

滨海盐土区 4 种典型耐盐植物盐分离子的积累特征^①

刘雅辉¹, 王秀萍¹, 刘广明², 孙建平¹, 姚玉涛¹, 杨雅华¹

(1 河北省农林科学院滨海农业研究所(唐山市植物耐盐研究重点实验室), 河北曹妃甸 063299;

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 为了筛选降盐效果优良的适宜植物材料以合理利用耐盐植物改良滨海盐碱地, 本研究通过田间试验系统探究了盐地碱蓬、田菁、红麻和高丹草的盐离子积累特征。结果表明: 4 种植物地上生物量在成苗期和成熟期均为总生物量的 80% 以上, 且大小为田菁>红麻>盐地碱蓬>高丹草。高丹草和红麻对 K^+ 、 Ca^{2+} 的吸收运输能力最强, 盐地碱蓬和田菁对 Na^+ 的吸收运输能力最强。根据各盐离子占植物积累总盐分的比例, 高丹草对 K^+ 积累量高于其他离子; 田菁在成苗期主要积累 K^+ , 在成熟期主要积累 Cl^- 和 Na^+ ; 红麻主要积累 Cl^- 和 K^+ ; 盐地碱蓬主要积累 Na^+ 和 Cl^- , 其体内的 Na^+ 和 Cl^- 分别占积累盐分总量的比例明显高于其余植物。从成苗期到成熟期的生长过程中, 盐地碱蓬表现出 Na^+ 积累比例持续下降, Cl^- 积累比例逐渐升高的趋势; 田菁和高丹草表现为 Na^+ 和 Cl^- 积累比例均升高; 红麻的 Na^+ 和 Cl^- 积累比例则表现为逐渐下降趋势。盐地碱蓬、田菁和红麻是滨海盐土改良的优良植物材料。

关键词: 滨海盐土; 植物材料; 盐离子; 吸收与积累

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A

土壤盐渍化及次生盐渍化现象日趋严重, 是制约农业生产的主要障碍因子之一, 也是影响生态环境的重要因素^[1-3]。滨海盐土是盐渍土的一种, 主要分布于我国沿海地区, 其土壤氯化物盐含量高, 土质黏重, 通气性差, 一般植物生长困难, 大多是光板地, 生态环境恶劣, 严重制约了区域农业发展及宜居环境的建设。因此, 盐碱地的改良利用是一个长期的、复杂而重要的任务。近几年来, 植物改良盐渍土逐渐受到人们的关注, 即通过筛选适应盐环境、具有一定经济价值的优良耐盐植物品种来开发利用盐碱地。许多研究表明, 种植耐盐植物改良盐碱地是最有效、最根本、最长远的一项改良措施^[4-7]。因此, 因地制宜筛选、种植具有土壤脱盐效果的耐盐植物, 对治理盐碱地、改善生态环境和农业可循环持续发展都具有重要意义。

耐盐植物包括盐生植物和非盐生耐盐植物, 它们都是通过自身的特有组织结构降低盐分毒害, 适应盐环境。目前国内外有关植物的耐盐性及耐盐机制方面已有一些研究, 结果表明不同植物间存在较大差异^[8-14]。盐地碱蓬是藜科植物中一种典型的稀盐盐生植物, 通常生长在盐渍化土壤中, 其繁殖力极强, 生产力较高, 可在 $pH>10$ 、含盐量 $>0.48\%$ 的土壤中存活^[15]。其叶

片或茎的组织结构中存在大量薄壁组织, 可有效增加植物贮水能力, 确保提供植物体正常生长和发育所需的水分; 还具有将从外界吸收的无机离子隔离到液泡中的区域化能力, 这样既降低了细胞质中的盐离子浓度, 又降低了细胞的水势, 从而抑制了盐离子的毒害作用。因此盐地碱蓬作为一种典型的盐碱地指示植物, 具有优良的耐盐碱性, 是改良盐碱地的理想材料。田菁是豆科田菁属一年生草本植物, 生于田间、海边及湿地, 耐潮湿和盐碱, 是改良盐渍土的优良植物^[16], 其茎叶可作绿肥及牛马饲料, 茎皮纤维可代替麻, 种子含有丰富的半乳甘露聚糖胶, 是重要的化工原料。殷云龙等^[17]、张立宾等^[18]都认为田菁在降盐改土方面有重要的作用。红麻是锦葵科木槿属一年生韧皮纤维性植物, 在纺织和造纸等方面有着重要的地位, 具有耐旱、耐盐碱、耐贫瘠、纤维产量高等特性, 适于种植在适度盐渍土中, 是极具潜力的耐盐、脱盐和高产的经济作物, 被誉为“世纪的优势作物”和“未来派作物”。张加强等^[19]、杨建^[20]对红麻不同种质资源进行了盐碱地适应性和耐盐性研究, 筛选出适宜盐碱地种植的品种。陈涛等^[21]对红麻幼苗生长及其抗氧化机制进行研究, 发现过氧化氢酶和谷胱甘肽还原酶可能在红

