

盐碱胁迫对骏枣养分吸收、 积累及运转的影响

袁泽^{1,2}, 王艳¹, 闫敏¹, 周晓凤¹,
蒲小秋¹, 闫浩宇^{1,2}, 苑恒州^{1,2}, 吴翠云^{1,2}

(1. 塔里木大学园艺与林学院/新疆特色果树高效优质栽培与深加工技术国家地方联合工程实验室, 新疆阿拉尔 843300;
2. 塔里木盆地生物资源保护利用兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:为揭示基于树体养分吸收、利用与积累特征的骏枣耐盐碱适应性生理机制,通过测定不同浓度盐碱处理下10年生骏枣各器官中N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu、Na等矿质元素的含量,分析养分在骏枣不同器官中的吸收、积累与运输分配特征。结果表明:矿质离子在盐碱胁迫下主要集中在主根、多年生枝,有无盐碱胁迫时Na⁺都主要聚集在主根中,K⁺浓度在叶片中最高,可以保持较高的K⁺/Na⁺。在低浓度盐碱胁迫(60 mmol·L⁻¹)下Mg、Ca的运输能力增强;高浓度盐碱胁迫(180 mmol·L⁻¹)下须根至叶片的Mg、Ca运输能力分别显著下降44.7%和33.1%,叶片中Ca²⁺/Na⁺、Mg²⁺/Na⁺值分别显著降低72.8%和71.6%,但仍大于1;其他器官中K⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺、Mg²⁺/Na⁺保持稳定且大于1。相较于CK,高浓度盐碱胁迫下当年生枝中的Mn、Fe含量与多年生枝中的Mg含量分别升高了14.01%、11.11%、10.52%,Cu、Zn、Mn、Fe在须根中的含量分别升高了117.53%、25.65%、84.98%、26.19%,主根中N、P、Zn、Mn、Fe、Ca的含量分别下降了23.07%、15.38%、80.48%、49.58%、8.82%、30.44%。结果表明成年骏枣树的盐适应机制主要是通过根对Na⁺的聚积作用,以及叶对K、Mg和Ca的选择性吸收能力增强来实现的。

关键词:骏枣;盐碱胁迫;矿质元素;养分分配;选择性运输

中图分类号:S665.1; Q945.78 **文献标志码:**A

Effects of saline and alkaline stress on nutrient uptake, accumulation and transportation in 'Junzao' Jujube

YUAN Ze^{1,2}, WANG Yan¹, YAN Min¹, ZHOU Xiaofeng¹,
PU Xiaochu¹, YAN Haoyu^{1,2}, YUAN Hengzhou^{1,2}, WU Cuiyun^{1,2}

(1. Horticulture and Forestry College of Tarim University, National-Local Joint Engineering Laboratory of High Efficiency and Superior-Quality Cultivation and Fruit Deep Processing Technology on Characteristic Fruit Trees, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Key Laboratory of Production and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin, Xinjiang Production & Construction Group, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: To reveal the physiological mechanism of salt alkali tolerance of 'Junzao' Jujube based on characteristics of nutrient absorption, utilization, and accumulation in 'Junzao' Jujube trees, the content of mineral elements such as N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Na in organs of 'Junzao' Jujube under different concentrations of salt alkali treatment was measured. The characteristics of nutrient absorption, accumulation, and transportation distribution in different organs of 'Junzao' Jujube were analyzed. The results showed that mineral ions were mainly concentrated in the main roots and perennial branches under salt alkali stress. With and without salt alkali stress, Na⁺ mainly gathered in the main roots of 'Junzao' Jujube, and the K⁺ concentration was highest in the leaves, which can maintain a high K⁺/Na⁺ concentration. The transport capacity of Mg and Ca was enhanced at low

收稿日期:2023-08-15

修回日期:2023-12-08

基金项目:塔里木大学研究生创新项目(TRGR1202228);新疆生产建设兵团第十四师农业农村局委托项目(2021011);新疆生产建设兵团园艺产业创新人才培养示范基地项目(2019CB001)

作者简介:袁泽(1999-),男,新疆阿拉尔人,硕士研究生,研究方向为果树栽培生理。E-mail: yzz1020@163.com

通信作者:吴翠云(1968-),女,新疆和田人,教授,主要从事果实品质与生理研究。E-mail: wcyby@163.com

concentrations of saline alkali ($60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$). Under high concentration saline alkali ($180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), the transport capacity of Mg and Ca from fibrous roots to leaves significantly decreased by 44.7% and 33.1%, and the $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ values in leaves significantly decreased by 72.8% and 71.6%, but still greater than 1. In other organs, $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ remained stable and greater than 1. Compared with CK, the Mn and Fe content in the annual branches and the Mg content in the perennial branches increased by 14.01%, 11.11%, and 10.52% respectively under high concentration saline alkali. The content of Cu, Zn, Mn, and Fe in the fibrous roots increased by 117.53%, 25.65%, 84.98%, and 26.19%, while the content of N, P, Zn, Mn, Fe, and Ca in the main roots decreased by 23.07%, 15.38%, 80.48%, 49.58%, 8.82%, and 30.44%. The results indicated that the salt adaptation mechanism of adult 'Junzao' Jujube was mainly achieved through the accumulation of Na^{+} by roots and the enhanced selective absorption ability of K, Mg, and Ca by leaves.

Keywords: Junzao; salinity and alkaline stress; mineral elements; nutrient allocation; selective transportation

枣是新疆第一大林果产业,其栽培面积为 41.3 万 $\text{hm}^{2[1]}$,主要分布于南疆环塔里木盆地林果产区,且大多数种植于盐碱地。盐渍化土壤对枣树生长^[2]、坐果及果实品质^[3]均造成不同程度的影响。研究表明,盐渍化土壤可能导致果树树体对养分的吸收利用及积累差异,从而产生不同的适应性机制^[4]。

土壤 pH 值过高会降低养分溶解度,使之形成沉淀,降低根的吸收能力以及根系周围养分供应能力,造成植物营养缺乏和失调。在一定浓度盐环境下,植物体内会积累大量钠离子,发生离子毒害,加剧离子间的竞争,从而限制植物体对其他营养元素的吸收和转运^[5-6]。盐碱环境中大果沙枣会把 Na^{+} 阻隔在根区外,并将 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 运输到枝、叶中以维持体内离子平衡、生理活动及信号传导,使植株在高盐胁迫中具有较高的适应能力^[7]。而泌盐植物柽柳叶片中的 Na^{+} 含量显著高于其他元素含量,对 Na^{+} 的选择性吸收并向上运移可能作为其主要的抗盐机制^[8]。应对 NaCl 盐胁迫和 NaHCO_3 碱胁迫时,苗期金丝小枣、酸枣会在叶片中保持较低的 Na^{+} 浓度以及稳定的高 K^{+} 浓度,保持高的 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$,以这种调节机制抵抗盐碱胁迫^[9]。

