洲狗牙根杂交并获得了一些优良后代,其中品种‘苏植2号’(‘Suzhi No. 2’)为中国自主选育的第1个国审杂交狗牙根新品种。

作者以杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’为研究对象,对NaCl胁迫条件下2个品种的抗盐性进行评价,分析2个品种对NaCl胁迫的生长响应及其组织内 Na^+/K^+ 调控机制的差异,为进一步研究杂交狗牙根抗盐机制及培育抗盐新品种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’种植于江苏省·中国科学院植物研究所草坪试验地。

1.2 方法

1.2.1 种植和处理方法 参照陈静波等^[9]的方法培育供试植株。在深60 cm、直径10 cm的聚氯乙烯(PVC)管内装入V(壤土):V(河沙)=1:4的砂壤土,于2009年5月从试验地中采集2个品种的新生匍匐茎植入PVC管中,先置于试验地的空旷处进行常规培养;待所有PVC管内的匍匐茎均成坪后,移入温室内培养1周。实验期间温室内白天最高温度25℃~30℃,晚上最低温度20℃~25℃,空气相对湿度60%~85%。

于2009年9月2日开始进行NaCl处理,设置质量浓度0(对照)和20 g·L⁻¹NaCl 2个处理组,每一品种每个处理组均设3次重复。采用NaCl溶液灌溉的方法,每管浇灌NaCl溶液(对照为自来水)600 mL,多余水从管底自由流出以减少盐分积累。为减少NaCl的冲击效应,处理开始时用质量浓度5 g·L⁻¹NaCl溶液浇灌,随后逐渐递增,隔天浇灌1次,达到质量浓度20 g·L⁻¹NaCl后,浇灌频率调整为每周1次。于2009年10月28日结束处理。

1.2.2 草坪修剪及指标测定方法 用剪刀手工修剪草坪,修剪高度2 cm;NaCl处理前及达到质量浓度20 g·L⁻¹NaCl前每次修剪所得的草屑废弃,此后每周修剪1次;将所得草屑分别收集,快速称取质量,累计值即为修剪茎叶鲜质量。然后置于80℃烘干48 h后,称取质量,其累计值即为修剪茎叶干质量。实验结束时(最后一次修剪之前),通过目测估计草坪中黄叶面积占总叶面积的百分率,即叶片枯黄率^[14]。在最后一次修剪后,将剩余的茎叶齐地面剪下,去除枯黄的茎叶后置于80℃烘干48 h,称取质量,即为冠层干质量。修剪茎叶干质量与冠层干质量之和即为地上部干质量。

把PVC管内的土柱分成0~20、20~40和40~60 cm 3个土层,分别置于孔径0.9 mm的筛子中,用水小心洗去每层土柱中的土壤和杂物,获得地下茎和根系,并将0~20 cm土层中的地下茎和根系分开;分别用自来水清洗3遍,再用去离子水清洗3遍,置于

80℃烘干48 h,称取质量,即为地下茎干质量和不同土层根系干质量;不同土层根系干质量的总和即为根系总干质量;地上部干质量、地下茎干质量和根系总干质量的总和即为植株总干质量。

将最后一轮的修剪茎叶用去离子水清洗3次,置于80℃烘干48 h,称取质量后将叶片挑出;将同一PVC管内3个土层的根系样品合并;分别把叶片和根系研磨成粉,用于Na⁺和K⁺含量测定。参照王宝山等^[15]的方法测定Na⁺和K⁺含量;称取0.02 g样品,加入15 mL去离子水,沸水煮1 h后静置过夜,过滤,滤液用FP6410火焰分光光度计(上海欣益仪器仪表有限公司)测定Na⁺和K⁺浓度,并换算成Na⁺和K⁺含量。