①基金项目: 河北省科技计划项目(152776122D)和河北省财政专项(F16R16003)资助。

作者简介: 刘雅辉(1979—), 女, 河北滦南人, 硕士, 助理研究员, 主要从事盐碱地改良与利用研究。E-mail: bhslyh@126.com

麻幼苗抵御盐害时起较重要作用。高丹草是高粱和苏丹草远缘杂交而成的新型牧草,具有较强的抗旱、耐盐碱能力,同时也能改良土壤。根据爱达荷州土壤学家介绍,高丹草可以在土壤中释放大量的 CO_2 , CO_2 可以把土壤中的盐分游离出来,然后,通过降水或灌溉把盐分从土壤中排出^[22]。赵海明等^[23]对不同类型高丹草品种进行了耐盐性比较研究,筛选出耐盐性强的品种。

纵观以上研究,主要集中于一些盐生植物的离子吸收特性、抗盐机制及非盐生耐盐植物品种的盐碱地适应性筛选方面,较少涉及非盐生耐盐植物抗盐机制及离子吸收特性方面的研究,尤其对比盐生植物和非盐生耐盐植物不同生长时期对滨海盐土盐分的吸收、运移及降盐改土最佳刈割时期的研究更鲜有报道。本

研究在滨海盐土环境下,开展盐生植物盐地碱蓬和田菁、耐盐植物高丹草和红麻在不同生育时期对盐分离子的吸收、运输及积累特性的研究,以期筛选出降盐效果好的优良材料和最佳收割时期同时也为合理利用耐盐植物,梯次推进改良滨海盐碱地提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区为河北省唐山市曹妃甸区生态城(118°33'40.82"E, 39°09'39.35"N),土壤类型属于退养还滩的滨海盐土,试验区土壤主要盐分类型为 NaCl ,具体离子含量见表1。

表1 试验区土壤盐分及离子浓度
Table 1 Salinity and ions concentration in soil in study area

盐分(g/kg)	pH	Na^+ (g/kg)	K^+ (g/kg)	Ca^{2+} (g/kg)	Mg^{2+} (g/kg)	Cl^- (g/kg)	SO_4^{2-} (g/kg)	HCO_3^- (g/kg)	CO_3^{2-} (g/kg)
6.900	7.870	2.269	0.267	0.216	0.049	3.772	0.036	0.915	0.000

1.2 试验材料与方法

选取一年生草本植物藜科碱蓬属盐地碱蓬(*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.)、豆科田菁属田菁(*Sesbania cannabina* (Retz.) Poir.)、锦葵科木槿属红麻(*Hibiscus cannabinus* Linn)和禾本科高粱属高丹草(*Sorghum bicolor*(L.) Moench $\times$ *S.sudanense*(L.)Stapf)为试验材料。盐地碱蓬和田菁为盐生植物,红麻和高丹草属于耐盐植物。植物种子均由河北省农林科学院滨海农业研究所盐碱地改良与利用研究室提供。试验采用完全随机排列设计,于2015年5—10月在河北省唐山市曹妃甸区生态城进行,小区面积6 m²,每个小区种植一个品种,每个品种设置3次重复,共12个处理,试验总面积72 m²。采用人工开沟条播播种,根据不同植物的特性安排株行距。试验期间,分别在播种完、出苗期、齐苗期及幼苗期进行4次滴灌,确保苗子生长旺盛一致,总灌水量为3 000~3 300 m³/hm²。播种前施用有机肥3 $\times$ 10⁴ m³/hm²,腐殖酸肥5 $\times$ 10⁵ kg/hm²,复合肥2 $\times$ 10⁵ kg/hm²,7月底追施复合肥2 $\times$ 10⁵ kg/hm²。

1.3 样品采集及测定

播种前采集试验区土壤样品,在成苗期和成熟期采集植物样品及根际土壤。每个重复随机取1 m $\times$ 1 m的样方3个,测定每个样方的生物量,并且将植物按不同器官分离烘干,按王宝山和赵可夫^[24]方法进行,略加改动,测定主要盐分离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 。其中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量用普析原子吸收分光光度计测定, Cl^- 浓度采用 AgNO_3 滴定法测定。每个指标重

