

几种藜科盐生植物吸盐能力及生态学意义

王 宁^{1,2}, 赵振勇^{1*}, 张心怡^{1,2}, 刘四海^{1,2}, 蒋 磊³, 官江平⁴, 荆卫民¹

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆乌鲁木齐 830011;

4 克拉玛依瑞利康源园林工程有限责任公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:【目的】聚盐能力是评价盐生植物对盐碱地生物改良能力的一个重要参考指标。针对不同的盐碱地类型, 有目的地选择生物量大且聚盐能力强的盐生植物, 是实现盐碱地快速改良的关键。比较不同盐生植物的盐离子吸收类型及能力, 可为盐碱地生物改良选择适宜的植物材料提供参考。【方法】试验选取 7 种藜科盐生植物进行人工种植试验, 包括野榆钱菠菜 (*Atriplex aucheri*)、高碱蓬 (*Suaeda altissima*)、盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*)、盐角草 (*Salicornia europaea*)、红叶藜 (*Chenopodium rubrum*)、驼绒藜 (*Ceratoides latens*) 和四翅滨藜 (*Atriplex canescens*)。试验地土壤以粉粘粒为主, 根层土壤 (0—40 cm) 平均含盐量为 45.57 g/kg。在生育末期采样测定植物地上部生物量和 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度。【结果】7 种藜科植物地上部生物量为野榆钱菠菜 (35077 kg/hm²)>盐地碱蓬 (19507 kg/hm²)>高碱蓬 (16160 kg/hm²)>驼绒藜 (12421 kg/hm²)>四翅滨藜 (10798 kg/hm²)>红叶藜 (10134 kg/hm²)>盐角草 (9576 kg/hm²)。高碱蓬、野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和红叶藜 5 种植物组织内 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度显著高于其他离子 ($P<0.05$), 而驼绒藜和四翅滨藜体内 K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 浓度较高。7 种藜科植物地上部 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 3 种盐离子累积总量为野榆钱菠菜 (3835 kg/hm²)>盐地碱蓬 (3145 kg/hm²)>盐角草 (2749 kg/hm²)>高碱蓬 (2253 kg/hm²)>红叶藜 (615 kg/hm²)>四翅滨藜 (367 kg/hm²)>驼绒藜 (220 kg/hm²)。【结论】盐生植物可在重度盐碱地上存活并产生一定的生物量, 野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和高碱蓬均表现出较强的吸盐能力, 但对不同离子的吸收累积能力不同。盐地碱蓬地上部 SO_4^{2-} 吸收量显著高于其他几种植物, 适宜于硫酸盐或氯化物-硫酸盐盐渍土的改良; 盐角草对 Cl^- 表现出极强的吸收能力, 适宜氯化物盐渍土的改良。

关键词: 藜科; 盐生植物; 地上生物量; 吸盐特征; 盐碱地改良

Salt absorption capacity and ecological significance of selected Chenopodiaceae halophytes

WANG Ning^{1,2}, ZHAO Zhen-yong^{1*}, ZHANG Xin-yi^{1,2}, LIU Si-hai^{1,2}, JIANG Lei³, GONG Jiang-ping⁴, JING Wei-min¹
(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 4 Karamay Ruili Kangyuan Garden Engineering C. Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: 【Objectives】The salt accumulation ability of halophytes is one of the most important reference indexes for bioremediation of saline-alkali lands. The ion absorption types and abilities of different halophytes with large biomass were studied to provide a basis for selecting suitable plant materials in saline-alkali soil biological improvement. 【Methods】Seven Chenopodiaceae halophytes were selected for artificial cultivation experiment in Karamay City, Xinjiang, including *Atriplex aucheri*, *Suaeda altissima*, *Suaeda salsa*, *Salicornia europaea*, *Chenopodium rubrum*, *Ceratoides latens*, and *Atriplex canescens*. The soil of the test site was silty clay by texture, had an average salt content of 45.57g/kg in the root layer (0–40 cm), which was categorized as

收稿日期: 2021–10–14 接受日期: 2022–03–25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0207200); 兵团财政科技计划项目 (2020DB001); 南疆地区盐渍化区 (巴州) 生态地质调查项目 (WZD2021BX02-01)。

联系方式: 王宁 E-mail: wangning191@mails.ucas.ac.cn; * 通信作者 赵振勇 E-mail: zhaozhy@ms.xjb.ac.cn

severe saline alkali. The aboveground biomass and the concentrations of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} were measured at the end of growth. 【 Results 】 The above-ground dry biomass of the Chenopodiaceae plants were: *Atriplex aucheri* (35077 kg/hm²) > *Suaeda salsa* (19507 kg/hm²) > *Suaeda altissima* (16160 kg/hm²) > *Ceratoides latens* (12421 kg/hm²) > *Atriplex canescens* (10798 kg/hm²) > *Chenopodium rubrum* (10134 kg/hm²) > *Salicornia europaea* (9576 kg/hm²). In five of the plants - *Suaeda altissima*, *Atriplex aucheri*, *Suaeda salsa*, *Salicornia europaea* and *Chenopodium rubrum*, the concentrations of Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} were significantly higher than K^+ , Ca^{2+} ($P < 0.05$), while in *Atriplex canescens* and *Ceratoides latens*, the concentrations of K^+ , Cl^- and Na^+ were higher than Ca^{2+} , Mg^{2+} . The total cumulative amount of Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} were 3835 kg/hm² (*Atriplex aucheri*) > 3145 kg/hm² (*Suaeda salsa*) > 2749 kg/hm² (*Salicornia europaea*) > 2253 kg/hm² (*Suaeda altissima*) > 615 kg/hm² (*Chenopodium rubrum*) > 367 kg/hm² (*Atriplex canescens*) > 220 kg/hm² (*Ceratoides latens*). 【 Conclusions 】 All the seven halophytes could survive in severe saline-alkali soil and produce ample biomass. However, among them, *Atriplex aucheri*, *Suaeda salsa*, *Salicornia europaea* and *Suaeda altissima* exhibited strong salt absorption abilities. *Suaeda salsa* accumulated significantly more SO_4^{2-} in its aboveground part than other plants, hence was more suitable for the bioremediation of sulfate or chloride-sulfate saline soil. *Salicornia europaea* had a strong absorption capacity for Cl^- , which rendered it more suitable for bioremediation of chloride saline soil.

