

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202110041

赵宏亮, 倪细炉, 侯晖, 等. 长苞香蒲对人工盐碱湿地 Na^+ 和 K^+ 的吸收与转运特征 [J]. 广西植物, 2022, 42(7): 1150–1159.ZHAO HL, NI XL, HOU H, et al. Characteristics of Na^+ and K^+ absorption and transport of *Typha domingensis* in artificial saline wetlands [J]. *Guihaia*, 2022, 42(7): 1150–1159.

长苞香蒲对人工盐碱湿地 Na^+ 和 K^+ 的吸收与转运特征

赵宏亮^{1,2}, 倪细炉^{2,3*}, 侯晖², 谢沁蕊², 程昊^{1,2}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 3. 宁夏贺兰山森林生态系统国家定位观测研究站, 银川 750021)

摘要: 为揭示长苞香蒲 (*Typha domingensis*) 对盐生湿地生态系统中 Na^+ 和 K^+ 的吸收与转运特征, 探讨长苞香蒲对盐生湿地的生态修复效果, 该研究采用人工模拟盐生湿地的方法, 设置 CK (对照)、T1 (浇灌 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐水)、T2 (浇灌 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐水) 及 T3 (浇灌 300 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐水) 4 种不同盐浓度的人工湿地生态系统, 并分别于 5 月 5 日 (开始盐胁迫处理, S0)、5 月 30 日 (S1)、6 月 30 日 (S2) 和 7 月 30 日 (S3) 测量其株高和干重、植株地上与地下部分 Na^+ 和 K^+ 的含量以及底泥和水体中 Na^+ 和 K^+ 的含量以分析长苞香蒲对盐碱湿地的脱盐作用。结果表明: (1) 各处理的长苞香蒲的株高和干重随着处理时间的延长呈增加趋势, 但与 CK 相比, 各处理生长量随盐浓度升高出现下降趋势。(2) 高浓度盐处理 (T3) 使长苞香蒲的地上部分和地下部分的 Na^+ 分别增加了 2.56 倍和 1.75 倍, 地上部分及地下部分的 K^+ 含量分别降低了 34.1% 和 35.8%。(3) 地上部分和地下部分的 Na^+/K^+ 在处理和对照间均随处理时间延长呈增加的趋势, 选择性转移系数与 Na^+ 和 K^+ 转移系数总体随处理时间延长呈降低的趋势。(4) 在 S0 至 S3 期间, 长苞香蒲对处理组土壤 Na^+ 和 K^+ 的去除率为 10.6%~15.8% 和 2.3%~12.8%, 对处理组水体 Na^+ 和 K^+ 的去除率为 55.0%~65.1% 和 1.6%~67.0%。综上所述, 盐胁迫能影响长苞香蒲体内的 Na^+ 和 K^+ 平衡, 长苞香蒲能够有效地吸收 Na^+ , 并在一定盐浓度下能通过 K^+ 的交换将 Na^+ 从根部吸收转运至地上部分。因此, 长苞香蒲可通过离子转运的形式完成对盐离子的吸收, 可作为盐碱湿地生态修复的优良植物。

关键词: 长苞香蒲, Na^+ 和 K^+ 含量, 脱盐作用, 转运特征, 植物修复

中图分类号: Q945; X144 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)07-1150-10

Characteristics of Na^+ and K^+ absorption and transport of *Typha domingensis* in artificial saline wetlands

ZHAO Hongliang^{1,2}, NI Xilu^{2,3*}, HOU Hui², XIE Qinmi², CHENG Hao^{1,2}

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Helan Mountain Forest Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Yinchuan 750021, China)

收稿日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金 (31960038, 31660045); 宁夏重点研发项目 (2020BFG03006, 2021BEG02005); 宁夏自然科学基金 (2020AAC03107) [Supported by National Natural Science Foundation of China (31960038, 31660045); Ningxia Key Research and Development Project (2020BFG03006, 2021BEG02005); National Science Foundation of Ningxia (2020AAC03107)].

第一作者: 赵宏亮 (1996-), 硕士研究生, 研究方向为植物逆境生理生态, (E-mail) ldzhl@qq.com。

*通信作者: 倪细炉, 博士, 副研究员, 研究方向为植物逆境生理生态, (E-mail) nixilu@nxu.edu.cn。

Abstract: In order to reveal the characteristics of both Na^+ and K^+ absorption and transport in *Typha domingensis* distribution in a wetland system, and to investigate the remediation effect of *T. domingensis* planting in the saline wetland, artificial saline wetlands with four different salinity concentrations were adopted in this experiment, namely CK (irrigation with tap water), T1 (irrigation with $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ saline water), T2 (irrigation with $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ saline water), and T3 (irrigation with $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ saline water), the height, dry weight, contents of Na^+ and K^+ in aboveground part and belowground part of the seedlings, as well as contents of Na^+ and K^+ in the water body and sediment. The effects of wetland salinity on the balance of Na^+ and K^+ in *T. domingensis* and its Na^+ transport characteristics were analyzed via the variation in Na^+/K^+ and the former's Na^+/K^+ transfer factor under different treatments in different periods. The removal ratios of Na^+ and K^+ from soil and water body were calculated to analyze the desalination of wetlands by *T. domingensis*. The results were as follows: (1) The plant height and dry weight increase of *T. domingensis* in each treatment showed an increasing trend during the whole treatment stage, but the height of *T. domingensis* in different treatments were lower than that of CK. (2) The concentrations of Na^+ in the aboveground and underground parts of *T. domingensis* were 2.56 times and 1.75 times of the CK, respectively, and the concentrations of K^+ in the aboveground and belowground parts were decreased by 34.1% and 35.8%. (3) The value of Na^+/K^+ in the aboveground and underground parts showed an increasing trend during the whole experimental stage, and the selective transfer coefficient and the Na^+ and K^+ transfer coefficients generally showed a decreasing trend during the whole experimental stage. (4) The removal rates of Na^+ and K^+ in the soil of the treatment group by *T. domingensis* were 10.6%–15.8% and 2.3%–12.8%, the removal rates of Na^+ and K^+ in the water body of the treatment group were 55.0%–65.1% and 1.6%–67.0%. All the above results indicate that salt stress can affect the balance of Na^+ and K^+ in *T. domingensis*. Na^+ can be effectively absorbed by *T. domingensis*, and Na^+ can be transferred from the belowground part to the aboveground part by exchange with K^+ in the plant. Therefore, the salt can be absorbed and transferred from the wetland system into the organ of *T. domingensis* by the mean of ion transport, which can be used as an excellent plant for saline wetland restoration.

