植物营养与肥料学报 2015,21(1):269-276
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0130

几种一年生盐生植物的吸盐能力

郭 洋, 陈波浪, 盛建东*, 胡浩东, 徐财发
(新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】土壤盐渍化在新疆发生面积多,分布广,利用盐生植物对盐分的超富集能力,选育生物量大且体内盐分浓度高的品种,可有效改良盐碱地。本试验比较了几种主要盐生植物的吸收离子类型和盐分积累量,为科学合理利用盐生植物进行盐碱地改良提供科学依据。**【方法】**选取一年生盐角草(*Salicornia europaea*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、高碱蓬(*Suaeda altissima*)和野榆钱菠菜(*Atripex aucheri* Moq.)为材料进行人工种植,试验地土壤为壤土和砂壤土,耕层土壤盐分均值为10.23 g/kg,pH为8.36,属于中度盐化土壤。采用完全随机排列设计,在生育早期、中期和末期采样测定植物地上、地下部分干物质量和K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}浓度。**【结果】**生育末期四种盐生植物地上生物量均占整株生物量的89%以上,高碱蓬(23302 kg/hm^2)>蓬野榆钱菠菜(20379 kg/hm^2)>盐地碱蓬(18670 kg/hm^2)>盐角草(9096 kg/hm^2)。盐分总浓度盐角草(215 g/kg)>盐地碱蓬(152 g/kg)>高碱蓬(137 g/kg)>野榆钱菠菜(103 g/kg)。不同植物离子含量不同,K^+浓度以高碱蓬中最高,Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}在盐角草中最高,Ca^{2+}、Mg^{2+}浓度在盐地碱蓬中最高;4种盐生植物对Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}的吸收能力极强,按阴离子类型划分盐角草属于$SO_4^{2-}-Cl^-$型盐生植物,盐地碱蓬、高碱蓬、野榆钱菠菜属于$Cl^--SO_4^{2-}$型盐生植物;盐分积累量为高碱蓬(3499 kg/hm^2)>盐地碱蓬(3061 kg/hm^2)>蓬野榆钱菠菜(2180 kg/hm^2)>盐角草(2080 kg/hm^2)。**【结论】**盐生植物对土壤的改良效果主要以生育末期刈割时单位面积从土壤中吸收的盐分总量来衡量,这取决于此时地上部分生物量与植株体内盐分浓度的大小。植物会根据其生长需求选择吸收土壤中矿物质元素,盐角草对的Na^+、Cl^-的吸收能力强于盐地碱蓬、高碱蓬和野榆钱菠菜,尤其对Cl^-表现出极强的选择吸收能力。

关键词: 人工种植; 盐生植物; 盐分离子; 吸盐特征
中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0269-08

Salt absorption capacities of several annul halophytes

GUO Yang, CHEN Bo-lang, SHENG Jian-dong*, HU Hao-dong, XU Cai-fa
(*College of Grassland and Environmental Sciences*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi 830052*, *China*)

Abstract:【Objectives】 Soil salinization happens in large area in Xinjiang, China. Cultivation of halophytes is one of the main remediation ways of the salty soils. The study on their capabilities to absorb salt and ions will provide base for choosing correct halophytes in Xinjigan.**【Methods】** A field experiment was conducted in saline-alkali soil, and annual halophytes *Salicornia europaea*, *Suaeda salsa*, *Suaeda altissima* and *Atripex aucheri* Moq. were planted. The soils are loam and sandy, in which the average total salt content are 10.23 g/kg, pH 8.36, belonging to middle salinization. The contents of K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^- and SO_4^{2-} and total salt in above and under ground parts were measured in early, mid and late growth of the halophytes. **【Results】** The above-ground biomass of the four halophytes in the late growth period is in the order of *Suaeda altissima*(23302 kg/ha) > *Atripex aucheri* Moq.(20379 kg/ha) > *Suaeda salsa*(18670 kg/ha) > *Salicornia europaea*(9096 kg/ha), averaged more than 89% of the total dry matter. The order for salt content is *Salicornia europaea*(215 g/kg) > *Suaeda salsa*(152 g/kg) > *Suaeda altissima*(137 g/kg) > *Atripex aucheri* Moq.(103 g/kg). K^+ content of *Suaeda altissima*,

收稿日期: 2014-01-06 **接受日期:** 2014-10-30
基金项目: 新疆自治区"十二五"重大专项"盐渍化低产田生产力提升关键技术研发与示范"课题(200731133-2); 新疆自治区土壤学重点学科资助。
作者简介: 郭洋(1986—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事干旱区土壤环境研究。E-mail: hades9@163.com
*通信作者 E-mail: sjd_2004@126.com

Na^+, Cl^-, SO_4^{2-} contents of *Salicornia europaea* as well as the Ca^{2+}, Mg^{2+} contents of *Suaeda salsa* are the highest. All the four types of halophytes have a strong absorptive capacity for Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}. *Salicornia europaea* belongs to $SO_4^{2-}-Cl^-$ type halophytes and *Suaeda salsa*, *Suaeda altissima*, *Atripex aucheri* Moq. are Cl^--SO_4^{2-} type halophytes, according to anion type. The order of salt accumulation is *Suaeda altissima* (3499 kg/ha) > *Suaeda salsa* (3061 kg/ha) > *Atripex aucheri* Moq. (2180 kg/ha) > *Salicornia europaea* (2080 kg/ha). 【**Conclusions**】The halophyte's capability on improving saline soil mainly depends on the accumulated amount of salts and the total biomass of the plant. Among the halophytes tested, *Salicornia europaea* showed the highest uptake capacity to Na^+、Cl^- than the other three ones.

