

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0791

王宁, 赵振勇, 张心怡, 刘四海, 张科, 胡明芳. 咸水滴灌对盐地碱蓬生育规律的影响. 草业科学, 2023, 40(10): 2528-2538.
WANG N, ZHAO Z Y, ZHANG X Y, LIU S H, ZHANG K, HU M F. Effect of saline water drip irrigation on the growth regularity of *Suaeda salsa*. Pratacultural Science, 2023, 40(10): 2528-2538.

咸水滴灌对盐地碱蓬生育规律的影响

王宁^{1,2}, 赵振勇¹, 张心怡^{1,2}, 刘四海^{1,2}, 张科¹, 胡明芳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)

摘要: 盐生植物是资源化利用盐碱地和地下咸水的有效工具, 对干旱半干旱区重度盐渍生境的植被建设和生态恢复有重要意义。本研究以盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 为研究对象, 开展为期1年的咸水滴灌定位试验, 共设5个灌溉梯度 (CK、10、20、30、40 g·L⁻¹), 研究咸水滴灌下盐地碱蓬的生长规律。结果表明: 盐地碱蓬的耐盐性随生育期进程逐渐增强。盐地碱蓬在萌发期和幼苗生长阶段对盐最为敏感, 可以选择成苗率作为评价盐地碱蓬耐盐性的指标。花蕾期-结实期是盐地碱蓬干物质累积的主要时期, 在这一时期前增加水肥投入可保证植株地上部的长势和产量, 从而提升土壤改良效果。盐地碱蓬具有较强的耐盐性, 可用于干旱半干旱地区重度盐碱荒地的植被重建和景观建设。

关键词: 咸水资源利用; 生物学性状; 植被重建; 盐碱地; 耐盐性; 土壤改良; 生态治理

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)10-2528-11

Effect of saline water drip irrigation on the growth regularity of *Suaeda salsa*

WANG Ning^{1,2}, ZHAO Zhenyong¹, ZHANG Xinyi^{1,2}, LIU Sihai^{1,2}, ZHANG Ke¹, HU Mingfang¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Halophytes are effective tools for resource utilization of saline-alkali land and underground salt water, and are significant for revegetation and ecological restoration of arid and semi-arid areas. In this study, *Suaeda salsa* was used as the research object to carry out a one-year saline water drip irrigation experiment with five treatments (CK, 10, 20, 30, and 40 g·L⁻¹) to study the growth characteristics of *S. salsa* under saline water drip irrigation. The results showed that the salt tolerance of *S. salsa* increased gradually with the growth period. *S. salsa* is most sensitive to salt during germination and in the seedling growth stage, and the seedling percentage can be selected as an index to evaluate the salt tolerance of *S. salsa*. The flower bud to fruiting stages are the main periods of dry matter accumulation in *S. salsa*. Increasing the input of water and fertilizer before this period can ensure the aboveground growth and yield of the plant to improve the effect of soil amendment. *S. salsa* has a strong salt tolerance and can be used for revegetation and landscape construction of severe saline wasteland in arid and semi-arid areas.

Keywords: utilization of saline water resources; biological characteristics; revegetation; saline-alkali land; salinity tolerance; soil improvement; ecological management

Corresponding author: ZHAO Zhenyong E-mail: zhaozhy@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2022-10-08 接受日期: 2022-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0207200); 国家重点研发计划 (2022YFD1900101); 宁夏回族自治区重点研发计划 (2022BBF03036)

第一作者: 王宁 (1996-), 女, 陕西千阳人, 在读博士生, 研究方向为盐土农业与重度盐碱地植被建设. E-mail: wangning191@mailsucas.ac.cn

通信作者: 赵振勇 (1973-), 男, 新疆精河人, 正高级工程师, 博士, 研究方向为干旱区盐碱地改良与盐生植物资源化利用。

E-mail: zhaozhy@ms.xjb.ac.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

土壤盐渍化已成为日益严峻的世界性问题。全世界约 8.7% 的陆地受到盐分影响^[1], 并有进一步扩大的趋势^[2]。土壤盐渍化不仅制约着农业的可持续发展, 而且对区域生态环境构成极大威胁。尤其是干旱半干旱地区, 在高蒸发量、低降水量和其他不合理的人类活动的综合影响下, 土壤盐渍化不断加剧^[3]。新疆地处欧亚大陆腹地, 是我国最为干旱、降水量稀少、蒸发强烈、土壤盐碱化分布范围最广、盐碱化类型最多、土壤积盐最重的地区^[4], 有着“世界盐碱土博物馆”之称^[5]。据统计, 新疆盐碱地面积达 2 181.4 万 hm^2 , 约占全国盐碱土总面积的 22.01%^[6]。

在气候变化和水资源利用对土壤盐渍化的重叠影响下, 建立新型水资源的盐渍化调控和管理途径受到国际学术界的关注^[7]。面临淡水资源缺乏、地下水咸化、高地下水位等问题, 干旱半干旱区技术研发的主导方向是节约淡水资源、开发利用地下咸水资源和开发耐盐植物^[8]。我国有着丰富的、易于开采的地下咸水资源, 到目前远未得到充分利用^[9]。盐生植物是利用盐渍土壤的有效工具^[10], 可支持地下咸水资源利用方面的研究; 真盐生植物可吸收土壤中的盐离子并累积在其地上部分, 通过刈割地上部带出土壤^[11]。利用其“吸盐特性”, 可实现低成本、有效地改良盐渍化土壤^[12]。因此, 利用地下咸水资源种植盐生植物对干旱半干旱区重度盐渍生境的植被重建和生态恢复有重要意义。

盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 是典型的抗逆性强的 一年生真盐生植物^[13], 并有重要的生态价值, 可用于原油污染修复^[14]、重金属污染修复^[15], 也是无排水灌区生物脱盐的重要材料^[16]。盐地碱蓬能吸收聚集盐分并有效促进根际盐分的淋洗, 其在盐碱地修复中的作用已被广泛证实^[17-19]。同时, 在盐渍土壤种植盐地碱蓬还能提高土壤的有机质含量和养分水平^[12]。

目前, 关于盐地碱蓬的研究大多集中于生理特征、耐盐机制与环境修复等方面, 且多在实验室环境下进行, 包括盆栽、水培等。在田间条件下, 盐地碱蓬对咸水灌溉的耐受阈值, 以及咸水灌溉下盐地碱蓬的生长特性、生物量形成规律等尚鲜见报道。为此, 本研究开展咸水灌溉定位试验, 研究咸水灌溉对盐地碱蓬生长的影响, 旨在探索田间条件下咸水资源利用的可行性和盐地碱蓬的耐盐阈值及生