Key words: *Typha domingensis*, Na^+ and K^+ contents, desalination, transport characteristics, plant remediation

盐碱土是地球上广泛分布的非地带性土壤类型,是一种重要的土地资源,同时也是世界性的低产土壤(邱并生,2014)。土壤中积盐过多,影响植物的气孔关闭,伤害植物组织,导致植物根系吸收水分、养分非常困难,容易引发生理干旱,滞缓营养吸收;同时过多的盐分使土壤物理性质恶化、肥力降低(翁亚伟等,2017)。土壤盐渍化不仅对植物的生长不利,给农牧业生产造成巨大的损失,还对区域生态环境构成严重的威胁(Sertel et al., 2017)。因此,盐碱化土地的治理和利用已成为我国目前亟待解决的问题。

宁夏位于我国西北内陆高原,属大陆性气候,具有干旱少雨、气温日差大、风大沙多等特点。由于气候和土壤状况的限制,黄河水长期漫灌,加之人类不合理的土壤耕作方式,宁夏引黄灌区土壤盐碱化面积不断加重,其中以银北地区最为严重,部分土地已经不能进行正常的农业生产(方媛,2012),银北地区盐碱土主要以低洼盐碱土为主,地下水位偏高。种植耐盐水生植物,可提高土壤

有机质含量,改善土壤局部环境,提高土壤肥力,从而抑制土壤盐分的积累(Radhakrishnan & Baek, 2017)。

盐生植物是指能在高盐(高碱性)生境中生存的一类具有较强抗盐(抗碱)能力的植物(孙兆军,2017)。我国盐碱地量大面广,且具有广泛的盐生植物资源,为盐碱地生态修复提供了物质基础。盐生植物具有聚盐泌盐的特性(弋良朋和王祖伟,2017),其根系的生长延伸能改善土壤的通透性(肖克飏,2013),盐碱地改良时可以通过水分淋洗滤去 Na^+ 和 K^+ ,或者植物在生长过程中通过吸收土壤和水体中 Na^+ 和 K^+ ,然后通过收获而去除土壤和水体中的盐碱;同时植物的蒸腾作用可以降低水位,从而抑制底层土壤返盐。由于生物措施具有投入成本低、稳定性和可持续性好等特点(史文娟等,2015),在盐碱地治理中应用较多,前景十分广阔。

长苞香蒲(*Typha domingensis*)为多年生挺水植物(褚润等,2017),喜光照,耐盐性好,经济价值

和观赏价值较高,目前对于长苞香蒲的研究主要集中在长苞香蒲对水体中微生物的吸收 (Shaukat et al., 2019) 和对水体的净化 (李龙山等, 2013; Anant et al., 2018; Sathe et al., 2019), 对碳捕获能力的评估及季节性碳输入的评估 (Afreen et al., 2019), 对土壤重金属的富集和转运 (严莉等, 2016), 而长苞香蒲对 Na^+ 和 K^+ 的吸收转运即对盐碱地的改良报道目前较少。本研究以长苞香蒲为对象在模拟人工盐碱湿地环境下, 测定不同处理不同时期植株体内的 Na^+ 和 K^+ 含量, 以及人工湿地中土壤及水体的 Na^+ 和 K^+ 含量变化, 拟解决以下科学问题: (1) 测定长苞香蒲对人工盐碱湿地的脱盐效果; (2) 探讨长苞香蒲对人工盐碱湿地中 Na^+ 和 K^+ 的吸收转运特征; (3) 揭示长苞香蒲耐盐机制, 从而为盐碱湿地的生物改良提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验点位于宁夏银川植物园内 ($106^{\circ} 10' 33.28'' \text{ E}$ 、 $38^{\circ} 25' 3.73'' \text{ N}$), 研究区属黄河中温带大陆性气候。基本气候特征是: 日照充足, 年平均气温 $9.5 \sim 11.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $45\% \sim 66\%$; 干旱少雨, 年平均降水量 $180 \sim 200 \text{ mm}$, 主要集中在夏季, 时间分配不均; 蒸发强烈, 平均蒸发量 $1\ 300 \sim 2\ 200 \text{ mm}$; 冬季寒冷, 夏季炎热。

1.2 试验设计

试验材料选用在宁夏地区广泛分布的湿地植物长苞香蒲, 试验用的长苞香蒲幼苗高约 80 cm 、鲜重约 55 g 。本试验采用桶栽试验, 栽培土壤采用沙壤土 (全盐量小于 0.2% 且过 2 mm 筛)。将植株分别移栽到带土的桶中 (桶高 85 cm , 上口直径 74 cm , 下口直径 52 cm , 土壤高度 40 cm), 每桶种植 4 株长苞香蒲, 共栽植 40 桶。本试验共设 4 个处理, (1) 对照, 30 L 普通自来水 (CK); (2) 浇灌 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐水 30 L (T1); (3) 浇灌 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐水 30 L (T2); (4) 浇灌 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐水 30 L (T3)。每个处理设置 3 次重复, 其余 4 桶也做相应处理, 用做备用材料。缓苗后第 3 周进行盐胁迫处理, 每周按时补水 1 次至 30 L (自来水的含盐量为 $550 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 土壤电导率为 $800 \sim 900 \text{ } \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, pH 为 $6.8 \sim 7.2$), 补水时每次间隔 1 h , 30 L 水分 5 次浇灌在桶中, 将桶置于四

周通风的带有透明塑料的大棚下, 防止自然降雨的影响。试验期间进行正常管护, 拔除杂草, 防止病虫害的侵扰, 每次测定时, 每个处理中随机取一桶, 共取 12 桶 48 株, S0 为刚种植的初始时期 (5 月 5 日), 5 月 30 日 (S1) 开始测定植物的株高和干重, 每月的 30 日测定 1 次, 至 7 月 30 日结束, 处理时期分别记为 S1、S2 和 S3。

1.3 试验方法

生物量的测定: 在 5—7 月每月 30 日将不同处理的长苞香蒲分地上部分和地下部分收割, 做好标记, 称量鲜重后置于 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青 15 min , 然后在 $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重, 称其干重, 计算各部分生物量。

株高的测定: 用钢卷尺于试验期间每月 30 日测定不同处理下的株高, 从土壤表面到最高点的距离记为株高, 保留 2 位小数。

地上、地下部分取样时是全株根系和地上部分生物量全部进行收集, 用蒸馏水冲洗干净, 分别烘干后, 用于测定相关的指标。

1.4 数据处理

用火焰分光光度计法 (Hajbageri et al., 1984) 分别测定长苞香蒲地上部分及地下部分、土壤、水体中的 Na^+ 与 K^+ 含量, 并进行以下指标的计算:

$$\text{长苞香蒲植株不同部位的钠钾比} (\text{Na}^+/\text{K}^+): \\ \text{Na}^+/\text{K}^+ = C_{\text{Na}^+}/C_{\text{K}^+} \quad (1)$$