Key words: Chenopodiaceae; halophyte; aboveground biomass; salt absorption; saline-alkali soil bioremediation

盐渍化是土壤退化的主要形式之一。据不完全统计, 全球的盐碱地面积约为 9.55 亿 hm²^[1], 主要分布于干旱半干旱地区。我国各类盐碱土面积约 9.913 × 10⁷ hm²^[2], 几乎占到世界盐碱地面积的 1/9。盐碱地作为我国重要的后备耕地资源, 其开发利用在保障口粮绝对安全、保持现有耕地稳定、坚守粮食基本自给的安全底线等方面具有重要作用^[3]。新疆是我国盐碱地分布最广、盐碱化类型最多、土壤积盐最重的地区^[4], 也是世界上盐碱地分布比较集中的地区。土地盐渍化已成为新疆农业开发和持续发展的重大限制条件和障碍因素^[5], 盐碱地资源化利用和盐碱耕地的改良, 是新疆农业生产发展的重要环节。

盐碱地改良是一个综合的和系统性的工程, 盐碱耕地的治理主要包括水利改良(农田排水)、农耕改良(深耕晒垡、客土回填)、化学改良(各类改良剂)、生物改良(耐盐作物)等措施^[6]。目前, 水利工程措施和农业改良措施已在新疆盐碱地改良实践中得到广泛应用。综合来看, 种稻洗盐只能局部减轻土壤盐渍化程度^[5]; 施用化学改良剂因见效快而被广泛应用^[7], 但资金投入和技术要求都很高, 大面积实施较为困难^[5]; 暗管在使用过程中, 存在淋失土壤养分尤其是氮素的情况, 并受到土壤质地的限制^[8], 加之淡水资源缺乏, 目前已难以为继^[9]。而利用盐生植物改良盐碱地, 不仅可降低根层土壤含盐量, 还可产生一定的经济价值, 是环境友好的多赢策略。用盐生植物的“吸盐”特性来治理盐碱地^[10-13], 对于新疆盐碱地的改良、生态环境的改善都有重要意义。

我国是一个盐生植物王国, 共有 555 种盐生植物, 隶属于 228 属、71 科; 其中, 藜科种类最多, 占 28 属, 包括 98 种 2 亚种 3 变种^[14]。由于植物的选择性吸收特征, 不同盐生植物组织内累积的盐离子种类和浓度不同, 且其吸盐能力与组织内离子浓度和地上部生物量均有关^[15]。不同区域的盐碱地类型和盐碱程度也因成土母质、气候水分和地形条件等各有差异^[14]。因而, 针对不同的盐碱地类型, 有目的地选择不同盐生植物, 是实现盐碱地快速改良的关键。

本研究选择 7 种已在新疆广泛种植并具有一定食用或饲用价值的藜科盐生植物进行人工种植试验, 旨在分析比较不同植物对盐离子的吸收能力及其选择吸收的离子种类, 可为选择适宜盐生植物进行盐碱地改良和开发利用提供依据。其中, 藜科盐角草属一年生草本植物, 盐角草是目前已知最耐盐的植物, 因其显著的聚盐能力已被广泛应用于盐碱地的改良^[10]; 盐地碱蓬广泛分布于世界各地, 由于其耐盐性较高而成为中国最重要的盐生植物之一^[16], 同时其鲜嫩枝叶还可作为蔬菜供人食用^[17]; 四翅滨藜、驼绒藜和野榆钱菠菜均为家畜喜食的优良牧草^[18-20], 并已在新疆成功种植。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

该试验于 2012 年 5—9 月在新疆克拉玛依农业综合开发区进行。该农业综合区位于克拉玛依市东

南 10 km 处的湖积平原。区域属温带荒漠气候区, 夏季酷热, 极端最高气温达 49.1℃; 冬季寒冷, 极端最低气温为-42.0℃。多年平均降水量为 108.9 mm, 蒸发量为 3008.9 mm, 蒸发量是降水量的 20.8 倍^[21]。开发区地带性土壤主要为湖积母质发育而成的沼泽土和沉积母质发育而成的各类盐土, 土壤质地黏重致密。试验地土壤理化性质见表 1。根据新疆灌区土壤盐渍化类型划分指标^[22], 表层土壤 (0—10 cm) 为氯化物盐渍化土, 10—40 cm 为硫酸盐-氯化物盐渍化土。试验区地下水埋深约 3.0 m。灌溉水来自克拉玛依西郊水库, pH 7.07, 其 Na⁺含量 0.020 g/L, K⁺含量 0.004 g/L, Mg²⁺含量 0.006 g/L, Ca²⁺含量 0.034 g/L, SO₄²⁻含量 0.070 g/L, Cl⁻含量 0.022 g/L。