Key words: planted; halophytes; salt ions; characteristics of salt absorption

土壤盐渍化问题正受到社会越来越普遍的关注,全世界约有1/3的土壤盐渍化,严重制约着农业生产,也是影响生态环境的重要因素之一。我国约有250多万 hm^2 的各种盐渍化土壤,且有逐年增加的趋势;新疆是我国盐碱地面积最多、分布范围最广的地区[1]。到目前为止,通过物理方法实现的"淡水洗盐"仍是新疆盐渍化土壤改良行之有效的方法,但因新疆干旱缺水,灌排工程施工量大,成本高,部分研究者开始考虑利用具有一定经济价值的盐生植物补偿生长来治理盐碱地,盐生植物的开发利用对于拓宽盐渍化土壤的利用空间,实现农业、生态、经济的良性发展具有重要的现实意义。

新疆盐生植物种类丰富,分布广泛。根据郗金标等文献,新疆现有盐生植物共305种15变种7亚种,隶属38科124属[2],其中,一年生盐生植物群落分布广泛,分布频率较高的有碱蓬属(*Suaeda*)、滨藜属(*Atriplex*)、盐角草属(*Salicornia*)等。由于一年生盐生植物生活史短、易于种植试验、繁殖后代和基因转化,成为耐盐植物研究的重要选择对象[3]。

目前对一年生盐生植物的究主要集中于盐生植物的抗盐机理、盐生植物与根系土壤的相互作用方面。孙黎[4]等研究了新疆荒漠地区10种藜科盐生植物的抗盐生理生化特征,发现盐生植物组功能叶中的平均脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量、有机酸含量、超氧化物歧化酶(SOD)及过氧化物酶(POD)活性明显高于非盐生植物;姚世响等[5]通过研究不同盐胁迫对新疆耐盐植物藜叶片钾、钠元素含量及相关基因表达的影响,得出藜在低浓度NaCl胁迫时可选择性吸收钾离子,在高浓度NaCl胁迫时有较强的富集钠离子能力;赵振勇[6]等研究了新疆两种盐生植物对重盐渍土脱盐效果,结果表明盐角草和盐地碱蓬对 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 具有较强的摄取能力,尤其对 Cl^- 表现出更强的选择吸收倾向;张科[7]等研究了盐土和沙土对新疆常见一年生盐生植物生长和体内矿质组成的影响,发现盐土不仅影响一年生盐生植物的生长,也显著影响这些植物对矿质元素的吸收和累积;弋良朋[8]等通过研究盐胁迫对3种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响,得出一定浓度的盐分可以促进盐生植物生长,但较高浓度的盐分则会抑制其生长,特别是对根系生长的抑制作用比较大;赵可夫[9]等研究了盐浓度对3种单子叶盐生植物渗透调节剂及其在渗透调节中贡献的影响,发现星星草(*Puccinellia tenuiflora*)、碱草(*Elymus dahuricus Turcz*)、獐茅(*Angiospermae*)的渗透调节能力随盐浓度的升高而增大。然而,关于新疆一年生盐生植物不同生育阶段的吸盐特征的研究还尚不多见。

本研究选取新疆4种一年生藜科(*Chenopodiaceae*)盐生植物进行人工种植试验,通过定期采集样品,分析比较这4种盐生植物对土壤盐分及其离子的吸收特性,为揭示盐生植物耐盐机理提供基础数据,也为科学合理利用盐生植物进行盐碱地改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择地为南疆喀什地区岳普湖县(76°23′E～77°25′E,38°48′N～39°20′N),该地地处塔里木河源流区,盖孜河下游,土地总面积3327 km^2。地势平坦,地面自西南向东北方向倾斜,海拔11701250 m,年降水量约51.7 mm,多年平均蒸发量为2651 mm,年均温度11.7 ℃,无霜期214 d,≥10 ℃的年有效积温约为4354 ℃。土壤类型主要有潮土、灌淤土、草甸土、盐土和风沙土。试验地土壤以壤土、砂壤土为主,耕层土壤盐分均值为10.23 g/kg, pH为8.36,属于中度盐化土壤,土壤有机质

(13.58 mg/kg)和速效磷(14.20 mg/kg)为中级水平,而碱解氮(56.49 mg/kg)和速效钾(158.08 mg/kg)为低级水平。自然植被主要有柽柳(*Tamaricaceae*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、西伯利亚白刺(*Ni-traria sibirica*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、芦苇(*Phragmites communis*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等。