1.3 数据分析

用EXCEL 2003程序对各指标进行数值转换,然后用SPSS 13.0统计分析软件进行方差分析。

相对叶片枯黄率=[(处理组叶片枯黄率-对照组叶片枯黄率)/(100%-对照组叶片枯黄率)]×100%;植株某一部位相对干质量=(处理组干质量/对照组干质量)×100%;茎叶含水量=[(修剪茎叶鲜质量-修剪茎叶干质量)/修剪茎叶鲜质量]×100%;某土层的根系相对干质量=(处理组某土层的根系干质量/对照组同一土层的根系干质量)×100%;某土层的根系分配比例=(某土层根系干质量/根系总干质量)×100%;钠钾选择性转运系数(ST)=(根系Na⁺/K⁺比)/(叶片Na⁺/K⁺比)^[16]。

2 结果和分析

2.1 NaCl胁迫对杂交狗牙根生长的影响

2.1.1 对不同部位生长的影响 NaCl胁迫条件下,杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’的相对叶片枯黄率以及不同部位的相对干质量见表1,它们的茎叶含水量见表2。

由表1可见:NaCl胁迫条件下,2个杂交狗牙根品种的叶片部分黄化,叶片枯黄率增加,其中品种‘苏植2号’的相对叶片枯黄率为45.00%,显著低于品种‘Tifgreen’(58.33%),说明‘苏植2号’的叶片黄化程度低于‘Tifgreen’。与对照相比,NaCl胁迫条件下2个品种的修剪茎叶干质量均下降,其中‘苏植2号’的修剪茎叶相对干质量显著高于‘Tifgreen’。NaCl胁迫条件下,2个品种的冠层和地上部的干质量均有所降低,其中‘苏植2号’的降低幅度显著小于‘Tifgreen’。

表1 NaCl胁迫对杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’叶片枯黄和生长的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 1 Effect of NaCl stress on leaf firing and growth of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 Cultivar	RPLF/%	RDW _S /%	RDW _C /%	RDW _A /%	RDW _{RH} /%	RTW _R /%	RTW _P /%
Suzhi No. 2	45.00±5.00b	71.71±13.43a	75.47±12.51a	73.94±12.90a	138.04±36.25a	108.22±8.30a	85.59±5.54a
Tifgreen	58.33±2.89a	44.08±5.51b	37.03±13.05b	40.04±14.24b	139.48±28.47a	115.94±6.02a	68.78±5.01b

¹⁾表中各指标的相对干质量均为同品种NaCl处理组与对照组同一指标测定数据的比值。Relative dry weight of all indexes in the table is the ratio of determination datums of the same index of NaCl treatment group to control group of the same cultivar. RPLF: 叶片相对枯黄率 Relative percentage of leaf firing; RDW_S: 修剪茎叶相对干质量 Relative dry weight of shoot clipping; RDW_C: 冠层相对干质量 Relative dry weight of crown; RDW_A: 地上部相对干质量 Relative dry weight of above-ground part; RDW_{RH}: 地下茎相对干质量 Relative dry weight of rhizome; RTW_R: 根系相对总干质量 Relative total dry weight of root; RTW_P: 植株相对总干质量 Relative total dry weight of plant. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

与地上部干质量的变化趋势不同,在NaCl胁迫条件下品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’地下茎干质量呈增加趋势,分别较对照增加了近40%,且品种间差异不显著;2个品种的根系总干质量也较对照有所增加,在NaCl胁迫条件下‘苏植2号’和‘Tifgreen’根系总干质量分别较对照增加了8.22%和15.94%,但品种间差异不显著。

与地上部干质量的变化趋势一致,在NaCl胁迫条件下2个杂交狗牙根品种植株总干质量均有所降低,但品种‘苏植2号’的降低幅度显著小于品种‘Tifgreen’,仅比对照下降了14.41%,而‘Tifgreen’的植株总干质量则较对照下降了31.22%。

