

# 盐胁迫对甜高粱和青贮玉米不同器官 $K^+$ 、 $Na^+$ 含量的影响

高 雪<sup>1</sup>,朱 林<sup>1\*</sup>,张会丽<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室/西北土地退化与生态恢复  
省部共建国家重点实验室培育基地/西部生态与生物资源开发联合研究中心,  
宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 农学院,宁夏 银川 750021)

**摘要:**为探讨甜高粱和玉米通过  $K^+$ 、 $Na^+$  调节适应盐胁迫的机制,选择4个甜高粱品系和4个青贮玉米品系(种)为试验材料,种植于宁夏灌区北部盐渍化土地(土壤含盐量 2.25 g/kg),并设置含盐量较低的对照地(土壤含盐量 0.85 g/kg),测定不同试验地甜高粱及玉米的公顷干质量以及根系、茎基、茎秆、叶片的  $K^+$ 、 $Na^+$  含量,分析不同器官  $K^+$ / $Na^+$  与公顷干质量的相关性。结果表明:盐胁迫下,甜高粱除叶片之外的其他器官中  $K^+$  含量极显著高于青贮玉米而  $Na^+$  含量极显著或者显著低于青贮玉米,甜高粱各器官的  $K^+$ / $Na^+$  均极显著高于青贮玉米。与对照相比,在盐胁迫下,甜高粱根系、叶片  $K^+$  含量降低,青贮玉米根系、茎基  $K^+$  含量降低;甜高粱根系  $Na^+$  含量升高,青贮玉米根系、茎基和茎秆  $Na^+$  含量升高;甜高粱根系  $K^+$ / $Na^+$  降低,青贮玉米根系、茎基和茎秆  $K^+$ / $Na^+$  降低。在对照地,甜高粱除茎秆之外其他器官  $K^+$ / $Na^+$  与公顷干质量均呈正相关,青贮玉米各器官  $K^+$ / $Na^+$  与公顷干质量均呈正相关;在盐胁迫下,甜高粱各器官  $K^+$ / $Na^+$  与公顷干质量均呈正相关,青贮玉米除根系之外其余器官  $K^+$ / $Na^+$  与公顷干质量均呈正相关。综上,盐胁迫下,甜高粱以及青贮玉米较强的耐盐性与其较高的  $K^+$ / $Na^+$  有关,甜高粱在盐胁迫下比青贮玉米具有更高的  $K^+$ / $Na^+$ ,从而使其具有更强的适应盐胁迫的能力。

**关键词:**甜高粱;青贮玉米;盐胁迫; $K^+$  含量; $Na^+$  含量; $K^+$ / $Na^+$

**中图分类号:**S513      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-3268(2017)12-0029-07

## Effects of Soil Saline Stress on $K^+$ and $Na^+$ Content of Different Organs of Sweet Sorghum and Silage Corn

GAO Xue<sup>1</sup>,ZHU Lin<sup>1\*</sup>,ZHANG Huili<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-Western China, Ministry of Education/Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration of North-Western China/Union Research Center for Ecological and Exploitation of Biological Resources in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Agricultural College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to explore the salt tolerance mechanism in terms of absorbing  $K^+$  and excluding  $Na^+$  of sweet sorghum and corn, four sweet sorghum lines and four silage corn lines were planted in saline land located (salinity level 2.25 g/kg) in northern irrigation area of Ningxia and in normal soil condition (control, salinity level 0.85 g/kg) respectively. The contents of  $K^+$  and  $Na^+$  in root, basal stem, stem and leaf and above-ground biomass were determined. The correlation between  $K^+$ / $Na^+$  and yield was analyzed

收稿日期:2017-06-05  
基金项目:宁夏高等学校科学研究项目(NGY2015030)  
作者简介:高 雪(1994-),女,宁夏固原人,在读硕士研究生,研究方向:植物生态学。E-mail: ydgaoxue@163.com  
\* 通讯作者:朱 林(1970-),男,宁夏银川人,副研究员,博士,主要从事植物逆境生理方面的研究。  
E-mail: zhulinscience@126.com

under different conditions. The result showed that in saline land the contents of  $K^+$  in all organs in sweet sorghum were higher than those in corn except leaf. Lower content of  $Na^+$  in all organs was found in sweet sorghum compared with corn except leaf. The ratios of  $K^+/Na^+$  in all organs in sweet sorghum were higher than those in corn. Saline stress decreased the contents of  $K^+$  in root and leaf for sweet sorghum and in root and basal stem for corn. Meanwhile, saline treatment resulted in the increase of contents of  $Na^+$  in root for sweet sorghum and in root, basal stem, and stem for corn. In saline land, the ratios of  $K^+/Na^+$  in root for sweet sorghum decreased, while those in root, basal stem, and stem for corn decreased compared with the control. In control, positive correlations between the ratios of  $K^+/Na^+$  in all organs except leaf and the above-ground dry biomass per hectare for sweet sorghum were found, and the ratios of  $K^+/Na^+$  in all organs were positively related to the above-ground dry biomass per hectare for corn. In saline land, positive correlations were found between the ratios of  $K^+/Na^+$  in all organs and the above-ground dry biomass per hectare for sweet sorghum, and the ratios of  $K^+/Na^+$  in all organs except root were positively correlated with the above-ground dry biomass per hectare for corn. Taken together, high  $K^+/Na^+$  could be related to higher tolerance to salinity for sweet sorghum and corn grown under saline stress. Sweet sorghum displayed higher  $K^+/Na^+$  and stronger tolerance to salinity than corn.