1.2　研究材料

选取的四种一年生盐生植物分别为:盐角草(*Salicornia europaea*),盐角草属,藜科;盐地碱蓬(*Suaeda salsa*),碱蓬属,藜科;高碱蓬(*Suaeda altissima*),碱蓬属,藜科;野榆钱菠菜(*Atripex aucheri* Moq.),滨藜属,藜科。盐角草为茎肉质化真盐生植物,盐地碱蓬、高碱蓬为叶肉质化真盐生植物。由于滨藜属植物一般都有盐腺,其叶片又有不同程度的肉质化,具有一定的渗透调节能力[10],故将野榆钱菠菜也被归为叶肉质化真盐生或向内泌盐的盐生植物。植物种子由中国科学院新疆生态与地理研究所提供。

1.3　研究方法

试验在岳普湖县农技推广中心实验站进行,采用完全随机排列设计,于 2012 年 3 月 25 日种植盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬、野榆钱菠菜,每种植物种植三个重复,每个重复面积 222 m^2,共 12 个处理,总试验面积 2664 m^2。灌溉方式为膜下滴灌,膜宽 1.2 m,按一膜双管布设滴灌带,采用人工开沟条播方式将盐生植物播种于滴灌带两侧 15 cm 范围内,株行配置为 60 cm、30 cm 宽窄行,播种量盐角草 30 kg/hm^2,盐地碱蓬 45 kg/hm^2、高碱蓬 45 kg/hm^2、野榆钱菠菜 45 kg/hm^2。试验期间,根据实际需水状况分 6 次滴灌,总灌水量 3600 ～ 3900 m^3/hm^2。试验地播种前施用复合肥($N:P_2O_5:K_2O = 20:14:6$) 600 kg/hm^2,分别于 5 月 10 日和 7 月 28 日两次追肥,每次均为 225 kg/hm^2。5 月 31 日(生育初期)、7 月 10 日(生育中期)、8 月 31 日(生育末期)分别采集植物样品,每个重复随机取 5 m × 5 m 的样方 3 个,调查每个样方株数和鲜重,烘干后称量干物质量。

将植物刈割后清洗,按不同组织器官分离,置于烘箱中在 105℃下杀青 30 min,然后于 80℃条件下烘干至恒重并粉碎。称取适量样品灰化后冷却至恒重,用蒸馏水溶解后,转移至 100 ml 容量瓶中定容制备待测液。K^+、Na^+ 的测定采用火焰光度法;Ca^{2+}、Mg^{2+} 的测定采用 EDTA 滴定法;Cl^- 的测定采用硝酸银滴定法,SO_4^{2-} 测定使用硫酸钡比浊法[11]。每个指标重复 3 次,取平均值。

1.4　数据分析

采用 Excel 2003 进行数据分析,采用 DPS 6.50 软件进行显著性差异分析。

2　结果与分析

2.1　不同盐生植物的生物量比较

从盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬与野榆钱菠菜地上部分生物量(表 1)可以看出,生育初期 4 种盐生植物之间差异显著;生育中期 4 种盐生植物之间的差异性除盐地碱蓬和高碱蓬之间不明显外,均达到显著水平;生育末期高碱蓬(23302 kg/hm^2)生物量是盐角草、盐地碱蓬、野榆钱菠菜的 2.6 倍、1.3 倍和 1.1 倍。从盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬与野榆钱菠菜地下部分生物量来看(表 1),生育初期盐地碱蓬、高碱蓬与野榆钱菠菜之间差异性均达到显著水平;生育中期,盐地碱蓬、高碱蓬和野榆钱菠菜之间差异不显著,但三者与盐角草之间的差异均达到显著水平;生育末期高碱蓬(2535 kg/hm^2)最高,是盐角草、盐地碱蓬和野榆钱菠菜的 2.29 倍、1.24 倍和 3.70 倍。由表 1 中整株生物量可知,生育初期四种盐生植物中盐地碱蓬(398 kg/hm^2)最高;生育中期 4 种盐生植物之间的差异性除盐地碱蓬和高碱蓬之间不明显外,均达到显著水平;生育末期除盐地碱蓬和野榆钱菠菜之间不明显外,均达到显著水平。

盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬和野榆钱菠菜的生物量由生育初期到生育中期分别增长 7544、345、510 和 1158 kg/hm^2,而由生育中期到生育末期分别增长 2550、19992、24978 和 19876 kg/hm^2,可见除盐角草的生长旺盛期在生育中期外,其他三种盐生植物均在生育后期。

由于盐生植物成熟后整体收割,故其对盐渍化土壤改良的效果主要体现在生育末期,此时四种盐生植物地上部分生物量均占整株生物量的 89% 以上,主要生物量积累于地上部分,地下部分所占的比例非常小。

表1 不同时期盐生植物地上部、地下部生物量(kg/hm²)

Table 1 The biomass of aboveground and underground parts of halophytes in different growth stages