由表2可见:NaCl胁迫条件下2个品种的茎叶含水量均有所下降,从对照的75%左右下降至70%左右;虽然NaCl胁迫处理组‘苏植2号’的茎叶含水量略低于‘Tifgreen’,但差异不显著。从地上部的表现来看,NaCl胁迫条件下‘苏植2号’受到的伤害明显小于‘Tifgreen’,表明‘苏植2号’的耐盐性强于‘Tifgreen’。

2.1.2 对不同土层根系生长和分配的影响 NaCl胁迫条件下,不同土层中杂交狗牙根品种‘苏植2号’和

‘Tifgreen’根系相对干质量见表3。由表3可见:从不同土层‘苏植2号’和‘Tifgreen’的根系相对干质量来看,NaCl胁迫对2个品种根系的生长均有一定的促进作用,其中,20~40和40~60cm土层中根系干质量的增幅大于0~20cm土层。从品种间的差异来看,0~20cm土层中2个品种间的根系相对干质量差异不显著,但在20~40和40~60cm土层中‘Tifgreen’的根系相对干质量显著高于‘苏植2号’,分别比‘苏植2号’高45.01%和49.81%。

NaCl胁迫条件下,不同土层中杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’根系分配比例见表4。结果显示:在对照组和处理组中2个品种的根系均主要分布在0~20cm土层,占62.81%~76.16%,而在40~60cm土层中根系的分配比例最低,占8.70%~16.88%。与对照相比,NaCl胁迫条件下2个品种根系在0~20cm土层的分配比例均有所降低,而在20~40和40~60cm土层中根系的分配比例则不同程度提高。从2个品种的比较结果来看,NaCl胁迫条件下‘苏植2号’在20~40和40~60cm土层的根系分配比例分别仅比对照增加了0.42%和3.31%,而

表3 NaCl胁迫对杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’根系干质量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 3 Effect of NaCl stress on root dry weight of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 Cultivar	不同土层中根系的相对干质量/% Relative dry weight of root in different soil layers		
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
Suzhi No. 2	103.44±5.92a	111.49±17.84b	126.89±19.21b
Tifgreen	100.74±4.07a	156.50±17.06a	176.70±6.88a

¹⁾表中所有数据均为同品种NaCl处理组与对照组同一指标测定数据的比值。All datums in the table are ratios of determination datums of the same index of NaCl treatment group to control group of the same cultivar. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

表2 NaCl胁迫对杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’茎叶含水量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 2 Effect of NaCl stress on water content of shoot of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 Cultivar	各处理组的茎叶含水量/% Water content of shoot in different treatment groups	
	0 g · L ⁻¹ NaCl (CK)	20 g · L ⁻¹ NaCl
	Suzhi No. 2	74.8±0.89a
Tifgreen	74.9±0.54a	70.5±0.50a

¹⁾同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

表4 NaCl胁迫条件下杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’根系在不同土层中的分配比例($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 4 Distribution percentage of root of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) in different soil layers under NaCl stress ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

土层深度/cm Depth of soil layer	各处理组‘苏植2号’根系的分配比例/% Root distribution percentage of ‘Suzhi No. 2’ in different treatment groups		各处理组‘Tifgreen’根系的分配比例/% Root distribution percentage of ‘Tifgreen’ in different treatment groups	
	0 g · L ⁻¹ NaCl (CK)	20 g · L ⁻¹ NaCl	0 g · L ⁻¹ NaCl (CK)	20 g · L ⁻¹ NaCl
0~20	66.53±4.58b	62.81±2.02b	76.16±2.71a	66.02±1.10b
20~40	19.89±3.22a	20.31±1.66a	15.14±1.14b	20.49±1.27a
40~60	13.57±1.79b	16.88±1.41a	8.70±1.72c	13.49±0.19b

¹⁾同行中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same row indicate the significant difference ($P<0.05$).