长规律, 以期对盐地碱蓬种植及盐渍土改良提供参考, 为干旱半干旱重度盐渍化地区的植被重建提供方向。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

试验于 2021 年 6 月—10 月在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 $45^{\circ}26' \text{N}$, $85^{\circ}00' \text{E}$, 海拔 260 m。区域属温带荒漠气候区, 夏季酷热, 极端高温达 49.1°C ; 冬季寒冷, 极端低温可达 -42.0°C 。多年平均降水量为 108.9 mm; 蒸发量为 3 008.9 mm, 是降水量的 20.8 倍^[20]。试验区灌溉水来源于克拉玛依西郊水库, pH 为 7.07, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度分别为 0.004、0.020、0.034、0.006、0.022、0.070 和 $0.083 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设 5 个灌溉水盐度处理, 每个处理 4 个重复。以不加任何物质的当地农业灌溉用水作为对照 (CK), 用 NaCl 和灌溉水配置出盐浓度分别为 10、20、30 和 $40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水。试验区为一块初始条件较为均质的盐碱荒地, 土壤初始条件如表 1 所列。试验区划分为 20 个面积为 $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的小区, 并采取随机区组设计布置。为避免侧渗干扰, 小区间设置 2 m 的隔离带。

2021 年 6 月中旬进行播种, 种植方式为条播。相邻毛管带间距 60 cm, 将盐地碱蓬种子掺细沙和水拌至散粒, 种植于毛管两侧 20 cm 的范围内, 形成 40 cm 的播种带。每个小区内 7 条播种带, 为避免边际效应干扰, 选择中间 5 条播种带为取样区域。

灌溉系统为自压储水罐滴灌。放置储水容量 1 000 L 的储水罐于 2 m 高处, 通过 PVC 管、球阀、水表、毛管连接形成滴灌系统。根据盐地碱蓬生育需水特点, 播种后立即灌一次水, 出苗期每隔 2 d 灌水一次。进入成苗期后, 根据土壤实际状况判断是否灌溉, 灌水标准以达到相邻毛管灌水湿润范围重叠为止。生育期内共灌水 16 次, 总灌水量为 $1 760 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 平均每次灌水量约 $110 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 取样及测定方法

将盐地碱蓬生育期分为出苗期、成苗期、花蕾

表1 试验区土壤初始条件
Table 1 Initial conditions of the soil in the experimental area

土壤深度 Soil depth/cm	总盐 Total salt/(g·kg ⁻¹)	含水量 Moisture content/%	Na ⁺ / (g·kg ⁻¹)	K ⁺ / (g·kg ⁻¹)	Ca ²⁺ / (g·kg ⁻¹)	Mg ²⁺ / (g·kg ⁻¹)	Cl ⁻ / (g·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (g·kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (g·kg ⁻¹)
0 - 20	3.62	13.00	0.68	0.03	0.28	0.17	0.59	1.56	0.27
20 - 40	8.77	19.14	1.89	0.04	0.69	0.28	2.48	2.55	0.23
40 - 60	7.46	21.38	1.49	0.04	0.72	0.21	2.18	2.15	0.24
60 - 80	5.01	23.63	1.07	0.03	0.35	0.15	1.17	1.69	0.26
80 - 100	4.96	23.12	0.69	0.03	0.59	0.18	1.30	1.45	0.24

期和结实期4个时期,在各个时期分别取样一次,测定盐地碱蓬的株高、单株生物量、地上部鲜重、地上部干重、含水率及肉质化程度。

在每个小区的取样行内随机选择0.6 m × 0.6 m的取样区,在离地面1 cm处刈割地上部分,随即称取鲜重;随机取10株植株测定株高和单株生物量,取平均值;在空气循环烘箱中105 °C杀青30 min后,在60 °C下低温干燥至恒重,称得干重。盐地碱蓬含水率=(鲜重-干重)/鲜重×100%,肉质化程度用鲜重/干重来衡量。

1.4 数据处理

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,采用单因素(one-way ANOVA)和Tukey法进行方差分析和多重比较。利用Origin 2019制图。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 咸水灌溉对盐地碱蓬植株生长速率的影响

整个生育期内,株高的生长速率呈先升高后降低的趋势(图1)。成苗期到花蕾期,咸水灌溉显著促进了植株的株高($P < 0.05$)。具体表现在:这一时期,对照和10 g·L⁻¹处理的盐地碱蓬,株高的增长率开始下降;20 g·L⁻¹及以上处理下,株高增长率继续上升,植株继续保持快速增高的趋势。与对照相比,高盐度咸水灌溉处理(20~40 g·L⁻¹)的盐地碱蓬株高增长率开始下降的拐点晚了一个月,到8月下旬才开始下降。40 g·L⁻¹灌溉处理下株高增长率的拐点值为2.34 cm·d⁻¹,是同期对照处理的2.2倍。到结实期时,所有处理的株高增长率均趋于0,植株拔高近乎停滞。

盐地碱蓬单株生物量累积主要在成苗期到花蕾期(图1)。从播种到开花,单株生物量的增长速率一直保持上升趋势,植株生物量的累积在不断加快。咸水灌溉对植株生物量的影响也从抑制逐渐变为低盐促进高盐抑制。开花之后,除40 g·L⁻¹处理,其余各处理的增长率均开始下降,最终趋近于停滞。

咸水灌溉显著影响盐地碱蓬地上部鲜重的积累($P < 0.05$)。出苗到成苗期是盐地碱蓬地上部鲜重积累的主要时期(图1),鲜重增长率在这一阶段快速增加,之后便开始下降。进入成苗期后,对照和10 g·L⁻¹灌溉处理下,植株地上部鲜重的增长率迅速下降;而20 g·L⁻¹及以上咸水处理则继续上升,到花蕾期后才开始下降。对照处理的鲜重增长率下降可能与菟丝子(*Cuscuta australis*)寄生有一定关系,但10 g·L⁻¹灌溉处理的植株鲜重增长率和对照表现出同一趋势,因而仍可得出咸水灌溉促进盐地碱蓬鲜重累积的结论。

咸水灌溉对地上部干物质积累的影响在各生育期不同(图1)。播种到成苗期,咸水灌溉对盐地碱蓬地上部干物质积累有显著的抑制作用($P < 0.05$);成苗期时,对照处理的干物质增长率为同期40 g·L⁻¹灌溉处理的2.2倍。成苗到花蕾期,咸水灌溉开始表现出促进干物质增长的趋势。花蕾期之后,干物质增长率受到咸水灌溉的显著促进,30 g·L⁻¹及更高盐度的咸水处理下,盐地碱蓬干重增长率继续增加,而其余处理的干物质增长率则开始下降,到结实期时,40 g·L⁻¹处理的增长率为同期对照的1.6倍。