1.2 试验材料

试验选取 7 种藜科盐生植物: 野榆钱菠菜 (*Atriplex aucheri*)、高碱蓬 (*Suaeda altissima*)、盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*)、盐角草 (*Salicornia europaea*)、红叶藜 (*Chenopodium rubrum*)、驼绒藜 (*Ceratoides latens*) 和四翅滨藜 (*Atriplex canescens*)。其中, 驼绒藜和四翅滨藜为多年生植物, 其余为一年生植物。

1.3 试验方法

试验地为未耕种过的生荒地。共选择 7 种盐生植物, 每种植物 4 个重复, 共设置 28 个面积为 25 m² (5 m×5 m) 的种植小区, 并采用随机区组布置。灌溉方式为滴灌, 滴灌带布设采用“一管一行”, 上述几种植物分别条播于滴灌带两侧 20 cm 范围内, 形成 40 cm 宽播种带, 驼绒藜和四翅滨藜的种植区行距为 1 m, 其余行距均为 0.75 m。

根据植物生育期需水特点定期灌水。播种后 4 天内, 每天灌水 1 次; 之后每周灌水 2~3 次; 株

高 15 cm 以后, 每周灌水 1 次; 生育末期 20~30 天灌水 1 次。灌水标准达到滴灌带间湿润锋相遇即可。试验期间灌溉用水共 4665 m³/hm²。

1.4 样品采集与测定

9 月中旬收获地上部分后称鲜重, 同时取样杀青后用烘干法于 80℃ 恒温下烘至恒重, 测得干重计算生物量。取烘干后的植物材料 1.0 g 于马弗炉中在 550℃ 下灰化 18 h, 置于干燥器中, 冷却后称重, 即为植物灰分。K⁺、Na⁺含量用原子吸收光谱法测定, 其余离子含量采用化学滴定法测定。

1.5 数据分析

利用 Excel 2016 软件进行试验数据整理, 采用 Jupyter Notebook 6.3.0 软件进行数据统计分析, 用 Origin 2019 制图, 采用单因素 (One-way ANOVA) 和 Tukey 法进行方差分析和多重比较。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同盐生植物的生物量比较

不同盐生植物地上部生物量 (图 1) 存在显著差异 ($P<0.05$)。试验条件下, 7 种藜科植物地上部生物量累积的大小顺序为: 野榆钱菠菜 (35077 kg/hm²) > 盐地碱蓬 (19507 kg/hm²) > 高碱蓬 (16160 kg/hm²) > 驼绒藜 (12421 kg/hm²) > 四翅滨藜 (10798 kg/hm²) > 红叶藜 (10134 kg/hm²) > 盐角草 (9576 kg/hm²); 其中野榆钱菠菜地上部干物质量极显著高于其他植物 ($P<0.01$), 分别是盐地碱蓬、高碱蓬的 1.8 和 2.2 倍。四翅滨藜和驼绒藜为多年生植物, 四翅滨藜生育期内可刈割 2~3 次, 本研究的生物量指标均为种植当年刈割 1 次的生物量数据。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of the test soil

土层 (cm) Soil layer	土壤质地 Soil texture (%)			容重 (g/cm ³) Bulk density	总盐 (g/kg) Total salt	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻
	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand			
0—10	7.67	84.88	7.45	1.58	58.86	7.07
10—20	8.23	89.31	2.45	1.56	42.82	2.95
20—40	8.71	91.29	0.00	1.49	40.29	3.43
40—60	7.72	92.28	0.00	1.47	28.43	4.43
60—80	8.70	91.30	0.00	1.55	27.77	3.17
80—100	11.50	88.50	0.00	1.54	25.52	2.65
100—120	13.19	86.81	0.00	1.51	21.11	4.34

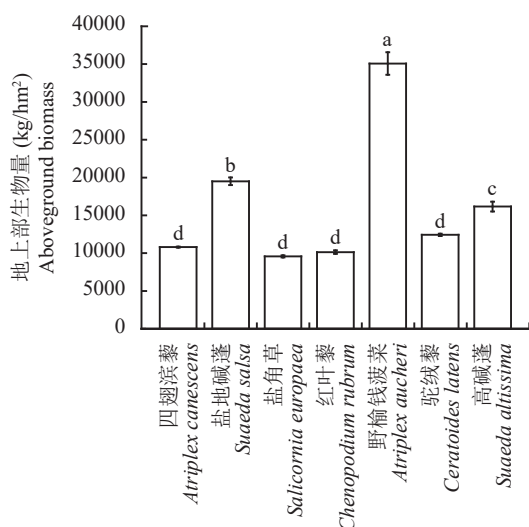


图 1 不同盐生植物地上部生物量

Fig. 1 Aboveground biomass of different halophytes

注: 柱上不同小写字母表示植物之间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among plant species ($P<0.05$).

2.2 不同盐生植物地上部分组织内不同离子含量比较

不同盐生植物地上部盐分离子浓度有明显差异 ($P<0.05$) (图 2)。本研究中, 高碱蓬、野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和红叶藜 5 种植物组织内, 均表

现为 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度显著高于其他离子 ($P<0.05$), 5 种植物 3 种离子之和依次分别占到所测离子总量的 88.82%、87.24%、84.97%、75.14% 和 89.91%; 盐角草表现出很强的离子吸收能力, 组织内 Na^+ 、 Cl^- 浓度均显著高于其他几种植物, 尤其对 Cl^- 表现出极强的吸收能力。

驼绒藜和四翅滨藜对离子的选择性吸收表现出相似性。体内 K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 浓度较高, 两种植物 3 种离子之和依次分别占所测离子总量的 74.36% 和 81.28%; 尤其对 K^+ 表现出很强的吸收能力, 体内 K^+ 浓度显著高于其他离子 ($P<0.05$)。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在盐生植物组织内浓度较低。本研究的 7 种盐生植物组织内 Ca^{2+} 浓度均显著低于其他离子 ($P<0.05$)。