有关盐碱胁迫对成龄枣树体养分吸收、利用及积累运转方面的研究少有报道。因此,为探讨基于树体养分吸收与积累特征的枣耐盐碱适应性机制,本研究通过 NaCl 、 NaHCO_3 混合盐碱处理模拟南疆枣园盐碱地栽培环境,研究不同盐碱浓度下成年骏

枣器官中养分的积累与运移,从骏枣营养生理方面解释其抗盐机制,为盐碱环境下新疆红枣耐盐性研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验地位于新疆生产建设兵团第一师十团七连,试验材料为 10 年生骏枣树,高 2.0~2.5 m,冠幅 1.8~2.2 m,株行距 1.5 m×3.0 m,每年采取更新复壮的修剪方式。试验地不同土层土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

采用单因素完全随机试验设计,设置不同浓度的混合盐碱胁迫处理,单行小区,每小区 20 株骏枣树。根据对阿拉尔盐碱地主要盐碱类型的分析,采用 NaCl 和 NaHCO_3 以 3:1 比例混合形成混合盐碱溶液,加入清水后配制形成不同浓度梯度:0 (CK)、60 (T1)、120 (T2)、180 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (T3)。

为避免不同浓度处理间盐碱溶液相互渗透,胁迫处理前在各处理行间挖 90 cm 深沟,四周及底部铺双层塑料薄膜隔离,并在试验区骏枣树上方搭设两侧通风的塑料遮雨棚,以防降雨影响。于 7 月上旬骏枣坐果期间以滴灌的方式在 2021—2022 年连续两年进行胁迫处理,每年连续浇灌 2 次盐碱溶液,浇灌的时间间隔为 20 d。2022 年于 7 月 8 日开始浇灌盐碱溶液,7 月 28 日再次浇灌,40 d 后于 9 月 8 日骏枣果实营养积累最大时期进行采样。

表 1 试验地不同土层土壤基本理化性质

Table 1 Basic soil physicochemical properties in different soil layers of the experimental site

土层深度 Soil depth /cm	电导率 EC /($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	碱解氮含量 Alkaline nitrogen content /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷含量 Quick-acting phosphorous content /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾含量 Potassium fast-acting content /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质含量 Organic matter content /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0~40	167.25±15.88	7.76±0.78	37.73±3.78	51.22±5.16	100.08±5.59	7.96±0.44
40~80	145.23±14.89	7.47±1.21	29.33±2.96	35.07±3.14	72.64±3.27	6.43±0.76
80~120	141.23±17.21	7.82±0.69	25.68±2.45	14.23±1.42	69.55±3.02	3.22±0.56

1.3 测定项目及方法

1.3.1 样品采集及矿质元素含量测定 每个处理小区内随机选取 3 株长势相对一致的枣树,以树干为圆心,在其 0.5 m 半径的位置挖出全株树体。将树体分解为叶片、当年生枝、多年生枝、主根、须根 5 部分,称重后作为各器官生物量,再将各器官以随机重量取样并称重,105℃ 下杀青 30 min 后 65℃ 下烘至恒重,称其干质量后,粉碎过 60 目筛,用作各项矿质元素测定。各器官中全氮(N)含量测定使用 C/N 分析仪;各器官中 P、K、Na、Ca、Mg、Zn、Cu、Fe、Mn 矿质元素含量测定使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES);在每个处理小区内骏枣树间滴灌带的附近位置,使用土钻随机取 3 个样点的 0~120 cm 深土层土壤用于试验地土壤基本性质测定,速效氮含量测定使用碱解扩散法,速效磷含量测定使用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾含量测定使用醋酸铵浸提-火焰光度法,有机质含量测定使用重铬酸钾法。

1.3.2 养分积累分配系数计算 植物器官中养分积累分配系数计算公式如下^[10],以叶片为例:

$$X_{\text{叶}} = C_{\text{叶}} \times M_{\text{叶}}$$

$$X_{\text{总}} = X_{\text{叶}} + X_{\text{当年生枝}} + X_{\text{多年生枝}} + X_{\text{主根}} + X_{\text{须根}}$$

$$K_{\text{叶}} = M_{\text{叶}} / M_{\text{总}} \times 100\%$$

式中, $X_{\text{叶}}$ 为叶片元素积累量(mg); $C_{\text{叶}}$ 为叶片中元素浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $M_{\text{叶}}$ 为叶片生物量(mg); $K_{\text{叶}}$ 为叶片养分占总养分的百分比积累分配系数。

1.3.3 离子选择性运输能力计算 各器官对离子的选择性运输系数 $S_{X/Na} = \text{库器官} [X/Na^+] / \text{源器官} [X/Na^+]$,X 代表 K^+ 、 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} , $S_{X/Na}$ 值越大表示源器官控制 Na^+ 、促进 X 离子向库器官运输的能力越强,留在根中的 Na^+ 越多,则植物抗盐性越大,所受盐害越小^[11]。

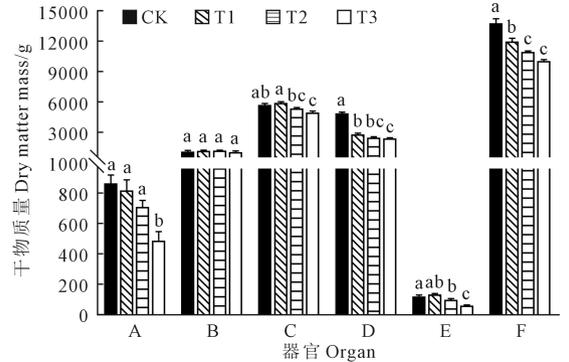
1.3.4 数据处理 数据采用 Excel 2010 整理和制图,采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析、独立样本 t 检验和 Duncan 多重比较;使用 GraphPad Prism 软件进行生物量、离子比制图,使用 Origin 2018 进行 PCA 分析。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对树体各器官干物质质量的影响

盐碱胁迫不同程度抑制了骏枣各器官的生长。如图 1 所示,T1、T2、T3 处理下的主根干物质质量显著低于 CK,T3 处理下的叶片、多年生枝、须根干物质质量低于 CK,当年生枝干物质质量与 CK 差异不显著。随着盐碱浓度的上升,骏枣干物质质量显著降低。与

CK 相比,T3 处理的骏枣叶片、多年生枝、主根、须根干物质质量分别降低 43.37%、12.10%、46.04%、48.72%,T1、T2、T3 整株干物质质量分别降低 12.69%、19.74%、26.14%。



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A:叶片;B:当年生枝;C:多年生枝;D:主根;E:须根;F:整株。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). A: Leaf; B: Annual branch; C: Perennial branch; D: Main root; E: Fibrous root; F: Whole plant. The same below.