2.2 不同生育期咸水灌溉对盐地碱蓬生长的影响

在盐地碱蓬的出苗期和成苗期,咸水灌溉表现为抑制生长的趋势($P < 0.05$)(表2)。随灌溉水盐度

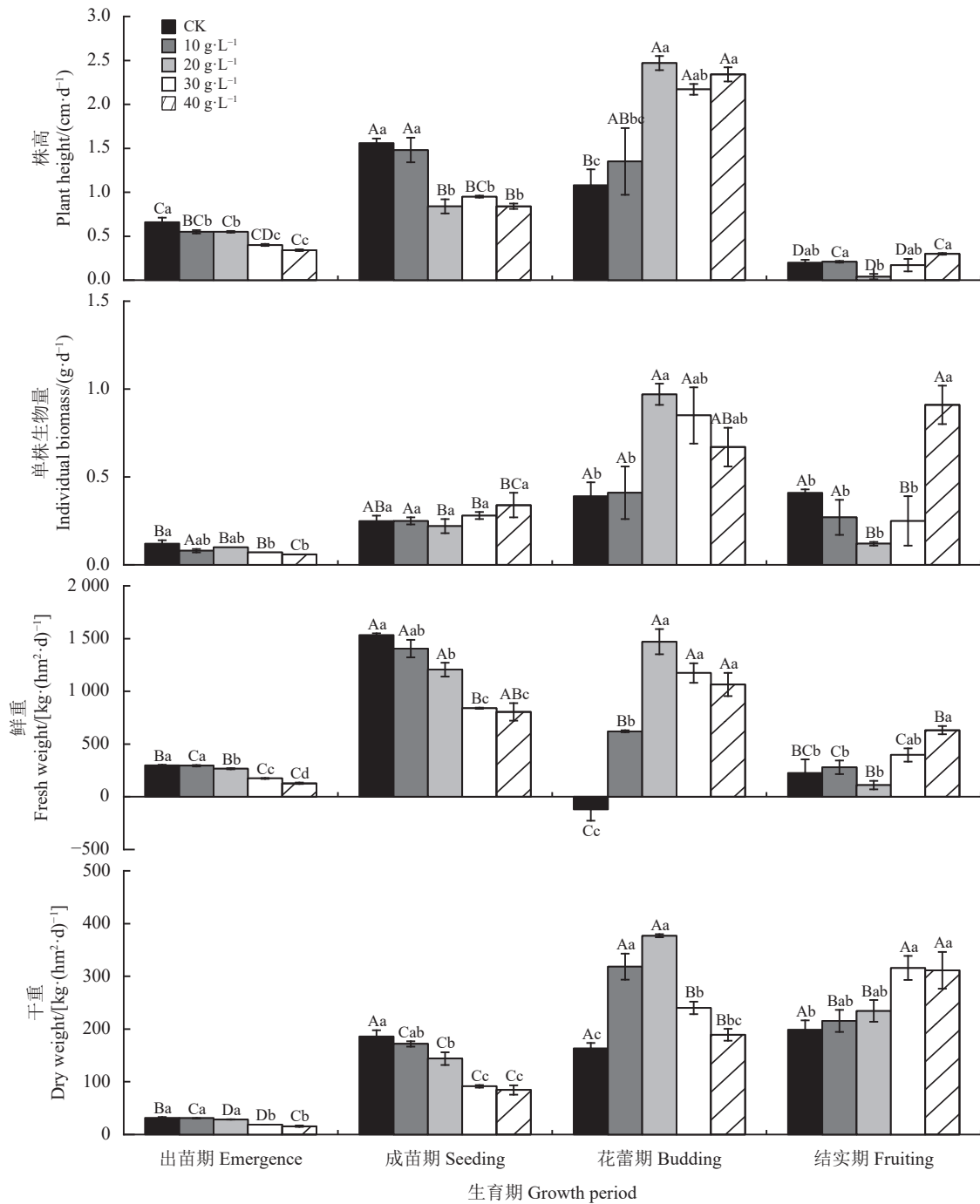


图 1 咸水灌溉对盐地碱蓬生长速率的影响

Figure 1 Effect of saltwater irrigation on the growth rate of *Suaeda salsa*

CK: 对照处理, 用不加任何物质的当地农业灌溉用水; 下同。不同大写字母表示不同时期同一处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

CK: control treatment, irrigating with local agricultural irrigation water without any substance; This is applicable for the following figures and tables as well. Different capital letters indicate significant differences among the same treatments in different periods at the 0.05 level; and different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same period at the 0.05 level.

增加, 盐地碱蓬的株高、地上部生物量 (包括鲜重和干重) 均逐渐降低。与对照相比, 40 g·L⁻¹ 咸水灌溉下, 出苗期盐地碱蓬的株高、地上部鲜重和干重分

别降低了 48.3%、57.1% 和 51.0%; 成苗期分别降低 43.2%、50.0% 和 53.9%。茎叶肉质化在出苗期表现出先增加后降低的趋势, 并在 10 g·L⁻¹ 处理下达到

表2 咸水灌溉对各生育期盐地碱蓬生物学性状的影响
Table 2 Effect of saline water irrigation on biological characteristics of *Suaeda salsa*