2.3 不同盐生植物地上部不同盐分离子累积能力

盐离子累积量代表着植物从土壤中吸收离子并聚积在体内的能力, 是衡量植物改良盐碱地潜力的重要指标。不同植物的离子累积量受地上部生物量、离子选择性吸收特征和组织内离子浓度的共同影响, 呈现出与地上部生物量 (图 1)、组织内离子浓度 (图 2) 不同的特征 (表 2)。

以灰分计算, 7 种植物盐分累积量为野榆钱菠菜 (7231 kg/hm^2) > 盐地碱蓬 (5308 kg/hm^2) > 盐角草 (4297 kg/hm^2) > 高碱蓬 (4053 kg/hm^2) > 驼绒藜 (1452

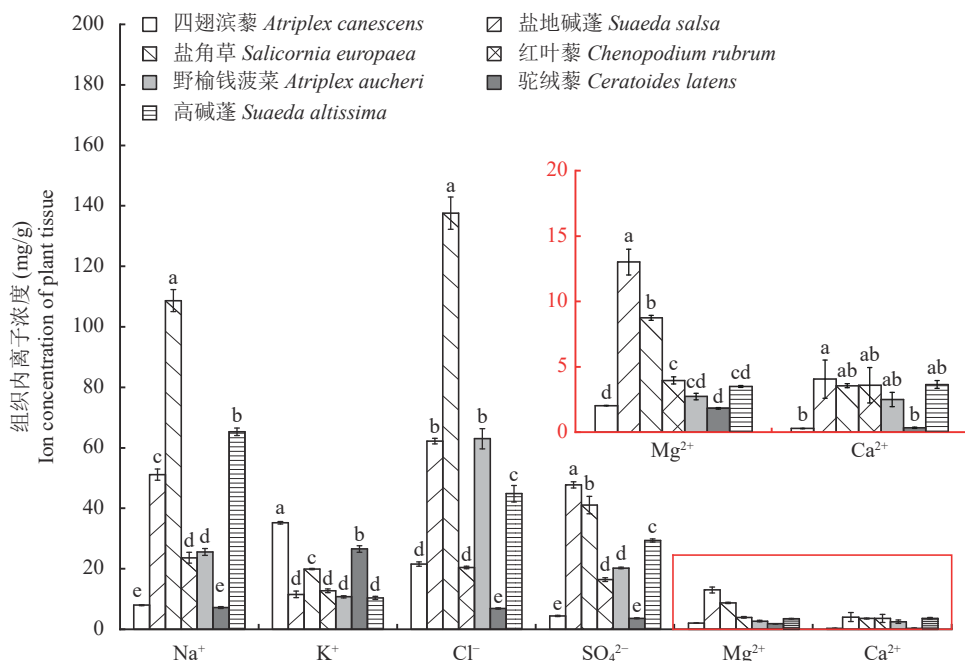


图 2 不同盐生植物组织内离子浓度

Fig. 2 Ion concentration in the tissue of different halophytes

注: 柱上不同小写字母表示相同离子不同植物之间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among plant species for the same ion ($P<0.05$).

表 2 不同盐生植物盐分累积量 (kg/hm^2)
Table 2 Salt accumulation in different halophytes

植物种类 Plant species	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	总离子累积量 Total ion accumulation	灰分累积量 Ash accumulation
四翅滨藜 <i>Atriplex canescens</i>	86.07±1.17 b	232.74±6.43 d	47.76±2.21 e	366.58±9.62 d	1382.07±51.43 d
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	998.51±52.28 a	1214.20±42.09 b	932.03±39.06 a	3144.73±126.62 b	5308.37±187.85 b
盐角草 <i>Salicornia europaea</i>	1039.69±28.98 a	1316.73±50.76 b	392.47±24.08 c	2748.89±63.20 bc	4296.90±104.05 bc
红叶藜 <i>Chenopodium rubrum</i>	240.41±21.98 b	207.06±4.66 d	167.32±9.53 d	614.79±33.35 d	1388.98±79.26 d
野榆钱菠菜 <i>Atriplex aucheri</i>	900.31±72.92 a	2224.45±208.86 a	710.66±33.80 b	3835.42±311.92 a	7230.53±620.71 a
驼绒藜 <i>Ceratoides latens</i>	89.31±3.57 b	85.69±3.00 d	44.83±1.25 e	219.84±7.20 d	1451.92±17.08 d
高碱蓬 <i>Suaeda altissima</i>	1055.20±42.67 a	724.01±51.51 c	473.76±14.60 c	2252.98±99.14 c	4053.01±130.45 c

注：同列数据后不同小写字母表示不同植物之间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among different plant species ($P<0.05$).

kg/hm^2)>红叶藜 ($1389 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>四翅滨藜 ($1382 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。

新疆盐碱土中的盐离子以 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主，可选择这 3 种离子总量评价不同盐生植物的移盐能力。7 种植物地上部分的 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 3 种盐离子累积量之和为野榆钱菠菜 ($3835 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐地碱蓬 ($3145 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐角草 ($2749 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>高碱蓬 ($2253 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>红叶藜 ($615 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>四翅滨藜 ($367 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>驼绒藜 ($220 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。其中野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和高碱蓬 4 种植物地上部盐离子累积量较高。

