

王 晨, 谭玲玲, 倪细炉, 等. 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, 2018, 37(9): 1970–1976.

WANG Chen, TAN Ling-ling, NI Xi-lu, et al. Characteristics of Na⁺ absorption and transport of *Phragmites communis* in artificial saline wetlands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1970–1976.

芦苇对人工盐碱湿地中Na⁺的吸收与转运特征

王 晨^{1,2}, 谭玲玲³, 倪细炉^{2,4*}, 李昌晓⁵, 李 健^{1,2}

(1. 宁夏大学生命科学学院, 银川 750021; 2. 宁夏林业研究院种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750004; 3. 青岛农业大学生命科学学院, 山东 青岛 266109; 4. 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002; 5. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要:以芦苇为材料,通过构建人工盐碱湿地研究芦苇对Na⁺的转运特征及Na⁺在湿地系统中的分布特征。实验设置4个处理,CK、T1(浇灌100 mmol·L⁻¹的盐水)、T2(浇灌200 mmol·L⁻¹的盐水)及T3(浇灌300 mmol·L⁻¹的盐水),于不同时间测定各处理下芦苇地上及地下部分Na⁺与K⁺含量,计算Na⁺/K⁺及二者的转移系数,从而分析湿地盐分对芦苇体内Na⁺、K⁺平衡的影响及芦苇对Na⁺的转运特征;测定土壤及水体中Na⁺与K⁺的含量,计算去除率,分析芦苇对湿地的脱盐作用。结果显示:与CK相比,高浓度(T3)NaCl处理使芦苇地上及地下部分Na⁺含量最终分别增加了6.09倍和1.61倍,地上及地下部分K⁺含量分别降低了26.88%和18.10%。地上部分Na⁺/K⁺随处理时间逐渐升高,地下部分则相反。CK及T1的Na⁺转移系数为0.30~0.86,随处理时间延长而减小;T2及T3的Na⁺转移系数为0.51~0.91,随处理时间延长而增加。芦苇对处理组土壤Na⁺及K⁺的去除率分别为11.0%~13.4%和3.8%~9.8%,对处理组水体Na⁺及K⁺的去除率分别为42.7%~51.6%和6.8%~74.2%。研究结果表明,盐胁迫会影响芦苇体内的Na⁺、K⁺平衡,芦苇能有效地吸收Na⁺,将Na⁺从植物地下部分转运到地上部分。芦苇对湿地具有一定的除Na⁺脱盐作用,且高浓度Na⁺的存在会影响芦苇对K⁺的吸收及去除。

关键词:芦苇;盐碱湿地;Na⁺转运特征;脱盐作用

中图分类号:S156.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)09-1970-07 **doi:**10.11654/jaes.2018-0684

Characteristics of Na⁺ absorption and transport of *Phragmites communis* in artificial saline wetlands

WANG Chen^{1,2}, TAN Ling-ling³, NI Xi-lu^{2,4*}, LI Chang-xiao⁵, LI Jian^{1,2}

(1. College of Life Science Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of the Seedling Bioengineering of Ningxia Forestry Institute, Yinchuan 750004, China; 3. College of Life Science Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 4. Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China; 5. College of Life Science Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The characteristics of both Na⁺ transport in *Phragmites communis* and Na⁺ distribution in a wetland system were investigated by constructing an artificial saline-alkaline wetland. Four treatments, namely CK, T1 (irrigation with 100 mmol·L⁻¹ saline water), T2 (irrigation with 200 mmol·L⁻¹ saline water), and T3 (irrigation with 300 mmol·L⁻¹ saline water), were set up for the experiment. The effect of wetland salinity on the balance of Na⁺ and K⁺ in *P. communis* 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 were calculated to analyze the desalination of wetlands by *P. communis*. The results indicated that in *P. communis* treated with high concentrations of NaCl (T3), the Na⁺ content in the aboveground and underground parts of the plants eventually increased 6.09 and 1.61 times, respectively, compared with CK, while the K⁺ content in aboveground and underground parts eventually decreased 26.88% and 18.10%, respectively. The Na⁺/K⁺ in the aboveground parts increased gradually while the opposite trend occurred in the underground parts. The Na⁺

收稿日期:2018-05-24 录用日期:2018-07-19

作者简介:王 晨(1991—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事植物基因工程方面研究工作。E-mail:1687706734@qq.com

*通信作者:倪细炉 E-mail:nixilu110@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31660045);国家国际合作项目(2015DFA90900)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31660045); International Science and Technology Cooperation Program of China(2015DFA90900)

transfer factor of CK and T1 decreased gradually while that of T2 and T3 showed the opposite trend. The removal ratios of Na⁺ and K⁺ from soil in the treatment groups ranged from 11.0% to 13.4% and 3.8% to 9.8%, respectively, and the removal ratios of Na⁺ and K⁺ from water in the treatment groups ranged from 42.7% to 51.6% and 6.8% to 74.2%, respectively. The above results indicated that salt stress affected the balance of Na⁺ and K⁺ in *P. communis*, and that the plant can effectively absorb and transport Na⁺ from its underground parts to its above-ground parts. In addition, *P. communis* had a role in removal of Na⁺ and wetland desalination, while the presence of a high Na⁺ concentration had a negative effect on the absorption and removal of K⁺.