生育期 Growth period	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	单株生物量 Individual biomass/g	鲜重 Fresh weight/ (kg·hm ⁻²)	干重 Dry weight/ (kg·hm ⁻²)	含水率 Moisture content/%	肉质化 Carnification
出苗期 Emergence	CK	19.65 ± 1.39a	3.67 ± 0.75a	8 960.99 ± 169.61a	954.31 ± 43.02a	0.89 ± 0.00a	9.32 ± 0.33a
	10 g·L ⁻¹	16.50 ± 0.51b	2.51 ± 0.31ab	8 861.28 ± 199.97a	927.35 ± 11.75a	0.89 ± 0.00a	9.36 ± 0.09a
	20 g·L ⁻¹	16.42 ± 0.32b	2.93 ± 0.03ab	7 993.44 ± 175.48b	858.07 ± 13.28a	0.89 ± 0.00a	9.32 ± 0.19a
	30 g·L ⁻¹	11.88 ± 0.35c	1.97 ± 0.12b	5 244.67 ± 125.43c	566.10 ± 1.37b	0.89 ± 0.00a	9.23 ± 0.14a
	40 g·L ⁻¹	10.15 ± 0.22c	1.70 ± 0.04b	3 840.59 ± 184.71d	468.05 ± 40.79b	0.88 ± 0.00a	8.69 ± 0.31a
成苗期 Seeding	CK	48.70 ± 2.47a	8.88 ± 0.33a	40 189.72 ± 727.93a	4 678.07 ± 196.83a	0.87 ± 0.01b	7.96 ± 0.41b
	10 g·L ⁻¹	46.71 ± 2.59a	8.07 ± 0.67a	37 163.61 ± 1 735.70ab	4 371.49 ± 111.31ab	0.88 ± 0.00ab	8.08 ± 0.11b
	20 g·L ⁻¹	33.42 ± 1.38b	7.22 ± 0.45a	32 114.58 ± 1 207.82b	3 738.73 ± 248.10b	0.88 ± 0.00ab	8.44 ± 0.15ab
	30 g·L ⁻¹	30.22 ± 1.07b	7.68 ± 0.26a	21 729.86 ± 334.03c	2 433.65 ± 66.46c	0.88 ± 0.00ab	8.56 ± 0.32ab
	40 g·L ⁻¹	27.68 ± 0.08b	8.50 ± 1.34a	20 151.53 ± 1 667.98c	2 157.31 ± 165.86c	0.89 ± 0.00a	9.33 ± 0.11a
花蕾期 Budding	CK	70.21 ± 3.65b	19.39 ± 2.97a	37 395.83 ± 2 316.69c	8 086.45 ± 123.75b	0.77 ± 0.01b	4.46 ± 0.12b
	10 g·L ⁻¹	76.85 ± 0.91ab	16.19 ± 3.40a	48 715.28 ± 603.74b	10 738.68 ± 456.68a	0.78 ± 0.01b	4.50 ± 0.13b
	20 g·L ⁻¹	85.82 ± 1.69a	26.69 ± 1.40a	61 527.78 ± 3 096.32a	11 410.79 ± 95.09a	0.83 ± 0.00a	5.51 ± 0.35ab
	30 g·L ⁻¹	74.25 ± 2.48b	25.46 ± 3.63a	45 208.33 ± 1 948.99bc	7 235.94 ± 259.57bc	0.82 ± 0.01a	6.45 ± 1.00ab
	40 g·L ⁻¹	75.56 ± 1.50b	24.06 ± 4.29a	43 194.44 ± 2 294.82bc	6 213.07 ± 387.98c	0.85 ± 0.00a	6.76 ± 0.20a
结实期 Fruiting	CK	82.82 ± 1.11a	45.59 ± 3.47b	57 361.11 ± 3 012.11c	20 032.61 ± 879.60a	0.64 ± 0.01ab	2.77 ± 0.05ab
	10 g·L ⁻¹	91.18 ± 0.86a	32.38 ± 5.77b	65 833.33 ± 4 068.28bc	24 277.90 ± 1 780.39a	0.63 ± 0.00b	2.68 ± 0.03b
	20 g·L ⁻¹	92.77 ± 3.09a	36.45 ± 1.46b	69 739.58 ± 1 669.65ab	25 238.22 ± 1 197.23a	0.62 ± 0.01b	2.62 ± 0.07b
	30 g·L ⁻¹	88.55 ± 6.42a	43.93 ± 1.38b	70 572.92 ± 800.06ab	25 869.03 ± 1 368.25a	0.64 ± 0.02ab	2.79 ± 0.15ab
	40 g·L ⁻¹	92.99 ± 1.39a	84.01 ± 8.15a	78 107.64 ± 1 576.30a	24 584.67 ± 2 009.68a	0.69 ± 0.02a	3.18 ± 0.16a

同列不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$); 下表同。

Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among the different treatments in the same periods at the 0.05 level; this is applicable for the following tables as well.

最大; 在成苗期则随灌溉水盐度增加而逐渐增加。

咸水灌溉对花蕾期盐地碱蓬的生长, 整体呈现出低浓度促进, 高浓度抑制的趋势(表2)。株高、地上部生物量(包括鲜重和干重)均随灌溉水盐度的增加表现出先升高后降低的趋势, 并在 20 g·L⁻¹ 灌溉处理下达到最大。20 g·L⁻¹ 处理下, 盐地碱蓬的株高、地上部鲜重和干重分别高于其他处理 11.7%~22.2%、26.3%~64.5%、6.3%~83.7%。

咸水灌溉对结实期盐地碱蓬的生长表现出一定的促进作用(表2)。株高和地上部鲜重均以 40 g·L⁻¹ 处理最大, 分别高于其他处理 0.2%~12.3% 和 10.7%~36.2%; 各处理的干物质生物量以 30 g·L⁻¹

最大, 高于其他处理 2.5%~29.1%, 但各处理间未表现出显著差异($P < 0.05$)。

2.3 盐地碱蓬在各生育期的生物量累积规律

播种一出苗期, 盐地碱蓬株高增长量占整个生育期的 10.9%~23.7%, 且随灌溉水盐度的升高显著降低($P < 0.05$)(表3)。出苗期一成苗期, 株高净增长量随灌溉水盐度增加先降低再升高后降低, 占整个生育期的 18.1%~37.7%, 以 10 g·L⁻¹ 处理的占比最高。成苗期一花蕾期, 株高累积量占整个生育期的 26.0%~53.2%, 且在 20 g·L⁻¹ 处理下占比最大。花蕾期一结实期, 株高净增长占整个生育期增长的 2.6%~19.2%; 40 g·L⁻¹ 处理的占比最高, 但仅与 20

$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理表现出显著差异 ($P < 0.05$)。

播种—成苗期, 地上部鲜重净积累量随灌溉水盐度的增加呈降低趋势, 播种—出苗期和出苗—成苗期分别占整个生育期的 4.9%~15.6% 和 23.8%~53.5% (表 3)。成苗期—花蕾期, 地上部鲜重净积累占 -4.2%~42.2%, 并随灌溉水盐度先升高后降低, 在 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下达到最大。这一时期, 对照处理的地上部鲜重净积累量为负。主要原因在于, 这一时期的对照小区被菟丝子寄生, 影响了生物量的累积, 甚至造成部分植株死亡。花蕾期—结实期, 地上部鲜重净积累量占总积累量的 9.4%~47.7%, 以 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理占比最高。

播种—成苗期, 干重净积累量随灌溉水盐度的增加呈降低趋势, 播种—出苗期和出苗—成苗期分别占整个生育期的 1.9%~4.8% 和 6.9%~18.6% (表 3)。成苗期到结实期, 干重净积累量均随灌溉水盐度的增加表现出先增加后降低的趋势。成苗期—花蕾期占整个生育期的 15.4%~29.9%; 干重净积累量以 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理最高, 与 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的差异不显著, 但均

显著高于其他处理; 对照处理最低, 低于其他处理 31.9%~56.6%。花蕾期—结实期, 干重净积累量占整个生育期的 52.4%~74.7%; 以 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理占比最高; 这一时期, 干重净积累量在 $30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下达到最高, 高于其他处理 1.4%~59.0%。