不同植物或同一植物在不同盐胁迫下对盐分的转运特征不同, 其衡量标准为转移系数 (transfer factor, TF)。转移系数为某种离子在植物地上部分的浓度与相应离子在植物地下部分中浓度的比值, 其作为衡量植物体对特定离子吸收与转运能力的指标, 比值的大小与转运能力呈正相关。

$$TF = C_{\text{地上}}/C_{\text{地下}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{地上}}$ 为植物地上部分某离子浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $C_{\text{地下}}$ 为植物地下部分某离子浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

$$\text{离子去除率} (\%) = (1 - C_3/C_0) \times 100 \quad (3)$$

离子去除率可反映出后期底泥或水体中 Na^+ 与 K^+ 含量去除的百分率, 式中: C_3 为 Na^+ 或 K^+ 于 S3 时期在底泥或水体中的含量; C_0 为 Na^+ 或 K^+ 于 S0 时期 (S0 为栽植的初始时期) 在底泥或水体中的含量。

通过 IBM SPSS statistics 22.0 分析软件进行试验数据的统计计算,在进行方差分析之前,对所有数据进行了正态性及方差齐性检验,相关指标差异在 5%水平上的显著性通过 LSD 单因素方差分析进行检验,并用 Origin 2019 软件作图。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对长苞香蒲株高和干重的影响

如表 1 所示,长苞香蒲的株高和干重随着处理时间和盐浓度的增加均呈升高趋势,而其生长量随着盐浓度的增加呈现下降趋势,长苞香蒲植株虽受到不同程度的盐胁迫,但仍生长。与 CK 相比,各处理的地上干重、地下干重和株高整体上显著降低,尤其在 T3 浓度下降最显著。T3 盐浓度下,5 月、6 月及 7 月份长苞香蒲的地上干重较对照分别下降了 57.2%、46.9%、16.2%,地下干重较对照分别下降了 20.2%、30.7%、31.9%,株高分别下降了 9.9%、18.3%、15.0%,株高与地上干重和地下干重的变化相比相对较低。

2.2 NaCl 胁迫对长苞香蒲体内 Na⁺和 K⁺含量的影响

如图 1 所示,随着盐胁迫时间的延长,处理组长苞香蒲体内 Na⁺含量较对照显著升高 ($P < 0.05$),而 K⁺含量均较对照组显著降低 ($P < 0.05$);随着处理时长的增加,其对照组根部的 Na⁺含量缓慢降低,而其地上部分的 Na⁺含量表现为先升高后降低的趋势;同时,对照组长苞香蒲地上部分 K⁺含量持续降低,而其根部 K⁺含量逐渐升高。随着盐胁迫处理时间的延长,T1 处理组中长苞香蒲的根部和地上部分 Na⁺含量的变化趋势与对照组一致,而 T2 和 T3 处理组根部的 Na⁺含量呈降低趋势,其地上部分 Na⁺含量呈升高趋势;处理组长苞香蒲根部 K⁺含量均呈现为先升高后降低的趋势,地上部分 K⁺含量持续降低,说明随着盐胁迫的增强及胁迫时间的延长,Na⁺逐渐由长苞香蒲的根内转移至其地上部分,而 K⁺则向长苞香蒲的根部转运。

2.3 NaCl 胁迫对 Na⁺和 K⁺选择性运输的影响

由图 2 可知,随着盐胁迫时间的延长,长苞香蒲地上部分的钠钾比在处理和对照间均呈增加的趋势,但 S3 时期各处理间较 S1 和 S2 差异更显著,S3 时期不同处理间均存在显著性差异 ($P < 0.05$),

表 1 NaCl 胁迫对长苞香蒲生长及生物量的影响

Table 1 Effects of NaCl stress on the growth and biomass of *Typha domingensis*

月份 Month	处理 Treatment	长苞香蒲 <i>Typha domingensis</i>		
		地上干重 Aboveground dry weight (g)	地下干重 Belowground dry weight (g)	株高 Plant height (cm)
5	CK	8.45± 0.65a	15.47± 1.11a	103.08± 3.83a
	T1	6.67± 0.40b	13.81± 0.90b	99.58± 0.77a
	T2	4.28± 0.20c	12.55± 0.59b	97.21± 2.43ab
	T3	3.62± 0.70c	12.34± 0.64b	92.90± 4.92b
6	CK	41.92± 3.13a	35.47± 1.11a	124.65± 4.24a
	T1	37.39± 2.06b	33.15± 2.86a	118.36± 2.63b
	T2	26.43± 1.23c	25.30± 2.72b	106.87± 3.52c
	T3	22.25± 0.89d	24.57± 2.20b	101.88± 2.28c
7	CK	46.45± 2.75a	53.12± 1.93a	146.64± 7.54a
	T1	44.55± 2.07a	44.79± 4.28b	140.94± 2.41ab
	T2	42.80± 1.71ab	42.74± 1.74b	132.64± 3.98bc
	T3	38.96± 3.23b	36.19± 2.65c	124.62± 5.27c

注:同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

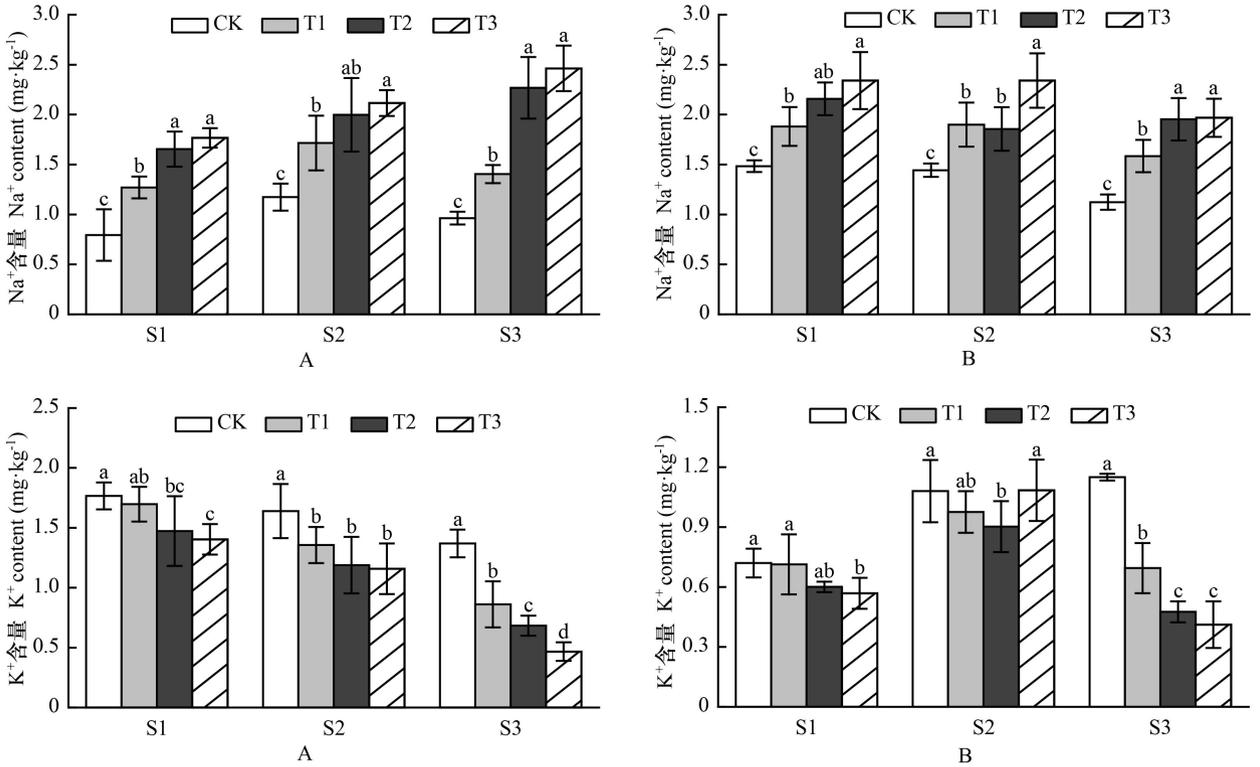
Note: Different letters in the same rows indicate significant differences ($P < 0.05$).