图 1 盐碱胁迫下骏枣各器官干物质质量
Fig.1 Dry matter mass of organs of Junzao under saline and alkaline stress

2.2 盐碱胁迫对树体各器官营养元素含量的影响

盐碱胁迫处理下骏枣树体各器官矿质元素含量见表 2。各处理叶片中 Mn、Fe、Ca 含量随盐碱浓度的升高呈现不断下降的趋势,K、Na 含量则表现持续升高,Cu、Zn 含量均呈现先下降后在 T2 处小幅度提升后下降,P、Mg 含量在 T1 浓度时达到最高随后开始下降。骏枣当年生枝的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量均以 T2 处理最高,且呈现“降-升-降”趋势;Na 呈显著升高趋势,T3 处理下 K 含量显著降低,P、Mg 含量呈现先下降后逐渐升高的趋势,Ca 含量呈不断下降趋势。骏枣多年生枝中 N、P、Zn、Mn 含量呈现“降-升-降”的趋势,Ca、Cu 含量呈显著下降趋势。随盐碱浓度的升高,骏枣主根中 N、P、Cu、Zn、Mn、Fe、Mg 含量呈现先升高后降低的趋势,Ca 含量持续下降,Na 含量变化趋势则相反。骏枣须根中的矿质元素含量变化趋势表现为 N、Ca、K 含量持续下降,Na 含量持续上升;Cu、Zn、Mn、Fe 含量呈现先下降后升高的趋势,均以 T3 处理含量最高,分别较 CK 升高 110%、25%、87%、23%;而 Mg 含量则表现为先上升后下降趋势。

2.3 盐碱胁迫对树体各器官矿质元素积累量的影响

骏枣器官中养分含量占比多少与该器官生物量多少及该器官中养分浓度大小有关。如图 2 所示,

表 2 盐碱胁迫下骏枣各器官中矿质元素含量

Table 2 Contents of elements in various organs of Junzao under saline and alkaline stress

器官 Organ	处理 Treatment	N /(g · kg ⁻¹)	P /(g · kg ⁻¹)	K /(g · kg ⁻¹)	Ca /(g · kg ⁻¹)	Na /(g · kg ⁻¹)	Mg /(g · kg ⁻¹)	Fe /(g · kg ⁻¹)	Mn /(mg · kg ⁻¹)	Zn /(mg · kg ⁻¹)	Cu /(mg · kg ⁻¹)
A	CK	19.1±0.6b	2.0±0.0b	32.7±0.6d	55.9±0.4a	0.2±0.0c	7.1±0.1b	9.0±0.2a	130.5±7.1a	55.5±6.0a	46.3±2.0a
	T1	20.5±0.6a	2.2±0.0a	36.5±1.7c	45.6±0.4b	0.4±0.0b	9.5±0.4a	7.1±0.1b	99.1±2.9b	34.9±3.8b	25.7±3.1c
	T2	18.7±0.7b	1.8±0.0c	38.8±0.7b	42.9±0.9c	0.4±0.0b	6.4±0.1c	6.7±0.2c	81.8±4.7c	38.5±2.7b	32.0±1.8b
	T3	21.8±0.6a	1.7±0.0d	49.5±0.7a	42.1±0.6d	0.6±0.0a	5.5±0.1d	6.1±0.1d	61.1±6.3d	26.1±0.8c	6.1±1.8d
B	CK	12.5±0.3a	1.0±0.1a	8.6±0.6a	37.1±0.0a	0.5±0.0d	2.6±0.1ab	6.3±0.1b	76.1±2.6b	37.3±1.3a	34.6±4.8a
	T1	11.0±0.8ab	0.6±0.0c	7.9±0.4a	34.9±0.4b	0.6±0.0c	1.7±0.1c	3.2±0.1c	51.4±4.1c	27.5±1.9b	26.7±4.5b
	T2	11.8±0.6b	0.6±0.0c	8.3±0.5a	33.1±0.9c	1.0±0.0b	2.5±0.0b	7.2±0.2a	95.0±8.4a	38.0±1.2a	38.3±1.5a
	T3	10.7±0.4b	0.7±0.0b	6.6±0.2b	30.8±1.0d	1.3±0.1a	2.7±0.1a	7.0±0.1a	88.5±2.1a	29.0±1.2b	25.5±2.6b
C	CK	0.6±0.0b	0.4±0.0a	4.9±0.0b	52.7±0.8a	2.2±0.0b	3.4±0.1b	4.6±0.1a	55.1±4.0a	6.9±0.7b	16.0±4.1a
	T1	0.4±0.0c	0.3±0.0b	4.5±0.2b	51.6±0.4b	2.7±0.1a	3.6±0.1a	3.2±0.0c	47.7±2.3bc	2.7±0.7c	8.9±0.8b
	T2	0.8±0.1a	0.4±0.0a	4.7±0.1b	43.5±0.6c	2.0±0.1c	3.1±0.1c	3.3±0.1b	52.6±2.6ab	13.3±3.2a	8.5±0.2b
	T3	0.3±0.0c	0.3±0.0b	5.6±0.5a	42.4±0.4d	2.7±0.1a	3.8±0.1a	3.3±0.1bc	43.6±1.8c	6.8±0.6b	6.3±0.5b
D	CK	1.3±0.1b	1.3±0.0ab	5.8±0.1b	38.1±0.2a	3.0±0.1d	5.2±0.1d	3.4±0.1c	48.0±0.6c	24.6±2.2b	3.4±0.5c
	T1	1.9±0.1a	1.4±0.0a	4.2±0.1c	31.4±0.2b	5.5±0.4c	10.2±0.5a	6.7±0.1a	99.1±5.0a	42.6±3.5a	19.7±2.4a
	T2	0.8±0.1d	1.3±0.0b	7.1±0.1a	29.8±0.5c	6.1±0.1b	8.5±0.3b	5.4±0.1b	68.2±2.2b	18.8±2.2c	17.3±2.3a
	T3	1.0±0.1c	1.1±0.1c	6.0±0.1b	26.5±0.5d	6.6±0.1a	6.2±0.1c	3.1±0.1c	24.2±2.3d	4.8±1.0d	8.8±1.6b
E	CK	6.1±0.1a	1.2±0.0a	7.9±0.1a	38.1±0.2s	6.3±0.1d	7.1±0.1c	4.2±0.1b	54.6±0.7bc	23.0±0.9b	15.4±2.9c
	T1	5.4±0.3b	0.8±0.0d	7.5±0.2b	31.4±0.2b	7.4±0.1c	8.9±0.1a	3.6±0.2c	58.5±1.2b	10.1±1.1d	7.7±1.9d
	T2	5.2±0.2b	0.9±0.0c	5.9±0.1c	29.8±0.5c	9.5±0.1b	8.5±0.1b	2.0±0.1d	54.6±1.1bc	13.4±1.9c	22.9±2.6b
	T3	3.3±0.1c	1.0±0.0b	4.7±0.1d	26.5±0.5d	11.1±0.6a	7.4±0.1c	5.3±0.1a	101.0±2.1a	28.9±1.5a	33.5±1.8a

注:同列数据不同字母表示差异显著(P<0.05)。A为叶片,B为当年生枝,C为多年生枝,D为主根,E为须根。下同。

Note: Different letters in the same column of data indicate significant differences (P<0.05). A refers to the leaf, B refers to the annual branch, C refers to the perennial branch, D refers to the main root, E refers to the fibrous root. The same below.