2.4 咸水灌溉下盐地碱蓬的盐离子积累量

盐地碱蓬可从根区土壤吸收盐分离子并聚积在 地上部组织内。本研究中, 随灌溉水盐度的增加, Cl^- 和 Na^+ 浓度显著增加 ($P < 0.05$), 并最终稳定在一定范围内 (表 4)。而 SO_4^{2-} 的浓度则随灌溉水盐度降低, 但并未表现出显著差异。通过刈割地上部, 可将植物组织内的盐离子移除土壤, 从而达到改良盐碱地的效果。因此, 盐离子积累量是衡量盐生植物改良盐碱地的重要指标。本研究中, 在离子浓度和干物质产量的共同影响下, 各处理的离子积累量均表现为 $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-}$ 。本研究中, 灌溉咸水为 NaCl 溶液, 且矿化度较高。因此, 根据灌溉定额计算可得, 咸水灌溉引入的 Cl^- 和 Na^+ 总量大于盐地碱蓬地上部的积累量。

表 3 盐地碱蓬各生育期生物量积累量和比例
Table 3 Biomass accumulation and proportion of *Suaeda salsa*

指标 Index	处理 Treatment	播种—出苗期 Sowing-emergence		出苗—成苗期 Emergence-seeding		成苗—花蕾期 Seeding-budding		花蕾—结实期 Budding-fruiting	
		净积累量 Accumulation/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	比例 Proportion/ %	净积累量 Accumulation/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	比例 Proportion/ %	净积累量 Accumulation/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	比例 Proportion/ %	净积累量 Accumulation/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	比例 Proportion/ %
株高 Plant height/ cm	CK	19.65 ± 1.39a	23.73	31.26 ± 0.95a	37.74	21.51 ± 3.53c	25.97	11.83 ± 2.06ab	14.28
	10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	16.50 ± 0.51b	18.10	29.61 ± 2.85a	32.47	27.07 ± 7.51bc	29.69	12.28 ± 0.78a	13.47
	20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	16.42 ± 0.32b	17.70	16.89 ± 1.65b	18.21	49.39 ± 1.51a	53.24	2.40 ± 1.76b	2.59
	30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	11.88 ± 0.35c	13.42	19.06 ± 0.23b	21.52	43.38 ± 1.26ab	48.99	9.83 ± 3.94ab	11.10
	40 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	10.15 ± 0.22c	10.92	16.83 ± 0.66b	18.10	46.71 ± 1.65a	50.23	17.86 ± 0.88a	19.21
鲜重 Fresh weight/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	CK	8 960.99 ± 169.61a	15.62	30 690.23 ± 285.78a	53.50	-2 405.21 ± 2 138.05c	-4.19	13 333.33 ± 7 661.16b	23.24
	10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	8 861.28 ± 199.97a	13.46	28 092.32 ± 1 652.98ab	42.67	12 415.00 ± 187.74b	18.86	16 527.78 ± 3 816.29b	25.11
	20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	7 993.44 ± 175.48b	11.46	24 121.14 ± 1 325.81b	34.59	29 413.19 ± 2 407.24a	42.18	6 579.86 ± 2 351.80b	9.43
	30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	5 244.67 ± 125.43c	7.43	16 785.24 ± 110.94c	23.78	23 478.47 ± 1 835.23a	33.27	23 402.78 ± 3 737.76ab	33.16
	40 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	3 840.59 ± 184.71d	4.92	16 101.00 ± 1 673.87c	20.61	21 309.34 ± 2 188.03a	27.28	37 291.67 ± 2 330.62a	47.74
干重 Dry weight/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	CK	954.31 ± 43.02a	4.76	3 723.76 ± 227.29a	18.59	3 270.86 ± 206.23c	16.33	11 721.75 ± 1 039.32b	58.51
	10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	927.35 ± 11.75a	3.82	3 437.45 ± 102.47ab	14.16	6 367.19 ± 491.72a	26.23	12 711.37 ± 1 247.83ab	52.36
	20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	858.07 ± 13.28a	3.40	2 880.67 ± 242.53b	11.41	7 537.99 ± 56.28a	29.87	13 827.43 ± 1 222.62ab	54.79
	30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	566.10 ± 1.37b	2.19	1 828.29 ± 49.86c	7.07	4 802.29 ± 232.64b	18.56	18 633.09 ± 1 352.51a	72.03
	40 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	468.05 ± 40.79b	1.90	1 689.25 ± 179.82c	6.87	3 788.07 ± 224.60bc	15.41	18 371.60 ± 2 054.01a	74.73

表4 盐地碱蓬离子浓度及累积量
Table 4 Ion concentration and accumulation in *Suaeda salsa*

处理 Treatment	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Na ⁺	
	浓度 Concentration/ (g·kg ⁻¹)	累积量 Accumulation/ (kg·hm ⁻²)	浓度 Concentration/ (g·kg ⁻¹)	累积量 Accumulation/ (kg·hm ⁻²)	浓度 Concentration/ (g·kg ⁻¹)	累积量 Accumulation/ (kg·hm ⁻²)
CK	68.40 ± 2.96b	1 370.23	29.44 ± 3.05a	589.76	36.47 ± 2.52b	730.59
10 g·L ⁻¹	97.74 ± 3.76ab	2 372.92	27.45 ± 2.20a	666.43	62.39 ± 1.93a	1 514.70
20 g·L ⁻¹	116.25 ± 9.22a	2 933.94	24.19 ± 1.78a	610.51	79.02 ± 5.35a	1 994.32
30 g·L ⁻¹	111.60 ± 9.66a	2 886.98	23.26 ± 0.32a	601.71	73.24 ± 9.40a	1 894.65
40 g·L ⁻¹	118.55 ± 7.86a	2 914.51	24.49 ± 2.11a	602.08	82.58 ± 6.72a	2 030.20

3 讨论

3.1 盐地碱蓬各生育期的耐盐性不同

本研究中,盐地碱蓬能够在 40 g·L⁻¹ 的 NaCl 溶液灌溉下正常萌发,并忍受高盐环境继续生长直至完成生活史。一般认为,NaCl 单盐对盐地碱蓬的毒害作用强于复合盐。证明盐地碱蓬的耐盐性极强,可用于干旱半干旱地区重度盐渍化土壤的植被恢复。一般而言,盐生植物在幼苗生长阶段较萌发阶段对盐胁迫较为敏感^[21]。植物建立的早期阶段,包括幼苗的出苗和生长,非常容易受到环境变化的影响,决定着幼苗能否存活以及此后群落的建成^[2,22]。与之前的研究结果一致,本研究中盐地碱蓬的耐盐性也随生育进程逐渐增强。因此,萌发期和幼苗生长阶段是盐地碱蓬对盐胁迫最为敏感的时期。可以选择成苗率作为评价盐地碱蓬耐盐性的指标。同时,在未来的研究或实践中,重点关注盐地碱蓬幼苗的生长状况,可较快判断种群水平上,盐地碱蓬能否成功建植。