而地下部分的钠钾比则是先降低后升高的趋势,但 S3 时期也同样呈现出比 S1 和 S2 差异大,S3 时期各个处理间也存在显著性差异 ($P < 0.05$),表明 S3 时期,由于盐胁迫处理时间最长,大量的盐分有了一定的累积,使得钠钾比大于 S1 和 S2 时期。

由图 3 可知,经盐胁迫处理后,长苞香蒲植株的钠钾选择性转移系数均降低,且随着时间的延长,T1 处理的钠钾选择性转移系数与对照组趋于一致,而 T2 和 T3 处理的钠钾选择性转移系数较对照仍有显著降低 ($P < 0.05$),表明随着盐胁迫时间的延长,各个处理之间长苞香蒲体内钠钾选择性转移系数在降低,且盐浓度越高,其降低速率越快,最后接近于 1。

2.4 长苞香蒲对盐分的转运特征

由图 4 可见,随着处理时间的延长,在对照组



A. 地上部分; B. 地下部分; S1. 5月30日; S2. 6月30日; S3. 7月30日。同处理的不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。
A. Aboveground; B. Belowground; S1. May 30; S2. June 30; S3. July 30. Different letters in the same treatment indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

图1 长苞香蒲体内 Na⁺和 K⁺含量
Fig. 1 Na⁺ and K⁺ contents in *Typha domingensis*

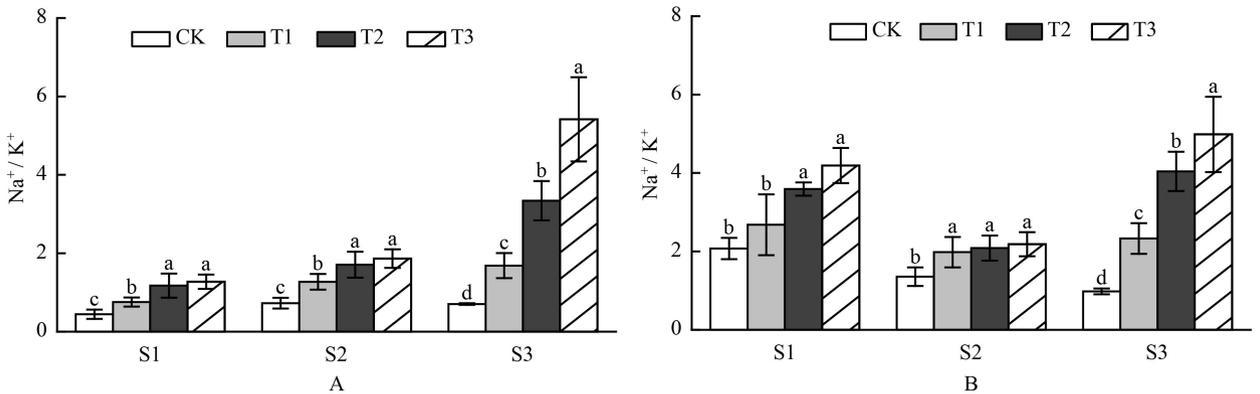


图2 长苞香蒲体内 Na⁺/K⁺
Fig. 2 Na⁺/K⁺ of *Typha domingensis*

和处理组中长苞香蒲对 K⁺的转移系数均随时间延长而减小,且各组之间差异不大。长苞香蒲对 Na⁺的转运特征也遵循同一模式,转运各组之间相似,转移系数均随处理时间的延长而增加,其中 T2 的中后期及 T3 后期大于 1,且在每个时期处理组对

Na⁺的转移系数均较对照组高。由此可见,在一定盐浓度下,长苞香蒲始终能够较为有效地将地下部分多余的 Na⁺转运至地上部分。

2.5 长苞香蒲对人工盐碱湿地土壤的脱盐作用

长苞香蒲对不同盐浓度的湿地土壤的 Na⁺和

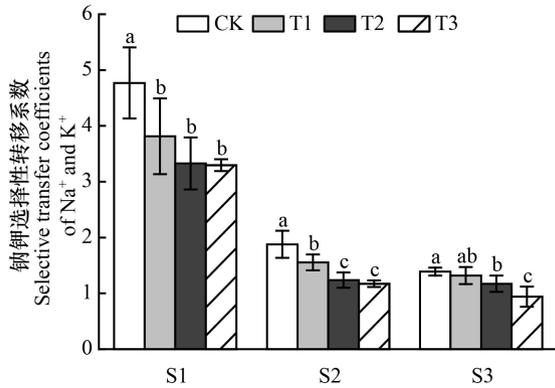


图3 长苞香蒲体内 Na^+ 和 K^+ 选择性转移系数
Fig. 3 Selective transfer coefficients of Na^+ and K^+ in *Typha domingensis*

K^+ 有一定的富集作用(图5)。土壤 Na^+ 含量, CK 和各处理组均随处理时间的延长而降低, 并最终显著降低。同一时期的不同处理组中土壤 Na^+ 含量随处理浓度的增加而升高。对于土壤 K^+ 含量, CK 和 T1 表现出相同的规律, 即均随处理时间的延长逐渐降低, 并于 S3 时期显著降低 ($P < 0.05$); 而 T2 及 T3 土壤 K^+ 含量在 S3 时期较 S0 时期有所下降, 但降低并不显著, 且二者在 S1 和 S2 时期存在反弹回升的现象, 回升的含量甚至超过了 S0, 表明高浓度 Na^+ 的存在会抑制长苞香蒲对 K^+ 的吸收, 或导致其根部 K^+ 的交换。