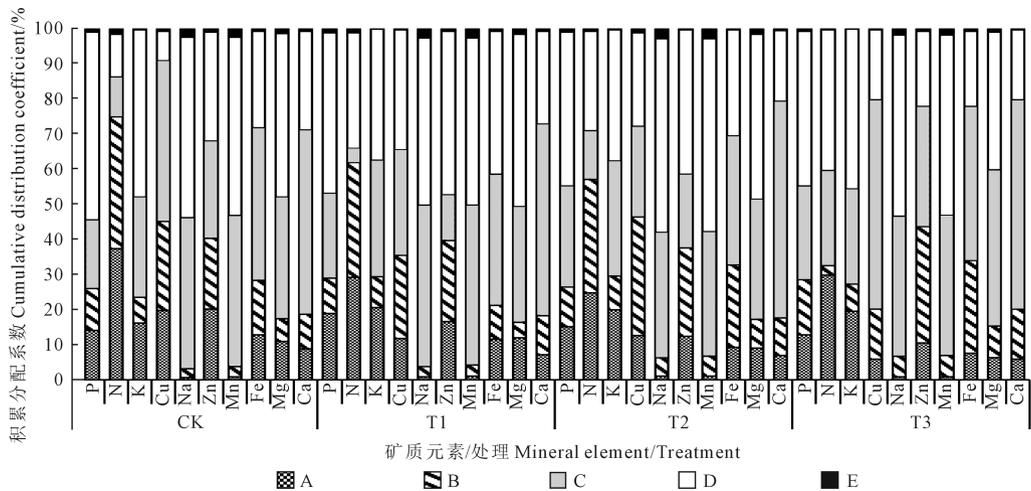


图 2 盐碱胁迫下骏枣器官中矿质元素的积累分配系数

Fig.2 Cumulative distribution coefficients of mineral element in organs of Junzao under saline and alkaline stress

植株养分多集中于多年生枝和主根中,须根最少。各处理下骏枣器官中 P、Na、Mn 含量均以主根中占比最高,须根最低,须根中矿质元素含量除 Mn 介于 2.0%~3.0%之间,其他养分含量均介于 0.5%~1.0%之间。CK、T1、T2 处理下 N 含量在当年生枝中占比较高,T3 时 N 含量主要集中在主根中。CK、T1、T2 处理下 Mg 含量在主根中占比较高,T3 时 Mg 含量

主要集中在多年生枝中,Na、Mn 在主根中占比为 50%左右,Na 在多年生枝中占比介于 35.0%~42.0%之间。

如表 3 所示,随着盐碱浓度升高,主根中 P 积累量和叶片中的 Cu、Zn、Fe、Ca 积累量呈现逐渐降低的趋势,与 CK 相比,T3 处理主根中 P 积累量降低 31.65%,叶片中 Cu、Zn、Fe、Ca 积累量分别降低

92.56%、66.99%、61.90%、57.90%。主根中的 K 积累量和多年生枝中的 N、Zn、Fe、Mn 积累量、当年生枝中的 Mg 积累量呈现先降低后升高的趋势,叶片中的 N 则相反。主根中的 Ca 积累量呈逐渐下降趋势,主根中 Cu、Zn、Fe、Mg 和叶片中 P 积累量呈现先升高再降低的趋势。当年生枝中 Na、Mn 积累量呈现逐渐升高的趋势。与 CK 相比,T3 处理多年生主枝中 Ca 积累量降低 27.27%,当年生枝中 Zn、Mn 积累量分别升高 3.41%、143.33%。

2.4 盐碱胁迫对树体各器官营养元素选择性运输能力的影响

在树体器官中养分由源器官输送至库器官。如表 4 所示,随着盐碱浓度的升高,主根→多年生枝

处的 $S_{K/Na}$ 、 $S_{Ca/Na}$ 值均在 T2 处理下达最大值后逐渐下降, $S_{Mg/Na}$ 则呈持续升高的趋势。多年生枝→当年生枝处 $S_{K/Na}$ 、 $S_{Ca/Na}$ 、 $S_{Mg/Na}$ 值均呈持续下降的趋势。当年生枝→叶处的 $S_{K/Na}$ 值逐渐升高,T3 处理较 CK 升高 93.6%, $S_{Ca/Na}$ 值呈先下降后升高再下降的趋势, $S_{Mg/Na}$ 值呈现先上升在 T1 处达最大值后逐渐下降的趋势。主根→多年生枝处 CK 和 T1 处理下 $S_{Mg/Na} < 1$,T2、T3 处理下 $S_{Mg/Na} > 1$ 。在骏枣树体的源器官→库器官下 Na、K、Ca 的运输能力随盐碱水平的升高整体呈现下降趋势,但均保持 > 1 的水平($S_{Mg/Na}$ 的 T1 处理除外),说明在盐碱浓度 $180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时枣树的养分吸收能力下降,但仍能保持一定的抗盐能力。

表 3 盐碱胁迫下单株骏枣各器官中矿质元素积累量

Table 3 Accumulation of mineral elements in organs of single Junzao under saline and alkaline stresses