播种到出苗期,盐地碱蓬的生物量随灌溉水盐度升高而降低。各处理的单位面积生物量表现出显著差异,而 20 g·L⁻¹ 及以下咸水灌溉处理下,单株生物量未观察到显著差异。部分原因可能在于植株个体间的差异积累到单位面积生物量上,才体现出显著的变化。也可能是灌溉咸水降低了盐地碱蓬的萌发率和出苗率,从而影响了单位面积生物量。这一现象在植物的萌发阶段较为普遍,如 *Cakile maritima*^[21] 和 *Chenopodium quinoa*^[23]。王茜等^[24] 研究表明,盐地碱蓬种子发芽率随盐碱胁迫作用的增强而降低,且这一规律与所选基质无关。

3.2 种植盐地碱蓬的生态价值

盐生植物可作为生物盐泵,将土壤中的盐分离子吸收并聚积在地上部位。通过刈割可将这部分盐离子带出土壤,从而改良盐碱地。盐地碱蓬的主要吸收离子为 Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻,更适宜于硫酸盐和氯化物-硫酸盐土壤的改良^[25]。本研究中,随灌溉水盐度的增加,植株内离子浓度逐渐上升并逐渐趋于恒定,说明盐生植物能调节矿物质的吸收。因此,盐地碱蓬的干物质产量是影响植株吸盐量的重要因素,也是衡量植株生长、生理状况的重要指标之一。

花蕾期-结实期是盐地碱蓬干物质积累的主要时期。这一时期,各处理的累积量均超过整个生育期的 50%,且高浓度的咸水灌溉显著促进了盐地碱蓬干物质积累,30、40 g·L⁻¹ 处理下,盐地碱蓬分别积累了整个生育期总干物质累积量的 72.0% 和 74.7%。说明这一时期,植株需要消耗更多的养分来维持生长,在此阶段前可增加水肥投入,可保证植株的长势和产量,增加组织内盐离子累积量,从而带走更多盐分。

为研究极端条件下盐地碱蓬的生长状况,本研究的灌溉水盐度较高,盐地碱蓬的离子累积量远低于灌溉引入的离子量。但盐地碱蓬能在重度盐渍化环境下成功定植,一方面可为碱荒地提供稳定的植被覆盖,为后续生态系统恢复提供条件。另一方面,刈割带走的盐分仅占土壤脱盐量的极小部分^[25],盐生植物生长的改良效果主要源于根系生长对土壤理化性质的影响。盐生植物种植后,根系散布可改善土壤总孔隙度和毛管孔隙度^[26],改善土壤团聚体^[27],促进根区盐离子向下淋洗。同时,盐生植物还能通过根系分泌物、根际微生物等改善土壤养分

和肥力水平^[28-29]。因此, 尽管不能恢复土壤使其适宜非盐生植物生长, 但种植盐地碱蓬可带来土壤环境的后续改善, 因此有利于重度盐渍化地区的植被重建和生态恢复。

3.3 咸水灌溉对盐地碱蓬生长发育动态的影响

盐地碱蓬的生育期主要受田间气候的影响, 与播种时间关系不大^[30]。盐地碱蓬种子萌发的最适温度为 20~35 °C, 且萌发速度随温度升高而加快^[31]。在北疆地区, 盐地碱蓬的适播期较长。本研究在 6 月中旬播种, 播种较晚, 种子萌发较快, 所有处理在 1 周内均已出苗。试验期间可观察到, 受组织内甜菜红素的影响^[32], 所有处理的嫩苗均为全株红色, 新生真叶为绿色。随着盐地碱蓬的生长, 植株逐渐转为绿色。到开花期, 植株开始逐渐变红。花蕾期后, 盐地碱蓬高度较为整齐, 中下部分枝少, 上部紧凑, 且整株呈现紫红色, 具有极强的观赏价值。目前, 盐地碱蓬已被广泛应用于湿地景观的恢复及沿海红海滩的保护与修复^[33-34]。

播种后到开花前这一时段是盐地碱蓬生长的最佳时节, 植株长高、生物量快速累积均发生这一时期。花蕾期后, 盐地碱蓬株高和生物量的增长速率快速下降。原因可能在于花蕾期之前, 盐地碱蓬的生长以营养生长为主, 之后则转为生殖生长和营养生长并存。植物生殖生长初期, 同化作用的产物和无机营养同时输入营养体和生殖器官以保证开花结果^[35], 从而使得营养生长放缓。

本研究中, 不同处理的盐地碱蓬生长动态并不是同步的。与对照相比, 高盐度咸水灌溉下, 植株迅速拔高并积累干物质的时期延长了近一个月。原因可能在于以下两种途径。一方面, 盐处理推迟了盐地碱蓬的生殖生长, 从而一定程度上促进了其营养生长。与本研究结果类似, 海水灌溉可延长冰菜 (*Mesembryanthemum crystallinum*) 的生长季; 与对照相比, 高盐处理的营养生长阶段延长了近一个月^[36]。

另一方面, 盐处理提高了盐地碱蓬的耐寒性。据新疆维吾尔自治区气象局报道, 9 月下旬开始, 克拉玛依市发布数次霜降预警; 11 月初, 受西西伯利亚强冷空气影响, 出现了一场寒潮天气, 最低气温达近 40 年同期低气温的极值。植物在盐、寒等逆境条件下受害, 表面均表现为植物体内外渗透压变化、离子吸收不均衡或细胞伤害等^[37]。因此, 植物对盐胁迫和冷(寒)胁迫有着类似的适应机制。高盐度咸水灌溉下, 盐地碱蓬组织内离子浓度增加, 冰点降低, 从而抑制了气候条件对盐地碱蓬生长的影响。这与 Cheng 等^[38] 研究结果一致, 在低照度条件下, 盐处理提高了盐地碱蓬的抗寒性。其他植物中也有类似发现, 曾韶西和李美茹^[39] 研究指出, 盐预处理可诱导水稻 (*Oryza sativa*) 幼苗抗寒性的提高。

植物长期进化, 在其生长习性、结构、生理生化等方面形成了对逆境的各种适应策略^[40]。不同物种对外界环境因素的响应表现不同, 物种生长季延长、不变和缩短都有可能^[41]。目前已明确至少存在 6 种调控开花时间的信号途径, 其中 3 种与外界环境相关^[42]。盐胁迫对开花时间调控的具体途径尚不清楚, 仍有待于进一步研究。

