

不同展叶物候期胡杨离子分布、吸收和运输特征及其与土壤盐分关系

姚诗雨¹, 王 杰¹, 黄文娟^{1,2*}, 彭承志¹, 宋双飞¹

(1 塔里木大学 生命科学与技术学院, 新疆阿拉尔 843300; 2 塔里木盆地生物资源保护利用省部共建国家重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘 要: 为明确胡杨的离子分布、吸收和运输规律, 探讨胡杨适应盐渍环境的生理机制, 以不同展叶物候期(萌芽期、展叶期、叶片快速发育期、叶片成熟期)的胡杨(*Populus euphratica*)为研究对象, 测定各器官中的可溶性盐离子并分析离子吸收、运输和分配特征, 结合林下土壤盐分, 探讨胡杨离子分布与土壤盐分关系。结果表明, 随着展叶物候的变化, 胡杨通过对离子吸收、运输和分布规律的差异满足生长发育的需要及对环境的适应。(1)根系选择性吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的能力随展叶物候变化呈先升后降趋势, 以叶片快速发育期为最高, 与土壤中总盐及 Na^+ 、 Cl^- 含量变化趋势相反;(2)离子从根系—主干及幼枝—叶片的运输能力随展叶物候的变化表现为先降后升的相反趋势, 且以叶片快速发育期为最低;(3)各器官中 Na^+ 和 K^+ 含量在展叶过程中变化不大, 在叶片成熟期有显著升高, 且 Na^+ 以根中含量最高, K^+ 以叶片中含量最高, 叶片和根系中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量随展叶物候变化整体呈升高趋势;(4)展叶物候期胡杨器官离子与土壤离子相关性表现为: 萌芽期, 各器官离子含量受土壤盐分影响较小, 指标间相关性多不显著; 展叶期, 根中 Na^+ 与土壤离子呈正相关, 幼枝和主干 K^+ 与土壤多呈负相关; 叶片快速发育期, 幼枝 Mg^{2+} 、根中 Na^+ 均与土壤离子呈正相关; 叶片成熟期, 各器官离子含量受土壤离子影响较小。

关键词: 胡杨; 离子吸收; 离子运输; 展叶物候期; 土壤

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Distribution, Uptake and Transport Characteristics of *Populus euphratica* Ions at Different Leaf Phenological Stages and Their Relationship with Soil Salinity

YAO Shiyu¹, WANG Jie¹, HUANG Wenjuan^{1,2*}, PENG Chengzhi¹, SONG Shuangfei¹

(1 Tarim University College of Life Science and Technology, Alar, Xinjiang 843300, China; 2 Xinjiang Production & Construction Corps Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: In order to clarify the ion distribution, absorption and transport law of *Populus euphratica*, To explore the physiological mechanism of *P. euphratica* adapting to saline environment, *P. euphratica* in different leaf (leaf phenological stages, leaf laying period, leaf maturation stage) was taken as the research object, the soluble salt ions in various organs were determined and the characteristics of ion absorption, transport and distribution were analyzed. Combined with the soil salt under the forest, the relationship between the ion distribution of *P. euphratica* and soil salt was discussed. The results showed that: With the

收稿日期: 2023-06-28; 修改稿收到日期: 2023-10-19

基金项目: “兵团英才”第二周期人才项目(BRFW2101); 塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室开放课题项目

作者简介: 姚诗雨(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事荒漠区植物保育研究。E-mail: 1091275698@qq.com

* 通信作者: 黄文娟, 硕士, 教授, 主要从事荒漠区生物多样性及保育研究。E-mail: hwjzky@163.com

changes of leaf phenological stages, *P. euphratica* meets the needs of growth and development as well as the adaptation to the environment through the difference of ion absorption, transportation and distribution rules. (1) The ability of selective absorption of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} by roots increased firstly and then decreased with the changes of leaf phenological stages, and most of them were in the rapid leaf development stage as the highest, which was just the opposite to the change trends of total salt and Na^+ and Cl^- contents in soil. (2) With the changes of leaf phenological stages, the transportation capacity of ions from root to trunk and juvenile branch to leaf presented the opposite trend of first decline and then rise, and most of them were in the rapid development period of leaf as the lowest. (3) Na^+ and K^+ contents in different organs changed little during the leaf developing process but increased significantly during the leaf maturation period, in which the content of Na^+ in root was the highest and that of K^+ in leaf was the highest. The contents of Ca^{2+} and Mg^{2+} in leaves and roots generally increased with the changes of leaf phenological stages. (4) The correlation between organ ions and soil ions of *P. euphratica* in the leaf phenological stages is as follows: In the embryonic stage, the ion content of each organ is less affected by soil salt, and the correlation between indicators is mostly insignificant; During the leaf laying period, Na^+ in roots positively correlated with soil ions, while K^+ in young branches and main stems negatively correlated with soil ions. During the rapid development of leaves, Mg^{2+} in young branches and Na^+ in roots were positively correlated with soil ions. The ion content of each organ was less affected by soil ions during the leaf maturation period.

Key words: *Populus euphratica*; ion absorption; ion transport; leaf phenological stages; soil

土壤盐渍化对植物生存适应和可持续发展具有巨大威胁,据不完全统计,全球盐碱地面积为 9.543 8 亿 hm^2 ,并以 $(1 \sim 1.5) \times 10^6$ hm^2 /年的速度增长^[1],极大的限制生态恢复和发展,新疆的盐渍化土壤面积为 2.1814×10^4 hm^2 ,是中国最大的盐渍土分布区,占全国盐渍化土壤总面积的 22%^[2]。新疆的盐渍化土壤形成经历了漫长的历程,但 20 世纪 50—60 年代以来,土壤灌溉使当地次生盐渍化的迅速发展,土壤微生物失衡,水土流失严重^[3],导致新疆塔里木盆地野生胡杨林数量逐渐减少。众所皆知,土壤环境与植物的生长密切相关,诸多科学家就干旱区和极端干旱区的植物耐盐生理机制做了大量的研究,从植物本身的适应机制探讨如何恢复干旱区及荒漠植物群落和生态系统等问题。

胡杨(*Populus euphratica*)是杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus*)落叶乔木,是荒漠地区特有的珍贵资源,世界上的胡杨主要分布在亚洲中部、北非和欧洲地区,其中中国是自然胡杨林分布最广泛的国家^[4],在中国胡杨被列为珍稀濒危保护植物,新疆具有全世界分布最广最集中的胡杨林,中国胡杨林有 90% 在新疆,分布最为集中的区域在塔里木盆地^[5],胡杨生命力顽强,具有防风固沙、调节气候、固水等作用,并且在维持干旱荒漠区生态平衡中发挥着不可替代的作用,是荒漠地区的天然屏障^[6]。伴随着人们对胡杨生态和经济价值认识的不断深入,有关胡杨各方面的研究也越来越广。胡杨作为盐碱地区