盐生植物 Halophytes	生育初期 Early growth stage			生育中期 Middle growth stage			生育末期 Final growth stage		
	地上部 Above-ground part	地下部 Underground part	整株 Whole plant	地上部 Above-ground part	地下部 Underground part	整株 Whole plant	地上部 Above-ground part	地下部 Underground part	整株 Whole plant
盐角草 *Salicornia europaea*	109 ± 7 c	—	109 ± 7 c	6967 ± 259 a	686 ± 50 a	7653 ± 307 a	9096 ± 89 d	1108 ± 31 c	10203 ± 103 c
盐地碱蓬 *Suaeda salsa*	354 ± 15 a	44 ± 1 b	398 ± 16 a	669 ± 21 c	74 ± 1 b	743 ± 22 c	18697 ± 429 c	2038 ± 27 b	20735 ± 449 b
高碱蓬 *Suaeda altissima*	301 ± 10 b	49 ± 4 a	349 ± 9 b	756 ± 26 c	103 ± 3 b	859 ± 29 c	23302 ± 122 a	2535 ± 52 a	25837 ± 79 a
野榆钱菠菜 *Atripex aucheri* Moq.	24 ± 1 d	6 ± 0 c	30 ± 1 d	1077 ± 18 b	112 ± 4 b	1188 ± 21 b	20379 ± 117 b	685 ± 14 d	21064 ± 107 b

注(Note):同列数据后不同字母表示差异达5%显著 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level;"—"表示盐角草初期根系极小,忽略不计 Represents a very small roots of *Salicornia europaea* in the early growth stage, there will not be discussed.

2.2 不同盐生植物中盐分离子含量差异比较

2.2.1 生育初期不同盐生植物中盐分离子含量 由图1可以看出生育初期盐地碱蓬、高碱蓬、野榆钱菠菜的地上部分对 K^+、Cl^-、SO_4^{2-} 的吸收能力低于地下部分,而对 Na^+ 的吸收均表现为地上部分高于地下部分;盐地碱蓬地上部分 Ca^{2+} 吸收高于地下,高碱蓬地上部分对 Ca^{2+}、Mg^{2+} 吸收低于地下部分,而野榆钱菠菜地上部分对 Ca^{2+}、Mg^{2+} 吸收高于地下部分,3种盐生植物离子合量均为地上部分小于地下部分。

不同盐生植物地上部盐分离子浓度有差异(图1),高碱蓬含 K^+ 量达22 g/kg,显著高于盐角草和盐地碱蓬($P<0.05$);盐角草 Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、总离子浓度分别为50、11、125、107和310 g/kg,显著高于其他3种植物($P<0.05$);野榆钱菠菜 Ca^{2+} 含量(5 g/kg)显著高于其他3种植物($P<0.05$)。

盐生植物地下部对盐分离子的吸收差异表明(图1):野榆钱菠菜 K^+ 浓度(27 g/kg)显著高于盐地碱蓬和高碱蓬($P<0.05$)。盐地碱蓬对 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、离子合量(浓度分别为40 g/kg、4 g/kg、9 g/kg、117 g/kg和294 g/kg)的吸收能力最强,显著高于高碱蓬和野榆钱菠菜($P<0.05$)。高碱蓬 SO_4^{2-} 浓度(107 g/kg)最高,但与盐地碱蓬和高碱蓬无显著性差异。

2.2.2 生育中期不同盐生植物盐分离子含量 由图2中盐生植物地上、地下六种离子浓度比较可以看出,除盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬地上部分 SO_4^{2-} 的含量低于地下部分外,均为地上部分较高。

生育中期4种盐生植物地上部盐分离子浓度差异显示(图2),野榆钱菠菜 K^+ 浓度最高(15 g/kg),盐角草 Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、离子合量浓度最高(分别为47、15、161和338 g/kg),盐地碱蓬 Ca^{2+} 浓度最高(为7 g/kg),野榆钱菠菜 SO_4^{2-} 浓度最高(为96 g/kg)。

生育中期不同盐生植物地下部盐分离子浓度差异表明(图2),盐角草 Na^+、离子合量浓度显著高于其他三种盐生植物;野榆钱菠菜 Ca^{2+} 浓度显著高于盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬;盐地碱蓬 Mg^{2+} 浓度显著高于盐角草、高碱蓬和野榆钱菠菜。

2.2.3 生育末期不同盐生植物盐分离子含量 图3显示,四种盐生植物地上部分对 Na^+、Cl^- 的吸收能力大于地下部分,而对 SO_4^{2-} 的吸收能力小于地下部分。盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬的地上部分 K^+、离子合量浓度高于地下部分,野榆钱菠菜则相反。盐地碱蓬地上部分 Ca^{2+} 含量高于地下部分,而盐角草、高碱蓬、野榆钱菠菜则相反。盐角草、盐地碱蓬、野榆钱菠菜地上部分 Mg^{2+} 含量高于地下部分,而高碱蓬相反。