2.6 长苞香蒲对盐碱湿地水体的脱盐作用

对不同盐浓度的湿地水体的 Na^+ 和 K^+ 有一定的富集作用(图6)。同一时期不同处理组的 Na^+ 含量随处理浓度增加而升高。随着处理时间的延长, CK 及各处理组水体 Na^+ 含量逐渐降低, 最终显著降低; 其中 T1 在 S2 时期基本降到最低, 其余各组在 S3 时期降至最低。对于水体 K^+ 含量, 各组在 S0 时期差异不大, 随处理时间的延长, CK 及 T1 处理 K^+ 含量逐渐降低, 并在 S2 及 S3 时期显著降低 ($P < 0.05$); 而 T2 在 S1 及 S2 时期水体 K^+ 含量上升, T3 在 S2 时期水体 K^+ 含量上升, 且上升含量超过了 S0 时期, T2 及 T3 水体 K^+ 含量在 S3 时期无显著降低。因此, 结合水体 Na^+ 和 K^+ 含量的变化, 可见在低盐胁迫下, 长苞香蒲能够有效去除水体 Na^+ 和 K^+ 。

2.7 K^+ 和 Na^+ 在人工盐碱地中的分配

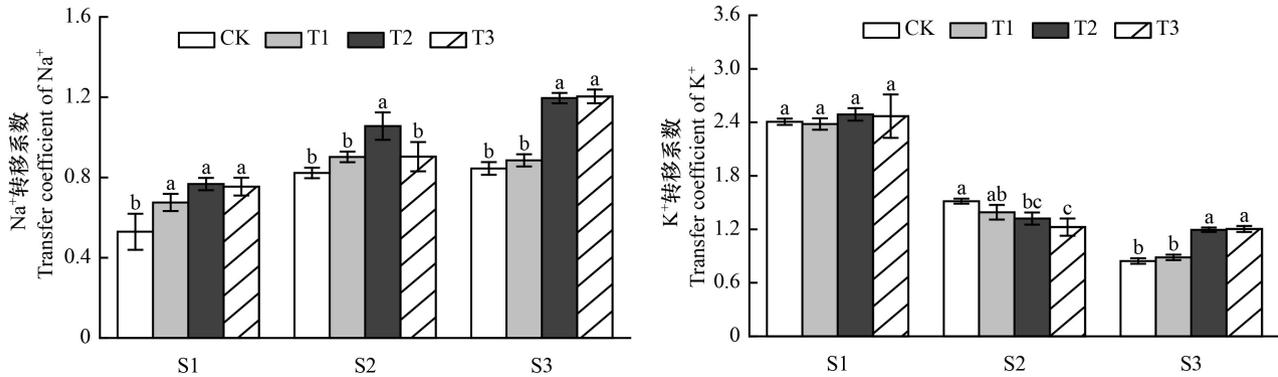
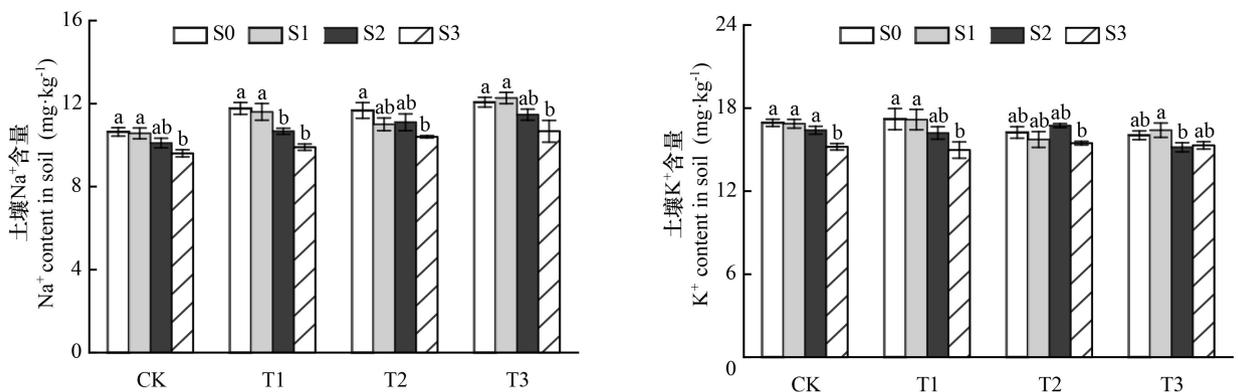
由表2可见, 对水体 K^+ 的去除率 CK 最高, T1

次之, 而 T2 及 T3 很低, 说明在水体 Na^+ 为一定浓度范围下长苞香蒲能够有效除去 K^+ , 但过高的 Na^+ 含量将显著抑制植物体对 K^+ 的吸收。整体而言, 长苞香蒲对水体 Na^+ 、 K^+ 的去除效果及脱盐作用优于土壤。CK 及各处理组对土壤中 Na^+ 的去除率较低, 在 10% 左右; CK 及 T1 对土壤 K^+ 的去除率显著高于 T2 及 T3, 这可能是 T2 及 T3 土壤及水体中 Na^+ 含量较高, 抑制长苞香蒲根部对 K^+ 吸收的结果。CK 对于水体中 Na^+ 的去除率为 49.4%, 说明正常条件下长苞香蒲能够有效吸收水体中的 Na^+ ; 而 CK 对水体 Na^+ 的去除率显著低于各处理组, 表明长苞香蒲不仅具有较强耐盐性, 更能在盐浓度较高的条件下有效除去水体中多余的 Na^+ 。