的优势物种,其耐盐机制非常复杂,盐分运移的时空规律对于研究胡杨耐盐机制非常重要^[7]。胡杨耐盐性体现在不同器官组织中离子含量的变化、信号传导和激素水平的调节、渗透调节物质的合成和分解,以及形态学上的适应性变化^[8]。已有的研究多集中于对胡杨盆栽实生苗的单因素控制试验^[9],缺少野生条件下胡杨耐盐性的相关研究报道。

为明确 1 个展叶物候期内,胡杨离子分布、吸收和运输特征随胡杨展叶物候的动态变化规律,探讨胡杨器官离子分布与土壤盐分的关系,本研究以塔里木河上游沙雅县境内分布的天然荒漠河岸胡杨林为研究对象,以胡杨 1 个生长季内的展叶动态为时间序列,研究胡杨萌芽期、展叶期、叶片快速发育期和叶片成熟期 4 个时期胡杨根、主干、老枝、幼枝和叶片等各器官离子含量的动态特征,并通过各器官离子含量分析根系对土壤各离子的选择性吸收能力、离子在各器官间的运输能力及离子在各器官的分布特征,同时结合不同展叶物候期胡杨林下土壤的盐分特征,阐明不同时期胡杨离子分布的动态特征与环境盐分的关系,为认识干旱、极端干旱区荒漠河岸林的胡杨耐盐机制补充资料,同时为南疆塔河荒漠河岸胡杨林的管护与复壮提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况和样地设置

研究区位于南疆地区塔里木河上游的沙雅县胡

杨林保护区内(82°44'E, 40°57'N), 海拔 888.85 m。研究区距离沙雅县中心 35 km, 属于暖温带沙漠边缘气候区, 气候炎热干燥, 日照充足, 热量充沛, 降水量稀少仅为 47.3 mm, 而蒸发量为 2 000.7 mm, 昼夜温差大, 年均气温 10.7 ℃。采样地设在垂直于塔里木河岸的一边, 并选择远离人为因素干扰的代表性样地。在样地内, 进行每木检尺, 记录其胸径、采样日期等数据。

1.2 样品采集和前处理

在所选样点内划分 3 个小样区, 每个样区内标记、选取接近标准木平均胸径的胡杨树 20 株, 用树冠高处悬挂标记物的方式进行样株标记, 并在后续各个展叶物候期对其进行采集, 每个时期在各样区采集 5 株。于 2022 年胡杨萌芽期(3 月底)、展叶期(4 月中旬至 4 月底)、叶片快速发育期(5 月底至 6 月初)和叶片成熟期(7 月中旬至 7 月底)4 个时期分别进行样品采集, 每棵胡杨样株均从树冠下部约 1/3 处从东西南北 4 个方位取健康的叶片和枝条, 叶片取胡杨幼枝的倒数第 2 节位叶片^[10]、幼枝(1 年生新枝)、老枝(4 年生老枝)各 30 个, 分别进行取材; 同时用生长锥在每个样株胸高附近钻取主干树芯 5 根, 并从土壤中挖取靠近主干的小根(2 mm<d<5 mm, 约 50 g)。

在每个样株附近用土钻按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 取新鲜土样, 一部分迅速盛入铝盒并密封用于土壤含水量测定, 另一部分装入自封袋内用于其他理化指标的测定, 将样品带回室内作进一步处理。

1.3 测定方法

1.3.1 植物指标测定

带回的植物样品清洗后, 烘箱 105 ℃杀青 15 min, 80 ℃烘干, 再用粉碎机(LG-01, 瑞安市百信制药机械有限公司)进行粉碎, 过直径 0.15 mm 筛。Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻ 采用沸水水提法做测定液; Na⁺、K⁺ 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法制做提取液。K⁺ 和 Na⁺ 测定采用火焰光度法(FP6431, INESA 上海仪电分析仪器有限公司), Cl⁻ 测定采用硝酸银滴定法, Ca²⁺、Mg²⁺ 测定采用 EDTA 滴定法, SO₄²⁻ 测定采用 EDTA 间接络合滴定法, 并计算各器官中 K⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺、Mg²⁺/Na⁺ 比值。

1.3.2 土壤样品测定

用于测定其他指标的土壤自然风干后过直径 2 mm 筛。土壤测定指标包括土壤含水量、土壤全盐含量及八大可溶性盐离子含量、土壤电导率和土壤 pH。土壤全盐量测定采用残渣烘干法测定^[11], 土壤

可溶性盐含量采用土壤浸出液测定八大离子, CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 测定采用双指试剂-中和滴定法, SO₄²⁻ 测定采用 EDTA 间接络合滴定法, Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺ 测定方法同植物离子测定方法一致。

将土壤含水量测定的铝盒用精度为 0.000 1 g 的天平称取鲜重, 后 105 ℃烘干至恒重, 称干重, 计算土壤含水量。土壤电导率采用电导率仪测定土壤浸出液, 土壤 pH 值采用 pH 计测定土壤浸出液。

1.3.3 离子运移系数

参照郑青松等^[12]的方法计算树体各营养器官对矿质离子的选择性运移系数(S_{X,Na^+})和根系的离子选择性吸收系数(SA_{X^+,Na^+})。 S_{X,Na^+} = 库器官 $[X/Na^+]$ /源器官 $[X/Na^+]$, SA_{X^+,Na^+} = 土壤 $[Na^+/X]$ /根系 $[Na^+/X]$, X 代表 K⁺、Ca²⁺ 的含量, S_{X,Na^+} 值越大, 说明源器官(根、枝)抑制 Na⁺、促进 K⁺、Ca²⁺ 向库端(枝、叶)运输的能力越强, 即库器官的运输能力越强。

1.4 数据处理

用 Excel 2007 进行数据整理, 用 SPSS 19.0 软件对胡杨不同器官离子含量的数据进行单因素方差比较分析, 并用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同展叶物候期胡杨林土壤水盐和离子动态特征分析

土壤中存在大量盐离子改变植物营养状况, 一般通过以下途径影响植物对营养元素的吸收: ①由于盐离子与营养元素之间相互竞争作用; ②盐离子影响生物膜对离子的选择性。盐离子与营养元素比例上所发生的这些变化, 将影响植物正常的生理代谢, 导致植物生长量的下降^[13]。沙雅胡杨林下土壤中全盐、电导率、pH、含水量见表 1。