处理 Treatment	器官 Organ	P/g	N/g	K/g	Cu/mg	Na/g	Zn/mg	Mn/g	Fe/g	Mg/g	Ca/mg
CK	A	1.83	17.20	29.44	41.69	0.21	49.99	0.10	8.18	6.49	52.03
	B	1.56	17.21	13.50	54.08	0.79	49.56	0.30	10.08	3.96	58.55
	C	2.54	5.15	52.04	96.71	13.49	68.12	4.50	27.74	20.55	307.94
	D	6.98	5.65	87.01	17.86	16.09	76.70	5.39	17.75	27.84	166.75
	E	0.16	0.79	0.76	1.98	0.81	2.61	0.27	0.55	0.92	4.94
T1	A	1.90	17.49	30.51	21.87	0.36	38.51	0.14	6.26	8.16	35.88
	B	1.00	19.56	13.10	44.29	1.07	53.66	0.39	5.20	3.01	54.49
	C	2.42	2.40	49.21	55.81	17.22	30.15	5.70	2.01	22.59	270.49
	D	4.58	19.81	55.45	63.40	17.92	108.20	6.03	21.80	33.46	130.95
	E	0.12	0.78	0.58	1.10	1.07	2.38	0.35	0.54	1.28	4.48
T2	A	1.35	13.84	28.72	23.69	0.33	27.14	0.12	4.93	4.84	33.86
	B	1.02	17.96	13.82	63.93	1.73	54.66	0.61	12.29	4.27	51.41
	C	2.58	7.72	47.22	48.68	11.46	45.74	3.85	19.36	18.08	299.82
	D	3.93	15.76	53.58	50.22	17.75	89.10	5.96	15.95	24.93	97.94
	E	0.10	0.56	0.75	2.44	1.01	1.26	0.33	0.22	0.91	3.16
T3	A	0.91	11.12	25.27	3.13	0.34	16.50	0.12	3.11	2.86	21.90
	B	1.11	0.98	10.38	39.08	2.12	51.31	0.73	10.71	4.13	53.52
	C	1.90	100.75	35.30	33.39	14.49	53.28	4.85	17.70	20.14	223.93
	D	3.13	14.85	59.03	24.77	18.80	33.42	6.28	8.73	17.77	75.33
	E	0.06	0.22	0.39	2.21	0.73	1.40	0.24	0.34	0.48	1.74

表 4 盐碱胁迫下骏枣各器官对矿物质离子的选择性运输系数

Table 4 Selective transport coefficients of mineral ions in organs of Junzao under saline and alkaline stress

选择性运输系数 Selective transport coefficient	处理 Treatment	E→D	D→C	C→B	B→A	E→A
$S_{K/Na}$	CK	2.06±0.08a	1.18±0.04c	7.63±0.39a	7.97±0.67c	23.15±0.66a
	T1	1.34±0.06c	2.29±0.19ab	7.49±0.22a	7.08±0.74c	18.52±2.80b
	T2	1.55±0.05b	2.40±0.22a	2.89±0.51b	10.80±1.01b	10.73±1.07c
	T3	1.67±0.12b	1.95±0.23b	2.80±0.45b	15.43±0.25a	8.99±0.83c
$S_{Ca/Na}$	CK	1.69±0.03ab	2.23±0.06c	3.22±0.11a	3.22±0.13a	19.07±1.31b
	T1	1.75±0.12a	2.16±0.27c	3.22±0.2a	1.96±0.04c	9.63±0.62c
	T2	1.77±0.09a	4.76±0.51a	1.63±0.14b	3.42±0.25a	32.96±3.93a
	T3	1.52±0.11b	3.86±0.21b	1.14±0.16c	2.55±0.16b	10.53±0.35c
$S_{Mg/Na}$	CK	1.52±0.09a	0.89±0.06c	3.26±0.2a	5.97±0.12b	4.38±0.26a
	T1	1.54±0.18a	0.72±0.14c	2.12±0.22b	8.03±0.62a	2.34±0.18b
	T2	1.55±0.09a	1.12±0.07b	1.57±0.19c	5.83±0.39b	2.74±0.23b
	T3	1.25±0.14b	1.47±0.11a	1.41±0.18c	4.20±0.33c	2.93±0.30b

2.5 盐碱胁迫对树体各器官离子比变化的影响

如图3所示,与CK相比,T3处理下骏枣不同器官中的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 K^+/Na^+ 值均有所降低。在低浓度盐碱胁迫下 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 K^+/Na^+ 在多年生主枝中有小幅度升高,高浓度盐碱胁迫下均呈现下降趋势,不同浓度盐碱胁迫下骏枣各器官中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 K^+/Na^+ 值表现为:叶>当年生枝>多年生枝>主根>须根。表明叶对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、 K^+ 的吸收显著高于其他器官,且地上部器官的吸收高于地下部。在 T3 处理下主根、须根的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 值 <1 ,说明在高浓度盐碱胁迫下骏枣地下部分对 Mg^{2+} 、 K^+ 的吸收受到严重阻碍,主根和须根的正常生长发育受到抑制。

2.6 盐碱胁迫下骏枣树体营养元素含量的主成分分析

如图4所示,不同盐碱浓度处理被明显区分出来,第一主成分在叶、当年生枝、多年生枝、主根、须根表现分别占总变异系数的 62.82%、41.10%、54.80%、61.50%、59.20%,第二主成分各器官分别占总变异系数的 20.4%、29.2%、24.30%、27.30%、27.10%。在骏枣叶片中,第一主成分主要为 Ca、Zn、Fe,第二主成分主要为 Mg、P、Cu;当年生枝中第一主成分主要为 Mn、Fe、Mg,第二主成分主要为 Ca、P、Cu;多年生枝中第一主成分主要为 N、Na、Mn、Mg、Ca,第二主成分主要为 Cu、K、P;主根第一主成分主要为 Mg、Ca、Mn、Cu,第二主成分主要为 Na、K、N;须根第一主成分主要为 N、K、Ca、Cu、Na、Mn,第二主成分主要为 P、Zn、Mg。

3 讨论

3.1 盐碱胁迫下矿质元素在植株中的分布与累积

大量研究表明,植物可将 Na^+ 吸收、转运至体内不同区域,通过离子区隔化抵抗胁迫的伤害,耐盐品种的番茄^[12]、西米亚棕榈^[13]、大果沙枣^[7]通过将 Na^+ 大量积累在地下部以应对盐害,而兰花^[14]、白三叶草^[15]、滨藜属植物^[16]、豌豆品种‘银豌1号’和‘737’^[17] 优先将 Na^+ 更多地转运至叶片中来应对盐碱胁迫对植物生长发育的伤害。本研究中,不同浓度盐碱处理下骏枣 Na^+ 浓度始终表现为地下部分远大于地上部分,且随着盐碱浓度升高, Na^+ 在不同器官中的浓度分布顺序均表现为主根>须根>多年生枝>当年生枝>叶,说明骏枣应对盐碱胁迫是通过将 Na^+ 大量区隔在根部以减轻盐碱危害。在本试验中, K^+ 大量集中于叶片中,与器官中 Na^+ 的分布和积累相反,根中的 K^+ 浓度呈现较低水平且随着盐碱浓

度的升高 K^+ 浓度显著降低,与啤酒大麦组织^[18] 中的 Na^+/K^+ 关系表现大致相同,即在叶片中保持较高的 K^+/Na^+ 比值,可减轻植物体受到的盐害^[19]。 Na^+ 还能参与植物体内的渗透调节,降低植物水势,减轻盐碱胁迫引起的干旱胁迫^[20],使枣树在一定浓度的盐碱胁迫下正常生长、发育及开花结果。