**Key words:** sweet sorghum; silage corn; salinity-stress;  $K^+$  content;  $Na^+$  content;  $K^+/Na^+$

随着全球生态环境的不断恶化和人类不合理活动的加剧,缺水、土壤盐渍化成为很多学者关注的一个世界性问题<sup>[1-3]</sup>。我国盐渍化土壤面积约有  $1.16 \times 10^8 \text{ hm}^2$ <sup>[4]</sup>,其中,宁夏土壤的盐渍化非常严重。减少土壤盐渍化的蔓延,研究并鉴定能在盐渍化严重的地区生长且能取得高产的作物就显得尤为迫切。盐胁迫形成的渗透胁迫和离子胁迫会干扰植物整株水平上的稳态,从而损伤细胞分子,导致植物生长减缓甚至死亡<sup>[5]</sup>。植物适应盐胁迫的机制表现在无机组分和有机物质等渗透调节物质含量的增加<sup>[6]</sup>。其中,有机物质如各种酯类、甘氨酸等;无机组分中以无机离子居多<sup>[7]</sup>,主要是  $K^+$ 、 $Na^+$  等,其中  $Na^+$  是主要的毒害离子。

玉米(*Zea mays* L.)是宁夏的第一大作物,而甜高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)则是高抗逆、高生物产量的理想作物,也是世界五大谷类作物之一。甜高粱和玉米同属  $C_4$  植物,且同属主要粮食、饲料作物,是人类和畜禽的重要食物来源<sup>[8]</sup>。近年来,在美国甜高粱常被作为青贮玉米的替代品进行研究<sup>[9]</sup>。甜高粱和青贮玉米在适应盐胁迫过程中都会限制  $Na^+$  的内流,增大  $Na^+$  的外排,保持胞质中较高的  $K^+/Na^+$ ,但甜高粱、青贮玉米的耐盐浓度不同<sup>[10]</sup>。近年来,关于小麦、青贮玉米、甜高粱等单种植物幼苗在盆栽条件下对短期单盐胁迫的抗性及其  $K^+$ 、 $Na^+$  含量和  $K^+/Na^+$  的变化方面,许多学者进行了研究<sup>[11-14]</sup>,结果表明,植物耐盐性与高  $K^+/Na^+$  保持能力有关<sup>[15]</sup>。但对比甜高粱和青贮玉米在土壤自然盐胁迫下通过  $K^+$ 、 $Na^+$  变化适应盐胁迫差异的研究鲜见报道。鉴于此,以甜高粱、青贮玉米为试验

材料,测定并对比 2 种作物及其不同器官在土壤自然盐胁迫下  $K^+$ 、 $Na^+$  含量,  $K^+/Na^+$ , 公顷干质量等的差异,以期了解甜高粱和青贮玉米通过  $K^+$ 、 $Na^+$  调节适应盐胁迫的机制。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

供试含盐量较低(0.85 g/kg)的对照地位于宁夏省银川市平吉堡(106°01′56.26″E、38°24′5.61″N),海拔约 1 111.4 m,地形东西高、中部低,起伏大,由西南向东北倾斜,该区气候属大陆性半荒漠草原带<sup>[16]</sup>;盐胁迫处理中,供试盐渍化土地(含盐量 2.25 g/kg)位于宁夏省石嘴山市平罗县西大滩(106°21′1.80″E、38°48′1.51″N),海拔约 1 100 m,该地位于银川平原北部,属黄河冲积平原,地势低洼,土质黏重,土壤盐渍化严重<sup>[17]</sup>。对照地和盐渍化土地作物生长期气温和降水量的情况如图 1 所示,土壤基本理化性质如表 1 所示。

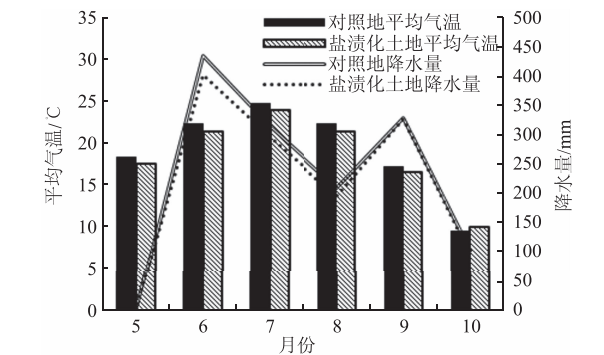


图 1 对照地和盐渍化土地的气候条件

表 1 对照地和盐渍化土地的土壤理化性状

土地类型	含盐量/(g/kg)	pH	有机质含量/(g/kg)	碱解氮含量/(mg/kg)	速效磷含量/(mg/kg)	速效钾含量/(mg/kg)
盐渍化土地	2.25	8.31	12.15	25.23	3.76	255.26
对照地	0.85	8.32	25.56	38.58	15.20	109.60

1.2 供试材料

本试验选用甜高粱杂交品系 4 个,分别为 A39、A60、A45、A46;青贮玉米品系(种)4 个,分别为杂交品系 HaiY1、A3/白 4-7 以及商业对照品种桂青贮 1 号和科多 8 号。