由表 1 可知, 研究区土壤为轻度盐渍土或中度盐渍土^[14]。试验开始于 3 月 27 日(胡杨萌芽期), 土壤经过漫长的冬季和春季, 此期间气候干燥、降水少、多风, 地下水通过毛管作用不断升至地表, 水分蒸发散失, 盐分则滞留在土壤表层, 使土壤表层盐分大量积聚, 土壤盐分较高; 4 月下旬, 因塔河上游雪水融化, 灌溉频繁, 土壤呈脱盐状态, 土壤含盐量下降; 6 月中旬, 塔河上游流域气温回升较快, 地下水位浅, 含水量较低, 由于蒸发作用较大, 积盐程度较高; 7 月下旬, 降雨和融水增多, 塔河水位上升, 土壤盐分受到淋洗流失作用, 略有减少。

表 1 不同展叶物候期胡杨林土壤水和盐含量

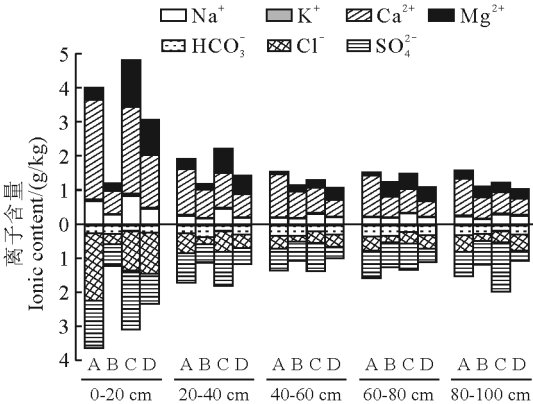
Table 1 Soil water and salt content of *P. euphratica* forest at different phenological stages

日期(月-日) Date (Month-day)	时期 Period	全盐 Total salt/ (g/kg)	电导率 EC/(mS/cm)	pH	含水量 Moisture content/%
3-27	萌芽期 Embryonic stage	3.597±0.545a	0.736±0.092a	8.513±0.023ab	10.288±0.616b
4-26	展叶期 Leaf laying period	1.649±0.153b	0.377±0.022b	8.462±0.026b	11.905±0.675ab
6-09	叶片快速发育期 Rapid leaf development	3.964±0.73a	0.898±0.124a	8.652±0.084a	11.878±0.707b
7-23	叶片成熟期 Leaf maturation	3.723±0.406a	0.761±0.071a	8.203±0.037c	14.351±0.729a

注:同列不同小写字母表示土壤水、盐因素在不同展叶物候期之间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: The different lowercase letters in the same column indicating that the difference between soil water and salt factors among different leaf phenological stages is significant ($P<0.05$). The same as below.

土壤酸碱性常用 pH 值表示,pH 值是土壤理化性质的综合反映,一般在土壤中比较稳定,受外界人为措施的影响较大,土壤 pH 值不同,影响土壤中各种营养元素的化学行为、存在形态和对植物的有效性^[15]。本研究中胡杨林土壤 pH 值变化范围在 8.2~8.6 之间。土壤中各种可溶性盐离子的含量变化见图 1 和表 2。

Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 在各土层含量及其均值随展叶物候期变化均呈减小—增加—减小的趋势,这与全盐、电导率的变化趋势相一致。 Cl^- 含量均值在各土层随展叶物候期变化呈先减小后增加趋势; Mg^{2+} 均值呈先增加后减小趋势,40—60 cm、60—80 cm 呈逐渐增大的趋势,其他土层与均值变化一致; HCO_3^- 均值变化趋势与土壤盐分变化趋势相反,60—80 cm 和 80—100 cm 土层变化趋势为先减小后增大,其他土层变化与均值趋势相同。



A. 萌芽期;B. 展叶期;C. 叶快速发育期;D. 叶成熟期。
图 1 不同展叶物候期胡杨林下土壤各土层离子含量
A. Embryonic stage; B. Leaf laying period;
C. Rapid leaf development; D. Leaf maturation.
Fig. 1 Ion content of different soil layers under
P. euphratica forest at different phenological stages

表 2 不同展叶物候期胡杨林各土层土壤离子含量均值

Table 2 Average ion content of soil layers in *P. euphratica* forest in different phenological stages g/kg

时期 Period	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
萌芽期 Embryonic stage	0.307±0.04ab	0.027±0.002ab	1.562±0.14a	0.212±0.04b	0.283±0.01a	0.778±0.13a	0.885±0.09ab
展叶期 Leaf laying period	0.185±0.01b	0.020±0.001b	0.698±0.04c	0.270±0.05b	0.298±0.02a	0.216±0.01b	0.644±0.05bc
叶快速发育期 Rapid leaf development	0.435±0.08a	0.032±0.004a	1.129±0.18b	0.611±0.14a	0.177±0.01b	0.558±0.11a	1.165±0.18a
叶成熟期 Leaf maturation	0.257±0.02b	0.026±0.002ab	0.725±0.08c	0.523±0.06a	0.265±0.01a	0.568±0.07a	0.485±0.05c

2.2 不同展叶物候期胡杨各器官离子分布特征

在不同展叶物候期,随着土壤环境中离子含量的变化,胡杨各器官的离子含量亦随之发生改变(表 3)。在萌芽期,因胡杨叶片与幼枝尚未发育,无法采样和测定。按照盐分运输方向,展叶物候期内各离子在胡杨不同器官的分布差异见表 3。

比较各器官阳离子分布在不同展叶物候期的差异:①随着胡杨展叶物候期的时间变化,各器官

Na^+ 、 K^+ 含量前期变化不大,直至叶片成熟时大幅升高,并显著高于其他各时期。②树根、老枝和叶片中 Ca^{2+} 含量均呈增加趋势;树根和叶片 Ca^{2+} 在叶片快速发育期含量最高,多显著高于其他时期;主干 Ca^{2+} 在展叶期含量最高,显著高于其他时期。③主干和老枝中 Mg^{2+} 含量先增加后减少,均在叶片快速发育期含量最高,且均显著高于其他时期;幼枝和叶片中 Mg^{2+} 含量变化一致,且在成熟期的含量最

高,显著高于其他各时期;树根中的 Mg^{2+} 含量在展叶期最高,萌芽期最低,二者间有显著差异。

比较各器官阴离子分布在不同展叶物候期的差异:①随胡杨展叶物候期时间变化,除老枝外各器官中的 HCO_3^- 含量均呈先减少后增加趋势;根和主干中的 HCO_3^- 含量均表现为萌芽期显著高于其他时期;叶片的 HCO_3^- 含量均在叶片成熟期最高,显著高于其他时

期。②树根和主干中 Cl^- 含量均呈增加趋势,且在展叶期含量显著高于萌芽期;老枝 Cl^- 含量先增加后减小,在叶片快速发育期含量最高,并显著高于其他时期。③树根、主干、老枝中 SO_4^{2-} 含量均呈先增加后减小的趋势,树根中 SO_4^{2-} 含量在展叶期最高,萌芽期最低,且者间有显著性差异主干和老枝中 SO_4^{2-} 含量均在快速发育期最高,分别显著高于萌芽期和叶片成熟期。