本研究中，7 种藜科植物地上部 Na^+ 累积量为高碱蓬 ($1055 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐角草 ($1040 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐地碱蓬 ($999 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>野榆钱菠菜 ($900 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>红叶藜 ($240 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>驼绒藜 ($89 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>四翅滨藜 ($86 \text{ kg}/\text{hm}^2$)； Cl^- 累积量为野榆钱菠菜 ($2224 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐角草 ($1317 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐地碱蓬 ($1214 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>高碱蓬 ($724 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>四翅滨藜 ($233 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>红叶藜 ($207 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>驼绒藜 ($86 \text{ kg}/\text{hm}^2$)； SO_4^{2-} 累积量为盐地碱蓬 ($932 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>野榆钱菠菜 ($711 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>高碱蓬 ($474 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>盐角草 ($392 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>红叶藜 ($167 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>四翅滨藜 ($48 \text{ kg}/\text{hm}^2$)>驼绒藜 ($45 \text{ kg}/\text{hm}^2$) (表 2)。

3 讨论

3.1 地上部生物量积累、盐离子累积与盐生植物“吸盐”能力

通过比较 7 种植物可知，地上生物量累积对植物离子累积量的大小有至关重要的作用。在生物量和组织内盐离子浓度的共同作用下，盐离子累积量表现为野榆钱菠菜>盐地碱蓬>盐角草>高碱蓬>红叶

藜>四翅滨藜>驼绒藜。组织内离子浓度较低，但地上生物量大的植物也可达到较高的离子累积量。因而，选育地上部生物量大且组织内盐害离子浓度高的品种，是实现盐碱地迅速脱盐的关键。以盐角草为例，本研究中，其组织内盐离子浓度显著高于其他几种植物，表现出较强的吸盐能力，与前人的研究结果^[10,13,15]一致。而其盐离子累积量显著低于野榆钱菠菜和盐地碱蓬，主要是因为其地上部生物量较低。有研究表明，不同盐度下施氮均可显著促进盐角草的生长量和对 Na^+ 的累积^[23]，施氮量为 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时，盐角草干草产量可达 $28825 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[24]，是本研究结果的 3 倍。说明提高盐生植物地上部生物量对盐生植物改良盐碱地的推广应用意义重大。

土壤矿物质特征影响植物地上部的矿质成分特征，但由于植物具有根据其生长需求选择吸收的特性，土壤矿物质特征又不能完全决定植物地上部的矿质成分特征^[25]，从本研究中 7 种盐生植物组织内离子含量的差异也可得以验证。比较几种植物体内的离子浓度可知，不同盐生植物对不同盐分离子的吸收具有选择偏向性。根据植物对盐分离子的选择性吸收特征，应选择不同种类盐生植物有针对性的修复各类盐碱土。本研究中，盐地碱蓬地上部 SO_4^{2-} 浓度显著高于其他几种植物 ($P<0.05$)，因而更适宜于硫酸盐或氯化物-硫酸盐盐渍土的改良；盐角草体内 Na^+ 、 Cl^- 均显著高于其他几种植物，尤其对 Cl^- 表现出极强的吸收能力，因而比其他几种植物更适宜于氯化物盐渍土的改良。

盐碱地的生物改良技术，其核心就是依靠耐盐碱植物的生长发育，吸收土壤中的盐碱成分来达到修复盐碱地的目的^[26]。植物“吸盐”能力由其地上部生物量和组织内的离子浓度共同决定。本研究以刈

割盐生植物地上部移出的 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 3 种盐离子总量代替灰分累积量进行植物吸盐量的计算。结果表明, 不同植物的“吸盐”能力有显著差异, 其中高碱蓬、野榆钱菠菜、盐地碱蓬和盐角草 4 种盐生植物的盐离子地上部累积量较高, 是盐碱地改良的优良材料。

参考赵振勇等^[9]建立的盐分平衡公式, 计算本试验 7 种植物种植当年从土壤中带走的各离子总量与因灌溉引入的离子总量之比 (表 3), 本研究选择的 7 种植物的离子平衡结果 S_d/S_i 均表现为 SO_4^{2-} 不及 Cl^- , 长期种植可能会使氯化物盐渍土向硫酸盐或氯化物-硫酸盐盐渍土转变。

土壤高 Na^+ 、高 pH 是土壤理化性质不断恶化的重要原因^[27], Na^+ 也是盐渍土中对植物生长危害较大的离子。含 Na 胶体粒子能散布在土壤颗粒之间的细缝之中, 造成土壤结构破坏。湿时体积膨胀, 渗透速度减慢, 毛细管水上升困难, 大量水分从地面流失; 干燥时, 土壤板结、坚硬, 阻碍各种营养物质的运移, 进而影响植物的正常生长发育^[27-28]。 Na^+ 累积量可作为评价盐生植物移盐能力的重要参考。计算 7 种植物种植当年从土壤中带走的 Na^+ 总量与因灌溉引入的 Na^+ 总量之比, 结果为高碱蓬 (11.31) > 盐角草 (11.14) > 盐地碱蓬 (10.70) > 野榆钱菠菜 (9.65) > 红叶藜 (2.58) > 驼绒藜 (0.96) > 四翅滨藜 (0.92)。其中高碱蓬、盐角草、盐地碱蓬、野榆钱菠菜均表现出极强的 Na^+ 移除能力, 尤其是高碱蓬, 收获地上部移除的 Na^+ 含量相当于试验条件下至少 11 年灌溉引入的 Na^+ 量。说明种植盐生植物对盐渍土有