1.3 试验设计

对照和盐胁迫处理均采用随机区组试验,甜高粱和青贮玉米各品系(种)均种植 3 个小区为 3 个重复。甜高粱采取条播的播种方式,各小区南北走向种植 8 行,行长 3 m,行距 60 cm,各个小区间隔 60 cm;青贮玉米采取穴播的播种方式,各小区种 8 行,行长 3 m,行距 60 cm、株距 20 cm,各个小区间隔 60 cm。甜高粱和青贮玉米均于 2015 年 5 月 4 日播种,出苗后生长季节进行严密的田间管理,10 月 4 日收获。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量 对照和盐胁迫处理均按作物及品系(种)分小区于成熟期取样,每小区沿对角线均匀选取 3 株,分别按照根系、叶片、茎基、茎秆等不同器官取样混匀,各品系(种)3 个重复均取样。植株样品烘干、粉碎、过孔径 0.25 mm 筛后按品种和部位分别标记,然后加入 10 mL 蒸馏水,在 100 ℃沸水中煮 2 h,冷却,定容至 50 mL,并用中速滤纸过滤。取过滤后的原液或稀释液,用火焰光度计测定 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量<sup>[18]</sup>。

1.4.2 公顷干质量 对照和盐胁迫处理按作物及品系(种)分小区于成熟期取样,各品系(种)每个重复取 0.5 m×1.0 m 面积的植株称取鲜质量,再各取 1 株完整的整株分别称取鲜质量,带回实验室烘干后测其干质量,根据每株的干鲜比换算出每公顷的干质量。公顷干质量=单株干质量/单株鲜质量×公顷鲜质量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 以及 DPS 7.5 进行数据的整理与统计分析,采用 Duncan's 新复极差法对不同部位 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量以及 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 等指标在物种间、基因型间以及环境间的差异显著性进行分析,并分析了不同试验地各试验材料 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与产量的相关性。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对甜高粱和青贮玉米不同器官 K<sup>+</sup> 含量的影响

由表 2 可知,在对照地,甜高粱和青贮玉米 2 种

作物各器官 K<sup>+</sup> 含量均差异显著或极显著。其中,甜高粱根系、叶片中 K<sup>+</sup> 含量分别显著、极显著高于青贮玉米,而茎基和茎秆中 K<sup>+</sup> 含量分别极显著、显著低于青贮玉米。除青贮玉米的叶片与根系的 K<sup>+</sup> 含量差异不显著之外,同一作物不同器官间 K<sup>+</sup> 含量差异显著,均表现为茎基>茎秆>叶片>根系。盐胁迫处理,2 种作物各器官 K<sup>+</sup> 含量差异显著或极显著。其中,甜高粱叶片 K<sup>+</sup> 含量显著低于青贮玉米,根系、茎基、茎秆中 K<sup>+</sup> 含量极显著高于青贮玉米。同一作物不同器官间 K<sup>+</sup> 含量均差异显著,均表现为茎基>茎秆>叶片>根系。

2 个试验地之间比较,盐胁迫处理、对照甜高粱不同品系根系 K<sup>+</sup> 含量分别为 0.34%~0.63%、0.46%~1.02%,叶片 K<sup>+</sup> 含量分别为 0.54%~1.09%、0.73%~1.14%,茎基 K<sup>+</sup> 含量分别为 1.65%~3.05%、1.80%~2.02%,茎秆 K<sup>+</sup> 含量分别为 1.46%~2.38%、1.23%~1.85%;盐胁迫处理甜高粱根系、叶片 K<sup>+</sup> 含量较对照显著降低,而茎基、茎秆 K<sup>+</sup> 含量则较对照显著升高。盐胁迫处理、对照青贮玉米不同品系(种)根系 K<sup>+</sup> 含量分别为 0.33%~0.42%、0.41%~0.99%,叶片 K<sup>+</sup> 含量分别为 0.64%~1.18%、0.50%~1.10%,茎基 K<sup>+</sup> 含量分别为 1.52%~2.21%、1.57%~3.16%,茎秆 K<sup>+</sup> 含量分别为 1.39%~1.97%、1.10%~2.12%;盐胁迫处理青贮玉米根系、茎基 K<sup>+</sup> 含量较对照显著降低,而叶片、茎秆 K<sup>+</sup> 含量较对照显著升高。

2.2 盐胁迫对甜高粱和青贮玉米不同器官 Na<sup>+</sup> 含量的影响

由表 3 可知,在对照地,2 种作物各器官 Na<sup>+</sup> 含量差异表现为:青贮玉米根系 Na<sup>+</sup> 含量显著高于甜高粱,2 种作物茎基、叶片、茎秆 Na<sup>+</sup> 含量差异不显著;甜高粱不同器官 Na<sup>+</sup> 含量表现为根系>叶片=茎基>茎秆,青贮玉米不同器官 Na<sup>+</sup> 含量表现为根系>茎基>叶片>茎秆。在盐胁迫处理中,2 种作物各器官 Na<sup>+</sup> 含量差异表现为:青贮玉米根系、茎基、茎秆 Na<sup>+</sup> 含量极显著或显著高于甜高粱,2 种作物叶片 Na<sup>+</sup> 含量差异不显著;甜高粱不同器官 Na<sup>+</sup> 含量表现为根系>叶片=茎基>茎秆,青贮玉米不同器官 Na<sup>+</sup> 含量表现为茎基>根系>茎秆>叶片。