表 3 不同展叶物候期胡杨各器官离子含量

Table 3 Ion content of each organ of <i>P. euphratica</i> at different leaf phenological stages						g/kg
离子 Ion	时期 Period	树根 Roots	主干 Trunk	老枝 Old branches	幼枝 Young branches	叶片 Leaves
Na^+	萌芽期 Embryonic stage	0.46±0.06Ab	0.21±0.03ABb	0.13±0.01Bb	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	0.33±0.06Ab	0.15±0.01Ab	0.10±0.02Ab	0.22±0.016Ab	0.14±0.02Ab
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	0.31±0.06Ab	0.23±0.01Ab	0.09±0.01Ab	0.13±0.01Ab	0.25±0.01Ab
	叶片成熟期 Leaf maturation	4.35±0.23Aa	1.66±0.04Ca	1.00±0.10Da	1.45±0.11Ca	2.22±0.36Ba
K^+	萌芽期 Embryonic stage	0.29±0.02Ab	0.24±0.01Ab	0.20±0.01Ab	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	0.32±0.01BCb	0.22±0.01Cb	0.26±0.01BCb	1.14±0.04Ab	0.82±0.02ABb
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	0.28±0.07Ab	0.21±0.02Ab	0.32±0.02Ab	0.71±0.03Ab	0.73±0.02Ab
	叶片成熟期 Leaf maturation	3.73±0.47Ca	2.39±0.14Da	2.68±0.10Da	5.29±0.11Ba	7.58±0.75Aa
Ca^{2+}	萌芽期 Embryonic stage	4.71±0.23Ac	3.53±0.28Ac	3.48±0.59Aa	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	8.96±0.77Ab	7.92±1.04Aa	4.09±0.89Ba	7.07±0.63Aa	8.44±1.25Ab
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	12.35±1.92Aa	3.92±0.01Cbc	6.41±0.84BCa	7.15±1.56Ba	12.23±1.56Aa
	叶片成熟期 Leaf maturation	12.10±1.88Aa	6.56±0.84Bab	4.54±0.67Ba	5.11±0.80Ba	11.45±1.72Aa
Mg^{2+}	萌芽期 Embryonic stage	0.92±0.12ABb	1.80±0.29Ab	1.01±0.22ABb	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	3.51±0.51Aa	2.01±0.40ABb	1.70±0.45Bb	3.51±0.76Ab	3.15±0.49ABa
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	3.15±0.49BCa	6.78±0.74Aa	4.28±0.94Ba	3.18±0.50BCb	2.36±0.03Ca
	叶片成熟期 Leaf maturation	3.09±0.48Ba	3.18±0.77Bb	2.37±0.02Bb	5.45±1.13Aa	3.89±0.79ABa
HCO_3^-	萌芽期 Embryonic stage	4.99±0.44Aa	4.83±0.26Aa	2.46±0.25Ba	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	3.46±0.39ABb	3.65±0.33ABbc	2.35±0.37Ca	4.25±0.18Aa	3.39±0.36Bb
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	2.81±0.24Ab	3.03±0.18Ac	2.56±0.34Aa	3.11±0.12Ab	3.08±0.32Ab
	叶片成熟期 Leaf maturation	3.40±0.27Ab	4.11±0.30Aab	3.09±0.24Aa	3.92±0.5Aab	4.37±0.35Aa
Cl^-	萌芽期 Embryonic stage	0.88±0.10Ab	0.52±0.04Ab	0.94±0.08Ab	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	1.96±0.15Aa	1.45±0.09Ba	1.26±0.24Bab	2.04±0.31Aa	1.70±0.11ABa
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	1.84±0.22Aa	1.48±0.14Aa	1.58±0.26Aa	1.71±0.13Aa	1.78±0.26Aa
	叶片成熟期 Leaf maturation	1.98±0.18Aa	1.39±0.13BCa	1.05±0.08Cb	1.18±0.05BCb	1.54±0.20ABa
SO_4^{2-}	萌芽期 Embryonic stage	4.92±1.45ABb	9.02±1.89Ab	9.22±1.11Aab	0.00±0.00	0.00±0.00
	展叶期 Leaf laying period	10.81±2.24Aa	10.72±1.98Aab	8.69±2.35Aab	10.72±2.49Aa	9.81±2.94Aa
	叶片快速发育期 Rapid leaf development	8.73±3.06BCab	14.71±1.80Aa	14.16±2.45ABa	9.36±2.26ABCa	8.12±2.72Ca
	叶片成熟期 Leaf maturation	10.06±1.06ABab	10.87±1.34ABab	7.13±0.90ABb	6.45±1.38Ba	12.28±2.31Aa

注:同一器官下不同小写字母表示不同展叶物候期之间各土壤指标因素的差异显著,同一展叶物候期不同大写字母表示在各器官之间的差异显著($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters in the table indicate that the soil index factors are significantly different between different leaf phenological stages under the same organ, and the different uppercase letters indicate that the differences between organs in the same leaf phenological period are significant ($P<0.05$).

萌芽期,胡杨各器官中 Na^+ 、 HCO_3^- 含量,从树根—主干—老枝呈下降趋势。根中 Na^+ 、 HCO_3^- 含量最高,且均显著高于老枝中含量。其他离子在各器官中略有差异,但不显著($P>0.05$)。