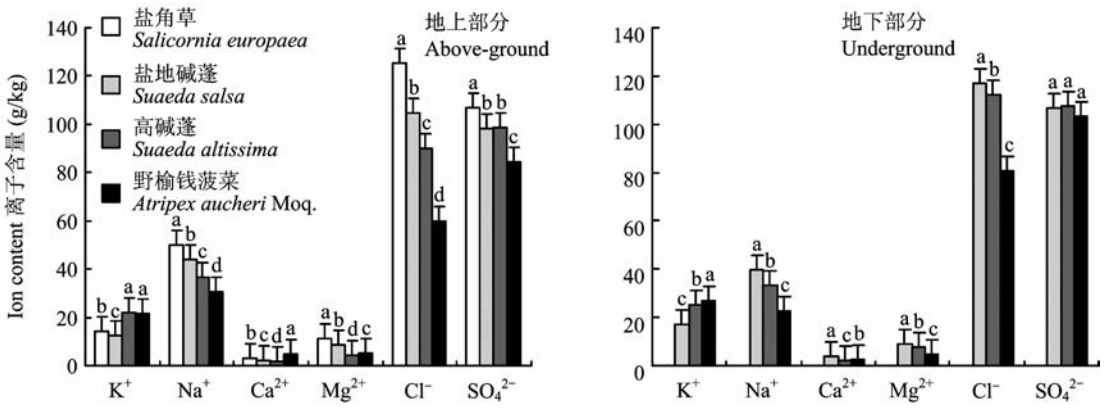

图 1　生育初期不同盐生植物盐分离子浓度比较

Fig. 1　Comparison of salt ion concentrations among different halophytes in early growth stage

[注(Note): 柱上不同字母表示差异达 5% 的显著水平 The different small letters above the bars mean the significant difference at $P<0.05$ level.; 盐角草初期根系极小,此处忽略不计,不予讨论 The roots of *Salicornia europaea* in the early growth stage were very small, there will not be discussed.]

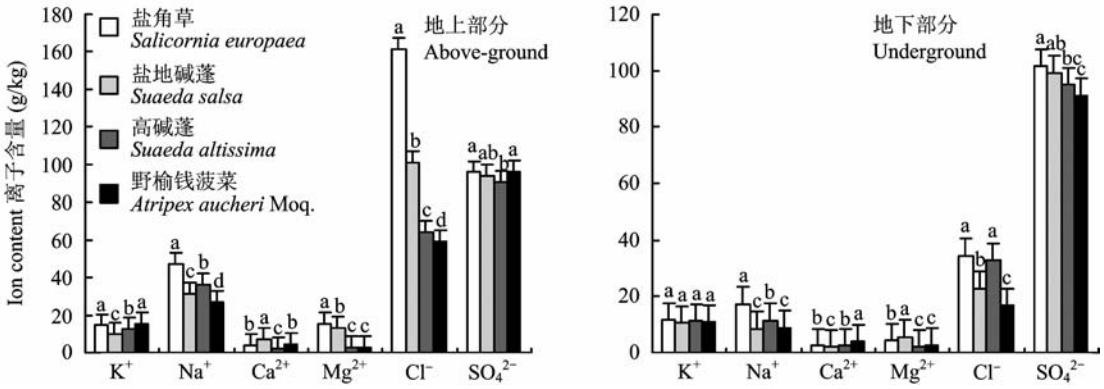

图 2　生育中期不同盐生植物盐分离子浓度

Fig. 2　Comparison of salt ion concentrations among different halophytes in middle growth stage

[注(Note): 柱上不同字母表示差异达 5% 的显著水平 The different small letters above the bars mean the significant difference at $P<0.05$ level.]

生育末期盐生植物地上部盐分离子含量差异显示(图 3),几种盐生植物中 K^+、Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}、离子合量浓度最高的植物与生育初期一致:高碱蓬含 K^+量(8 g/kg)最高;盐角草 Na^+、Cl^-、离子合量浓度(22、112、215 g/kg)显著高于盐地碱蓬、高碱蓬和野榆钱菠菜($P<0.05$);盐地碱蓬 Ca^{2+}、Mg^{2+}浓度(2、3 g/kg),显著高于其他三种盐生植物($P<0.05$)。

生育末期几种盐生植物地下部盐分离子含量差异(图 3)显示,野榆钱菠菜 K^+、SO_4^{2-} 浓度显著高于盐角草、盐地碱蓬、高碱蓬($P<0.05$),盐角草 Na^+、Cl^-含量最高(9、22 g/kg),盐地碱蓬 Mg^{2+}含量(2 g/kg)最高,高碱蓬 Ca^{2+}、离子合量浓度(4、118 g/kg)最高。

盐分吸收能力盐角草 > 盐地碱蓬 > 高碱蓬 > 野榆钱菠菜,且盐角草盐分含量在生育中期达到峰值。4 种盐生植物对 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 的吸收能力极强,盐角草 Cl^-含量高于 SO_4^{2-} 含量,SO_4^{2-}/Cl^-为 0.69,在 0.25 ~ 1.00 之间,按阴离子类型划分属于 $SO_4^{2-}-Cl^-$型盐生植物[12];而盐地碱蓬、高碱蓬、野榆钱菠菜组织内 Cl^-含量低于 SO_4^{2-},SO_4^{2-}/Cl^-为 1.25、1.31、3.04,在 1 ~ 4 之间,按阴离子类型划分属于 $Cl^- - SO_4^{2-}$ 型盐生植物[12],说明不同 4 种盐生植物均具有一定的抗盐碱性,且对不同盐分离子的吸收具有选择性。