3 讨论

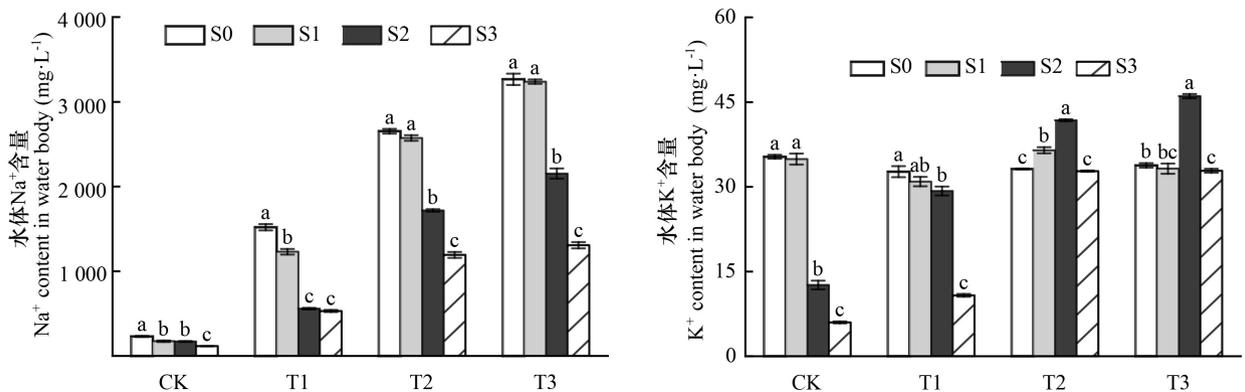
3.1 NaCl 胁迫对长苞香蒲生物量及体内 Na^+ 和 K^+ 含量的影响

本试验中的植物长苞香蒲能在一定盐浓度下正常生长, 说明具有一定的耐盐性。 NaCl 的胁迫不仅会影响植物体内 Na^+ 和 K^+ 的含量, 更会不同程度地降低其生物量(李洪涛等, 2014)。王澍等(2011)研究了甜瓜(*Cucumis melo*)的耐盐性, 结果表明盐胁迫主要通过离子胁迫和渗透胁迫这两种途径来影响植物的生长发育。由于 Na^+ 的竞争, 植物对钾、磷等营养元素的吸收会相应减少, 磷的转移会受到抑制, 严重影响植物的营养生长状况(陈静波等, 2014; 伍会萍等, 2018; 陈碧华等, 2020), 对于长苞香蒲株高及生物量均有明显影响。在盐胁迫初期, 长苞香蒲地上生物量存在大幅度降低, 但随着胁迫时间的延长, 长苞香蒲的地上生物量降低幅度减小。在各时期, 不同强度盐胁迫下的长苞香蒲地上及地下部分 Na^+ 含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 且长苞香蒲体内 Na^+ 含量也随着盐浓度的升高而升高, 说明在各处理条件下, 长苞香蒲能够有效得将根部吸收的 Na^+ 转运并储存在整个植物体内, 这与王晨等(2018)研究芦苇(*Phragmites australis*)对盐碱湿地中 Na^+ 的吸收与转运结果一致。在对照及各浓度处理下, Na^+ 在长苞香蒲地下部分的含量起初都要高于地上部分, 且随处理时间的延长, 这种含量差逐渐减小; 值得注意的是, 在 T2 及 T3 浓度处理下的 S2 及 S3 时期, Na^+ 在长苞香蒲地上部分的含量超过了地下部

图4 长苞香蒲体内 Na⁺和 K⁺转移系数Fig. 4 Na⁺ and K⁺ transfer coefficients of *Typha domingensis*

S0. 5月5日。下同。

S0. May 5. The same below.

图5 土壤中 Na⁺和 K⁺含量Fig. 5 Na⁺ and K⁺ contents in soil图6 水体中 Na⁺和 K⁺含量Fig. 6 Na⁺ and K⁺ contents in water

分,这说明 Na⁺起初积累于长苞香蒲的地下部分,然后转运并存储于地上部分,这有利于通过收割除去土壤中的 Na⁺。

3.2 Na⁺和 K⁺在不同植物体内的转移特征

盐胁迫不可避免地会影响植物体内的离子平衡,植物对 Na⁺的过度吸收会降低植物体内 K⁺含

表 2 长苞香蒲对土壤及水体 Na⁺、K⁺去除率Table 2 Na⁺ and K⁺ removal ratios in soil and water body of *Typha domingensis*

介质 Medium	盐离子 Saline ion	离子去除率 Ion removal ratio (%)			
		CK	T1	T2	T3
土壤 Soil	Na ⁺	9.23± 0.34c	15.79± 0.61a	10.60± 0.26b	11.80± 0.28b
	K ⁺	10.11± 0.18b	12.83± 0.20a	4.44± 0.13c	2.33± 0.15d
水体 Water body	Na ⁺	49.40± 0.39d	65.09± 0.63a	55.02± 0.48c	59.97± 0.33b
	K ⁺	83.04± 0.32a	67.02± 0.41b	1.11± 0.06d	5.58± 0.24c

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$).

量。一方面,对于长苞香蒲,植物体内 K⁺含量对照组要高于处理组, K⁺含量也随着盐浓度的升高而降低,且随着时间的延长, K⁺的地上部分含量降低,地下部分含量逐渐升高。这刚好与 Na⁺在长苞香蒲体内的含量变化相反,说明 K⁺和 Na⁺在地上及地下部分相互交换,最终使 Na⁺积累于地上部分。另一方面, Na⁺/K⁺可以更直观地反映出随时间的延长及胁迫强度的增加, Na⁺被有效地转运到长苞香蒲的地上部分,且最终其地上及地下部分均储存有较高浓度的 Na⁺。本研究表明,长苞香蒲地上部分的 Na⁺/K⁺一直在升高,且主要体现在 S2 至 S3 这段时期,而地下部分的在 S1 至 S2 这段时期下降并于 S2 至 S3 这段时期上升;这些变化表明长苞香蒲将 Na⁺转移至地上部分的时间集中在生物量增长迅速的 S2 时期。钠钾选择性转运系数即为植物根部钠钾比与其地上部分钠钾比的比值,其数值大小反映了植物由根部向地上部分转运 K⁺而抑制 Na⁺的能力,其值越大说明植物的选择性运输能力越强(于宝勒, 2021),不仅能反映出长苞香蒲不同时间及胁迫强度下的转运特征,还能看出对盐胁迫的反应差异。长苞香蒲的钠钾选择性转运系数各处理组及对照组遵循同一规律,即始终随时间及浓度降低,说明其离子选择性随时间及浓度下降,体现出了其对盐胁迫的耐受及适应性。转移系数显示出长苞香蒲在对照处理下能够将 Na⁺逐渐转移至地上,但含量始终是地下部分较高,且在环境含盐量较高(>200 mmol·L⁻¹)

时地上部分 Na⁺含量可高于地下部分。不同植物对盐的耐性存在差异,耐盐机制也不同(Walter, 1961);盐生植物主要通过液泡积累无机盐(Paul & Lade, 2014),且主要是 NaCl。在对 6 种储盐植物的研究中,碱蓬(*Suaeda glauca*)和马齿苋(*Portulaca oleracea*)表现出了更强的储盐能力以及土壤盐分的清除能力,二者通过将胞质中有毒的 Na⁺、K⁺和 Ca²⁺存储到液泡中,并通过增加液泡的体积来调节和富集这些离子。因此,碱蓬和马齿苋被成功地通过连续栽培用于除去作物区土壤中的 NaCl,碱蓬液泡体积占细胞体积的 77%(吴丹等, 2019),这使其能够累积盐浓度高达 500 mmol·L⁻¹(Dracup et al., 1985; Ravindran et al., 2007)。还有很多植物的耐盐性得益于能够通过叶片将多余的 Na⁺排除,这些植物通过表皮细胞组成的盐腺从叶肉细胞中汲取盐分并将其分泌到叶片表面,在叶表面形成一层盐结晶(Munns, 2002; James et al., 2011)。本试验中的长苞香蒲通过吸收、转运及 K⁺的交换将 Na⁺存储在地下部分,这与许多其他植物的机制相似。