Keywords: *Phragmites communis*; saline-alkali wetland; Na⁺ transport characteristics; desalination

盐碱土是一类特殊且分布广泛的土壤类型,通常以盐土与碱土混合存在,盐碱土面积约占全球灌溉面积的20%以上。由盐和碱导致的土壤退化严重影响了农业的生产力及可持续性,尤其在世界范围内的干旱及半干旱地区^[1-2]。盐碱土会影响植物体的Na⁺、K⁺平衡^[3],严重危害了植物的生长及作物产量,如盐胁迫会降低番茄植株生物量,减小果实尺寸及pH值^[4]。Na⁺是盐碱土中含量较高、毒性最大的一种阳离子,高的Na⁺浓度会严重影响作物体内阳离子及微量元素的平衡,耐盐植物盐角草及甜菜在高Na⁺浓度下能够维持阳离子平衡及对微量元素的吸收,而盐敏感植物玉米和菜豆的生长受到不同程度的抑制,且二者对微量元素的吸收降低^[5]。显然,盐碱土的改良已成为亟待解决的问题。

目前,盐碱地改良方法中的Ca²⁺交换^[6]及植物种植^[7-9]等方法均已被用于降低土壤盐碱度。耐盐植物因具有相应的适应机制,能够生长在盐碱土地,因此被用于植物修复^[10]。耐盐植物的种植不仅对表层土壤具有明显的脱盐效果^[7],且能够改善土壤的理化性质及微生物环境等^[11]。在多种植物中,植物体可通过Na⁺、K⁺交换将多余的Na⁺储存在地上部分^[12],从而可通过收割植物的地上部分以除去盐碱土中的盐分及Na⁺,如种植在盐碱地中的滨藜叶灰含盐量高达390 g·kg⁻¹^[13]。

宁夏土壤含盐量高,尤其是Na⁺含量,宁夏引黄灌区Na⁺含量与土壤总盐呈极显著正相关^[14]。芦苇(*Phragmites communis*)是一种具根状茎的多年生湿地植物,具有一定耐盐能力,能够降低土壤中Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻等盐分离子含量^[15],及水体中Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻等的含量^[16],也可去除水体中的氮、磷等元素^[17-18],但随着盐水浓度的增加,芦苇的生物量及品质也会呈现降低的趋势^[19]。已有的研究表明芦苇能够去除土壤及水体中的一些盐分离子,但对于不同浓度梯度盐胁迫下其体内Na⁺、K⁺的吸收与转运特征及时空变化未见报道。本实验以芦苇为材料,通过模拟

人工盐碱湿地,测定芦苇不同部位位于不同时间的Na⁺、K⁺含量变化,研究其对Na⁺、K⁺的转运特征,以及人工湿地的土壤及水体Na⁺、K⁺含量变化,分析其对湿地的脱盐作用,从而为植物耐盐机制及盐碱湿地改良的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料 with 处理

供试材料为芦苇,选用生长状况均一的芦苇幼苗,幼苗高约55 cm,鲜重约20 g。实验开始于2016年4月中旬,芦苇幼苗于宁夏银川植物园(106°10'33.28" E, 38°25'3.73" N)的桶中栽培(桶高85 cm,上口直径74 cm,下口直径52 cm),栽培土壤采用沙壤土(全盐量小于0.2%且过2 mm筛),土壤高度为40 cm。本实验设置4个处理:(1)对照(CK),浇灌自来水30 L,自来水的含盐量为550~600 mg·L⁻¹,EC为800~900 μS·cm⁻¹,pH为6.8~7.2;(2)T1,浇灌100 mmol·L⁻¹的盐水30 L;(3)T2,浇灌200 mmol·L⁻¹的盐水30 L;(4)T3,浇灌300 mmol·L⁻¹的盐水30 L。每个处理设置3个重复,于栽培后第3周进行盐胁迫处理,每周按时补水1次至30 L。于5月(S1)、6月(S2)、7月(S3)底分别测定芦苇地上及地下部分、土壤、水体Na⁺与K⁺含量,以及栽培初期(S0)土壤及水体Na⁺、K⁺含量。

1.2 指标测定与计算

用火焰分光光度计法^[20]分别测定芦苇地上及地下部分、土壤、水体中的Na⁺与K⁺含量,并进行以下指标的计算。

芦苇植株不同部位的钠钾比(Na⁺/K⁺):

$$\text{Na}^+/\text{K}^+ = \text{Na}^+ \text{ 含量} / \text{K}^+ \text{ 含量}$$

转移系数(Transfer Factor, TF)指地上部分某离子浓度与其在植物地下部分浓度的比值,可作为衡量植物体对特定离子吸收与转运能力的指标:

$$TF = C_{\text{地上}} / C_{\text{地下}}$$

式中: $C_{\text{地上}}$ 为植物地上部分某离子浓度,mg·kg⁻¹; $C_{\text{地下}}$ 为植物地下部分某离子浓度,mg·kg⁻¹。

离子去除率能够显示出后期土壤或水体中 Na^+ 与 K^+ 含量去除的百分率。

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

式中: C_3 为 Na^+ 或 K^+ 于S3时期在土壤或水体中的含量; C_0 为 Na^+ 或 K^+ 于S0时期在土壤或水体中的含量。

1.3 数据处理

通过IBM SPSS statistics 22.0分析软件进行试验数据的统计计算,进行方差分析前对所有数据进行正态性及方差齐性检验,用LSD单因素方差分析(One-Way ANOVA)对相关指标进行差异性检验,并用Microsoft Excel 2003作图。