复3次,取平均值。植物的选择运输系数和选择吸收系数参照文献[25-26],公式如下:

$$\text{选择性运输系数 } TS_{x, \text{Na}^+} = \frac{[X]_{\text{ds}}/[\text{Na}^+]_{\text{ds}}}{[X]_{\text{dx}}/[\text{Na}^+]_{\text{dx}}} \quad (1)$$

式中: $[X]_{\text{ds}}$ 、 $[X]_{\text{dx}}$ 为植株地上部和地下部 K^+ 或 Ca^{2+} 含量, $[\text{Na}^+]_{\text{ds}}$ 、 $[\text{Na}^+]_{\text{dx}}$ 为植株地上部和地下部 Na^+ 含量。

$$\text{选择性吸收系数 } AS_{x, \text{Na}^+} = \frac{[X]_{\text{p}}/[\text{Na}^+]_{\text{p}}}{[X]_{\text{s}}/[\text{Na}^+]_{\text{s}}} \quad (2)$$

式中: $[X]_{\text{p}}$ 为植株全株 K^+ 或 Ca^{2+} 含量, $[X]_{\text{s}}$ 为根际土壤中 K^+ 或 Ca^{2+} 含量, $[\text{Na}^+]_{\text{p}}$ 为植株全株 Na^+ 含量, $[\text{Na}^+]_{\text{s}}$ 为根际土壤中 Na^+ 含量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS20.0 进行数据处理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 植物生物量比较

从地上部生物量来看(表2),在成苗期高丹草、田菁、红麻和盐地碱蓬间存在显著差异,田菁显著高于其余3种植物;在成熟期,除田菁和红麻间差异不显著外,其余均达显著差异水平,田菁地上生物量最高,为高丹草、红麻和盐地碱蓬的1.08倍、1.01倍和1.05倍。从地下部生物量来看(表2),成苗期和成熟期的规律一致,除了田菁和红麻之间没有差异外,其余间均差异显著。成苗期田菁的地下生物量最高,是高丹草、红麻和盐地碱

蓬的 1.33 倍、1.1 倍和 2.2 倍；成熟期盐地碱蓬最大，是高丹草、田菁和红麻的 1.27 倍、1.11 倍和 1.15 倍。从成苗期到成熟期生物量积累看，高丹草、田菁、红麻和盐地碱蓬地上部分分别积累了 1.96×10^4 、 1.99×10^4 、 1.97×10^4 和 1.99×10^4 kg/hm²，地下部分分别积累了 1.50×10^3 、

1.68×10^3 、 1.63×10^3 和 1.98×10^3 kg/hm²。可见，从成苗期到成熟期，地上生物量积累最快的为盐地碱蓬和田菁，地下部生物量积累最快的为盐地碱蓬，其次是田菁、红麻和高丹草，而且 4 种植物的生物量主要积累于地上部分，地下部分所占比例较小。

表 2 不同时期植物的地上、地下部生物量(kg/hm²，以干重计)
Table 2 Aboveground and underground biomass of plants in different growth stages

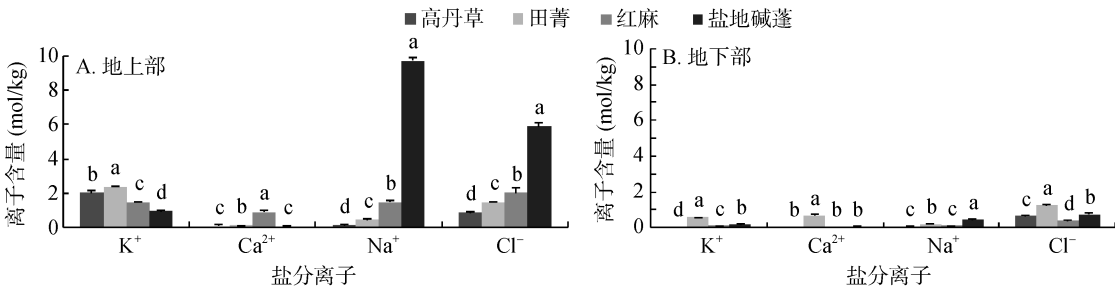
植物	成苗期		成熟期	
	地上部	地下部	地上部	地下部
高丹草	$6.84\times 10^2\pm 13.08$ d	$1.38\times 10^2\pm 14.52$ b	$2.02\times 10^4\pm 57.04$ c	$1.63\times 10^3\pm 57.76$ c
田菁	$1.92\times 10^3\pm 65.67$ a	$1.84\times 10^2\pm 8.45$ a	$2.18\times 10^4\pm 100.05$ a	$1.87\times 10^3\pm 152.83$ b
红麻	$1.81\times 10^3\pm 77.08$ b	$1.68\times 10^2\pm 10.06$ a	$2.15\times 10^4\pm 529.41$ a	$1.80\times 10^3\pm 173.29$ b
盐地碱蓬	$7.94\times 10^2\pm 62.71$ c	$0.84\times 10^2\pm 6.85$ c	$2.07\times 10^4\pm 321.62$ b	$2.07\times 10^3\pm 251.79$ a