明显的脱盐作用。一方面, 种植盐生植物能够吸收 Na^+ 并通过地上部分的收获而去除。更重要的是, 盐生植物生长过程中, 根系纵横交错, 对土壤产生挤压、分割作用, 能够改善土壤团聚体, 并促进土壤剖面的水分运动^[29-30]。同时, 植物根系的呼吸作用及有机质的分解可为 Na^+ 的置换提供 Ca^{2+} 源^[30], 增加土壤透水性, 进一步促进了水分运动^[31]。另一方面, 种植多年后, 土壤中未被完全分解的纤维在土壤中形成通气、通水通道^[32]。由此, 土壤团聚体改善, 不再板结, 从而促进 Na^+ 随水分运动沿根向下淋洗。

3.2 盐生植物“吸盐”对于盐碱地改良与修复的生态学意义

盐碱土在全球分布广泛, 其面积正以每年 100 万~150 万 hm^2 的速度增加^[33]。据估计在未来 25 年内世界上由于盐渍化造成土地流失的面积将会达到 30%, 到 21 世纪中叶将会达到 50%^[1]。盐生植物是目前唯一能在盐渍化环境中生长的特殊的自然植物区系^[14]。本研究中, 7 种植物均可在重度盐碱土地上存活并保证可观的地上部生物量。土壤表面有无植被的覆盖是影响土壤水热的主要因素之一^[28], 盐生植物覆盖地表, 用自身的蒸腾作用代替土壤蒸发, 一定程度地抑制了土壤返盐^[34], 同时大大改善了盐碱化土壤的水、热状况, 使环境向有利于植物生长的方向转化^[28], 从而提高土壤抵御盐碱危害的能力^[35]。盐生植物对盐碱地植被建立、改良及生态平衡维系有至关重要的作用。在内陆干旱高盐碱环境大规模种植盐生植物, 可以有效遏制土地盐渍荒漠化与盐碱尘暴的扩散, 实现生态环境的改良和优化。

表 3 不同盐生植物盐分平衡状况
Table 3 Salt balance results of different halophytes

植物种类 Plant species	S_d (kg/hm^2)			S_d/S_i		
	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}
四翅滨藜 <i>Atriplex canescens</i>	86.07±1.17 b	232.74±6.43 d	47.76±2.21 e	0.92	2.27	0.15
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	998.51±52.28 a	1214.20±42.09 b	932.03±39.06 a	10.70	11.83	2.85
盐角草 <i>Salicornia europaea</i>	1039.69±28.98 a	1316.73±50.76 b	392.47±24.08 c	11.14	12.83	1.20
红叶藜 <i>Chenopodium rubrum</i>	240.41±21.98 b	207.06±4.66 d	167.32±9.53 d	2.58	2.02	0.51
野榆钱菠菜 <i>Atriplex aucheri</i>	900.31±72.92 a	2224.45±208.86 a	710.66±33.80 b	9.65	21.67	2.18
驼绒藜 <i>Ceratoides latens</i>	89.31±3.57 b	85.69±3.00 d	44.83±1.25 e	0.96	0.83	0.14
高碱蓬 <i>Suaeda altissima</i>	1055.20±42.67 a	724.01±51.51 c	473.76±14.60 c	11.31	7.05	1.45

注: S_d —盐生植物地上部分收获带出的离子总量; S_i —灌溉引入的离子总量, 灌溉水中的 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 量(S_i)分别为 93.30、102.63、326.05 kg/hm^2 。同列数据后不同小写字母表示不同植物之间差异显著 ($P<0.05$)。 S_d/S_i —平衡结果。
Note: S_d —Total ions amount absorbed by halophytes; S_i —Total amount of ions introduced from irrigation, the S_i of Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} were 93.30, 102.63 and 326.05 kg/hm^2 , respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among plant species ($P<0.05$). S_d/S_i —Balance results.

本研究中的几种盐生植物不仅具有较强的耐盐能力,而且能作为生物泵从根区土壤带走盐分。以盐地碱蓬为例,参考王旭等^[36]的研究结果,盐地碱蓬种植1年,根区(0—40 cm)土壤盐分从45.57 g/kg下降到31.63 g/kg。结合根区土壤容重(1.54 g/cm³)计算可得,种植当年盐地碱蓬吸盐量(5308 kg/hm²)约占根区土壤脱盐量(86054 kg/hm²)的6.17%,说明盐生植物不仅吸收并将盐分聚积在体内,还可借助根系生长和分泌物改善土壤物理性状和提升土壤肥力^[28],改良盐碱地。

长期以来,内陆盐碱地的开发利用和改良治理主要依靠水利措施,依靠大水漫灌淋洗土壤盐分实现一般农作物的种植。但受淡水资源短缺制约,这种模式已难以为继。筛选有经济价值的盐生植物进行适应性种植,可为盐碱地区农业拓展新的发展空间。李梅梅等^[37]研究表明,新疆5种藜科一年生盐生饲草红叶藜、野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和高碱蓬均具有一定的饲用开发利用价值;于海芹等^[38]首次对盐生草籽营养成分进行了全面分析与评价,结果表明盐生草籽是一种理想的保健食用油开发新资源。乔蕤等^[39]利用盐碱土地种植盐生草,充分挖掘盐生草作为油料、优质蛋白饲料来源新作物的价值,具有巨大的经济效益和生态效益。雷春英等^[40]指出利用盐碱荒地种植碱蓬属植物,充分开发其在食用、医疗保健方面的应用价值,具有巨大潜力和广阔前景。筛选培育经济型“吸盐”盐生植物,建立配套种植技术,构建盐生植物与常规作物轮作、间作等种植模式,将是内陆干旱区盐碱地生态改良与可持续利用的方向。