4 结论

本研究中, 盐地碱蓬在 40 g·L⁻¹ 的咸水灌溉下仍能正常萌发并完成生活史, 说明盐地碱蓬具有较强的耐盐性, 可用于干旱半干旱地区重度盐碱荒地的植被重建和景观建设。田间条件下, 影响其种群建立的咸水灌溉阈值仍有待进一步研究。同时, 其耐盐性随生育进程逐渐增强, 种子萌发和出苗阶段对盐分最敏感, 是决定种群能否建立的关键时期。花蕾—结实期是盐地碱蓬干物质累积的主要时期, 在这一时期前增加水肥投入可保证植株地上部的长势和产量, 从而增加其吸盐量以提升盐渍土改良效果。研究观察到盐处理有延迟盐地碱蓬营养生长的趋势, 具体途径有待于进一步研究。

参考文献 References:

- [1] FAO. Global map of salt-affected soil: GSASmap v1.0. <https://www.fao.org/3/cb7247en/cb7247en.pdf>
- [2] 刘金萍, 高奔, 李欣, 宋杰, 范海, 王宝山, 赵可夫. 盐旱互作对不同生境盐地碱蓬种子萌发和幼苗生长的影响. 生态学报, 2010, 30(20): 5485-5490.

- LIU J P, GAO B, LI X, SONG J, FAN H, WANG B S, ZHAO K F. The effects of salinity and drought interaction on seed germination and seeding growth of *Suaeda salsa* L. from different habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5485-5490.
- [3] HESSINI K, JEDDI K, SHAER H M E, SMAOUI A, SALEM H B, SIDDIQUE K H M. Potential of herbaceous vegetation as animal feed in semi-arid Mediterranean saline environments: The case for Tunisia. *Agronomy Journal*, 2020, 112(4): 2445-2455.
- [4] 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. 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. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(10): 111-117.
- [5] 景鹏成, 王树林, 陈乙实, 鲁为华, 马春晖. 耐盐牧草对南疆地区盐渍土的适应和改良研究. 草业学报, 2017, 26(10): 56-63.
- JING P C, WANG S L, CHEN Y S, LU W H, MA C H. Adaptation of salt-tolerant forage grasses to saline soil and their ability to improve saline soil utilization in southern Xinjiang region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(10): 56-63.
- [6] 刘星宏, 张青青, 徐海量, 张鹏, 张广鹏, 李宏. 北疆盐碱地植物群落空间分布及物种多样性. 生态学报, 2021, 41(4): 1501-1513.
- LIU X H, ZHANG Q Q, XU H L, ZHANG P, ZHANG G P, LI H. Spatial distribution and species diversity of saline-alkali plant communities in northern Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1501-1513.
- [7] 邓铭江, 李湘权, 龙爱华, 章毅, 汪党献. 支撑新疆经济社会跨越式发展的水资源供需结构调控分析. 干旱区地理, 2011, 34(3): 379-390.
- DENG M J, LI X Q, LONG A H, ZHANG Y, WANG D X. Regulation of supply and demand structure of the water resources and support economic and social leap-forward development of protection measures. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 379-390.
- [8] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
- WANG J L, HUANG X J, ZHONG T Y, CHEN Z G. Review on sustainable utilization of salt-affected land. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 673-684.
- [9] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70-75.
- MA Z S, TAN J L, WEI T. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 70-75.
- [10] SONG J, WANG B. Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model. *Annals of Botany*, 2015(3): 541-553.
- [11] SHAYGAN M, MULLIGAN D, BAUMGARTL T. The potential of three halophytes (*Tecticornia pergranulata*, *Sclerolaena longicuspis*, and *Frankenia serpyllifolia*) for the rehabilitation of brine-affected soils. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 2002-2014.
- [12] CONGJUAN L, RAN L, WANG S J, SUN Y Q, ZHANG H, GAO J, DANG Y X, ZHANG L L. Growth and sustainability of *Suaeda salsa* in the Lop Nur, China. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(3): 429-440.
- [13] ZHANG X J, YAO Y, LI X T, ZHANG L Y, FAN S J. Transcriptomic analysis identifies novel genes and pathways for salt stress responses in *Suaeda salsa* leaves. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 4236.
- [14] YU Y, ZHANG Y, ZHAO N, GUO J, XU, W G, MA M Y, LI X X. Remediation of crude oil-polluted soil by the bacterial rhizosphere community of *suaeda salsa* revealed by 16s rRNA genes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1471.
- [15] SHANG C, WANG L, TIAN C Y, SONG J. Heavy metal tolerance and potential for remediation of heavy metal-contaminated saline soils for the euhalophyte *Suaeda salsa*. *Plant Signaling & Behavior*, 2020, 15(11): e1805902-e1805910.
- [16] 赵振勇, 李中邵, 张福海, 张科, 王雷, 田长彦. 盐生植物种植对克拉玛依农业开发区盐分平衡的影响. 水土保持通报, 2013, 33(4): 211-215.
- ZHAO Z Y, LI Z S, ZHANG F H, ZHANG K, WANG L, TIAN C Y. Impacts of halophytes planting on salt balance in agricultural development region of Karamay city. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4): 211-215.
- [17] 王旭, 田长彦, 赵振勇, 张科, 李艳红. 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. 干旱区