注：同列数据小写字母不同表示不同植物生物量间的差异达到 $P<0.05$ 显著水平，下同。

2.2 不同时期植物体内的盐分离子含量

从成苗期地上部分与地下部分 4 种主要盐分离子含量来看(图 1)，4 种植物的 K⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 含量均为地上部分高于地下部分，Ca²⁺ 含量除了田菁地下高于地上外，其余植物均为地上高于地下。图 1A 可以看出 4 种植物地上部的 K⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 含量均存在显著差异，K⁺ 含量最高的是田菁，Na⁺ 和 Cl⁻ 含量

最高的是盐地碱蓬；Ca²⁺ 含量最高的是红麻。图 1B 中看出，4 种植物地下部分 K⁺、Cl⁻ 含量的差异均达到显著水平，均为田菁最高，盐地碱蓬次之；Ca²⁺ 含量是田菁最高，与高丹草、红麻和盐地碱蓬的差异达显著水平，而后三者间没有显著差异；Na⁺ 含量是盐地碱蓬最高，显著高于其余 3 种植物，高丹草和红麻间 Na⁺ 含量差异不显著。



(图中小写字母不同表示同种盐分离子不同植物间差异达到 $P<0.05$ 显著水平,下同)

图 1 成苗期不同植物体内盐分离子含量与分布

Fig.1 Icons contents and distribution in different plants in seeding stage

图 2 为成熟期地上和地下部分主要盐分离子含量。可以看出，4 种植物的 K⁺、Ca²⁺ 和 Na⁺ 含量为地上部分高于地下部分，Cl⁻ 含量除了红麻地上部分与地下部分相同外，其余植物也是地上部分高于地下部分。从图 2A 可以看出，4 种植物地上部分 K⁺、Ca²⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 含量差异均达到显著水平，K⁺ 含量最高为高丹草，盐地碱蓬最低；Ca²⁺ 含量最高为红麻，盐地碱蓬最低；Na⁺ 含量最高为盐地碱蓬，其次是田菁、高丹草和红麻；Cl⁻ 含量最高为田菁，其次是盐地碱蓬、高丹草和红麻。图 2B 显示，4 种植物地下部分除了 K⁺ 外，Ca²⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 含量差异均达到显著水平，K⁺ 含量最高为盐地碱蓬，田菁最低；Ca²⁺ 含量最高是高丹草；Na⁺ 含量最高是盐地碱蓬，红麻次之；

Cl⁻ 含量最高是红麻，盐地碱蓬次之。

2.3 植物对盐分离子的选择性吸收

根据不同植物体内各盐分离子的分布情况可知，不同植物对盐分离子具有选择吸收的特性。AS_{x,Na⁺} 和 TS_{x,Na⁺} 分别表示植物对离子的吸收和运输系数，其值越大，表示植物对抑制 Na⁺、促进 K⁺ 和 Ca²⁺ 吸收和运输能力越强；反之，则说明对 Na⁺ 吸收能力越强。从表 3 可以看出，无论成苗期还是成熟期 4 种植物对 K⁺ 吸收系数大小顺序都为高丹草>红麻>田菁>盐地碱蓬，运输系数与其一致。对 Ca²⁺ 吸收和运输系数大小顺序为红麻>高丹草>盐地碱蓬>田菁。可见，对 K⁺ 和 Ca²⁺ 具有较强的选择吸收与运输能力的为高丹草和红麻，对 Na⁺ 具有较高选择吸收能力的为盐地碱蓬和田菁。