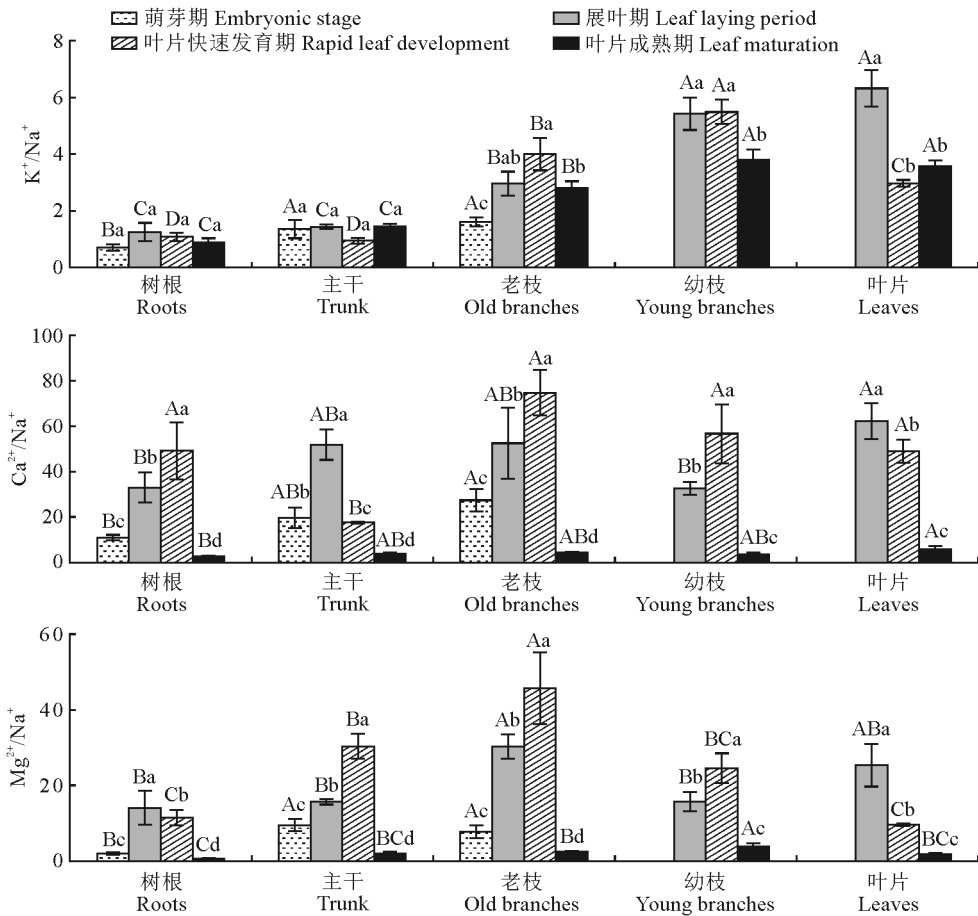
展叶期, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 含量随盐分运输方向在器官中呈先减少后增加趋势,且幼枝中 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 含量较高,根中 Ca^{2+} 和 Cl^- 含量较高,均显著高于老枝。 K^+ 含量随盐分运输方向在器官中逐渐增加,且幼枝中含量最高,显著高于老枝、主干、根系。

快速发育期,各器官内 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- 分布略有差异,但不显著。 Ca^{2+} 含量先减少后增加,根中的含量最高,显著高于主干、老枝、幼枝。 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量分布相反,主干含量均最高,显著高于其他器官。

叶片成熟期,各器官内 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,均呈先减少后增加的趋势。根中 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 含量均最高,且显著高于其他器官含量。叶片中 K^+ 和 SO_4^{2-} 含量最高,仅叶片中 K^+ 显著高于其他器官。 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 含量增加,仅叶片中 HCO_3^- 含量显著高于老枝。

2.3 不同展叶物候期胡杨各器官离子比特特征分析

比较胡杨各器官 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 在不同展叶物候期的差异发现(图 2):随展叶物候期变化,除叶片外各器官的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 及老枝的 K^+/Na^+ 均呈先增加后减小的趋势,大部分器官均表现为在叶片快速发育期时比值最大,显著高于其他时期;叶片中 3 种离子比均呈减小趋势,展叶期比值最大,且显著高于其他时期;胡杨根和主干的 K^+/Na^+ 在展叶物候期内差异不显著。



柱上不同小写字母表示同一器官不同展叶物候期之间具有显著差异;不同大写字母表示表示同一时期不同器官之间有显著差异($P<0.05$)。下同。

图 2 不同展叶物候期胡杨各器官离子比差异

Different lowercase letters on the column indicate that there are significant differences between different leaf phenological stages of the same organ; Different capital letters indicate significant differences between different organs during the same period ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 2 Differences in ion ratio of different organs of *P. euphratica* at different phenological stages

同一物候期胡杨不同器官中 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 的差异: 萌芽期, 老枝的 3 种离子比均较高, 且显著高于根; 展叶期, 叶片中 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 及老枝中 Mg^{2+}/Na^+ 均最大, 多显著高于其他器官; 叶片快速发育期, 老枝的 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 及幼枝中 K^+/Na^+ 均最大, 其中 K^+/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 均显著高于其他器官; 叶片成熟期, 幼枝中 K^+/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 最大, 均显著高于其他器官。

2.4 不同展叶物候期胡杨对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的选择性吸收、运输特征比较

2.4.1 选择吸收能力特征比较

SA_{K^+,Na^+} 是一种表征植物根系对土壤离子选择吸收的能力的指标^[12]。在盐渍环境中, 植物能够通过调节根系对离子选择性吸收能力, 来增加营养离子(如 K^+)的吸收, 同时减少盐害离子(如 Na^+)的吸收, 从而降低植株盐分, 提高耐盐性。

随展叶物候期变化, 胡杨根系对各离子的选择性吸收系数见图 3。胡杨根系 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的选择吸收系数均表现为先增加后减小的趋势, 根系 SA_{K^+,Na^+} 、 SA_{Ca^{2+},Na^+} 均在快速发育期最大, 且 SA_{K^+,Na^+} 显著高于萌芽期, SA_{Ca^{2+},Na^+} 均显著高于其他时期; 根系 SA_{Mg^{2+},Na^+} 在展叶期最大, 显著高于萌芽期与叶片成熟期。

比较同一时期根系吸收不同离子能力大小发现: 在萌芽期和叶片成熟期根系 SA_{K^+,Na^+} 均最大, 显著高于 SA_{Ca^{2+},Na^+} ; 在展叶期根系的吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 能力均差异不显著; 在快速发育期, 根系 SA_{Ca^{2+},Na^+} 最大, 显著高于 SA_{Mg^{2+},Na^+} 。

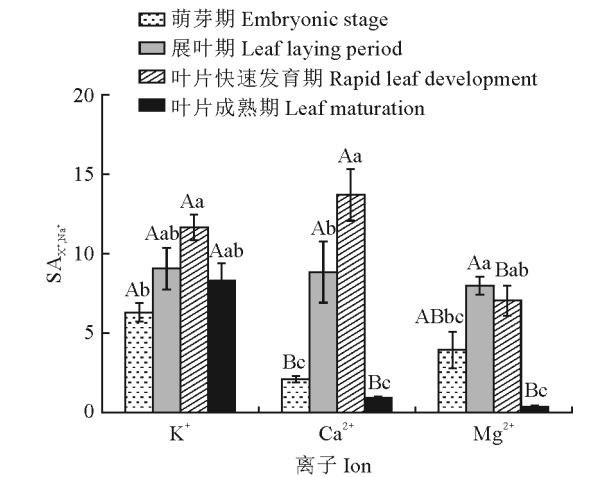


图 3 不同展叶物候期根系吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的差异
Fig. 3 Differences of K^+ 、 Ca^{2+} and Mg^{2+} absorption by roots at different leaf phenological stages

2.4.2 选择运输能力特征比较

S_{K^+,Na^+} 、 S_{Ca^{2+},Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+} 反映植物由源器官向库器官运输营养离子的能力, 值越大说明植物更倾向于将营养离子而非盐离子从根系向地上部输送, 从而提高植物的耐盐性。胡杨各器官在不同展叶物候期运输 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的能力见图 4。