2.3　不同盐生植物盐分离子吸收积累特征

不同时期不同盐生植物的盐分、离子积累量受

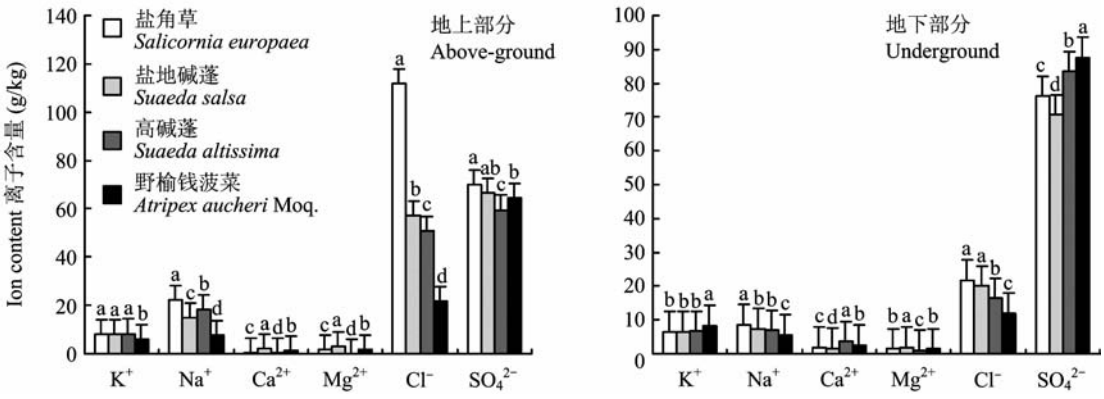

图3 生育末期不同盐生植物盐分离子浓度比较

Fig. 3 Comparison of salt ion concentrations among different halophytes in final growth stage

[注(Note):柱上不同字母表示差异达5%的显著水平 The different small letters above the bars mean the significant difference at $P<0.05$ level.]

植株生物量和体内盐分、离子浓度共同影响,呈现出与生物量(表1)和盐分、离子浓度(图1、图2、图3)不同的特征。

四种盐生植物盐分离子积累量差异显示(表2),生育初期高碱蓬 K^+ 积累量显著高于盐角草、盐地碱蓬和野榆钱菠菜,盐地碱蓬 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 的积累量显著高于盐角草、高碱蓬和野榆钱菠菜($P<0.05$);生育中期盐角草6个离子的积累量均最高;生育末期 K^+、Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 积累量均以高碱蓬(211、445、1224和1599 kg/hm^2)最高,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 积累量均以盐地碱蓬(46、56 kg/hm^2)最高。

从离子合量来看(表2),盐地碱蓬、高碱蓬、野榆钱菠菜的积累量随着时间的增加不断递增,但盐角草总盐积累量从生育中期时开始缓慢降低。生育初期盐地碱蓬积累量显著高于盐角草、高碱蓬和野榆钱菠菜($P<0.05$),分别高出223%、20%和1615%;生育中期盐角草积累量分别是盐地碱蓬、高碱蓬和野榆钱菠菜的13.84倍、14.29倍和10.68倍。生育末期高碱蓬的积累量(3499 kg/hm^2)分别比盐角草、盐地碱蓬和野榆钱菠菜高了68%、14%和60%。

结合不同部分生物量与盐分、离子浓度可知,与地上部分相比,盐生植物根部生物量和盐分、离子浓度都较低[13],盐分、离子积累量较低,对盐渍土的改良影响甚微。由于生育末期盐生植物仅刈割地上部分,对土壤的改良效果主要以单位面积带出的盐分多少来衡量,这取决于此时植物地上部分生物量与盐分浓度的大小。

3 讨论与结论

盐渍化土壤盐分过量是植物生长主要的胁迫因素[14],但盐渍土也是一种重要的欠开发土壤资源,需经改良才能发挥其资源潜力。利用盐生植物,特别是具有一定经济价值的盐生植物对盐分的吸收来改良盐碱地,不仅可以降低土壤盐分,推动盐渍土资源的开发,同时有助于促进当地的农业经济发展。

本研究中,4种盐生植物地上部分含盐量由生育初期到生育中期增降幅度不明显,而从中期到末期有显著下降的趋势($P<0.05$),分别由中期的338、256、208和204 g/kg下降到末期的215、152、137和103 g/kg;地下部分含盐量由生育初期到生育中期下降明显($P<0.05$),而中期到末期的下降幅度不明显。植株体内的盐分及离子浓度降低是生物稀释的结果,但由于盐地碱蓬、高碱蓬和野榆钱菠菜生育中期到生育末期为生长旺盛期,生物量剧增,使植株盐分及离子积累量随之剧增,故应让植株有一个充分生长的过程。盐角草在生育中期盐分、离子浓度与积累量达到最大值,此时开始刈割以带出更多的盐分。通过四种盐生植物的对比可知,生物量的大小对于不同植株总盐、离子积累量的多少起到至关重要的作用,单位质量含盐量较低,但生物量大的植株盐分积累量高于生物量小的植株。4种盐生植物生育末期地上部分生物量高碱蓬为23302 kg/hm^2,蓬野榆钱菠菜为20379 kg/hm^2,盐地碱蓬为18670 kg/hm^2,盐角草为9096 kg/hm^2(表1),总离子浓度为盐角草(310 g/kg) > 盐地碱蓬(270 g/kg) > 高碱蓬(253 g/kg) > 野榆钱菠菜(207 g/kg),二因素共同作用导致盐分摄取量为高碱蓬