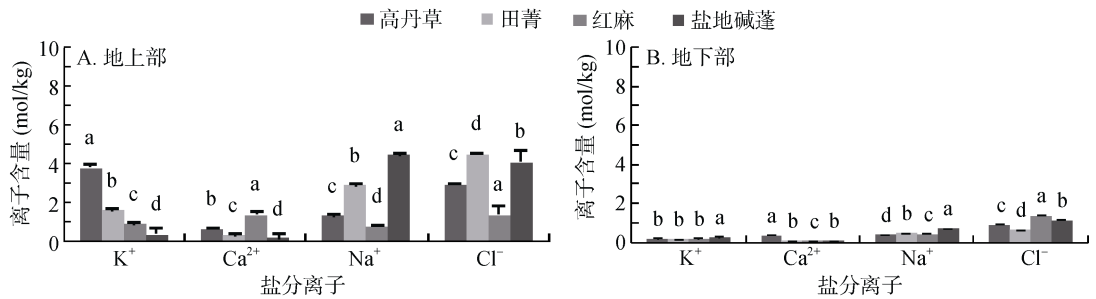


图 2 成熟期不同植物体内盐分离子含量与分布
Fig.2 Ions contents and distribution in different plants during maturation period

表 3 不同植物对盐分离子的吸收及运输系数
Table 3 Salt ions absorption and transportation coefficients of different plants

时期	植物	TS _{x,Na⁺}		AS _{x,Na⁺}	
		K ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺
成苗期	高丹草	8.404	1.186	9.155	3.083
	田菁	1.029	0.089	3.191	0.610
	红麻	1.946	1.468	4.054	3.459
	盐地碱蓬	0.265	0.090	2.968	0.083
成熟期	高丹草	6.947	4.563	6.119	0.763
	田菁	1.699	0.171	2.287	1.317
	红麻	2.855	4.578	3.587	2.389
	盐地碱蓬	0.247	0.129	0.574	0.614

2.4 植物地上部盐分离子的积累

表 4 纵向比较可以看出，在成苗期和成熟期 4 种植物的不同盐分离子积累具有明显差异。成苗期 K⁺ 积累量最高是田菁，显著高于高丹草、红麻和盐地碱蓬。Ca²⁺ 积累量最高是红麻，显著高于高丹草、田菁和盐地碱蓬。Na⁺ 和 Cl⁻ 积累量最高是盐地碱蓬，分别为 177.51 kg/hm² 和 166.40 kg/hm²，显著高于其余 3 种植物；盐地碱蓬 Na⁺ 积累量分别为高丹草、田菁和红麻的 81.80 倍、8.92 倍和 2.88 倍；Cl⁻ 积累量分别为高丹草、田菁和红麻的 7.73 倍、1.63 倍和 1.29 倍。成

熟期 K⁺ 积累量最高是高丹草，为 2 972.96 kg/hm²，显著高于其他 3 种植物；Ca²⁺ 积累量最高仍是红麻，为高丹草、田菁和盐地碱蓬的 2.32 倍、4.81 倍和 15.32 倍；Na⁺ 积累量为盐地碱蓬最高，达 2 113.83 kg/hm²，分别为高丹草、田菁和红麻的 3.56 倍、1.49 倍和 5.58 倍；Cl⁻ 积累量为田菁最高，达 3 477.18 kg/hm²，和盐地碱蓬(3 023.06 kg/hm²)差异不显著，二者显著高于高丹草和红麻。从总盐分积累来看，4 种植物总盐分积累量随时间的增加不断递增，从成苗期到成熟期增加幅度非常大。成苗期盐地碱蓬总盐分积累量显著高于高丹草、田菁和红麻，分别高出 376.58%、22.69%、14.20%。成熟期田菁、高丹草总盐分积累间差异不显著，但显著高于盐地碱蓬和红麻。表 4 横向比较还可以看出，每种植物对不同离子的积累量也各不相同。成苗期高丹草对 K⁺ 积累量高于其余离子的积累，占总盐分积累比例为 68.39%，对盐胁迫离子 Na⁺ 和 Cl⁻ 的积累比例为 2.76% 和 27.35%。田菁对 K⁺ 积累比例为 58.54%，对盐胁迫离子 Na⁺ 和 Cl⁻ 的积累比例分别为 6.51% 和 33.34%。红麻对 Cl⁻ 的积累比例最大，为 39.27%；对 K⁺、Ca²⁺ 和 Na⁺ 积累比例为 31.76%、10.17% 和 18.79%。盐地碱蓬主要积累 Na⁺ 和 Cl⁻，积累比例分别为 47.36% 和 44.40%。成熟期高丹草对 K⁺ 积累比例仍高于其余离

表 4 4 种植物不同时期地上部盐分积累量(kg/hm²)
Table 4 Salt accumulation in aboveground parts of four plants in different periods