随胡杨展叶物候期变化, 由根—主干 S_{K^+,Na^+} 、 S_{Ca^{2+},Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+} 均呈先减小后增大的趋势, 3 种运输系数均在萌芽期最大, 显著高于其他时期; 由主干—老枝 3 种运输系数与根—主干相反, 均在快速发育期最大, 显著高于其他时期; 由老枝—幼枝和幼枝—叶片 3 种运输系数大多表现为先减小后增大的趋势, 老枝—幼枝 S_{K^+,Na^+} 、 S_{Ca^{2+},Na^+} 及幼枝—叶片 3 种运输系数均在展叶期最高, 显著高于其他时期。

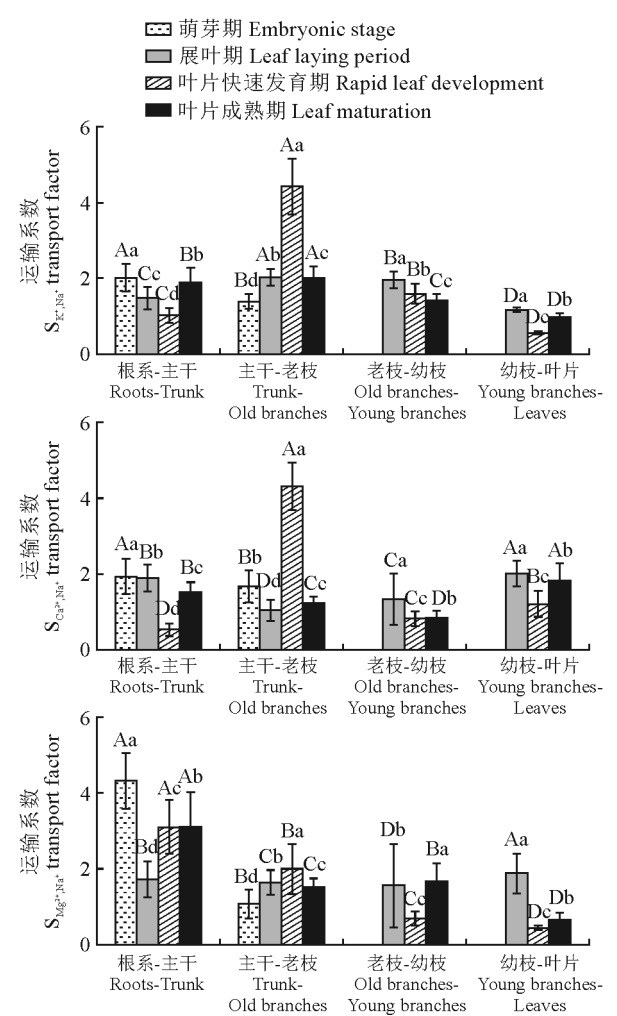


图 4 不同展叶物候期中各器官对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 运输的差异
Fig. 4 Transport differences of K^+ 、 Ca^{2+} and Mg^{2+} in different organs at different leaf phenological stages

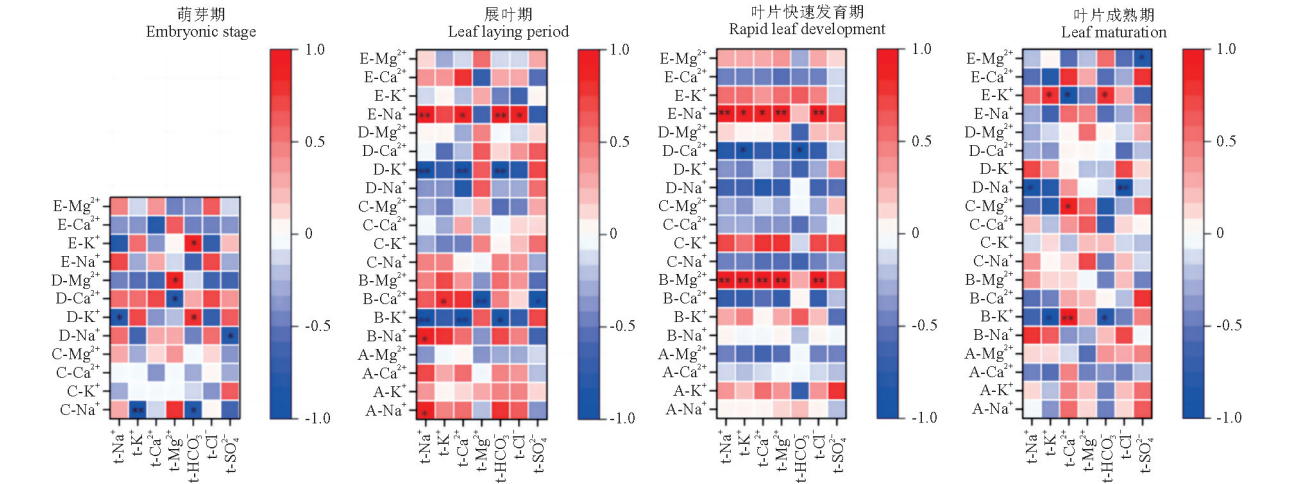
不同展叶物候期胡杨各器官 S_{K^+,Na^+} 、 S_{Ca^{2+},Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+} 运输系数,按盐分运输方向变化规律不同。萌芽期,根—主干的 3 种运输系数均显著大于主干—老枝;展叶期, S_{K^+,Na^+} 先增加后减小,主干—老枝 S_{K^+,Na^+} 最大,显著大于其他运输方向, S_{Ca^{2+},Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+} 与 S_{K^+,Na^+} 相反,均为幼枝—叶片 S_{Ca^{2+},Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+} 最大,显著大于其他运输方向;叶片快速发育期,3 种运输系数均先增加后减小,主干—老枝的 S_{K^+,Na^+} 和 S_{Ca^{2+},Na^+} 系数最大,且显著高于其他运输方向;叶片成熟期, S_{K^+,Na^+} 先增加后减小, S_{Ca^{2+},Na^+} 与 S_{K^+,Na^+} 相反, S_{Mg^{2+},Na^+} 则是减小的趋势。

2.5 不同展叶物候期胡杨各器官 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与土壤盐分关系

对不同展叶物候期胡杨各器官的阳离子含量与同期土壤离子进行皮尔逊相关性分析,结果见图 5 萌芽期,因叶片与幼枝尚未生长,仅老枝、主干、树根中离子含量与土壤盐分离子含量进行相关性分析。结果表明,老枝和主干 Na^+ 与土壤 K^+ 、 HCO_3^- 、

SO_4^{2-} 均多呈显著和极显著负相关;主干和根系中 K^+ 均与土壤 HCO_3^- 呈显著正相关,主干 K^+ 与土壤 Na^+ 呈显著负相关;主干 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 分别与土壤 Mg^{2+} 呈显著负相关和显著正相关。展叶期,叶片、幼枝、根中 Na^+ 与土壤各离子多呈显著和极显著正相关;幼枝和主干 K^+ 与土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 多呈极显著负相关;幼枝 Ca^{2+} 与土壤 K^+ 呈显著正相关,幼枝 Ca^{2+} 与土壤 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 分别呈极显著和显著负相关。