表 2　四种盐生植物盐分积累量比较(kg/hm²)

Table 2　Comparison of salt accumulation among four halophytes

生育时期 Growth stage	盐生植物 Halophytes	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	离子合量 Total salt
生育初期 Early growth stage	盐角草 *Salicornia europaea*	1.54 ± 0.10 c	5.42 ± 0.16 c	0.32 ± 0.01 c	1.21 ± 0.06 c	13.61 ± 0.45 c	11.61 ± 0.35 c	33.71 ± 0.46 c
	盐地碱蓬 *Suaeda salsa*	5.14 ± 0.26 b	17.31 ± 0.56 a	1.01 ± 0.03 a	3.47 ± 0.19 a	42.22 ± 1.95 a	39.57 ± 1.88 a	108.72 ± 4.51 a
	高碱蓬 *Suaeda altissima*	7.81 ± 0.69 a	12.70 ± 0.27 b	0.56 ± 0.01 b	1.70 ± 0.08 b	32.52 ± 1.17 b	34.95 ± 1.77 b	90.25 ± 3.70 b
	野榆钱菠菜 *Atripex aucheri* Moq.	0.67 ± 0.03 d	0.87 ± 0.05 d	0.13 ± 0.00 d	0.15 ± 0.01 d	1.90 ± 0.02 d	2.62 ± 0.09 d	6.34 ± 0.12 d
生育中期 Middle growth stage	盐角草 *Salicornia europaea*	109.57 ± 3.58 a	340.43 ± 12.04 a	11.14 ± 0.84 a	110.07 ± 11.50 a	1149.94 ± 58.56 a	737.63 ± 32.50 a	2458.77 ± 107.86 a
	盐地碱蓬 *Suaeda salsa*	7.26 ± 0.23 c	21.52 ± 0.39 b	0.36 ± 0.02 b	9.15 ± 0.51 b	69.20 ± 2.83 b	70.17 ± 0.65 c	177.65 ± 3.00 b
	高碱蓬 *Suaeda altissima*	10.57 ± 0.44 c	28.54 ± 0.82 b	0.42 ± 0.02 b	2.22 ± 0.15 b	52.01 ± 4.39 b	78.36 ± 1.48 c	172.12 ± 6.49 b
	野榆钱菠菜 *Atripex aucheri* Moq.	17.56 ± 1.02 b	29.81 ± 0.41 b	0.11 ± 0.00 d	3.27 ± 0.18 b	65.75 ± 4.02 b	113.67 ± 3.19 b	230.18 ± 3.87 b
生育末期 Final growth stage	盐角草 *Salicornia europaea*	82.60 ± 1.69 d	211.37 ± 10.03 c	6.83 ± 0.18 d	16.65 ± 0.35 c	1043.01 ± 24.58 c	719.95 ± 34.67 c	2080.41 ± 69.51 d
	盐地碱蓬 *Suaeda salsa*	161.37 ± 4.57 b	291.72 ± 10.56 b	46.44 ± 2.69 a	56.35 ± 1.24 a	1112.12 ± 13.48 b	1393.03 ± 65.94 b	3061.03 ± 71.38 b
	高碱蓬 *Suaeda altissima*	210.60 ± 7.71 a	444.94 ± 11.23 a	14.42 ± 0.22 c	5.88 ± 0.08 d	1223.97 ± 30.42 a	1598.70 ± 45.72 a	3498.51 ± 28.04 a
	野榆钱菠菜 *Atripex aucheri* Moq.	124.77 ± 3.48 c	160.73 ± 6.77 d	30.50 ± 0.93 b	37.78 ± 1.73 b	452.20 ± 25.16 d	1374.34 ± 53.79 b	2180.31 ± 22.78 c

注(Note)：相同时期同列数据后不同字母表示差异达 5% 的显著水平 Values followed by different letters of the same stage in a column are significantly different at 5% level.

(3499 kg/hm²) > 盐地碱蓬(3061 kg/hm²) > 蓬野榆钱菠菜(2180 kg/hm²) > 盐角草(2080 kg/hm²),说明选育生物量大且体内盐分浓度高的品种,对于改良盐碱地十分关键。

本试验末期盐角草、盐地碱蓬生物量略低于赵振勇[6]研究盐生植物对重盐渍土脱盐效果中的生物量(盐角草 11044 kg/hm², 盐地碱蓬 19119 kg/hm²),这可能与种植密度、土壤养分含量有关。本试验区域耕层盐分含量(10.23 g/kg)低于其验区域耕层盐分含量(15.28 ～23.05 g/kg),而对于盐生植物来说,一定量的盐分是促进植株生长发育的关键因素,这也可能是本研究中盐角草和盐地碱蓬生物量相对较低的因素之一。