时期	植物	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	总盐分
成苗期	高丹草	53.78 ± 4.12 c	1.17 ± 0.16 b	2.17 ± 0.42 d	21.51 ± 0.94 d	78.64 ± 2.92 c
	田菁	178.82 ± 9.22 a	4.92 ± 0.49 b	19.90 ± 2.68 c	101.84 ± 4.874 c	305.48 ± 12.01 b
	红麻	104.24 ± 3.44 b	33.38 ± 2.56 a	61.65 ± 3.31 b	128.89 ± 13.08 b	328.18 ± 14.65 b
	盐地碱蓬	29.55 ± 1.63 d	1.32 ± 0.40 b	177.51 ± 19.01 a	166.40 ± 18.09 a	374.78 ± 38.53 a
成熟期	高丹草	2 972.96 ± 139.21 a	255.39 ± 39.99 b	593.59 ± 42.35 c	2 125.00 ± 248.13 b	5 946.93 ± 130.69 a
	田菁	1 320.80 ± 61.22 b	123.18 ± 36.47 c	1 419.77 ± 66.70 b	3 477.18 ± 209.71 a	6 340.87 ± 118.16 a
	红麻	713.28 ± 76.94 c	592.58 ± 29.09 a	378.89 ± 49.69 d	1 048.97 ± 21.35 c	2 733.71 ± 82.27 c
	盐地碱蓬	297.35 ± 31.17 d	38.67 ± 3.97 d	2 113.83 ± 186.063 a	3 023.06 ± 482.54 a	5 472.91 ± 269.61 b

子,对盐胁迫离子 Na^+ 和 Cl^- 的积累比例为 9.98% 和 35.73%。田菁对盐胁迫离子 Na^+ 和 Cl^- 的积累比例高,分别为 22.39% 和 54.84%。红麻对 Cl^- 的积累比例仍最大,为 38.37%;对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 积累比例为 26.09%、21.68% 和 13.86%。盐地碱蓬仍主要积累 Na^+ 和 Cl^- , 积累比例为 38.62% 和 55.24%, 对其余离子积累较少。可见,成苗期盐地碱蓬对 Na^+ 和 Cl^- 积累比例明显高于其余植物,其次为红麻、田菁和高丹草。成熟期盐地碱蓬对 Na^+ 和 Cl^- 积累比例仍然明显高于其余植物,其次为田菁、红麻和高丹草。从成苗到成熟的生长过程中,4 种植物对两种盐分胁迫离子的积累比例变化也各有不同,盐地碱蓬表现出 Na^+ 积累比例下降, Cl^- 积累比例升高的趋势;田菁和高丹草一致,表现为 Na^+ 和 Cl^- 积累比例均升高;而红麻则表现为下降趋势。

3 讨论

植物改良盐渍土即植物吸收土壤中的盐分离子,通过刈割植物带走盐分,从而降低土壤盐分,主要以刈割时单位面积从土壤中吸收的盐分总量来衡量,这取决于此时单位面积植物生物量和盐分离子含量。本研究中不论是成苗期还是成熟期 4 种植物地上部分的生物量占总生物量的比例均在 80% 以上,且地上部的盐分离子含量均高于地下部分。因此,4 种植物改良盐碱地主要靠地上部分盐分的积累,地下部分作用甚微。选择地上生物量大且地上部盐分浓度高的品种,对于实现盐碱地迅速脱盐十分关键。这与郭洋等^[27]的研究结果一致。在盐渍化土壤与植物长期相互的选择过程中,植物通过积累无机离子的方式来应对盐胁迫^[28]。这些无机离子主要包括 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Cl^- 。 K^+ 是一种重要的渗透调节离子,高浓度 K^+ 可以提高植物的耐盐性, Ca^{2+} 作为一种重要的信号传导物质,在维持细胞稳定性方面有重要的作用。黄慧灵^[29]研究认为藜科植物无机渗透调节以 Na^+ 和 Cl^- 为主,有较高的 Na^+/K^+ ;而菊科则以 K^+ 和 Cl^- 为主,表现很低的 Na^+/K^+ 。刘欣^[30]也认为植物中参与渗透调节的无机离子通过主动运输主要积累在液泡中,且积累的无机离子的种类和数量与植物的种类、器官及环境中的离子种类和浓度有关。 K^+ 通常是非盐生植物的渗透调节物质,而盐生植物的渗透调节物质通常是 Na^+ 和 Cl^- 。本研究中高丹草主要积累 K^+ ,对 K^+ 的高度吸收可能与其细胞膜结构有关,也可能作为主要渗透调节物质,是一种拒盐机制,以提高它们的耐盐性。田菁在成苗期以积累 K^+ 为主,成熟期则以积累