叶片快速发育期,根 Na^+ 与幼枝 Mg^{2+} 与土壤各离子多呈显著和极显著正相关;主干 Ca^{2+} 与土壤 K^+ 和 HCO_3^- 均呈显著负相关。叶片成熟期,主干 Na^+ 与土壤 Na^+ 、 Cl^- 分别呈显著和极显著负相关;幼枝 K^+ 与土壤 K^+ 、 HCO_3^- 均呈显著负相关,与土壤 Ca^{2+} 呈极显著正相关;根中 K^+ 与土壤 K^+ 、 HCO_3^- 均呈显著正相关,与土壤 Ca^{2+} 呈显著负相关;老枝 Mg^{2+} 与土壤 Ca^{2+} 呈显著正相关,与土壤 SO_4^{2-} 呈显著负相关。



A. 叶片; B. 幼枝; C. 老枝; D. 主干; E. 根系; t. 土壤; * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。
图 5 不同展叶物候期各器官 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量与土壤离子含量的相关性分析
A. Blades; B. Young branches; C. Old branch; D. Trunk; E. Root system; t. Soil;
* indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$.

Fig. 5 Correlation analysis between Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} contents of each organ and soil ion content at different leaf phenological stages

3 讨论

3.1 不同展叶物候期胡杨各器官离子含量分布特征

在盐碱胁迫下各类营养离子之间存在复杂的相互作用关系^[16]。植物各器官在生活史不同阶段对不同元素的输入与输出的比例使得植物叶片元素含量呈现出明显的季节动态^[17]。同时,由于各种离子元素的生理机能不同,各元素的含量也会存在一定差异。

随着时间推移,同一器官的离子含量也会发生改变。宋爱云等^[18]对绒毛白蜡(*Fraxinus chinensis*)的研究表明,枝条 Na^+ 含量与叶片类似,在 5—7 月份均表现为逐渐增高的变化趋势。郭天文等^[19]对苹果(*Malus pumila*)展叶物候期内叶片、枝条及果实矿质元素含量的研究也表明,在 4—7 月 Na^+ 含量处于逐渐增高的趋势。K、Ca、Mg 等金属元素是植物生长过程中不可或缺的大量营养元素,K 主要作

用于碳水化合物的合成和转移,缺 K 会导致植物光合作用减弱。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是植物叶片中多种酶的催化剂,能有效促进植物叶片细胞的有丝分裂和蛋白质合成。刘明等^[20]对洋绒毛白蜡(*Fraxinus pennsylvanica*)的研究表明,叶片 Ca^{2+} 含量呈逐月升高的趋势。 Ca 元素不易流动且不易被利用,是构成植物细胞壁的主要元素^[21-22],对于银杏(*Ginkgo biloba*)叶片的研究表明,叶片 Ca 元素随季节呈缓慢增加的趋势^[23]。朱海峰等^[24]对库尔勒香梨的研究也得出类似的结论。黄小辉等^[25]对核桃研究表明, Mg^{2+} 含量则随着生长期的推进而不断升高,这可能是由于 Mg^{2+} 的移动性受蒸腾作用影响较大,故随着叶龄增大,叶片 Mg^{2+} 含量升高。

本研究对胡杨 7 种可溶性盐离子含量的展叶物候期变化研究表明,随不同展叶物候期土壤水盐变化及胡杨自身生长发育变化,胡杨各器官可溶性盐离子含量发生变化。由于叶片成熟期试验区环境炎热,土壤水盐含量最高,且胡杨蒸腾速率极大,对水分需求量大,导致树体吸收 Na^+ 、 K^+ 量均显著高于其他时期。此期,胡杨通过根系对 Na^+ 截留作用将其主要储存在根系中, K^+ 主要储存在叶片中参与叶片渗透调节和气孔活动,从而降低盐害,这与任运涛等^[26]对阿拉善白刺等 4 种荒漠区植物叶片元素 Na^+ 的季节变化研究结果类似。随展叶物候期变化,本研究发现树根、主干、老枝中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均呈增加,并且王瑶等^[27]对冬枣营养枝叶矿质元素进行动态变化比较,也发现了冬枣叶片中及枝条 Ca^{2+} 在 5—7 月呈升高趋势,表明随生长发育需要,在快速发育时期叶片及营养期器官需要大量 Ca 、 Mg ,满足生长发育。

胡杨各器官中阴离子随展叶物候期变化为:由于土壤 HCO_3^- 含量随展叶物候期变化呈现“升高—降低—升高”的趋势,胡杨树根、主干、幼枝、叶片 HCO_3^- 同土壤变化趋势一致,在快速发育期含量最低。表明胡杨快速发育期,这些器官受碱胁迫程度最低,器官内 pH 相对稳定,能够快速发育。胡杨根系和主干 Cl^- 呈增加趋势,萌芽期到展叶期增幅最大,后期趋于稳定,表明在展叶期之后根与枝干对 Cl^- 截留能力增强,使幼枝中 Cl^- 含量逐渐减小,叶片中 Cl^- 维持相对稳定。叶片发育合成需要提供大量 S 元素,根系吸收大量硫酸盐进行活化产生 3-磷酸-5-腺甘磷酸硫酸(PAPS),提供叶片生长发育所需要的半胱氨酸^[28]。南疆的盐土主要以氯化物或硫酸盐-氯化物为主^[29],本研究发现,展叶期 SO_4^{2-}

在根中储存量最高,叶片快速发育期 SO_4^{2-} 在主干和老枝中含量最高,表明在幼嫩器官快速发育时需要主干及时输送 SO_4^{2-} 合成氨基酸等营养物质,将 SO_4^{2-} 储存在主干及老枝,便于运输至树体其他器官。

在萌芽期时,胡杨主要将有害离子 HCO_3^- 、 Na^+ 储存在根系及主干中,且 Ca^{2+} 含量也较高,可以在促进 Na^+ 外排的同时,与 HCO_3^- 结合,降低主干和根系受到的盐碱伤害。在展叶期,除主干外各器官中阴离子含量均较高,由于新叶发育时期,大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 储存在叶片、枝干和根系中,减缓阴离子吸收造成的离子失衡;此外, Mg^{2+} 大量储存在树根是由于展叶期胡杨根系开始活动吸收, Mg^{2+} 会首先积累在营养体中,作为植物体的储存库,便于后期叶片等营养器官发育的重新分配利用,这与黄丽萍等^[30]研究早熟根部矿质元素含量的动态变化一致:一方面供给叶片生长发育,另一方面在根中抵御碱胁迫。快速发育期, Ca^{2+} 同展叶期分布一致, Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 主要储存在主干,由于在韧皮部中 Mg^{2+} 、木质部中 SO_4^{2-} 的移动性强^[31],使叶片在快速期时能及时输送至树体其他器官,为树体器官细胞伸长、根系生长及各器官蛋白质合成提供保障。在叶片成熟期,土壤 Na^+ 、 Cl^- 一部分被截留在根中,一部分运输至地上各个器官,主要储存在叶片中; K^+ 、 Mg^{2+} 主要储存在叶片和幼枝中, Ca^{2+} 分布在根系和叶片中维持叶片光合作用及自身阳离子含量,大量 Ca^{2+} 能促进 K^+ 吸收及 Na^+ 的流出^[32],抵御 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Cl^- 对叶片和根系的伤害,维持叶片及根系阳离子含量。