3.3 长苞香蒲对土壤和水体的脱盐作用

盐生植物的种植是为了能够改善土壤及农田排水质量,从而应用于盐碱土地的植物修复。Ammari 等(2008)研究发现,饲料甜菜(*Beta vulgaris*)及大麦(*Hordeum vulgare*)均能有效地去除土壤中的盐分和 Na⁺,收获的饲料甜菜地上部分含盐量为 156 kg·hm⁻²,而大麦为 75 kg·hm⁻²,二者能够去除 10 cm 深表层土壤 12%的 Na⁺含量。盐碱土中的 Na⁺可被同是阳离子的 Ca²⁺交换析出, Qadir 等(2003)研究发现,通过向盐碱土中施加石灰或种植苜蓿(*Medicago sativa*)均能有效降低 Na⁺含量,苜蓿能够为分解根际的碳酸钙提供 Ca²⁺,并且苜蓿生长一定年限后会使得根际周边土壤的 pH 值和含盐量进一步降低(魏晓斌等, 2013; 罗慧等, 2020)。整体而言,通过种植耐盐植物对盐碱土中 Na⁺的去除效率不弱于化学方法,且经济可持续性高、无二次污染。显然,盐碱地及农田排水中不止含有 Na⁺,通过研究 8 种水生植物对农田排水的脱盐效果,发现芦苇、长苞香蒲及菹草(*Potamogeton crispus*)3 种植物具有较高的脱盐能力,其中通过收割芦苇和长苞香蒲每年能从农田排水中脱盐 10%~26%,另外,二者对于 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻和 SO₄²⁻等离子的吸收率为每年 9%~15%(Yang et

al., 2015)。耐盐植物双稗草 (*Leptochloa fusca*) 的种植能够降低土壤盐碱度、可溶性阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的浓度,且随着双稗草的种植,土壤肥力和性质的改善保持了5年以上,说明通过种植耐盐植物是修复盐碱荒地的可持续性生物方法 (Akhter et al., 2003),耐盐植物的种植对土壤物理性质、土壤有机质及微生物环境等均有较好的改善作用,而化学方法修复盐碱地会带来一系列经济及生态问题,植物修复越来越受到重视 (肖克飏, 2013)。因此,对不同植物耐盐机理的进一步研究将有助于之后在土壤植物修复中的实际应用。

4 结 论

通过试验结果进行分析,可以得出以下三点结论:(1)长苞香蒲体内的 Na^+ 和 K^+ 平衡会因盐胁迫而打破,其植株体内 Na^+ 含量逐渐升高,而 K^+ 含量则逐渐降低。(2)长苞香蒲能够将土壤和水体中吸收的 Na^+ 从地下部分转移至地上部分,能有效去除土壤和水体中的 Na^+ 和 K^+ ,即可通过收割的方法来降低土壤和水体中的盐碱,从而达到去除盐碱的目的。(3)在较高浓度盐胁迫下,多余 Na^+ 依然能够被有效除去,但高的 Na^+ 浓度及长苞香蒲对 Na^+ 的大量吸收阻碍了长苞香蒲对水体 K^+ 的去除,甚至在某些时期出现了植物体 K^+ 外渗的现象。

参 考 文 献:

AFREEN J, AMRIK S, MALKIAT C, et al., 2019. Carbon sequestration potential of macrophytes and seasonal carbon input assessment into the Hokersar Wetland, Kashmir [J]. *Wetlands*, 39(3): 453-472.

AKHTER J, MAHMOOD K, MALIK KA, et al., 2003. Amelioration of a saline sodic soil through cultivation of a salt-tolerant grass *Leptochloa fusca* [J]. *Environ Conserv*, 30(2): 26-35.

AMMARI TG, TAHBOUB AB, SAOUB HM, et al., 2008. Salt removal efficiency as influenced by phyto-amelioration of salt-affected soils [J]. *J Sci Food Agric Environ*, 6(3): 456-460.

ANANT Y, FLORENT C, SRIKANTH M, 2018. Development of the "French system" vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India [J]. *Ecol Eng*, 113(113): 88-93.

CHEN BH, GUO WL, MENG FR, et al., 2020. Effect of cadmium stress on cadmium uptake accumulation and photosynthetic characteristics of pumpkin [J]. *J Irrig Drain*, 39(12): 1-6. [陈碧华, 郭卫丽, 孟凡茹, 等, 2020. 镉胁迫对南瓜植株镉吸收积累及光合特性的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 39(12): 1-6.]

CHEN JB, NIU JW, TIAN HY, et al., 2014. Effect of NaCl stress on growth and Na^+ and K^+ accumulation of cultivars 'Suzhi No. 2' and 'Tifgreen' of hybrid Bermuda grass [J]. *J Plant Resour Environ*, 23(3): 45-51. [陈静波, 牛佳伟, 田海燕, 等, 2014. NaCl 胁迫对杂交狗牙根品种 '苏植 2 号' 和 'Tifgreen' 生长及 Na^+ 和 K^+ 积累的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 23(3): 45-51.]

CHU R, CHEN NL, WANG XJ, et al., 2017. The nitrogen removal effect of emergent plant in constructed wetland [J]. *Environ Poll Control*, 39(8): 884-889. [褚润, 陈年来, 王小娟, 等, 2017. 人工湿地挺水植物脱氮效果研究 [J]. *环境污染与防治*, 39(8): 884-889.]

DRACUP MNH, GREENWAY H, 1985. A procedure for isolating vacuoles from leaves of the halophyte *Suaeda maritima* [J]. *Plant Cell Environ*, 8(2): 149-154.

FANG Y, 2012. Study on soil salinization in typical areas of north central Ningxia based on WET [D]. Xi'an: Chang'an University. [方媛, 2012. 基于 WET 的宁夏中北部典型地区土壤盐渍化研究 [D]. 西安: 长安大学.]

GE LP, WANG ZW, 2017. Effects of different types of halophytes on the concentration of cadmium in coastal saline soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 37(14): 4656-4662. [戈良朋, 王祖伟, 2017. 滨海盐渍土壤中不同类型盐生植物富集镉的效应 [J]. *生态学报*, 37(14): 4656-4662.]

HAJIBAGHERI MA, HALL JL, FLOWERS TJ, 1984. Stereological analysis of leaf cells of the halophyte *Suaeda maritima* (L.) Dum [J]. *J Exp Bot*, 35(159): 1547-1557.

JAMES RA, BLAKE C, BYRT CS, et al., 2011. Major genes for Na^+ exclusion, *Nax1* and *Nax2* (wheat HKT1;4 and HKT1;5), decrease Na^+ accumulation in bread wheat leaves under saline and waterlogged conditions. [J]. *J Exp Bot*, 62(8): 2939.