表 2 不同处理甜高粱和青贮玉米各器官的 K<sup>+</sup> 含量

%

处理	作物	品系(种)	根系	叶片	茎基	茎秆
对照	甜高粱	A39	1.02 ± 0.01a	0.73 ± 0.01f	1.95 ± 0.01cd	1.42 ± 0.02d
		A60	0.74 ± 0.02c	1.14 ± 0.01a	1.96 ± 0.01cd	1.36 ± 0.01e
		A45	0.46 ± 0.02d	1.03 ± 0.01c	2.02 ± 0.02c	1.23 ± 0.01f
		A46	0.75 ± 0.02c	0.96 ± 0.01d	1.80 ± 0.21de	1.85 ± 0.01b
		平均值	0.74 ± 0.23( dA)	0.97 ± 0.17( cA)	1.93 ± 0.09( aB)	1.46 ± 0.27( bB)
	青贮玉米	HaiY1	0.41 ± 0.02e	0.50 ± 0.02h	2.46 ± 0.01b	2.12 ± 0.01a
		A3/白 4-7	0.46 ± 0.01d	0.86 ± 0.01e	1.57 ± 0.01f	1.10 ± 0.02h
		桂青贮 1 号	0.99 ± 0.01a	0.72 ± 0.01g	3.16 ± 0.00a	1.62 ± 0.01c
		科多 8 号	0.93 ± 0.01b	1.10 ± 0.01b	1.76 ± 0.01e	1.16 ± 0.01g
		平均值	0.70 ± 0.30( cA) *	0.79 ± 0.25( cB) **	2.24 ± 0.73( aA) **	1.50 ± 0.47( bB) *
盐胁迫	甜高粱	A39	0.63 ± 0.01a	0.61 ± 0.01g	1.65 ± 0.01g	1.62 ± 0.01d
		A60	0.55 ± 0.01c	0.54 ± 0.01h	3.05 ± 0.01a	2.38 ± 0.01a
		A45	0.34 ± 0.01f	1.02 ± 0.01c	2.31 ± 0.01b	1.46 ± 0.01f
		A46	0.58 ± 0.02b	1.09 ± 0.01b	1.85 ± 0.02d	1.54 ± 0.01e
		平均值	0.53 ± 0.13( dB)	0.82 ± 0.28( cB)	2.22 ± 0.62( aA)	1.75 ± 0.43( bA)
	青贮玉米	HaiY1	0.42 ± 0.01d	0.78 ± 0.01e	1.52 ± 0.01h	1.39 ± 0.03g
		A3/白 4-7	0.38 ± 0.02e	0.64 ± 0.01f	1.72 ± 0.01e	1.61 ± 0.02d
		桂青贮 1 号	0.42 ± 0.02d	0.91 ± 0.01d	1.71 ± 0.01f	1.69 ± 0.05c
		科多 8 号	0.33 ± 0.01g	1.18 ± 0.01a	2.21 ± 0.01c	1.97 ± 0.01b
		平均值	0.36 ± 0.04( dB) **	0.88 ± 0.23( cA) *	1.79 ± 0.30( aB) **	1.67 ± 0.24( bA) **

注:同列不同小写字母表示同一处理同一器官不同作物各品系(种)在 5% 水平上差异显著, \*、\*\* 表示同一处理同一器官 2 种作物分别在 5%、1% 水平上差异显著、极显著,( ) 内不同小写字母表示同一处理同一作物不同器官在 5% 水平上差异显著,( ) 内不同大写字母表示同一作物同一器官不同处理在 5% 水平上差异显著;下同。

表 3 不同处理甜高粱和青贮玉米各器官的 Na<sup>+</sup> 含量

%

处理	作物	品系(种)	根系	叶片	茎基	茎秆
对照	甜高粱	A39	0.05 ± 0.01d	0.03 ± 0.01d	0.02 ± 0.01f	0.02 ± 0.00c
		A60	0.07 ± 0.01c	0.05 ± 0.01b	0.05 ± 0.01b	0.02 ± 0.01c
		A45	0.04 ± 0.01e	0.03 ± 0.01d	0.03 ± 0.01e	0.03 ± 0.01b
		A46	0.07 ± 0.01c	0.05 ± 0.01b	0.05 ± 0.01c	0.03 ± 0.00b
		平均值	0.05 ± 0.01( aB)	0.04 ± 0.01( bA)	0.04 ± 0.01( bA)	0.02 ± 0.01( cA)
	青贮玉米	HaiY1	0.08 ± 0.01b	0.04 ± 0.00c	0.04 ± 0.01c	0.04 ± 0.01a
		A3/白 4-7	0.07 ± 0.01c	0.04 ± 0.01c	0.05 ± 0.01bc	0.02 ± 0.00c
		桂青贮 1 号	0.09 ± 0.01a	0.04 ± 0.01c	0.06 ± 0.01a	0.02 ± 0.01c
		科多 8 号	0.07 ± 0.01c	0.06 ± 0.00a	0.04 ± 0.03d	0.04 ± 0.00a
		平均值	0.08 ± 0.01( aB) *	0.04 ± 0.01( cA)	0.05 ± 0.01( bB)	0.03 ± 0.01( dB)
盐胁迫	甜高粱	A39	0.04 ± 0.01g	0.02 ± 0.01e	0.02 ± 0.01f	0.02 ± 0.01e
		A60	0.11 ± 0.02e	0.03 ± 0.01d	0.06 ± 0.00e	0.03 ± 0.01c
		A45	0.05 ± 0.01f	0.03 ± 0.01d	0.03 ± 0.01f	0.02 ± 0.01e
		A46	0.05 ± 0.01f	0.05 ± 0.01b	0.02 ± 0.01f	0.03 ± 0.01d
		平均值	0.06 ± 0.03( aA)	0.03 ± 0.01( bB)	0.03 ± 0.02( bB)	0.02 ± 0.01( cA)
	青贮玉米	HaiY1	0.21 ± 0.01c	0.09 ± 0.01a	0.33 ± 0.03c	0.21 ± 0.01a
		A3/白 4-7	0.47 ± 0.01a	0.03 ± 0.02d	0.23 ± 0.01d	0.03 ± 0.01d
		桂青贮 1 号	0.14 ± 0.01d	0.04 ± 0.01c	0.49 ± 0.01a	0.04 ± 0.01b
		科多 8 号	0.24 ± 0.01b	0.04 ± 0.01c	0.36 ± 0.01b	0.03 ± 0.01cd
		平均值	0.26 ± 0.14( bA) **	0.03 ± 0.02( dB)	0.35 ± 0.11( aA) **	0.08 ± 0.09( cA) *