2 结果与分析

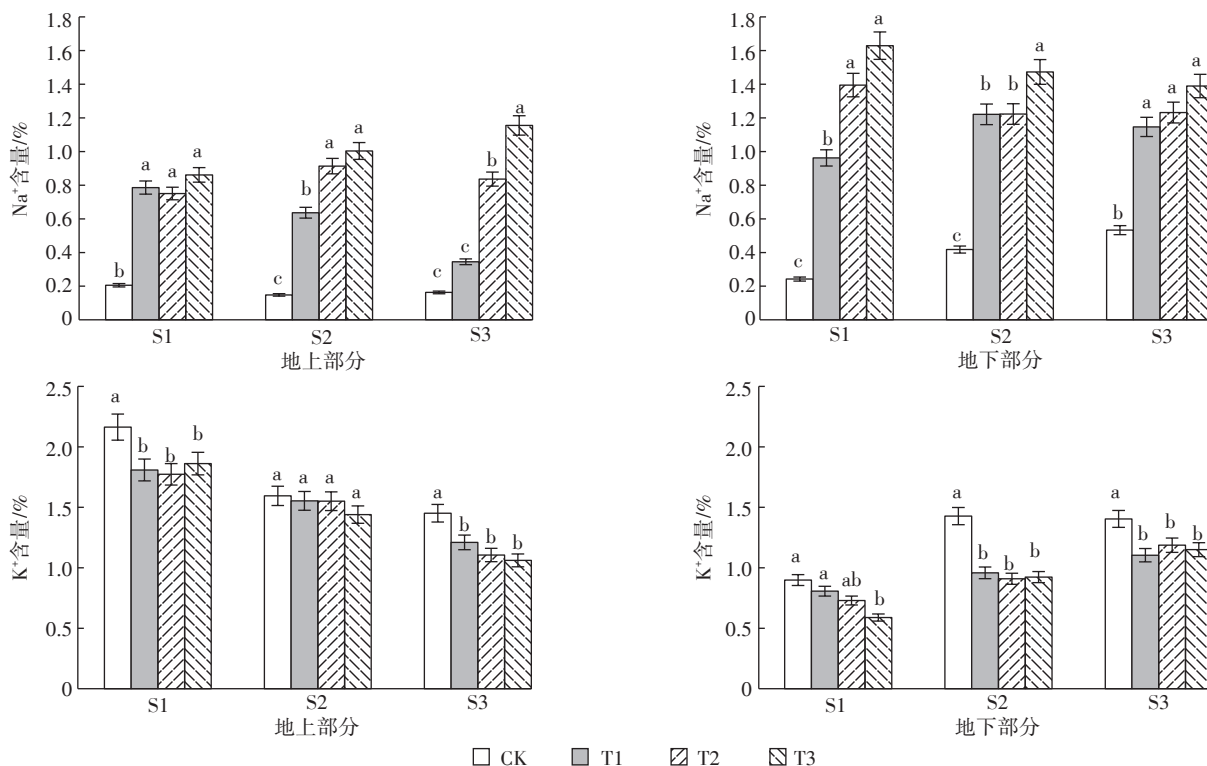
2.1 湿地盐分对芦苇体内 Na^+ 、 K^+ 平衡的影响

湿地盐分的含量直接影响植物体内 Na^+ 及 K^+ 的平衡。由图1可见,芦苇各处理组地上及地下部分的 Na^+ 含量在各时期均显著高于对照组(除S3时期的T1处理)。且随着处理浓度的升高,芦苇地上及地下部分 Na^+ 含量呈上升趋势。S3时期,T1、T2及T3的地上部分 Na^+ 含量较CK分别增加了1.12、4.13倍及6.09倍,地下部分 Na^+ 含量较CK分别增加了1.15、1.31倍

及1.61倍。芦苇地上部分的 K^+ 含量随NaCl处理浓度的升高及时间的延长而降低,且于S3时期分别降低为CK的83%、76%及73%;对于地下部分 K^+ 含量,S1时期随处理浓度升高而降低,S2及S3时期CK显著高于各处理且处理间差异不显著;各处理组随处理时间而升高,CK组则表现为先升后降;在S3时期,T1、T2、T3分别降低为CK的77%、85%及82%。