4 结论

盐生植物可在重度盐碱地上存活并产生一定的生物量,高碱蓬、盐角草、盐地碱蓬、野榆钱菠菜4种植物的移盐能力较为突出,是盐碱地植物改良的优良材料。盐地碱蓬地上部SO₄²⁻浓度及累积量均显著高于其他几种植物,可优先选为硫酸盐或氯化物—硫酸盐盐渍土的改良植物;盐角草体内可积累高浓度的Na⁺、Cl⁻,尤其对Cl⁻表现出极强的吸收能力,适宜于氯化物盐渍土的改良。

参 考 文 献:

- [1] 刘星宏,张青青,张鹏,张广鹏. 新疆盐碱地空间分布特征分析[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(8): 141–148.
- Liu X H, Zhang Q Q, Zhang P, Zhang G P. Spatial distribution characteristics and analysis of saline-alkali land in Northern

- Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(8): 141–148.
- [2] 罗廷彬,任斌,谢春虹. 新疆盐碱地生物改良的必要性与可行性[J]. 干旱区研究, 2001, (1): 46–48.
- Luo T B, Ren W, Xie C H. Necessity and feasibility of biotic improving the saline and alkaline land in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2001, (1): 46–48.
- [3] 刘森,王志春,杨福,等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 1–8.
- Liu M, Wang Z C, Yang F, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 1–8.
- [4] 刘星宏,张青青,徐海量,等. 北疆盐碱地植物群落空间分布及物种多样性[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1501–1513.
- Liu X H, Zhang Q Q, Xu H L, et al. Spatial distribution and species diversity of saline-alkali plant communities in northern Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1501–1513.
- [5] 田长彦,宋郁东,胡明芳. 新疆荒漠化现状、成因及对策[J]. 中国沙漠, 1999, (3): 17–21.
- Tian C Y, Song Y D, Hu M F. Status, causes and countermeasures of desertification in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 1999, (3): 17–21.
- [6] 衡通,王振华,张金珠,李文昊. 新疆农田排水技术治理盐碱地的发展概况[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(3): 161–169.
- Heng T, Wang Z H, Zhang J Z, Li W H. Development of farmland drainage technology to control saline-land in Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(3): 161–169.
- [7] 李茜,刘松涛,李明,等. 碱化土壤改良后种植乔木红柳对比试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 49–53.
- Li Q, Liu S T, Li M, et al. Comparative study on planting tamarisk trees after alkalinized soil improvement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 49–53.
- [8] 谭攀,王士超,付同刚,等. 我国暗管排水技术发展历史、现状与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 633–639.
- Tan P, Wang S C, Fu T G, et al. Development history, present situation, and the prospect of subsurface drainage technology in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 633–639.
- [9] 赵振勇,李中邵,张福海,等. 盐生植物种植对克拉玛依农业开发区盐分平衡的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 211–215.
- Zhao Z Y, Li Z S, Zhang F H, et al. Impacts of halophytes planting on salt balance in agricultural development region of Karamay City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 211–215.
- [10] 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.
- [11] 王升,王全九,周蓓蓓,等. 膜下滴灌棉田间作盐生植物改良盐碱地效果[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 362–367.
- Wang S, Wang Q J, Zhou B B, et al. Effect of interplanting halophyte in cotton fields with drip irrigation under film to improve saline-alkali soil[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 362–367.
- [12] 祁通,孙阳讯,黄建,等. 两种盐生植物在南北疆地区的适生性及吸盐能力[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (1): 144–148.