2 个试验地比较,盐胁迫处理、对照甜高粱不同品系根系 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.04% ~0.11%、0.04% ~0.07%,叶片 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.02% ~0.05%、0.03% ~0.05%,茎基 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.02% ~0.06%、0.02% ~0.05%,茎秆 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.02% ~0.03%、0.02% ~0.03%;盐胁迫处理甜高

梁根系 Na<sup>+</sup> 含量较对照显著升高,叶片、茎基 Na<sup>+</sup> 含量较对照显著降低,茎秆 Na<sup>+</sup> 含量与对照则无显著差异。盐胁迫处理、对照青贮玉米不同品系(种)根系 Na<sup>+</sup> 含量为 0.14% ~ 0.47%、0.07% ~ 0.09%,叶片 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.03% ~ 0.09%、0.04% ~ 0.06%,茎基 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.23% ~ 0.49%、0.04% ~ 0.06%,茎秆 Na<sup>+</sup> 含量分别为 0.03% ~ 0.21%、0.02% ~ 0.04%;盐胁迫处理青贮玉米根系、茎基、茎秆 Na<sup>+</sup> 含量较对照显著升高,而叶片 Na<sup>+</sup> 含量则较对照显著降低。

2.3 盐胁迫对甜高粱和青贮玉米不同器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 的影响

由表 4 可知,在对照地,甜高粱各器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 均极显著高于青贮玉米;甜高粱和青贮玉米各器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 均表现为茎秆 > 茎基 > 叶片 > 根系,且差异显著。在盐胁迫处理,甜高粱各器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 均极显著高于青贮玉米;甜高粱不同器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 表

现为茎基 > 茎秆 > 叶片 > 根系,青贮玉米不同器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 表现为茎秆 > 叶片 > 茎基 > 根系。

2 个试验地比较,盐胁迫处理、对照甜高粱不同品系根系 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 4.96 ~ 16.31、11.09 ~ 22.07,叶片 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 18.28 ~ 36.11、19.84 ~ 37.31,茎基 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 51.04 ~ 93.26、38.76 ~ 100.71,茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 52.37 ~ 83.35、43.20 ~ 74.63;盐胁迫处理甜高粱根系 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 较对照显著降低,叶片、茎基、茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 较对照显著升高。盐胁迫处理、对照青贮玉米不同品系(种)根系 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 0.75 ~ 2.35、5.47 ~ 13.75,叶片 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 9.11 ~ 30.40、13.29 ~ 22.36,茎基 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 3.47 ~ 7.40、32.42 ~ 56.18,茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 分别为 6.65 ~ 66.64、29.79 ~ 85.25;盐胁迫处理青贮玉米根系、茎基、茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 较对照显著降低,叶片 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 较对照显著升高。