盐碱环境下,盐离子被植株大量吸收进体内并累积,导致各器官中 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 离子比发生了变化,各组织的离子平衡被打破。本研究中,在低浓度盐碱环境下骏枣地上部各器官 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 值显著高于地下部器官,随着盐碱浓度的升高骏枣叶片中的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 显著降低,但始终高于其他器官,由此推

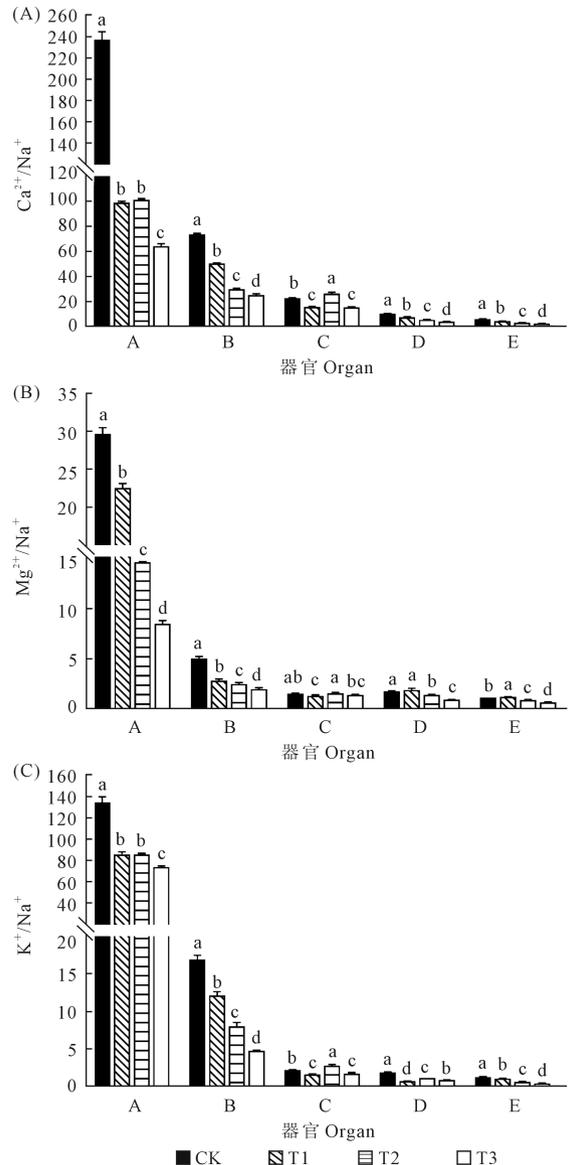


图3 盐碱胁迫下骏枣各器官 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 K^+/Na^+ 变化

Fig.3 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ and K^+/Na^+ changes in organs of Junzao under saline and alkaline stress

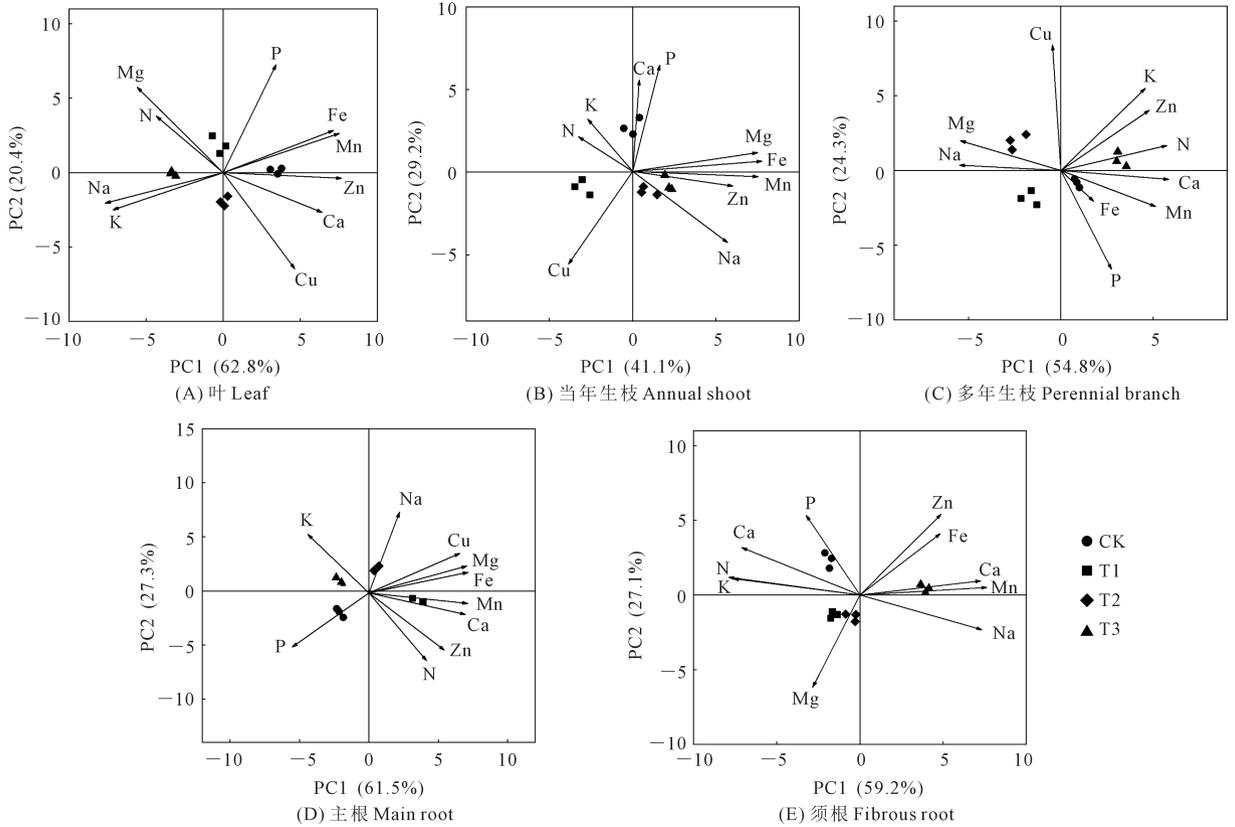


图 4 盐碱胁迫下骏枣各器官中元素含量主成分分析以及各元素对 PC1 和 PC2 的负荷

Fig.4 Principal component analysis of mineral element content and the load of each element on PC1 and PC2 in organs of Junzao under saline and alkaline stress