‘Tifgreen’在20~40和40~60 cm土层的根系分配比例分别比对照增加了5.35%和4.79%;尽管如此,NaCl胁迫条件下‘苏植2号’在40~60 cm土层的根系分配比例总体上高于‘Tifgreen’,说明‘苏植2号’的根系比‘Tifgreen’更深。

2.2 NaCl胁迫对杂交狗牙根体内Na⁺和K⁺含量的影响

NaCl胁迫条件下,杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’的叶片和根系中Na⁺和K⁺含量及选择性转运系数见表5。

2.2.1 对叶片Na⁺和K⁺含量的影响 由表5可见:NaCl胁迫条件下品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’叶片中Na⁺含量均较对照显著升高,K⁺含量均较对照显著下降。品种间相比,对照组2个品种叶片的Na⁺含量基本一致,约为60 mmol · kg⁻¹,但在NaCl处理组中‘Tifgreen’叶片的Na⁺含量达到366.10 mmol · kg⁻¹,显著高于‘苏植2号’(286.13 mmol · kg⁻¹);而对照组和NaCl处理组‘苏植2号’叶片的K⁺含量均较高。对照组‘苏植2号’和‘Tifgreen’叶片的Na⁺/K⁺比均为0.09,而NaCl处理组二者叶片的Na⁺/K⁺比分别达

到0.73和1.12,即‘Tifgreen’叶片的Na⁺/K⁺比增加幅度更大,与其叶片Na⁺含量较高有关。

2.2.2 对根系Na⁺和K⁺含量的影响 由表5还可见:NaCl胁迫条件下2个品种根系中Na⁺和K⁺含量及Na⁺/K⁺比的变化趋势与叶片基本一致,均表现为Na⁺含量和Na⁺/K⁺比显著升高,而K⁺含量显著下降。但与叶片不同的是,不论是对照组还是NaCl处理组,‘苏植2号’根系的Na⁺含量和Na⁺/K⁺比均高于‘Tifgreen’,而其根系K⁺含量均显著低于‘Tifgreen’。

2.2.3 对Na⁺和K⁺选择性运输的影响 钠钾选择性转运系数(ST)反映了植物从一个器官往另一个器官选择性运输K⁺而抑制Na⁺的能力,ST值越高,选择性运输能力越强。NaCl胁迫条件下,2个品种从根系到叶片的ST值均显著高于对照(表5)。对照组和NaCl处理组‘苏植2号’的ST值均显著高于‘Tifgreen’,其中,在NaCl胁迫条件下‘苏植2号’的ST值较对照增加了2.94,而‘Tifgreen’的ST值仅较对照增加了1.88。实验结果表明:NaCl胁迫导致杂交狗牙根从根系到叶片的钠钾选择性运输能力增强,且‘苏植2号’的选择性运输能力强于‘Tifgreen’。

表5 NaCl胁迫对杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’Na⁺和K⁺含量及转运的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 5 Effect of NaCl stress on content and transportation of Na⁺ and K⁺ of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis*) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 Cultivar	处理 Treatment	叶片中离子含量/mmol · kg ⁻¹ Ion content in leaf		R _L	根系中离子含量/mmol · kg ⁻¹ Ion content in root		R _R	ST
		Na ⁺	K ⁺		Na ⁺	K ⁺		
Suzhi No. 2	0 g · L ⁻¹ NaCl (CK)	60.11±4.61c	679.33±43.73a	0.09±0.01c	59.66±13.01c	260.46±33.04b	0.23±0.02c	2.57±0.28b
	20 g · L ⁻¹ NaCl	286.13±12.24b	397.03±43.52c	0.73±0.07b	652.21±58.79b	164.30±13.84c	3.97±0.08a	5.51±0.53a
Tifgreen	0 g · L ⁻¹ NaCl (CK)	53.04±8.36c	594.58±22.36b	0.09±0.01c	81.10±8.53c	491.63±25.38a	0.16±0.01c	1.87±0.28c
	20 g · L ⁻¹ NaCl	366.10±13.35a	346.55±48.59c	1.12±0.12a	782.98±32.21a	238.46±30.93b	3.32±0.41b	3.75±0.71b