表 4 不同处理甜高粱和青贮玉米各器官的 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>

处理	作物	品系(种)	根系	叶片	茎基	茎秆
对照	甜高粱	A39	22.07 ± 0.66a	26.32 ± 1.87b	100.71 ± 3.47a	74.63 ± 2.31b
		A60	11.09 ± 0.08d	23.84 ± 0.05bc	38.76 ± 1.48e	69.45 ± 1.34c
		A45	12.49 ± 0.70c	37.31 ± 4.21a	68.19 ± 0.27b	43.20 ± 1.70f
		A46	11.33 ± 0.26d	19.84 ± 0.06cd	39.66 ± 1.07e	63.99 ± 1.88d
		平均值	14.24 ± 5.25 (dA)	26.83 ± 7.48 (cB)	61.83 ± 29.3 (bB)	62.82 ± 13.78 (aB)
	青贮玉米	HaiY1	5.47 ± 0.14f	13.29 ± 0.41e	56.18 ± 5.17c	53.61 ± 0.15e
		A3/白 4-7	6.87 ± 0.22e	22.36 ± 0.16bed	32.42 ± 0.02f	56.53 ± 0.67e
		桂青贮 1 号	10.47 ± 0.05d	19.34 ± 1.53d	54.71 ± 0.53c	85.25 ± 3.18a
		科多 8 号	13.75 ± 0.05b	19.09 ± 1.08d	45.40 ± 0.21d	29.79 ± 0.05g
		平均值	9.14 ± 3.72 (dA) **	18.52 ± 3.79 (cB) **	47.18 ± 10.94 (bA) **	56.29 ± 22.72 (aA) **
盐胁迫	甜高粱	A39	16.31 ± 0.44a	30.90 ± 0.14b	84.16 ± 0.23b	83.35 ± 1.20a
		A60	4.96 ± 0.19d	18.28 ± 0.07d	51.04 ± 0.06d	80.02 ± 0.02b
		A45	7.09 ± 0.13c	36.11 ± 2.04a	77.48 ± 0.27c	75.18 ± 0.97c
		A46	11.81 ± 0.27b	23.19 ± 1.40c	93.26 ± 0.37a	52.37 ± 0.05f
		平均值	10.04 ± 5.06 (dB)	27.12 ± 7.93 (cA)	76.49 ± 18.15 (aA)	72.73 ± 13.98 (bA)
	青贮玉米	HaiY1	2.04 ± 0.01e	9.11 ± 0.01e	4.56 ± 0.38g	6.65 ± 0.14h
		A3/白 4-7	0.75 ± 0.00g	22.20 ± 0.29c	7.40 ± 0.08e	54.68 ± 0.02e
		桂青贮 1 号	2.35 ± 0.21e	23.60 ± 0.22c	3.47 ± 0.01h	43.37 ± 1.41g
		科多 8 号	1.37 ± 0.01f	30.40 ± 0.15b	6.17 ± 0.01f	66.64 ± 0.04d
		平均值	1.63 ± 0.71 (dB) **	21.32 ± 8.9 (bA) **	5.40 ± 1.73 (cB) **	42.83 ± 25.93 (aB) **

2.4 不同处理各器官 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量的相关性

由表 5 可知,对照地,甜高粱根系、叶片、茎基 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量均呈正相关,其中,茎基 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量相关性最高 (r = 0.663);青贮玉米根系、叶片、茎基、茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量均呈正相关,其中,茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量相

关性最高 (r = 0.890)。

盐胁迫处理,甜高粱根系、叶片、茎基、茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量均呈正相关,其中,根系 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量相关性最高 (r = 0.975);青贮玉米叶片、茎基、茎秆 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量呈正相关,其中,茎基 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 与公顷干质量相关性最高 (r = 0.268)。

表 5 不同处理甜高粱和青贮玉米各器官  $K^+/Na^+$  与公顷干质量的相关性

作物	器官	对照		盐胁迫处理	
		回归方程	$r$	回归方程	$r$
甜高粱	根系	$y = 2\,085.4x + 32\,887$	0.527	$y = 3\,057.3x + 10\,385$	0.975
	叶片	$y = 982.4x + 36\,237$	0.353	$y = 901.37x + 16\,637$	0.450
	茎基	$y = 470.64x + 33\,492$	0.663	$y = 594.58x - 4\,393.8$	0.680
	茎秆	$y = -438.36x + 90\,129$	-0.291	$y = 129.96x + 31\,631$	0.114
青贮玉米	根系	$y = 216.06x + 42\,253$	0.146	$y = -1\,407.7x + 34\,630$	-0.177
	叶片	$y = 566.64x + 33\,732$	0.390	$y = 117.82x + 29\,830$	0.184
	茎基	$y = 91.45x + 39\,913$	0.182	$y = 880.95x + 27\,584$	0.268
	茎秆	$y = 215.8x + 32\,079$	0.890	$y = 31.698x + 30\,985$	0.145

3 结论与讨论

3.1 盐胁迫对甜高粱和青贮玉米不同器官  $K^+$ 、 $Na^+$  含量的影响

$K^+$  是保证植物细胞维持正常代谢的重要无机离子,在植物细胞质中维持一定的  $K^+$  浓度对于植物正常生长以及适应逆境胁迫非常重要。在盐胁迫下,植物膜结构和功能发生变化,细胞内  $Na^+$  过量累积<sup>[19]</sup>, $Na^+$  竞争  $K^+$  的吸收位点及活性位点, $Na^+$  含量增多导致  $K^+$  吸收减少<sup>[20]</sup>。本研究中,与对照相比,盐胁迫处理下甜高粱和青贮玉米根系  $K^+$  含量减少, $Na^+$  含量增加。这与王晓冬等<sup>[21]</sup>、彭建云等<sup>[22]</sup> 的研究结论相似。植物在盐胁迫下受影响最大的器官首先是根,根在外界离子浓度变化后首先受到影响, $Na^+$  在根部累积,减少了向地上部的运输,减轻了  $Na^+$  对植物地上部分的毒害<sup>[23]</sup>。但盐胁迫处理下,甜高粱根系和叶片中的  $K^+$  含量较对照减少,青贮玉米根系和茎基中  $K^+$  含量较对照减少。说明甜高粱和青贮玉米除根系之外受到盐胁迫影响的器官不同,此结论对王玉凤等<sup>[24]</sup> 的研究结论有所补充,王玉凤等<sup>[24]</sup> 研究认为,青贮玉米在盐胁迫处理下根系和成熟叶叶鞘  $K^+$  含量下降。成熟叶叶鞘在植株适应盐胁迫中会限制  $Na^+$ 、推动  $K^+$  向叶片运输<sup>[25]</sup>,从而表现出  $K^+$  含量下降,但王玉凤等<sup>[24]</sup> 的研究材料为玉米幼苗,而本试验中的研究材料为成熟期玉米。因此,茎基部和成熟叶叶鞘在青贮玉米适应盐胁迫的过程中的作用异同还有待研究。