测在盐碱环境下,骏枣树体会将 K、Ca、Mg 转运并积累至当年生枝、叶中,维持植物体内正常的离子平衡、生理活动及信号传导,提高枣对高盐碱胁迫的抵抗能力。本研究中,低浓度盐碱胁迫使骏枣树体各器官中的 Ca 均表现为上升趋势,有可能是发生盐碱胁迫后 Ca 会对细胞膜结构起保护作用,减轻盐碱胁迫对植物体造成的破坏^[21]。在低浓度盐碱胁迫下骏枣叶片 Mg^{2+} 浓度显著高于地上部分其他器官,可能是骏枣树体将 Mg^{2+} 更多地运移至叶片,加强其对树体光合作用的支持。骏枣树体在低浓度盐碱胁迫时提高叶片 Ca^{2+}/Na^{+} 和 Mg^{2+}/Na^{+} 比值,这可能是骏枣对抗盐碱胁迫的机制之一。

不同盐碱浓度对不同养分运转系统影响不同,随着盐碱浓度升高,叶片中的 N 占比逐渐升高,与前人研究中发现高浓度盐碱胁迫下抗盐性大豆叶片中氮含量升高的结果类似,可能二者将氨基酸和蛋白质形式存在的氮进行重新分配,从而在一定程度上抵消盐分胁迫带来的不利影响^[22]。低浓度盐碱胁迫下骏枣根中的 Ca、Zn 积累量呈下降趋势,与碱环境下的棉花^[23]表现类似,矿质元素不仅通过调

节离子平衡抗盐碱,还会参与植物体内渗透物质的合成并在胁迫防御反应中起重要作用,因此推测较低盐浓度时各器官中养分含量有所提升,以抵抗盐碱胁迫;而高浓度盐碱胁迫会导致植物体离子平衡被打破,机体对矿质元素的吸收受到影响,且植物根系发育受阻,影响矿质元素的吸收和转运^[24],因此高浓度盐碱胁迫下主根中 Cu、Zn、Mn、Fe 积累量上升。低浓度盐碱胁迫时骏枣器官会将 K^{+} 大量向上运输以调节离子平衡,因此源器官中的 K^{+} 含量减少,盐碱浓度过高后 K^{+} 运转系统被破坏,运转效率减弱甚至无法将养分向上运移,导致养分在源器官中堆积,因此出现主根中 K^{+} 占比随着盐碱浓度的升高、养分积累量先降低后升高的现象。

3.2 盐碱胁迫下矿质离子在植株中的吸收与运输

不同离子在植物体内与酶亲和性不同,造成了其在植物体中的吸收和运输能力不同^[25]。在盐碱胁迫下 Na^{+} 大量聚集影响植物体对离子的吸收和运输, $S_{K/Na}$ 、 $S_{Mg/Na}$ 和 $S_{Ca/Na}$ 的大小反映了植物体对 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 选择性运输能力的强弱。在本试验中,随着盐碱浓度的升高,枝到叶中骏枣树体对 K^{+}

的选择性运输能力显著提高,分析认为是 Na^+ 和 K^+ 半径与水结合能力相似所产生的拮抗关系^[26], Na^+ 在根部大量聚集,在叶片的积累量极低;骏枣叶片对 K^+ 选择性运输增强,因此受到盐碱胁迫时,骏枣叶片可能加大对 K^+ 的吸收,以维持细胞正常代谢。这可能是枣树的抗盐机制之一。本研究中,地上部分器官的 $S_{\text{Mg}/\text{Na}}$ 和 $S_{\text{Ca}/\text{Na}}$ 显著高于地下部分且均大于 1,保持一个稳定的较高水平,说明盐碱胁迫下骏枣树体能够保持细胞内的离子水平和离子平衡,维持树体生长与营养的运输,保证果实的正常发育。在低浓度盐碱胁迫下 $S_{\text{Mg}/\text{Na}}$ 和 $S_{\text{Ca}/\text{Na}}$ 会得到提高,高盐碱浓度下骏枣树体各器官的 $S_{\text{Mg}/\text{Na}}$ 、 $S_{\text{Ca}/\text{Na}}$ 显著低于 CK,与沙拐枣^[27]、棉花^[28] 等植物表现相似,表明在盐胁迫下,植物对 Ca、Mg 的吸收和运输能力均会下降,体现了盐分对植物的毒害作用。

4 结 论

土壤盐碱胁迫对骏枣树体各器官中矿质养分积累、分布和选择性吸收、运输会产生影响,对根、叶处影响较为明显。无论有无盐碱胁迫,骏枣树均会将 Na^+ 聚集在根中,从而增强地下部对 K^+ 的向上运输使骏枣叶片 K^+ 浓度增高,始终在叶片保持较高的 K^+/Na^+ ,具有抵抗盐碱胁迫的能力。高浓度盐碱胁迫 ($180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下叶中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 值显著降低,但依然保持高水平,这也是骏枣树体抵抗盐碱胁迫的方式之一。与 CK 相比,高盐碱浓度下主根中 P 含量和叶片中的 Cu、Zn、Fe、Ca 含量明显减少,加快了这些养分从源器官向库器官的运转,说明骏枣树会根据不同的盐碱浓度对离子积累、吸收做出调节。高浓度盐碱胁迫下 K、Ca、Mg 的运输能力明显下降,根部的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值 < 1 ,骏枣根部抵抗盐碱能力会大幅下降,抗盐碱机制可能被打破,因此骏枣树体仅对一定浓度的盐碱胁迫 ($< 180 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 具有调节和抵抗能力。

本研究表明,在低浓度盐碱环境下骏枣树体有很好的适应能力,在较高浓度盐碱环境下树体仍能将 Na^+ 聚集在地下部,提高地上部对 K^+ 的吸收,抵抗盐害,使骏枣树得以生存。因此在栽培管理上多施 K、Ca、Mg 肥,保证骏枣在高浓度盐碱环境下保持离子平衡,有利于进一步增强抗性,使其发育良好,提高枣果实品质。

参 考 文 献:

[1] 曹振兴,邓婉莹,王振磊,等. 新疆南疆不同产区骏枣果实品质评价[J/OL]. 分子植物育种: 1-11. (2023-03-28) [2024-03-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20230327.1716.014.html>.

CAO Z X, DENG W Y, WANG Z L, et al. Evaluation of the quality of junjube fruits from different production regions in southern Xinjiang[J/OL]. Molecular plant breeding: 1-11. (2023-03-28) [2024-03-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20230327.1716.014.html>.

[2] 王志强,吴翠云,杨哲,等. 盐碱胁迫对酸枣幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 153-160.

WANG Z Q, WU C Y, YANG Z, et al. Effect of saline-alkali stress on growth, physiological and biochemical characteristics of wild jujube seedlings[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 153-160.

[3] 位杰,王合理,吴翠云,等. 复合盐碱胁迫对灰枣果实内在品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 144-147.

WEI J, WANG H L, WU C Y, et al. Effects of mixed salt-alkali stress on the internal quality of *Zizyphus jujuba* 'Huizao' [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 144-147.

[4] FLOWERS T J, HAJIBAGHERI M A. Salinity tolerance in *Hordeum vulgare*: ion concentrations in root cells of cultivars differing in salt tolerance[J]. Plant and Soil, 2001, 231(1): 1-9.