¹⁾R_L: 叶片Na⁺含量与K⁺含量的比值 Ratio of Na⁺ content to K⁺ content in leaf; R_R: 根系Na⁺含量与K⁺含量的比值 Ratio of Na⁺ content to K⁺ content in root; ST: 选择性转运系数 Selective transportation coefficient. 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

3 讨论和结论

盐胁迫对草坪草生长的影响因盐的浓度水平、受害器官、草的种类及品种(基因型)等因素而异。朱义等^[17]认为:NaCl浓度在 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下对高羊茅根系和地上部分生长没有显著影响,而NaCl浓度超过 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 可显著抑制植株生长。李晓宇等^[18]的研究结果表明:在 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl胁迫条件下羊草[*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.]的根、根茎、茎和叶的干质量分别比对照($0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl)降低了24.0%、45.3%、35.0%和43.9%,对根生长的影响最小,对根茎和叶生长的影响最大。Marcum^[19]的实验结果表明:经 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上NaCl处理后,抗盐性较差的垂穗草[*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.]、野牛草和砂地鼠尾粟[*Sporobolus cryptandrus* (Torr.) A. Gray.]的根系生长量下降迅速,抗盐性中等的结缕草的根系生长不受NaCl处理的影响,而抗盐性较强的盐草[*Distichlis spicata* (Torr.) Beetle]、碱地鼠尾粟[*Sporobolus airoides* (Torr.) Torr.]及抗盐性中等的狗牙根的根系生长则有一定程度的促进,并且对碱地鼠尾粟和狗牙根根系生长的促进程度大于抗盐性最强的盐草。这些研究结果均说明植物地上部对盐胁迫的敏感性通常强于地下部,在较低盐度胁迫条件下地上部生长已经受到抑制,而只有在较高盐度胁迫条件下地下部生长才可能受到抑制;在相同盐度胁迫条件下,抗盐性强的草种或品种(基因型)地上部生长受到的抑制作用程度通常较低,但对地下部生长的抑制作用因草种而异。因此地上部分的生长指标是更合适且更敏感的抗盐性评价指标^[14]。本研究结果表明:在 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl胁迫条件下,杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’地下茎和根系的生长受到促进,而地上部生长受到抑制,其中2个品种地下部的生长状况差异不显著,但是 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl胁迫对‘苏植2号’的地上部生长的抑制作用显著低于‘Tifgreen’。据此可判定‘苏植2号’的抗盐性比‘Tifgreen’强,表明‘苏植2号’对盐碱地的适应性高于‘Tifgreen’。

由于 Na^+ 与 K^+ 具有相似的物理性质,当根际环境中 Na^+ 过多时可抑制根系对 K^+ 的吸收,从而导致植株体内 Na^+ 积累和 K^+ 缺乏, Na^+/K^+ 比提高^[20]。一般认为,植物叶片 Na^+ 积累较少、维持更高的 K^+ 含量和较