植物通过吸收  $K^+$ 、排出  $Na^+$  以适应盐胁迫下离子平衡被打破带来的伤害,植物细胞中的液泡膜逆向转运蛋白将细胞质中过量的  $Na^+$  转运并区域化在液泡中,质膜逆向转运蛋白将细胞质中过量的  $Na^+$  转运出细胞,从而排出细胞质中过量的  $Na^+$ ,降低细胞质内  $Na^+$  的含量,消除  $Na^+$  对细胞膜以及细胞质中代谢活动的影响和伤害<sup>[26]</sup>。盐胁迫下,通过  $K^+$ 、 $Na^+$  含量的调节才能维持细胞内原有稳定的  $K^+$ 、 $Na^+$  平衡,使作物能更好地适应盐胁迫。本研

究中,在盐胁迫下,甜高粱除叶片外的其他器官  $K^+$  含量均高于青贮玉米,除叶片  $Na^+$  含量与青贮玉米无显著差异以外,其他器官中  $Na^+$  含量均低于青贮玉米,说明甜高粱吸收  $K^+$  排出  $Na^+$  的能力强于青贮玉米。

3.2 盐胁迫下甜高粱和青贮玉米不同器官  $K^+/Na^+$  与公顷干质量的关系

植物正常发育需要维持细胞内离子的相对平衡状态,而细胞质保持  $K^+/Na^+$  相对恒定的能力是植物盐适应性的重要决定因素之一<sup>[24]</sup>。盐胁迫导致植物相应的离子吸收和运输产生变化,故  $K^+/Na^+$  既能代表细胞内离子动态平衡状态,也能代表植物通过无机离子的变化适应盐胁迫的能力。盐胁迫下,植物  $K^+$  大量外流, $Na^+$  过量积累,而保持较高的  $K^+/Na^+$  在作物适应逆境的过程中尤为重要。本试验中,盐胁迫下,甜高粱各器官  $K^+/Na^+$  均极显著高于青贮玉米,说明甜高粱通过吸  $K^+$  排  $Na^+$  的机制来保持较高的  $K^+/Na^+$  以适应盐胁迫的能力远高于青贮玉米。盐胁迫下,青贮玉米叶片中  $K^+/Na^+$  较对照升高,而甜高粱叶片、茎基、茎秆  $K^+/Na^+$  较对照升高,说明同为  $C_4$  植物的甜高粱和青贮玉米,在较强盐胁迫下的渗透调节机制存在一定的差异,这与李晓宇等<sup>[27]</sup> 的研究结果相同。

在对照地,甜高粱茎基  $K^+/Na^+$  与公顷干质量相关性最高( $r = 0.663$ ),青贮玉米茎秆  $K^+/Na^+$  与公顷干质量相关性最高( $r = 0.890$ ),说明在土壤含盐量较低的对照地,甜高粱和青贮玉米没有受到盐胁迫时,甜高粱茎基部保持较高的  $K^+/Na^+$ ,保持对地上部分  $K^+$  的输送和调控,有利于甜高粱干物质的积累;青贮玉米茎秆保持较高的  $K^+/Na^+$ ,茎秆细胞内离子动态平衡,茎秆稳定生长,有利于干质量增加。盐胁迫处理下,甜高粱根系、叶片、茎基和茎秆等器官  $K^+/Na^+$  与公顷干质量均呈正相关,根系  $K^+/Na^+$  与公顷干质量相关性最高( $r = 0.976$ )。这是因为试验中盐碱地土壤含盐量很高,根系作为甜高粱适应盐胁迫最敏感的器官,保持高的  $K^+/Na^+$

可以保持对地上部分  $K^+$  的输送和  $Na^+$  的截流,从而保护好根系免受盐胁迫的离子毒害,保证甜高粱在盐胁迫下不会形成生理干旱,使根系能够正常地吸收水分和养分,从而能够适应盐胁迫,表现为在含盐量较高的土壤上保持较高的公顷干质量。而青贮玉米在盐胁迫处理下根系  $K^+/Na^+$  与公顷干质量呈负相关,可能是因为试验中盐碱地的含盐量较高,已经超出青贮玉米根系耐受的含盐量阈值,离子浓度过高对青贮玉米根系造成了伤害。

综上可知,盐胁迫处理对甜高粱和青贮玉米  $K^+$  和  $Na^+$  的影响首先表现在根系,2 种作物均表现为在盐胁迫处理下根系  $K^+$  含量减少, $Na^+$  含量增加;盐胁迫处理下甜高粱根系、叶片、茎基中的  $K^+/Na^+$  与公顷干质量均呈正相关,且相关性高于青贮玉米相应器官中的  $K^+/Na^+$  与公顷干质量的相关性;盐胁迫处理下甜高粱各器官  $K^+/Na^+$  均极显著高于玉米,表明甜高粱在适应盐胁迫时具有更强的吸  $K^+$  排  $Na^+$  能力。