2.2 芦苇的 Na^+ 、 K^+ 转运特征

由图2可见,各处理组 Na^+/K^+ 显著高于对照组(除S3时期的T1处理),且在植株内随处理浓度的升高而增加,地下部分 Na^+/K^+ 高于地上部分。CK及T1地上部分 Na^+/K^+ 随时间逐渐减小,而T2及T3为逐渐增加;CK地下部分 Na^+/K^+ 随时间逐渐增加,T1表现为先增加后减小,而T2及T3为逐渐减小。对于 Na^+ 转移系数,其在S1时期随处理浓度的升高而减小,在S2及S3时期随处理浓度的升高而增加。对于 K^+ 转移系数,在S1时期,T3显著高于其余各组;S2时期CK低于处理组,而处理组间差异不显著;S3时期的 K^+ 转移系数随处理浓度的升高而减小。总体反映出 K^+ 在地下部分含量较高, Na^+ 于地下部分含量较高,且存在 Na^+ 逐渐向上转运而 K^+ 逐渐向下转运的特征。

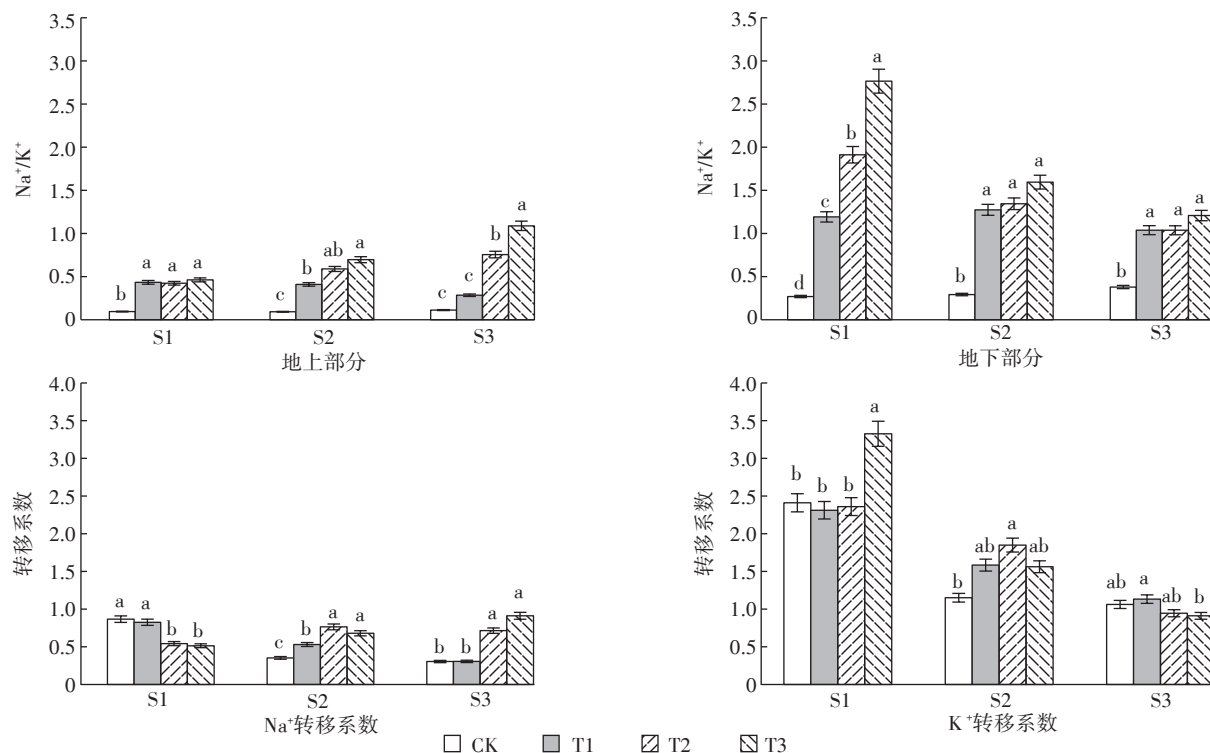


同时期的不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

The different letters in the same period indicate significant differences ($P < 0.05$)

图1 芦苇 Na^+ 及 K^+ 含量

Figure 1 Na^+ and K^+ contents in *Phragmites communis*



同时期的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

The different letters in the same period indicate significant differences ($P < 0.05$)

图2 芦苇 Na^+/K^+ 及 Na^+ , K^+ 转移系数

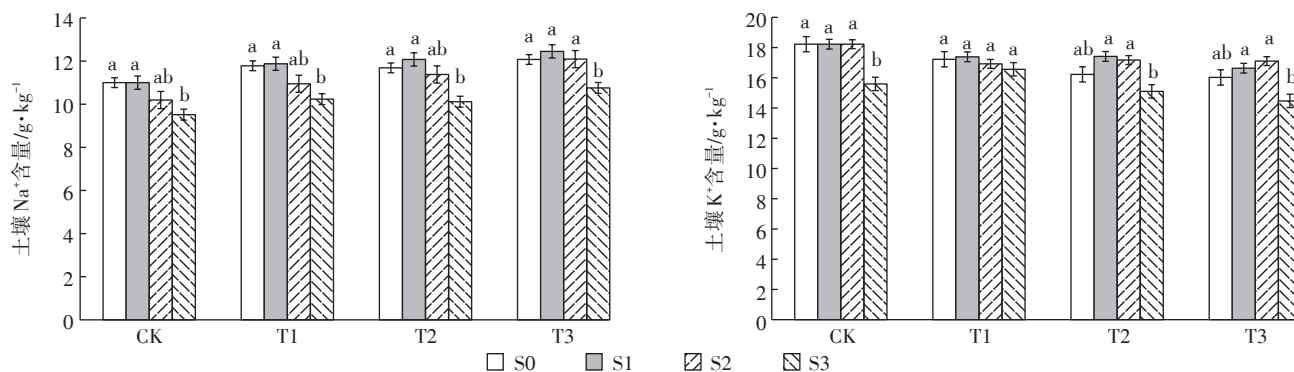
Figure 2 Na^+/K^+ and Na^+ , K^+ transfer factor of *Phragmites communis*