[5] 周和平,张立新,禹锋,等. 我国盐碱地改良技术综述及展望[J]. 现代农业科技, 2007,(11): 159-161, 164.

ZHOU H P, ZHANG L X, YU F, et al. Review and prospect of saline alkali land improvement technology in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007,(11): 159-161, 164.

[6] AZIZ I, KHAN M A. Experimental assessment of salinity tolerance of *Ceriops tagal* seedlings and saplings from the Indus delta, Pakistan [J]. Aquatic Botany, 2001, 70(3): 259-268.

[7] 罗青红,阿不都热西提·热合曼,李英仑,等. 盐渍土壤中大果沙枣成年树离子吸收、运输和分配特征研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(11): 87-94.

LUO Q H, REHEMAN A, LI Y L, et al. Research on the ion absorption, transportation and distribution of mature *E. angustifolia* in saline soil habitat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(11): 87-94.

[8] 王慧,刘宁,姚延涛,等. 晋北干旱区盐碱地柽柳叶总有机碳与营养元素含量的关系[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2036-2044.

WANG H, LIU N, YAO Y T, et al. The relationship between foliar TOC of *Tamarix chinensis* Lour. and nutrient elements' content in saline-alkali soil of North Shanxi [J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26(12): 2036-2044.

[9] 陈雄伟,马艳萍,徐呈祥,等. 渗透势干旱、盐、碱胁迫下枣和酸枣盐分离子吸收运输分配特性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(1): 20-25.

CHEN X W, MA Y P, XU C Y. Absorption, translocation and distribution characteristics of salt ions of Chinese jujube and sour date under iso-osmotic potential drought, salt and alkaline stresses[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(1): 20-25.

[10] 赵新华,束红梅,王友华,等. 施氮量对棉铃干物质和氮累积及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 888-897.

ZHAO X H, SHU H M, WANG Y H, et al. Effects of nitrogen application on dry matter and nitrogen accumulation and distribution in

- cotton bolls[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4): 888-897.
- [11] PITMAN M G. Transport across the root and shoot/root interactions [M]//STAPLES R C, TOENNIESSEN G H. Salinity tolerance in plants, strategies for crop improvement. New York: John Wiley and Sons, 1984: 93-123.
- [12] 王学征, 李秋红, 吴凤芝. NaCl 胁迫下栽培型番茄 Na⁺、K⁺ 吸收、分配和转运特性[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(7): 1423-1432.
WANG X Z, LI Q H, WU F Z. The absorption, distribution, and transport characteristics of Na⁺ and K⁺ in cultivated tomatoes under NaCl stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(7): 1423-1432.
- [13] MARQUES E C, DE FREITAS P A F, ALENCAR N L M, et al. Increased Na⁺ and Cl⁻ accumulation induced by NaCl salinity inhibits cotyledonary reserve mobilization and alters the source-sink relationship in establishing dwarf cashew seedlings [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35: 2171-2182.
- [14] PAN T, LI W, CHEN Y. Na⁺ distribution and secretion characters from *Tamarix Hispida* under salt stress[C]//Soft Computing in Information Communication Technology, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 45-52.
- [15] 徐威, 袁庆华, 王瑜, 等. 盐胁迫下白三叶幼苗离子分布规律的初步研究[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(5): 33-39.
XU W, YUAN Q H, WANG Y, et al. Studies on ion distribution in white clover seedling under salt stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(5): 33-39.
- [16] 张利文, 胡生荣, 高永. 盐胁迫下三种滨藜植物体内盐分离子分布格局[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(3): 289-294.
ZHANG L W, HU S R, GAO Y. Distribution pattern of salt ions in three plants of *Atriplex* L. under salt stress[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol*, 2014, 45(3): 289-294.
- [17] 董放, 曹靖, 李先婷, 等. 不同盐分类型胁迫对豌豆幼苗离子吸收、累积及运输的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(11): 66-75.
DONG F, CAO J, LI X T, et al. Effects of different salt stress types on ion absorption, accumulation, and transport in pea seedlings [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(11): 66-75.
- [18] SERRANO R, MULET J M, RIOS G, et al. A glimpse of the mechanisms of ion homeostasis during salt stress [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 1023-1036.
- [19] BOWLER C, FLUHR R. The role of calcium and activated oxygens as signals for controlling cross-tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(6): 241-246.
- [20] 李州, 王晓娟, 彭丹丹, 等. Na⁺ 对水分胁迫下白三叶抗氧化防御和有机渗透调节物质的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(5): 175-183.
LI Z, WANG X J, PENG D D, et al. Effects of Na⁺ on antioxidant defence and accumulation of osmoregulatory substances in white clover under water deficit stress[J]. *Acta prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 175-183.
- [21] 侯雪, 陈雨洁, 李春苗, 等. 调环钙对盐碱胁迫下绿豆苗期生长的调控作用[J]. *作物杂志*, 2022, (6): 174-180.
HOU X, CHEN Y J, LI C M, et al. Regulating effects of prohexadione-calcium on the growth of mung bean seedlings under saline-alkali stress[J]. *Crops*, 2022, (6): 174-180.
- [22] 林川韵, 林相宜, 邹瑞, 等. 盐胁迫对不同抗盐性大豆矿质元素吸收及相关基因表达的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1767-1774.
LIN C Y, LIN X Y, ZOU R, et al. Effects of salt stress on mineral element absorption and related gene expression in soybeans with different salt resistance[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1767-1774.
- [23] 郭家鑫, 鲁晓宇, 陶一凡, 等. 盐碱胁迫对棉花生长和养分吸收的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 23-32, 59.
GUO J X, LU X Y, TAO Y F, et al. Effects of saline and alkaline stresses on growth and nutrient uptake of cotton[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 23-32, 59.
- [24] 肖定华, 丁骏, 周雄, 等. 盐胁迫对苜蓿养分吸收分配及其生态效率的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 527-537.
XIAO D H, DING J, ZHOU X, et al. The effect of salt stress on nutrient absorption and distribution and ecological efficiency of alfalfa [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(6): 527-537.
- [25] MAATHUIS F J M. Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2023, 65(3): 849-858.
- [26] MAATHUIS F J M, AMTMANN A N. K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: the basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios[J]. *Annals of Botany*, 1999, 84(2): 123-133.
- [27] WANG X, WANG J, YANG Y, et al. Comparative transcriptome analysis reveals the mechanism of salt stress tolerance in *Glycine max* [J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 1-16.
- [28] GONG H, ZHU X, CHEN K, et al. Silicon alleviates salt and alkali stresses in cotton seedlings by altering the activity and expression of plasma membrane H⁺-ATPase[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1/2): 357-374.