- Qi T, Sun Y X, Huang J, *et al.* The adaptability and salt absorption ability of two kinds of halophyte in southern and northern of Xinjiang[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (1): 144–148.
- [13] 董积忠, 尹传华, 王海孝, 等. 两种盐生植物生物移盐能力及土壤改良效果比较[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(1): 124–128.
- Dong J Z, Yin C H, Wang H X, *et al.* Comparison of two species of halophyte in removing and reducing soil salinity from saline soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(1): 124–128.
- [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.
- Xi J B, Zhang F S, Tian C Y. Halophytes in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [15] 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.
- Guo Y, Chen B L, Sheng J D, *et al.* Salt absorption capacities of several annual halophytes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 269–276.
- [16] Zhang X, Yao Y, Li X, *et al.* Transcriptomic analysis identifies novel genes and pathways for salt stress responses in *Suaeda salsa* leaves[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1–12.
- [17] Song J, Wang B S. Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model[J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(3): 541–553.
- [18] 王文颖, 王刚. 四翅滨藜的生物—生态学特性及研究进展[J]. *草业科学*, 2004, 21(7): 18–21.
- Wang W Y, Wang G. Bio-ecological characteristic and research progress for *Atriplex canescens*[J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(7): 18–21.
- [19] 蔡丹红, 李陈建, 魏岩. 准噶尔荒漠驼绒藜种子的萌发行[J]. *草地学报*, 2016, 24(2): 384–388.
- Cai D H, Li C J, Wei Y. Germination behavior of *Ceratoides latens* seed in Junggar Desert[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2): 384–388.
- [20] 王伟华, 姜黎. 四种钠盐胁迫对野榆钱菠菜种子萌发特性和幼苗生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(6): 23–29.
- Wang W H, Jiang L. Effects of sodium stress on seed germination and seedling growth of *Atriplex aucheri*[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 23–29.
- [21] 韩鹏冉, 严成, 孙永秀, 岳健. 克拉玛依市中部城区外围生态敏感性评价[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1217–1222.
- Han P R, Yan C, Sun Y X, Yue J. GIS-based assessment of eco-environmental sensitivity in peripheral regions of Karamay central urban area[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1217–1222.
- [22] 乔木, 周生斌, 卢磊, 等. 近25a来塔里木盆地灌区土壤盐渍化时空变化特点与改良治理对策[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 604–613.
- Qiao M, Zhou S B, Lu L, *et al.* Temporal and spatial changes of soil salinization and improved countermeasures of Tarim Basin Irrigation District in recent 25a[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 604–613.
- [23] 尹海龙, 田长彦, 任婧, 等. 土壤氮、盐浓度对盐角草(*Salicornia europaea*)生长发育及氮素吸收的影响[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1277–1284.
- Yin H L, Tian C Y, Ren Q, *et al.* Effects of soil nitrogen and salt concentration on growth and nitrogen uptake of *Salicornia europaea* [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1277–1284.
- [24] 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 Pratacultural Sinica*, 2012, 21(2): 99–105.
- [25] 张科, 田长彦, 李春俭. 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[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.
- [26] 赵振勇, 田长彦, 张科, 王黎. 盐碱地生物改良与盐生植物资源综合利用[J]. *高科技与产业化*, 2020, (9): 64–66.
- Zhao Z Y, Tian C Y, Zhang K, Wang L. Biological improvement of saline-alkali land and comprehensive utilization of halophyte resources[J]. *High-Technology & Commercialization*, 2020, (9): 64–66.
- [27] 刘盛林, 丁效东, 郑东峰, 等. 黄河三角洲盐渍化荒地种植植物对土壤改良、磷形态转化及有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 278–284.
- Liu S L, Ding X D, Zheng D F, *et al.* Effect of different plants plantation on amelioration of uncultivated saline wasteland, soils phosphorus fraction and availability in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 278–284.
- [28] 范亚文. 种植耐盐植物改良盐碱土的研究[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2001.
- Fan Y W. Study on planting salt-enduring plants[D]. Harbin, Heilongjiang: PhD Dissertation of Northeast Forestry University, 2001.
- [29] 李冰月, 张馨馨, 南丽丽, 等. 红豆草间作四翅滨藜对土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(1): 85–91.
- Li B Y, Zhang X X, Nan L L, *et al.* Effects of *Atriplex canescens* and *Onobrychis viciaefolia* intercropping on soil microbial quantity and enzyme activity[J]. *Grassland and Turf*, 2020, 40(1): 85–91.
- [30] 王善仙, 刘宛, 李培军, 吴海燕. 盐碱土植物改良研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 1–7.
- Wang S X, Liu W, Li P J, Wu H Y. Advances of researches in plant-improvement of saline-alkaline soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 1–7.
- [31] 李彦, 衣怀峰, 赵博, 等. 燃煤烟气脱硫石膏在新疆盐碱土壤改良中的应用研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1682–1685.
- Li Y, Yi H F, Zhao B, *et al.* Study on improving Xinjiang sodic soils amelioration with desulfurized gypsum[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1682–1685.
- [32] 任崑, 罗廷彬, 王宝军, 苏逢春. 新疆生物改良盐碱地效益研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 211–214.
- Ren W, Luo T B, Wang B J, Su F C. Biological improvement of saline and alkaline land in Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 211–214.
- [33] Kovda V A. Loss of productive land due to salinization[J]. *Ambio A Journal of the Human Environment*, 1983, 12(2): 91–93.
- [34] 余冬梅, 祁兆鑫, 胡夏嵩, 等. 柴达木盆地杂斯库勒湖湖区盐生植物吸盐效应及其耐盐性评价[J]. *盐湖研究*, 2020, 28(1): 123–131.
- Yu D M, Qi Z X, Hu X S, *et al.* The assessment of salt-absorption and salt tolerance of halophytes in the Gaskule Salt Lake area of

- Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2020, 28(1): 123–131.
- [35] 胡明芳, 田长彦, 赵振勇, 王林霞. 新疆盐碱地成因及改良措施研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 111–117.
- Hu M F, Tian C Y, Zhao Z Y, Wang L X. Salinization causes and research progress of technologies improving saline-alkali soil in Xinjiang[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(10): 111–117.
- [36] 王旭, 田长彦, 赵振勇, 等. 滴灌条件下盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)种植年限对盐碱地土壤盐分离子分布的影响[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 211–217.
- Wang X, Tian C Y, Zhao Z Y, *et al.* Effects of different planting years of *Suaeda salsa* on the soil ions distribution in saline-sodic soil under drip irrigation[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 211–217.
- [37] 李梅梅, 吴国华, 赵振勇, 等. 新疆5种藜科盐生植物的饲用价值[J]. *草业科学*, 2017, 34(2): 361–368.
- Li M M, Wu G H, Zhao Z Y *et al.* Feeding value evaluation of Xinjiang five chenopod halophytes[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(2): 361–368.
- [38] 于海芹, 张天柱, 魏春雁, 李志坚. 3种碱蓬属植物种子含油量及其脂肪酸组成研究[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(10): 2077–2082.
- Yu H Q, Zhang T Z, Wei C Y, Li Z J. Fat contents and fatty acid composition in the seeds of three species of *Suaeda*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(10): 2077–2082.
- [39] 乔蕤, 胡娜, 周菁, 等. 西北旱区盐生植物盐生草籽营养成分分析与评价[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(6): 956–960.
- Qiao R, Hu N, Zhou J, *et al.* Analysis and evaluation on seed nutrition of halophyte *Halogeton glomeratus* in arid region of northwest China[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(6): 956–960.
- [40] 雷春英, 彭钊植, 刘畅, 等. 盐生药用植物黑果枸杞研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(7): 55–60.
- Lei C Y, Peng M Z, Liu C, *et al.* The review of ecological and economic values of halophyte medicinal plant *Lycium ruthenicum*[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2021, 40(7): 55–60.