Cl^- 和 Na^+ 为主,这可能是由于在不同生育时期的渗透调节物质不同或是耐盐机制不同所致。盐地碱蓬以积累 Na^+ 和 Cl^- 为主,因为盐地碱蓬通过在液泡中积累大量的 Na^+ ,来降低细胞水势,缓解生理干旱。但由于 Na^+ 是通过高亲和性 K^+ 转运体进入植物细胞内的,这样便使植物体在大量吸收 Na^+ 的同时抑制了对 K^+ 的吸收。不同植物间各离子积累量所占的比例不同,可能与不同植物耐盐机制不同有关。通过比较还发现红麻的 Ca^{2+} 积累量普遍要高于其余植物,这可能是红麻在盐碱胁迫下诱导 Ca^{2+} 通道开放的结果。 Ca^{2+} 从液泡中释放出来后可与钙调蛋白或其他钙结合蛋白结合调节细胞代谢或基因表达,进而促进植物适应逆境。

滨海盐土中主要盐分离子有 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Cl^- ,故本研究仅对 4 种主要盐分离子进行了研究。在评判植物对盐渍土降盐效果方面,郭洋等^[27]、张振勇等^[31]在新疆盐碱区以盐生植物总盐分离子的积累量作为指标比较吸盐效果。本研究结果与之有差异,因为植物在生长过程中从土壤中吸收多种盐分离子,而在滨海盐土区影响植物正常生长的离子主要是 Na^+ 和 Cl^- ,也称之为盐分胁迫离子,由于研究中试材包括盐生植物和非盐生植物,它们对不同盐分离子的积累具有明显差异,也正如研究中发现高丹草成熟期总盐分积累量很大,但是它主要积累了 K^+ ,并不能起到降盐效果。因此在本研究中只考察总盐分积累量不能全面真实地评价这些植物的降盐效果。为了更好地评判植物改土效果,笔者认为盐胁迫离子与总盐分离子积累量的比例作为评判改土效果的标准比较适合。这可能是由于试验区主要盐分离子含量不同,盐生植物与非盐生植物的耐盐机制不同,有待进一步探讨。

4 结论

4 种植物体内主要盐分离子的积累部位一致,均为地上部大于地下部,但是离子积累量具有明显差异。田菁在成苗期主要积累 K^+ ,在成熟期主要积累 Cl^- 和 Na^+ 。高丹草、红麻和盐地碱蓬在成苗期和成熟期的盐分积累情况一致,表现为高丹草对 K^+ 积累量远高于其余离子;红麻主要积累 Cl^- 和 K^+ ;盐地碱蓬主要积累 Na^+ 和 Cl^- 。以盐胁迫离子与总盐分离子积累比例衡量,盐地碱蓬、田菁和红麻是改良滨海盐土的优良材料,并且盐地碱蓬在成苗后任意时期刈割,或一年多次刈割都可以带走土壤中的盐分;田菁应该在成熟后刈割、红麻在成苗期刈割,或一年多插种植多次收割均会对土壤起到较好的降盐效果。