2.3 芦苇对湿地土壤及水体的脱盐作用

由图3可见,各处理组土壤中的 Na^+ 含量在不同时期均高于CK。在同一时期,土壤 Na^+ 含量随处理浓度的增加而升高;CK及各处理组土壤中的 Na^+ 含量均随处理时间的延长而降低,且均在S3时期显著低于CK,CK、T1、T2及T3的土壤 Na^+ 含量最终降低了1.48、1.55、1.57 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及1.32 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明芦苇能够有效降低土壤中 Na^+ 含量。对于土壤 K^+ 含量,CK及T1组均

随时间缓慢降低,最终分别降低了2.63 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及0.66 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;T2及T3组均出现了先升高后降低的特征,最终分别降低1.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及1.55 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由图4可见,CK的水体 Na^+ 含量基本保持稳定,各处理组水体 Na^+ 含量随时间延长而显著降低,CK、T1、T2及T3水体 Na^+ 含量最终分别降低了8.64、782.33、1 367.51 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及1 395.73 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。T3组在S1时期降低不显著,且在S3时期出现回升现象。对

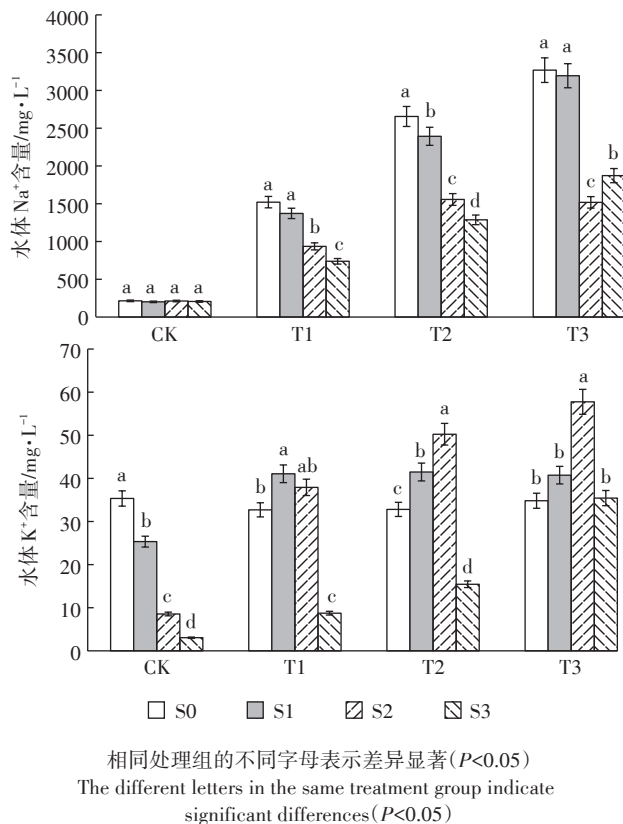


相同处理组的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

The different letters in the same treatment group indicate significant differences ($P < 0.05$)

图3 土壤 Na^+ 及 K^+ 含量

Figure 3 Na^+ and K^+ contents in soil



相同处理组的不同字母表示差异显著($P<0.05$)

The different letters in the same treatment group indicate significant differences ($P<0.05$)

图4 水体Na⁺及K⁺含量

Figure 4 Na⁺ and K⁺ contents in water

于水体K⁺含量,在S0时期CK及各处理组相当,但在其余各时期水体K⁺含量随NaCl处理浓度的增加而升高。CK表现为逐渐降低,最终降低了32.27 mg·L⁻¹;而各处理组表现为先升高后降低,其中T1和T2处理组最终分别降低了23.95 mg·L⁻¹和17.35 mg·L⁻¹,而T3组水体K⁺含量较初始反而上升了0.61 mg·L⁻¹。

由表1可见,芦苇对CK及各处理组土壤中Na⁺的去除率为10.96%~13.52%,且差异不显著;各处理组土壤K⁺的去除率随处理浓度升高而降低,但均显著低于CK。芦苇对水体中Na⁺的去除率,T1、T2超过了

表1 土壤及水体Na⁺、K⁺去除率(%)

Table 1 Na⁺ and K⁺ removal ratios in soil and water(%)

处理	土壤		水体	
	Na ⁺	K ⁺	Na ⁺	K ⁺
CK	13.52±0.67a	14.43±0.46a	3.99±0.71c	90.24±2.69a
T1	13.28±0.80a	3.81±0.72d	51.56±3.03a	74.20±1.78b
T2	13.35±2.85a	6.81±0.23c	51.56±2.71a	55.84±1.57c
T3	10.96±1.62a	9.79±0.55b	42.73±4.25b	6.77±0.53d