- 地理, 2020, 43(1): 211-217.
- WANG X, TIAN C Y, ZHAO Z Y, ZHANG K, LI Y H. Effects of different planting years of *Suaeda salsa* on the soil ions distribution in saline-sodic soil under drip irrigation. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 211-217.
- [18] 杨策, 陈环宇, 李劲松, 田宇, 封晓辉, 刘小京, 郭凯. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(10): 1578-1586.
- YANG C, CHEN H Y, LI J S, TIAN Y, FENG X H, LIU X J, GUO K. Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline-alkaline land. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10): 1578-1586.
- [19] 赵振勇, 张科, 王雷, 王平, 田长彦. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1420-1425.
- ZHAO Z Y, ZHANG K, WANG L, WANG P, TIAN C Y. Desalination effect of halophytes in heavily salinized soil of Karamay, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1420-1425.
- [20] 乔木, 周生斌, 卢磊, 闫俊杰, 李和平. 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. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 604-613.
- QIAO M, ZHOU S B, LU L, YAN J J, LI H P. Temporal and spatial changes of soil salinization and improved countermeasures of Tarim Basin irrigation district in recent 25 a. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 604-613.
- [21] DEBEZ A, BEN HAMED K, GRIGNON C, ABDELLY C. Salinity effects on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritima*. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 179-189.
- [22] AN Y, GAO Y, ZHANG Y, TONG S Z, LIU X H. Early establishment of *Suaeda salsa* population as affected by soil moisture and salinity: Implications for pioneer species introduction in saline-sodic wetlands in Songnen Plain, China. *Ecological Indicators*, 2019, 107.
- [23] PANUCCIO M R, JACOBSEN S E, AKHTAR S S, MUSCOLO A. Effect of saline water on seed germination and early seedling growth of the halophyte quinoa. *AoB Plants*, 2014, 6: 3-8.
- [24] 王茜, 校亮, 唐翔宇, 徐青, 衣华鹏, 田海凤. 盐碱胁迫和氮素供给对盐地碱蓬种子发芽与幼苗生长的影响. *草业学报*, 2015, 24(9): 216-222.
- WANG Q, XIAO L, TANG X Y, XU Q, YI H P, TIAN H F. Effects of saline alkali stress and nitrogen supply on germination and growth of *Suaeda salsa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(9): 216-222.
- [25] 王宁, 赵振勇, 张心怡, 刘四海, 蒋磊, 宫江平, 荆为民. 几种藜科盐生植物吸盐能力及生态学意义. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(6): 1104-1112.
- WANG N, ZHAO Z Y, ZHANG X Y, LIU S H, JIANG L, GONG J P, JING W M. Salt absorption capacity and ecological significance of selected Chenopodiaceae halophytes. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 1104-1112.
- [26] WANG X, ZHANG F, ZHANG B, XU X. Halophyte planting improves saline-alkali soil and brings changes in physical and chemical properties and soil microbial communities. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, 30(5): 4767-4781.
- [27] MAO R, ZHANG X H, MENG H N. Effect of *Suaeda salsa* on soil aggregate-associated organic carbon and nitrogen in tidal salt marshes in the Liaohe Delta, China. *Wetlands*, 2014, 34(1): 189-195.
- [28] RATHORE A P, CHAUDHARY D R, JHA B. Seasonal patterns of microbial community structure and enzyme activities in coastal saline soils of perennial halophytes. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(5): 1779-1790.
- [29] CHAUDHARY D R, KIM J, KANG H. Influences of different halophyte vegetation on soil microbial community at temperate salt marsh. *Microbial Ecology*, 2018, 75(3): 729-738.
- [30] 潘书轩, 孙良斌, 张少民, 白灯莎·买买提艾力, 贾洪涛, 冯固. 盐地碱蓬在北疆的生育规律及其对盐渍土改良效果. *西北农业学报*, 2014, 23(12): 201-206.
- PAN S X, SUN L B, ZHANG S M, Baidengsha·Maimaitiaili, JIA H T, FENG G. Growth regularity of *Suaeda salsa* L. and its effects on salt soil improvement in the northern Xinjiang. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(12): 201-206.
- [31] 管博, 栗云召, 于君宝, 陆兆华. 不同温度及盐碱环境下盐地碱蓬的萌发策略. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1411-1416.
- GUAN B, SU Y Z, YU J B, LU Z H. Germination strategies of *Suaeda salsa* at different temperature and under different salt stress.

- Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1411-1416.
- [32] WANG C Q, ZHAO J Q, CHEN M, WANG B S. Identification of betacyanin and effects of environmental factors on its accumulation in halophyte *Suaeda salsa*. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(2): 195-201.
- [33] 梁继业, 赵振勇, 刘畅, 左忠, 姜黎. 真盐生植物盐地碱蓬资源特征与利用开发研究进展. 中国野生植物资源, 2022, 41(2): 30-37.
- LIANG J Y, ZHAO Z Y, LIU C, ZUO Z, JIANG L. Research progress on characteristics, utilization and development of euhalophyte *Suaeda salsa* resources. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(2): 30-37.
- [34] 曹晨晨, 苏芳莉, 李海福, 魏超, 孙迪. 辽河口盐地碱蓬湿地景观破碎化及驱动机制. 生态学报, 2022, 42(2): 581-589.
- CAO C C, SUN F L, LI F H, WEI C, SUN D. Landscape fragmentation and driving mechanism of *Suaeda salsa* wetland in Liaohe Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 581-589.
- [35] 王丽云, 刘小金, 徐大平, 杨曾奖, 张宁南, 洪舟, 钟文斌, 袁雅琪. 生长调节剂对降香黄檀营养生长与生殖生长的影响. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 86-90.
- WANG L Y, LIU X J, XU D P, YANG Z J, ZHANG N N, HONG Z, ZHONG W B, YUAN Y Q. Effects of plant growth regulators on vegetative and reproductive growth of *Dalbergia odorifera*. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(5): 86-90.
- [36] ATZORI G, DE VOS A C, VAN RIJSELBERGHE M, VIGNOLINI P, ROZEMA J, VAN BODEGOM P M. Effects of increased seawater salinity irrigation on growth and quality of the edible halophyte *Mesembryanthemum crystallinum* L. under field conditions. [Agricultural Water Management](#), 2017, 187: 37-46.
- [37] 周小江, 马湘君, 张久明, 李闯, 田黎. 两株海洋极端生境微生物防治番茄灰霉及促进抗盐抗寒作用研究. 中国生物防治学报, 2016, 32(2): 244-250.
- ZHOU X J, MA X J, ZHANG J M, LI C, TIAN L. Effects of two marine microorganisms on tomato leaf mold and their resistance to salt and cold. Chinese Journal of Biological Control, 2016, 32(2): 244-250.
- [38] CHENG S, YANG Z, WANG M J, SONG J, SUI N, FAN H. Salinity improves chilling resistance in *Suaeda salsa*. [Acta Physiologiae Plantarum](#), 2014, 36: 1823-1830.
- [39] 曾韶西, 李美茹. 冷和盐预处理提高水稻幼苗抗寒性期间细胞Ca²⁺-ATP酶活性的变化. 植物学报, 1999, 41(2): 156-160.
- ZENG S X, LI M R. Changes of Ca²⁺-atpase activities in cell of rice seedlings during the enhancement of chilling resistance induced by cold and salt pretreatment. Journal of Integrative Plant Biology, 1999, 41(2): 156-160.
- [40] 梁慧敏, 夏阳, 王大明. 植物抗寒冻、抗旱、耐盐基因工程研究进展. 草业学报, 2003, 12(3): 1-7.
- LIANG H M, XIA Y, WANG T M. Progress on cold, drought and salt resistance gene engineering in plants. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(3): 1-7.
- [41] KRAMER K, LEINONEN I, LOUSTAU D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: An overview. [International Journal of Biometeorology](#), 2000, 44(2): 67-75.
- [42] 张敏, 朱佳旭, 王磊, 徐妙云. 逆境诱导植物开花的研究进展. 生物工程学报, 2016, 32(10): 1301-1308.
- ZHANG M, ZHU J X, WANG L, XU M Y. Progress of stress-induced flowering in plants. Chinese Journal of Biotechnology, 2016, 32(10): 1301-1308.

(责任编辑 魏晓燕)