参考文献：

- [1] 孔涛, 张德胜, 徐慧, 等. 盐碱地及其改良过程中土壤微生物生态特征研究进展[J]. 土壤, 2014, 46(4): 581–588
- [2] 杨红梅, 徐海量, 牛俊勇. 干旱区滴灌条件下防护林次生盐渍化土壤水盐运移规律研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 1023–1027
- [3] 祝文婷. 黄绿木霉 T1010 对滨海盐渍土根际生态的调控效应研究[D]. 济南: 山东师范大学出版社, 2013
- [4] 王璐, 仲启铨, 陆颖, 等. 群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 638–647
- [5] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1–4
- [6] 肖克飏, 吴普特, 雷金银, 等. 不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 31(12): 2433–2440
- [7] 史文娟, 杨军强, 马媛. 旱区盐碱地盐生植物改良研究动态与分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 229–234
- [8] Rozema J, Schat H. Salt tolerance of halophytes, research questions reviewed in the perspective of saline agriculture[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92: 83–95
- [9] Vermue E, Metselaar K, van der Zee S E A T M. Modelling of soil salinity and halophyte crop production[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92: 186–196
- [10] Roy S, Chakraborty U. Salt tolerance mechanisms in Salt Tolerant Grasses (STGs) and their prospects in cereal crop improvement[J]. Roy and Chakraborty Botanical Studies, 2014, 55(31): 1–9
- [11] Katschnig D, Broekman R, Rozema J. Salt tolerance in the halophyte *Salicornia dolichostachya* Moss: Growth, morphology and physiology[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92(8): 32–42
- [12] Shabala S, Mackay A. Ion transport in halophytes[J]. Advances in Botanical Research, 2011, 57: 151–199
- [13] Belkheiri O, Mulas M. The effects of salt stress on growth, water relations and ion accumulation in two halophyte *Atriplex* species[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 86: 17–28
- [14] 张继伟, 赵昕, 陈国雄, 等. 盐胁迫下荒漠植物柠条和油蒿的离子吸收及分配特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 68–73
- [15] Zheng H, Li J D. Form and dynamic trait of halophyte community[C]. Beijing: Science Press, 1999: 137–138
- [16] 刘兆普, 沈其荣, 邓力群, 等. 滨海盐土水、旱生境下田菁生长及其对盐土肥力的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 267–275
- [17] 殷云龙, 於朝广, 华建峰, 等. 豆科植物田菁对滨海盐土的适应性及降盐效果[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(5): 336–338
- [18] 张立宾, 郭新霞, 常尚连, 等. 田菁的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 310–312
- [19] 张加强, 金关荣, 周瑞阳, 等. 不同类型红麻品种在滨海盐碱地的适应性表现[J]. 中国麻业科学, 2015, 30(6): 291–294
- [20] 杨建. 红麻种质资源萌发期及苗期的耐盐性鉴定[D]. 南宁: 广西大学, 2013
- [21] 陈涛, 王贵美, 沈伟伟, 等. 盐胁迫对红麻幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 植物科学学报, 2011, 29(4): 493–501
- [22] 姚建民. 一种可以改良盐土的杂交禾草[J]. 草原与草坪, 1987(2): 16–19
- [23] 赵海明, 李源, 谢楠, 等. 不同高丹草品种发芽期 NaCl 胁迫评价研究[J]. 草原与草坪, 2012, 32(3): 26–31
- [24] 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
- [25] Flowers T J, Yeo A R. Ion relations of salt tolerance // Baker D A, Hall J L. Solute transport in plant cells and tissues[M]. New York: John Wiley & Sons, 1988: 399–412
- [26] 陆嘉惠, 吕新, 梁永超, 等. 新疆胀果甘草幼苗耐盐性及对 NaCl 胁迫的离子响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 839–850
- [27] 郭洋, 陈波浪, 盛建东, 等. 几种一年生盐生植物的吸盐能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 269–276
- [28] 赵可夫, 李法曾, 张福锁. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 2013
- [29] 黄蕙灵. 八种抗碱盐生植物适应盐碱生境的渗透调节和离子平衡机制比较[D]. 长春: 东北师范大学, 2011
- [30] 刘欣. 植物的耐盐生物学机制研究进展[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2015, 31(2): 140–145
- [31] 赵振勇, 张科, 王雷, 等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1420–1425

Ions Absorption and Accumulation in Four Typical Salt-tolerant Plants in Coastal Saline Soil Region

LIU Yahui¹, WANG Xiuping¹, LIU Guangming², SUN Jianping¹, YAO Yutao¹, YANG Yahua¹

(1 Tangshan Key Laboratory of Plant Salt Tolerance Research (Institute of Coastal Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences), Caofeidian, Hebei 063299, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to select suitable salt-tolerant plants for the improvement of coastal saline soil, the characters for ions absorption and accumulation in four typical salt-tolerant plants (*Suaeda salsa*, *Sesbania*, *Kenaf* and *Sudangrass*) was explored by field experiment. The results showed that in seeding stage and maturation period, the aboveground biomass of each plant accounted 80% more of the total dry matter, in an order of *Sesbania* > *kenaf* > *Suaeda salsa* > *Sudangrass*. *Sudangrass* and *Kenaf* had higher capacity of absorption and transportation of K^+ and Ca^{2+} while *Sesbania* and *Suaeda salsa* had higher capacity of Na^+ . The accumulation of K^+ was higher than other ions in *Sudangrass*. K^+ was the main ion accumulated in seeding stage of *Sesbania*, Na^+ and Cl^- were the main ions accumulated in maturation period. Cl^- and K^+ were the main ions accumulated in *Kenaf*. Na^+ and Cl^- were the two main ions accumulated in *Suaeda salsa*, and the ratios of these two ions to the total accumulated salt amount were highest among these four plants. From seeding stage to maturation period, ratio of Na^+ decreased while ratio of Cl^- increased in *Suaeda salsa*, the ratios of Na^+ and Cl^- increased in *Sesbania* and *Sudangrass* but decreased in *Kenaf*. In general, *Suaeda salsa*, *Sesbania* and *Kenaf* are the sound plants for the improvement of coastal saline soil.

Key words: Coastal saline soil; Plant material; Salt ions; Absorption and accumulation