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: The different letters in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

50%,T3为42.73%,均显著高于CK;对水体中K⁺的去除率随处理浓度升高而显著降低,CK达到了90.24%显著高于各处理组,其中T3仅为6.77%。

3 讨论

3.1 NaCl胁迫对植物体内Na⁺、K⁺平衡的影响

对于植物体内的Na⁺与K⁺含量,由于K⁺是植物正常生长所需的重要营养元素,因此其含量在植物体中较高,尤其是地上部分,而Na⁺则相反,在植物体中浓度较低^[21],这与本研究中CK植株内Na⁺、K⁺含量相符。Besford^[22]报道指出,即使在Na⁺浓度为K⁺浓度127倍的情况下,番茄植株仍选择性地吸收K⁺;由本研究中表2可知,芦苇的CK组在水体Na⁺含量为K⁺含量数倍至数十倍条件下仍选择性地吸收K⁺而非Na⁺。植物耐盐通常要求地上部分保持低Na⁺、高K⁺和低Na⁺/K⁺^[23]。结合图1及图2可见,芦苇地上部分均符合这些特征,但会随着盐浓度的升高逐渐逆转;而有些植物如向日葵^[24]在环境K⁺缺乏时会向地上部分吸收转运Na⁺,可见体内阳离子的平衡对植物的正常生长也至关重要^[5]。同种植物的不同部位Na⁺与K⁺的含量也不同,NaCl胁迫下,4种甜瓜品种植株中Na⁺含量增加,K⁺含量降低,其中Na⁺含量为茎>叶片>果实、根,K⁺含量为果实>茎>叶片>根,整体表明其地上部分Na⁺及K⁺含量高于地下部分^[25],而本实验的芦苇地下部分Na⁺含量及地上部分K⁺含量较高。总之,无论是耐盐植物还是盐敏感植物,在遭受NaCl胁迫时植株Na⁺及K⁺含量均受到不同程度的影响。本文中的芦苇地上及地下部分K⁺含量与NaCl浓度成反比,这是由于Na⁺与K⁺分子结构的相似性使得Na⁺能够竞争K⁺的结合位点,从而在高浓度Na⁺下抑制植物对K⁺的吸收与利用^[26]。

3.2 不同植物体内的Na⁺、K⁺转运特征

Na⁺/K⁺及Na⁺、K⁺转移系数反映了植物体对离子的选择性吸收及转运特征,盐胁迫下,6种草坪草根茎中的Na⁺浓度及Na⁺/K⁺增加^[27],NaCl胁迫增加狗牙根叶片、根系中Na⁺含量及Na⁺/K⁺^[28]。同样,本文中芦苇地上及地下部分Na⁺/K⁺也因NaCl的胁迫而不同程度地增加。另外,芦苇不同部位的Na⁺/K⁺有差异,且不同部位Na⁺/K⁺随NaCl浓度及胁迫时间的变化存在规律性变化,即地上部分随浓度及时间上升,而地下部分随浓度上升、随时间下降,地下部分Na⁺/K⁺高于地上部分。与此结果类似的有香根草、香蒲、芦苇和美人蕉^[16];甜瓜不同器官中Na⁺/K⁺随着

NaCl浓度的增加均逐渐增加^[25]。耐盐植物能够将盐碱土中的Na⁺富集到植物体内,但不同的植物或同种植物在不同时期对Na⁺的转运特征固然存在差异。Ghavri等^[29]在12种杂草对盐碱地Na⁺和K⁺的富集及转运特征研究中发现,其中*Bothriochloa pertusa*的Na⁺/K⁺最高,为0.8,这些植物对Na⁺的转移系数为0.6~1.2, K⁺的转移系数为0.5~0.9。本文中各NaCl浓度下芦苇对Na⁺的转移系数为0.3~0.9, K⁺的转移系数为0.9~3.3,可见芦苇对Na⁺的转移系数与上述杂草相似,而K⁺转移系数更高,表明芦苇具有较强的K⁺选择性运输能力。另外,由芦苇Na⁺/K⁺及Na⁺、K⁺转移系数的变化可知,在一定盐浓度胁迫下,芦苇能够有效地将Na⁺由地下部分逐渐转运到地上部分;根部Na⁺/K⁺更高且Na⁺转移系数始终低于K⁺转移系数,推测这是植物根系对Na⁺具有的截留作用以阻止其向地上部分运输^[30]。