土壤矿物质特征影响植物的矿质成分特征,但由于植物具有根据其生长需求选择吸收的特性,所以土壤矿物质特征又不能完全决定植物的矿质成分特征[7],从几种盐生植物组织内 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 的含量显著大于其他离子便可得到验证(图 1、图 2、

图3)。四种盐生植物对三种主要盐胁迫离子(Na^+、Cl^-、SO_4^{2-})的积累量高于其他离子,适合作为盐碱地改良的优良材料。

不同盐生植物对不同盐分离子的吸收具有选择偏向性,针对不同盐生植物对生境离子选择吸收的差异,可根据盐渍土壤分类特征有目的的选择不同种类盐生植物修复盐渍化土壤。本研究中,盐角草体内的Na^+、Cl^-浓度显著高于其他三种盐生植物,尤其对Cl^-表现出极强的选择吸收能力,使其较其他三种盐生植物更适宜于南疆氯化物盐渍土的改良[15]。

参考文献:

[1] 郗金标,张福锁,毛达如,等. 新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J]. 土壤通报,2005,36(3):299-303.
Xi J B, Zhang F S, Mao D R *et al*. Saline-soil distribution and halophyte resources in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 299-303.

[2] 郗金标,田长彦,阎平,等. 新疆盐生植物区系初探[J]. 中国生态农业学报,2006,14(1):7-10.
Xi J B, Tian C Y, Yan P *et al*. Primary research on the halophyte flora in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(1): 7-10.

[3] Flowers T J, Colmer T D. Salinity tolerance in halophytes[J]. New Phytologist, 2008, 179(4): 945-963.

[4] 孙黎,刘士辉,师向东,等. 10种藜科盐生植物的抗盐生理生化特征[J]. 干旱区研究,2006,23(2):309-313.
Sun L, Liu S H, Shi X D *et al*. Salt-tolerant physiological and biochemical properties of ten species of *Chenopodiaceae* halophytes growing in deserts, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(2): 309-313.

[5] 姚世响,陈莎莎,徐栋生,等. 不同盐胁迫对新疆耐盐植物藜叶片钾、钠元素含量及相关基因表达的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(8):2281-2284.
Yao S X, Chen S S, Xu D S *et al*. Effects of different salinity stress on K, Na content and relevant genes expression in leaves of *Chenopodium album* in Xinjiang[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(8): 2281-2284.

[6] 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.
Zhao Z Y, Zhang K, Wang L *et al*. Desalination effect of halophytes in heavily salinized soil of Karamay, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1420-1425.

[7] 张科,田长彦,李春俭. 盐土和沙土对新疆一年生盐生植物生长和体内矿质组成的影响[J]. 生态学报,2012,32(10):3069-3076.
Zhang K, Tian C Y, Li C J. Influence of saline soil and sandy soil on growth and mineral constituents of common annual halophytes in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3069-3076.

[8] 弋良朋,马健,李彦. 盐胁迫对3种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2006,36(增刊Ⅱ):86-94.
Yi L P, Ma J, Li Y. Effects of saline condition on root system character and vitality among three desert halophytes[J]. Science in China (Ser. D): Earth Sciences, 2006, 36 (Suppl Ⅱ): 86-94.

[9] 赵可夫,李军. 盐浓度对3种单子叶盐生植物渗透调节剂及其在渗透调节中贡献的影响[J]. 植物学报,1999,41e(12):1287-1292.
Zhao K F, Li J. Effects of salinity on the contents of osmotica of monocotyledenous halophytes and their contribution to osmotic adjustment[J]. Acta Botanica Sinica, 1999, 41 (12): 1287-1292.

[10] 张科,田长彦,李春俭. 一年生盐生植物耐盐机制研究进展[J]. 植物生态学报,2009,33(6):1220-1231.
Zhang K, Tian C Y, Li C J. Review of progress of studies on salt-tolerance mechanisms of annual halophytes[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1220-1231.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000. 12.
Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 12.

[12] 夏阳. 天山博格达峰西北盐生植物群落及其化学元素特征[J]. 干旱区研究,1994,11(1):2-4.
Xia Y. Halophytic communites and its chemical elements featues on the north-west pediment of bogda peak of Tianshan mountain[J]. Arid Zone Research, 1994, 11(1): 2-4.

[13] 林学政,陈靠山,何培青,等. 种植盐地碱蓬改良滨海盐渍土对土壤微生物区系的影响[J]. 生态学报,2006,26(3):801-807.
Lin X Z, Chen K S, He P Q *et al*. The effects of *Suaeda salsa* L. planting on the soil microflora in coastal saline soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 801-807.

[14] 郗金标,张福锁,田长彦. 新疆盐生植物[M]. 北京:科学出版社,2006. 33-63.
Xi J B, Zhang F S, Tian C Y. Halophytes in Xinjiang [M]. Beijing: Science Press, 2006. 33-63.

[15] 梁飞,田长彦,张慧. 施氮和刈割对盐角草生长及盐分累积的影响[J]. 草业学报,2012,21(2):99-105.
Liang F, Tian C Y, Zhang H. The impacts of N fertilization and clipping on the growth and salt accumulation of *Salicornia europaea*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 99-105.