低的 Na^+/K^+ 比值,是抗盐性强的标志之一^[21]。相关的研究结果^[11]表明:盐胁迫下狗牙根体内 Na^+ 含量增加,而 K^+ 含量减少,并且抗盐性与叶片 Na^+ 含量呈负相关。狗牙根作为泌盐植物,可通过叶片上的盐腺选择性分泌 Na^+ 来减少叶片中 Na^+ 的积累从而维持 K^+ 含量水平的稳定^[8]。但Chen等^[12]研究认为:普通狗牙根‘C291’的叶片泌盐能力较弱,而其根系则具有一定的钠钾选择性运输能力。根系对钠钾的选择性运输是一些草本植物维持叶片钠钾平衡的重要机制之一,如星星草[*Puccinellia tenuiflora* (Griseb.) Scribn. et Merr.]^[22]等。在NaCl胁迫条件下杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’叶片的 K^+ 含量减少、 Na^+ 含量和 Na^+/K^+ 比增加,并且抗盐性较强的‘苏植2号’叶片能够维持较高的 K^+ 含量、较低的 Na^+ 含量和 Na^+/K^+ 比,也佐证了Marcum等^[11]以及Hu等^[23]的研究结果。NaCl胁迫条件下,杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’根系的 Na^+ 和 K^+ 含量以及 Na^+/K^+ 比的变化趋势与叶片一致,但不同的是,抗盐性较强的‘苏植2号’的 Na^+ 和 K^+ 含量显著低于‘Tifgreen’, Na^+/K^+ 比显著高于‘Tifgreen’,说明杂交狗牙根的根系与叶片内钠钾平衡具有不同的调控机制。对钠钾选择性运输能力的分析结果显示:‘苏植2号’具有更高的钠钾选择性运输能力,即选择 K^+ 而限制 Na^+ 往叶片运输的能力较强,进一步说明品种‘苏植2号’抗盐性较强与其具有更强的钠钾选择运输能力有关,从而可以在根系中隔离更多的 Na^+ ,并减少叶片中 Na^+ 的积累,同时促进 K^+ 往叶片运输,使其根系中 K^+ 含量比品种‘Tifgreen’更低而叶片中 K^+ 含量更高。

在一定盐度条件下一些抗盐性较强的草坪草的根系生长会受到促进或保持稳定的生长状态^[9,19]。根系生长的促进或稳定一方面有利于盐胁迫条件下植株对水分和养分的吸收,另一方面可能有利于根系对钠钾离子的调控。根系吸收的水分和各种矿质元素离子(包括 Na^+)通过木质部导管随蒸腾流到达叶片,水分通过蒸腾作用散失到大气中,而 Na^+ 则滞留并积累在叶片中从而产生毒害。植物根系木质部薄壁细胞的质膜上具有一类高亲和钾转运蛋白(HKT),能够选择性吸收导管蒸腾流中的 Na^+ 并隔离到薄壁细胞中,同时间接促进 K^+ 从薄壁细胞中释放到导管中,从而减少 Na^+ 而增加 K^+ 往叶片运输,提高植物的抗盐性^[24-25]。本研究中,NaCl胁迫在一定程度上促进了杂交狗牙根品种‘苏植2号’和‘Tifgreen’根系生

长,增加了根系在深层土壤(20~60 cm)中的分配比例,虽然抗盐性较弱的品种‘Tifgreen’的根系总量和深层土壤中根系的增量高于抗盐性较强的品种‘苏植2号’,但从根系的分配比例来看,不管是对照组还是NaCl处理组,深层土壤中‘苏植2号’根系的分配比例高于品种‘Tifgreen’。根系的加深加长在某种意义上有利于延长根毛区吸收的Na⁺运输到地上部分的距离,从而有利于根系木质部薄壁细胞对Na⁺的逐步截留,减少Na⁺向叶片的运输,同时促进K⁺释放到导管并增加叶片中K⁺的运输量。因此,在深层土壤中品种‘苏植2号’具有较高的根系分配量,可能有利于根系对Na⁺的截留并促进K⁺释放,从而提高其钠钾选择性运输能力、增强抗盐性。

综上所述,NaCl胁迫条件下,杂交狗牙根品种‘苏植2号’受伤害程度小于品种‘Tifgreen’,表明其抗盐性较强;‘苏植2号’可能通过加深根系以提高其钠钾选择性运输能力,从而减少叶片细胞中Na⁺的积累并维持K⁺水平的相对稳定,提高其抗盐性。

参考文献:

- [1] 陈静波,刘建秀. 狗牙根抗盐性评价及抗盐机理研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 302-310.
- [2] MARCUM K B. Use of saline and non-potable water in the turfgrass industry: constraints and developments [J]. Agricultural Water Management, 2006, 80: 132-146.
- [3] 王 胜,常智慧,韩烈保. 9个匍匐剪股颖品种成熟期耐盐性比较[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 836-843.
- [4] 陈静波,阎 君,姜燕琴,等. 暖季型草坪草优良选系和品种抗盐性的初步评价[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 107-114.
- [5] 李 珊,陈静波,郭海林,等. 结缕草属草坪草种质资源的耐盐性评价[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 43-51.
- [6] 产祝龙,施海涛,王艳平. 狗牙根抗非生物胁迫的研究进展[J]. 草业科学, 2013, 30(8): 1182-1187.
- [7] 刘 伟,张新全, WU Y Q,等. 狗牙根属植物多样性与品种选育研究概况[J]. 园艺学报, 2003, 30(5): 623-628.
- [8] MARCUM K B, MURDOCH C L. Salinity tolerance mechanisms of six C₄ turfgrasses [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1994, 119: 779-784.
- [9] 陈静波,褚晓晴,李 珊,等. 盐水灌溉对7属11种暖季型草坪草生长的影响及抗盐性差异[J]. 草业科学, 2012, 29(8): 1185-1192.
- [10] HAMEED M, ASHRAF M. Physiological and biochemical adaptations of *Cynodon dactylon* (L.) Pers. from the Salt Range (Pakistan) to salinity stress[J]. Flora, 2008, 203: 683-694.
- [11] MARCUM K B, PESSARAKLI M. Salinity tolerance and salt gland excretion efficiency of bermudagrass turf cultivars [J]. Crop Science, 2006, 46: 2571-2574.
- [12] CHEN J, YAN J, QIAN Y, et al. Growth responses and ion regulation of four warm season turfgrasses to long-term salinity stress[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122: 620-625.
- [13] 宗俊勤,陈静波,於朝广,等. 部分暖季型草坪草品种(系)在沿海滩涂的生长适应性及其对土壤盐度的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 48-54.
- [14] 陈静波,阎 君,郭海林,等. 暖季型草坪草大规模种质资源抗盐性评价指标的选择[J]. 草业科学, 2008, 25(4): 95-99.
- [15] 王宝山,赵可夫. 小麦叶片中Na、K提取方法的比较[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(1): 50-52.
- [16] WANG S, ZHENG W, REN J, et al. Selectivity of various types of salt-resistant plants for K⁺ over Na⁺ [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52: 457-472.
- [17] 朱 义,谭贵娥,何池全,等. 盐胁迫对高羊茅(*Festuca arundinacea*)幼苗生长和离子分布的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5447-5454.
- [18] 李晓宇,蔺吉祥,李秀军,等. 羊草苗期对盐碱胁迫的生长适应及Na⁺、K⁺代谢响应[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 201-209.
- [19] MARCUM K B. Salinity tolerance mechanisms of grasses in the subfamily Chloridoideae [J]. Crop Science, 1999, 39: 1153-1160.
- [20] 武传兰,隆小华,梁明祥,等. NaCl胁迫对2个杨树品种扦插苗生长及体内离子含量和运输的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(1): 63-69.
- [21] MAATHUIS F J M, AMTMANN A. K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: the basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios[J]. Annals of Botany, 1999, 84: 123-133.
- [22] GUO Q, WANG P, MA Q, et al. Selective transport capacity for K⁺ over Na⁺ is linked to the expression levels of *PtSOS1* in halophyte *Puccinellia tenuiflora* [J]. Functional Plant Biology, 2012, 39: 1047-1057.
- [23] HU L, HUANG Z, LIU S, et al. Growth response and gene expression in antioxidant-related enzymes in two bermudagrass genotypes differing in salt tolerance[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2012, 137: 134-143.
- [24] HORIE T, HAUSER F, SCHROEDER J I. HKT transporter-mediated salinity resistance mechanisms in *Arabidopsis* and monocot crop plants[J]. Trends in Plant Science, 2009, 14: 660-668.
- [25] 王 丽,张俊莲,张金文,等. 拟南芥高亲和性K⁺载体蛋白基因cDNA克隆及其序列特征分析[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 230-238.

(责任编辑:张明霞)