#### 参考文献:

- [1] Steduto P, Katerji N, Puertos-Molina H, et al. Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions Gas-exchange investigations at leaf and canopy scales [J]. Field Crops Research, 1997, 54 (2/3): 221-234.
- [2] Massacci A, Battistelli A, Loreto F. Effect of drought stress on photosynthetic characteristics, growth and sugar accumulation of field-grown sweet sorghum [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1996, 23 (3): 331-340.
- [3] 邓川. 甜高粱抗旱耐盐碱种质资源筛选及其离体培养再生能力评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [4] 刘友良, 汪良驹. 植物对盐胁迫的反应和耐盐性 [M]//余叔文, 汤章诚. 植物生理与分子生物学. 北京: 科学出版社, 1998: 752-769.
- [5] 张宏飞, 王锁民. 高等植物  $Na^+$  吸收、转运及细胞内  $Na^+$  稳态平衡研究进展 [J]. 植物学报, 2007, 24 (5): 561-571.
- [6] Zhao Y, Lu Z, He L. Effects of saline-alkaline stress on seed germination and seedling growth of *Sorghum bicolor* (L.) Moench [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 173 (7): 1680-1691.
- [7] 贺转转, 邢佳佳, 陈玲, 等. 植物幼苗抗逆机制研究进展 [J]. 生物技术通报, 2013 (2): 1-7.
- [8] 赵丽敏. 不同抗旱性玉米和高粱品种的水力结构特性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [9] Keterings Q M, Godwin G, Chemey J. Potassium management for brown milrb sorghum sudangrass as replacement for corn silage in the north-eastern USA [J]. Agromomy & Crop Science, 2005, 191: 41-46.
- [10] 姜慧, 胡瑞芳, 邹剑秋, 等. 生物质能源甜高粱的研究进展 [J]. 黑龙江农业科学, 2012 (2): 139-141.
- [11] 赵旭, 王林权, 周春菊, 等. 盐胁迫对四种基因型冬小麦幼苗  $Na^+$ 、 $K^+$  吸收和累积的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27 (1): 205-213.
- [12] 刘强, 周晓梅, 倪福太, 等. 盐胁迫下 5 种木本植物体内  $Na^+$ 、 $K^+$  含量变化及其与抗盐性的关系研究 [J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (1): 115-118.
- [13] 王宝山, 邹琦, 赵可夫. 高粱不同器官生长对 NaCl 胁迫的响应及其耐盐阈值 [J]. 西北植物学报, 1997, 17 (3): 279-285.
- [14] 梁俊杰, 杨慧勇, 张福耀. 高粱耐盐种质筛选及耐盐种质多态性分析 [J]. 山西农业科学, 2013, 41 (5): 401-406.
- [15] 王宝山, 邹琦, 赵可夫. NaCl 胁迫对高粱不同器官离子含量的影响 [J]. 作物学报, 2000, 26 (6): 845-850.
- [16] 戴治家, 尹礼贤. 平吉堡地区土壤次生盐渍化的特点及其改良意见 [J]. 宁夏农业科学通讯, 1964 (5): 33-35.
- [17] 刘茂松, 鲁小珍, 王汉杰, 等. 宁夏平罗西大滩人类有序活动的环境效应及发展对策 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (3): 83-88.
- [18] 王宝山, 赵可夫. 小麦叶片中  $Na$ 、 $K$  提取方法的比较 [J]. 植物生理学报, 1995 (1): 50-52.
- [19] 张润花, 郭世荣, 樊怀福, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下黄瓜幼苗体内抗氧化酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2006, 25 (11): 1333-1337.
- [20] 王素平, 郭世荣, 周国贤, 等. NaCl 胁迫下黄瓜幼苗体内  $K^+$ 、 $Na^+$  和  $Cl^-$  分布及吸收特性的研究 [J]. 西北植物学报, 2006, 26 (11): 2281-2288.
- [21] 王晓冬, 王成, 马智宏, 等. 短期 NaCl 胁迫对不同小麦品种幼苗  $K^+$  吸收和  $Na^+$ 、 $K^+$  积累的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31 (10): 2822-2830.
- [22] 彭建云, 丁同楼, 陈敏, 等. 不同盐处理对玉米幼苗根系质子分泌及细胞膜透性的影响 [J]. 西北植物学报, 2007, 27 (12): 2496-2501.
- [23] 姚帅男, 刘晓东, 施冰. 混合盐碱胁迫对金山绣线菊  $Na^+$  和  $K^+$  分布影响的研究 [J]. 林业科技, 2009, 34 (5): 60-63.
- [24] 王玉凤, 薛盈文, 杨克军, 等. NaCl 胁迫对玉米幼苗不同器官离子含量的影响 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (8): 1654-1661.
- [25] Ding T L, Duan P, Wang B S.  $Na^+/K^+$  selectivity of leaf sheath in wheat cultivars differing in salt tolerance [J]. Journal of Plant Physiology & Molecular Biology, 2006, 32 (1): 123-126.
- [26] 高永生, 王锁民, 宫海军, 等. 盐胁迫下植物离子转运的分子生物学研究 [J]. 草业学报, 2003, 12 (5): 18-25.
- [27] 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.