3.3 植物对盐碱湿地的脱盐作用

目前对于植物去除土壤及水体Na⁺及其对盐碱地脱盐作用的报道较多,如*Beta vulgaris*地上部分含盐量为156 kg·hm⁻²,而*Hordeum vulgare*为75 kg·hm⁻²,二者能够去除10 cm深表层土壤Na⁺含量的12%^[31];通过研究8种湿地植物对农田排水的脱盐作用,发现芦苇、香蒲及菹草3种植物具有更为高效的脱盐能力,其中,通过收割芦苇和香蒲每年能从农田排水脱盐10%~26%^[16];本研究中芦苇T1、T2及T3对土壤中Na⁺的最终去除率分别为13.28%、13.35%及10.96%, T1、T2及T3对水体中Na⁺的最终去除率分别为51.56%、51.56%及42.73%,其对土壤中Na⁺去除率较低应该是受水体中高浓度Na⁺的影响。另外,图3和图4显示芦苇对土壤及水体具有不同程度的除Na⁺脱盐作用,但T3处理组对水体Na⁺的去除在S3时期出现回升,这可能是由于高盐浓度在芦苇生长后期加速其枯萎,其枯落物中的盐分释放到了水体中^[32],因此在实际生产中可以考虑及时收割地上部分。从图4水体K⁺含量变化可见, T1、T2及T3处理在S1~S2时期K⁺含量上升,表明高浓度NaCl不仅抑制K⁺的吸收,还会增加根部K⁺的向外渗透;CK、T1及T2组S3时期水体中的K⁺含量较S0均显著降低,而T3组水体K⁺含量在S3时期比S0时期上升0.61 mg·L⁻¹,表明当水体中的Na⁺达到一定浓度时,芦苇不能最终降低K⁺含量。综上所述,各处理组土壤和水体Na⁺含量均随时间逐渐降低,表明芦苇能够有效地将湿地水土中多余的Na⁺由根部吸收而去除。而土壤和水体中K⁺含量的变化说明芦苇对

Na⁺的吸收阻碍了其K⁺的吸收与转运,但在一定Na⁺浓度范围内芦苇能够显著降低土壤和水体K⁺含量。对于盐碱地的植物修复,由于*Suaeda maritima*和*Sesuvium portulacastrum*表现出了较强的储盐能力以及土壤盐分的清除能力,已被成功地通过连续栽培用于去除作物区土壤中的NaCl^[33];耐盐植物*Leptochloa fusca*的种植能够降低土壤盐碱度,使土壤肥力和性质的改善保持5年以上^[8-9];而*Pennisetum purpureum*等植物由于能高效去除土壤Na⁺、K⁺,因此对工业废地的植物修复潜力巨大^[29]。本实验结果表明芦苇具有除Na⁺脱盐的能力,孙博等^[32]报道芦苇的种植不仅能够通过收获地上部分去除盐碱湿地中的Na⁺,也能降低Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻等盐分离子的含量,且芦苇腐殖质对盐碱土盐分降低和有机质含量提高同样具有一定作用,结合上述已有的报道,可将其用于盐碱湿地的植物修复。

4 结论

(1) NaCl胁迫会影响芦苇体内的Na⁺、K⁺平衡,使芦苇体内Na⁺含量逐渐升高, K⁺含量逐渐降低。

(2) 盐胁迫下,芦苇地上及地下部分Na⁺/K⁺和Na⁺、K⁺转移系数的变化表明其能够有效地将吸收的Na⁺由地下部分转移至地上部分。

(3) 芦苇能够有效去除土壤及水体中的Na⁺及K⁺,而高浓度NaCl的胁迫会促进芦苇对Na⁺的吸收而阻碍对K⁺的吸收及去除。

参考文献:

- [1] Qadir M, Noble A D, Schubert S, et al. Sodicty-induced land degradation and its sustainable management: Problems and prospects[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 17(6): 661-676.
- [2] Suarez D L. Sodic soil reclamation: Modelling and field study[J]. *Soil Research*, 2001, 39(6): 1225-1246.
- [3] Gao Y, Lu Y, Wu M, et al. Ability to remove Na⁺ and retain K⁺ correlates with salt tolerance in two maize inbred lines seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7. doi:10.3389/fpls.2016.01716.
- [4] Yurtseven E, Kesmez G D, Ünlükara A. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central anatolian tomato species (*Lycopersicon esculantum*) [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1): 128-135.
- [5] Kudo N, Sugino T, Oka M, et al. Sodium tolerance of plants in relation to ionic balance and the absorption ability of microelements[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(2): 225-233.
- [6] Qadir M, Steffens D, Yan F, et al. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation[J]. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(3): 301-307.
- [7] 王立艳, 潘洁, 肖辉, 等. 种植耐盐植物对滨海盐碱地土壤盐分