LI HT, CHEN HY, LI DW, et al., 2014. Effect of NaCl tolerance on contents of Na^+ and K^+ of Mudanhua pomegranate plants [J]. *J Henan Agric Sci*, 43(7): 130-132. [李洪涛, 陈海燕, 李东伟, 等, 2014. NaCl 胁迫对牡丹花石榴植株体内 Na^+ 、 K^+ 含量的影响 [J]. *河南农业科学*, 43(7): 130-132.]

LI LS, NI XL, LI ZG, et al., 2013. Sewage cleaning abilities of five wetland plants [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 33(11): 2292-2300. [李龙山, 倪细炉, 李志刚, 等, 2013. 5 种湿地植物对生活污水净化效果研究 [J]. *西北植物学报*, 33(11): 2292-2300.]

LUO H, FENG CC, YUE ZH, et al., 2020. Effects of phytoremediation on soil enzyme activity and thermodynamic characteristics of enzymatic reaction in severe saline-alkali

- land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 31(12): 4243–4250. [罗慧, 冯程程, 岳中辉, 等, 2020. 植被修复对重度盐碱地土壤酶活性和酶反应热力学特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 31(12): 4243–4250.]
- MUNNS R, 2002. Comparative physiology of salt and water stress. [J]. *Plant Cell Environ*, 25(2): 239–250.
- PAUL D, LADE H, 2014. Plant-growth-promoting rhizobacteria to improve crop growth in saline soils; a review [J]. *Agron Sustain Dev*, 34(4): 737–752.
- QADIR M, STEFFENS D, YAN F, et al., 2003. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation [J]. *Land Degrad Dev*, 14(3): 301–307.
- QIU BS, 2014. Microbes in saline-alkali soil [J]. *Microbiology*, 41(1): 200. [邱并生, 2014. 盐碱土壤微生物 [J]. *微生物学通报*, 41(1): 200.]
- RADHAKRISHNAN R, BAEK KH, 2017. Physiological and biochemical perspectives of non-salt tolerant plants during bacterial interaction against soil salinity [J]. *Plant Physiol Biochem*, 116(116): 116–126.
- RAVINDRAN KC, VENKATESAN K, BALAKRISHNAN V, et al., 2007. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 39(10): 2661–2664.
- SATHE SM, MUNAVALLI GR, 2019. Domestic wastewater treatment by modified bio-rack wetland system [J]. *Proc Eng*, 28(28): 240–249.
- SERTEL E, GORJI T, TANIK A, 2017. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey [J]. *Ecol Indic*, 74(74): 384–391.
- SHAUKAT A, RASHID M, AREESHA M, et al., 2019. Assessment of spring water microbiology and role of *Typha angustata* as bio sorbent [J]. *Water Environ Res*, 91(12): 1705–1717.
- SHI WJ, YANG JQ, MA Y, 2015. Review on saline-alkali soil improvement with planting halophyte method in arid region [J]. *J Water Resour Water Eng*, 26(5): 229–234. [史文娟, 杨军强, 马媛, 2015. 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*, 26(5): 229–234.]
- SUN ZJ, 2017. Ecological restoration of typical saline-alkali soils in northern China [M]. Beijing: Science Press: 19–20. [孙兆军, 2017. 中国北方典型盐碱地生态修复 [M]. 北京: 科学出版社: 19–20.]
- WALTER H, 1961. Salinity problems in the acid zones, the adaptations of plants to saline soils [J]. *Arid Zone Res*, 14: 65–68.
- WANG C, TAN LL, NI XL, et al., 2018. Characteristics of Na⁺ absorption and transport of *Phragmites communis* in artificial saline wetlands [J]. *J Agro-Environ Sci*, 37(9): 1970–1976. [王晨, 谭玲玲, 倪细炉, 等, 2018. 芦苇对人工盐碱湿地中 Na⁺的吸收与转运特征 [J]. *农业环境科学学报*, 37(9): 1970–1976.]
- WANG S, ZHU CY, YU CX, et al., 2011. K⁺ and Na⁺ contents in plants of muskmelon varieties under NaCl stress [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ (Agric Sci Ed)*, 29(3): 41–46. [王澍, 朱春燕, 俞晨玺, 等, 2011. NaCl 对不同甜瓜品种植株中 K⁺和 Na⁺含量的影响 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 29(3): 41–46.]
- WEI XB, WANG ZF, YU HZ, et al., 2013. Effects of alfalfa with different growth years on soil saline-alkali land [J]. *Pratact Sci*, 30(10): 1502–1507. [魏晓斌, 王志锋, 于洪柱, 等, 2013. 不同生长年限苜蓿对盐碱地土壤肥力的影响 [J]. *草业科学*, 30(10): 1502–1507.]
- WENG YW, ZHANG L, ZHANG S, et al., 2017. Effects of salt with drought stress on growth and water uptake of wheat seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 37(7): 2244–2252. [翁亚伟, 张磊, 张姍, 等, 2017. 盐旱复合胁迫对小麦幼苗生长和水分吸收的影响 [J]. *生态学报*, 37(7): 2244–2252.]
- WU D, SUN P, CHEN GL, et al., 2019. Water purification effect and saline-alkali tolerance improvement mechanism of *Suaeda salsa* in the estuary area [J]. *Environ Sci*, 40(12): 5384–5393. [吴丹, 孙萍, 陈广琳, 等, 2019. 外源 Ca²⁺和 K⁺作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 [J]. *环境科学*, 40(12): 5384–5393.]
- WU HP, DING ZJ, NI XL, 2018. Effects of NaCl stress on growth and photosynthetic properties of *Phragmites australis* and *Typha angustata* [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 46(24): 134–138. [伍会萍, 丁振杰, 倪细炉, 2018. NaCl 胁迫对长苞香蒲和芦苇生长及光合特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 46(24): 134–138.]
- XIAO KB, 2013. Experimental study on mechanism of halophyte-remediation in alkali-saline soil in north region of Yinchuan City Ningxia Province [D]. Yangling: Northwest A & F University. [肖克飏, 2013. 宁夏银北地区耐盐植物改良盐碱土机理及试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- YAN L, LI LS, NI XL, et al., 2016. Accumulation of soil heavy metals in five species of wetland plants [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 36(10): 2078–2085. [严莉, 李龙山, 倪细炉, 等, 2016. 5种湿地植物对土壤重金属的富集转运特征 [J]. *西北植物学报*, 36(10): 2078–2085.]
- YANG YN, SHENG Q, ZHANG L, et al., 2015. Desalination of saline farmland drainage water through wetland plants [J]. *Agric Water Manag*, 156: 19–29.
- YU BL, 2021. Remediation measures of saline-alkali land: A review [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 37(7): 81–87. [于宝勒, 2021. 盐碱地修复利用措施研究进展 [J]. *中国农学通报*, 37(7): 81–87.]