- 的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(5):226-231.
- WANG Li-yan, PAN Jie, XIAO Hui, et al. Effect of soluble salt on planting salt-tolerant plants of coastal saline soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(5):226-231.
- [8] Akhter J, Murray R, Mahmood K, et al. Improvement of degraded physical properties of a saline-sodic soil by reclamation with kallar grass (*Leptochloa fusca*)[J]. *Plant & Soil*, 2004, 258(1/2):207-216.
- [9] Akhter J, Mahmood K, Malik K A, et al. Amelioration of a saline sodic soil through cultivation of a salt-tolerant grass *Leptochloa fusca*[J]. *Environmental Conservation*, 2003, 30(2):26-35.
- [10] Hasanuzzaman M, Nahar K, Alam M M, et al. Potential use of halophytes to remediate saline soils[J]. *BioMed Research International*, 2014. doi:10.1155/2014/589341
- [11] 肖克飏. 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, 2013.
- XIAO Ke-biao. Experimental study on mechanism of halophyte-remediation in alkali-saline soil in the north region of Yinchuan City Ningxia Province[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2013.
- [12] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. *Plant Cell & Environment*, 2002, 25(2):239-250.
- [13] Malcolm C V, Clarke A J, D'Antuono M F, et al. Effects of plant spacing and soil conditions on the growth of five *Atriplex* species[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1988, 21(3):265-279.
- [14] 樊丽琴, 杨建国, 许兴, 等. 宁夏引黄灌区盐碱地土壤盐分特征及相关性[J]. 中国农学通报, 2012, 28(35):221-225.
- FAN Li-qin, YANG Jian-guo, XU Xing, et al. Salinity characteristics of soil and correlation of saline-alkali soil in Ningxia irrigation district [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(35):221-225.
- [15] 吴林川, 孙婴婴. 芦苇对盐渍土壤盐分改良及分布规律的影响[J]. 土地开发工程研究, 2017, 2(9):42-47.
- WU Lin-chuan, SUN Ying-ying. Effects of reed on salt improvement and distribution in saline-alkali soil[J]. *Land Development and Engineering Research*, 2017, 2(9):42-47.
- [16] Yang Y N, Sheng Q, Zhang L, et al. Desalination of saline farmland drainage water through wetland plants[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 156:19-29.
- [17] 李芳. 吉林省西部盐碱芦苇湿地吸收盐分和氮磷去除效果研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- LI Fang. Study on removal efficiency and absorption of salinity and nitrogen and phosphorus by *Reed* saline-alkali wetlands in the west of Jilin Province[D]. Changchun:Chinese Academy of Sciences (North-east Institute of Geography and Agroecology), 2014.
- [18] 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 等. 5种湿地植物对生活污水净化效果研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33(11):2292-2300.
- LI Long-shan, NI Xi-lu, LI Zhi-gang, et al. Sewage cleaning abilities of five wetland plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia*, 2013, 33(11):2292-2300.
- [19] 张爽, 郭成久, 苏芳莉, 等. 不同盐度水灌溉对芦苇生长的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(1):65-68.
- ZHANG Shuang, GUO Cheng-jiu, SU Fang-li, et al. Effect of salinity on the growth of reed[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(1):65-68.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:80-82.
- LI He-sheng. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:80-82.
- [21] Yasutake D, Araki T, Wang W, et al. Analysis of salts transport affected by root absorption capacity in surface-irrigated fields in the upper Yellow River basin[J]. *Biologia*, 2009, 64(3):570-574.
- [22] Besford R T. Effect of replacing nutrient potassium by sodium on uptake and distribution of sodium in tomato plants[J]. *Plant & Soil*, 1978, 50(2):399-409.
- [23] 李妍. Na⁺转运与高等植物耐盐性[J]. 图书情报导刊, 2007, 17(15):179-180.
- LI Yan. Na⁺ delivery and the salt tolerance of higher plant[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2007, 17(15):179-180.
- [24] Quintero J M, Fournier J M, Benlloch M. Na⁺ accumulation in shoot is related to water transport in K⁺ starved sunflower plants but not in plants with a normal K⁺ status[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(1):60-67.
- [25] 王澍, 朱春燕, 俞晨玺, 等. 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), 2011, 29(3):41-46.
- WANG Shu, ZHU Chun-yan, YU Chen-xi, et al. K⁺ and Na⁺ contents in plants of muskmelon varieties under NaCl stress[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2011, 29(3):41-46.
- [26] Maathuis F J M, Amtmann A. K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: The basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios[J]. *Annals of Botany*, 1999, 84(2):123-133.
- [27] Uddin M K, Juraimi A S, Ismail M R, et al. The effect of salinity on growth and ion accumulation in six turfgrass species[J]. *Plant Omics*, 2012, 5(3):244-252.
- [28] 陈静波, 牛佳伟, 田海燕, 等. 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, 2014, 23(3):45-51.
- CHEN Jing-bo, NIU Jia-wei, TIAN Hai-yan, et al. Effect of NaCl stress on growth and Na⁺ and K⁺ accumulation of cultivars ‘Suzhi No. 2’ and ‘Tifgreen’ of hybrid bermudagrass[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2014, 23(3):45-51.
- [29] Ghavri S V, Baudhdh K, Kumar S, et al. Bioaccumulation and translocation potential of Na⁺ and K⁺ in native weeds grown on industrially contaminated soil[J]. *International Journal of Chemtech Research*, 2013, 5(4):1869-1875.
- [30] 王林权, 邵明安. 高等植物对钠离子的吸收、运输和累积[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5):244-249.
- WANG Lin-quan, SHAO Ming-an. The salt influx, transport and accumulation in higher plant[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(5):244-249.
- [31] Ammari T G, Tahboub A B, Saoub H M, et al. Salt removal efficiency as influenced by phyto-amelioration of salt-affected soils[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2008, 6(3):456-460.
- [32] 孙博, 解建仓, 汪妮, 等. 芦苇对盐碱地盐分富集及改良效应的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):92-96.
- SUN Bo, XIE Jian-cang, WANG Ni, et al. Effect of reeds on salt enrichment and improvement of saline-alkali land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3):92-96.
- [33] Ravindran K C, Venkatesan K, Balakrishnan V, et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(10):2661-2664.