现有关植物矿质元素含量动态变化的相关研究,多以叶片为研究对象^[33],对比植物不同器官的矿质元素变化规律,将植株作为一个整体可以更全面的了解植物矿质营养的整体分配和动态变化过程。

3.2 不同展叶物候期胡杨各器官离子比值特征

为评估盐胁迫对矿质阳离子含量和植株营养状况的影响,常用 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 等比值作为指标,植物能否在盐渍环境条件下生存很大程度上取决于其体内维持 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 平衡的能力^[34]。一般来说,营养器官 Na^+ 含量越高,这些比值就越低,表明 Na^+ 对植物生长造成更大的干扰^[35]。随展叶物候期变化, K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 在各器官含量也不同。在本研究中,萌芽期胡杨地上器官的 3 种离子比值均大于根系离子比值,表明在萌芽期胡杨维持地上器官的阳离子含量对于后期生长发育过程极为重要。展叶期时,叶

片 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 均高于其他器官,新叶通过增强对 K^+ 和 Ca^{2+} 的储存,抵御离子失衡,避免新叶在生长发育初期受到盐害。在快速发育期,幼枝 K^+/Na^+ 及老枝 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值均高于其他器官,表明枝干在快速发育期间 K^+ 主要参与幼枝的阳离子含量, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对于老枝结构的发育极为重要。叶片成熟期,幼枝 K^+/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 均大于其他器官,胡杨通过增强 K^+ 、 Mg^{2+} 储存来减少对 Na^+ 的吸收,保证幼枝结构完整及对叶片的支撑作用;叶片 Ca^{2+}/Na^+ 均大于其他器官,叶片通过增强对 Ca^{2+} 的吸收来应对生理代谢失衡,以此增强细胞质膜稳定性,并减少对 Na^+ 的吸收,保证成熟叶片的正常光合作用。对比不同时期胡杨各器官中离子比发现,叶片 3 种离子比值均在展叶期高于其他时期,叶片维持较高的阳离子含量既可以减少叶片盐害,又可以通过储存大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 保证叶片的正常生长发育。

3.3 不同展叶物候期胡杨离子吸收、运输特征

不同生长时期,植物的不同器官的离子选择性吸收和运输系数不同,反映其对矿质营养元素分配能力不同^[36]。随展叶物候期变化根系对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收能力均呈先增加后减小的趋势, K^+ 、 Ca^{2+} 均在快速发育期吸收能力最大, Mg^{2+} 则在展叶期吸收能力最大。在快速发育期根系吸收的 K^+ 、 Ca^{2+} 主要运输至幼枝和叶片,为其生长发育和光合作用提供资源并提高叶片对环境的抗逆能力。在展叶期根系大量吸收 Mg^{2+} ,并将其分配于幼枝和叶片,为叶片生长发育及光合作用非常重要。萌芽期和叶片成熟期均主要吸收 K^+ 为主、快速发育期主要吸收 Ca^{2+} ,表明 K^+ 对于胡杨萌芽期生长发育及叶片成熟期的耐盐性具有重要作用, Ca^{2+} 对于植物生长发育非常重要。

随胡杨展叶物候期时间变化,胡杨各器官运输 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的能力有相同,也有差异。根—主干运输 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 能力均在萌芽期最大,表明胡杨在幼嫩其器官萌动的时期,为后期生长发育将大量营养元素从根系运输至主干,将主干作为营养元素源器官,保障在展叶期及快速发育期营养元素的向其他器官的快速运输。主干—老枝运输 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均在快速发育期最大,表明了胡杨在快速发育期枝干结构对营养元素需求。老枝—幼枝及幼枝—叶片运输 K^+ 、 Ca^{2+} 在均展叶期最大,幼枝—叶片运输 Mg^{2+} 也在展叶期最大。胡杨展叶期叶片、幼枝形成及调控蛋白质的形成需要大量 K^+ 、

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 参与。

3.4 不同展叶物候期胡杨各器官阳离子与土壤盐分关系

土壤是植物体矿质元素的主要来源,土壤矿物质组成与含量影响植物地上部的离子吸收、运输和积累特征^[37]。不同展叶物候期时期,土壤对胡杨各器官阳离子含量与土壤离子相关性不同。

萌芽期时,主干和根 K^+ 均与土壤 HCO_3^- 呈显著正相关,表明在萌芽期,胡杨随着土壤 HCO_3^- 增加,主干和根系 K^+ 含量增加,缓解根系和主干受碱胁迫的损害。并且老枝 Na^+ 与土壤 K^+ 、主干 Na^+ 与土壤 SO_4^{2-} 均呈显著负相关,可能是因为萌芽期,胡杨对 K^+ 、 SO_4^{2-} 吸收增多,抑制胡杨对 Na^+ 吸收。

在展叶期时,主干和幼枝 K^+ 与土壤各离子多呈极显著负相关,根中 Na^+ 与土壤盐分离子相反。表明在展叶期,随土壤盐分离子增加,幼枝和主干 K^+ 含量减少,根中 Na^+ 含量增加,幼枝、主干、根受胁迫程度增加。

在叶片快速发育时期,根 Na^+ 与土壤盐分离子多呈极显著正相关,主干 Ca^{2+} 与盐分离子多呈显著负相关,随土壤盐分离子增加,根中 Na^+ 增加,主干 Ca^{2+} 含量减少,根和主干受胁迫程度增加;并且幼枝 Mg^{2+} 与土壤盐分离子多呈极显著正相关,表明在叶片快速发育时期幼枝通过储存 Mg^{2+} ,抵御盐害。

在叶片成熟期时,主干 Na^+ 与土壤 Na^+ 、 Cl^- 呈显著负相关,随土壤 Na^+ 、 Cl^- 含量增加,主干中 Na^+ 含量减小,原因可能是在随着盐胁迫增加胡杨通过将主干 Na^+ 运输至其他器官,使主干 Na^+ 含量减少。根中 K^+ 与土壤 K^+ 和 HCO_3^- 均呈显著正相关,表明在叶片成熟期,随土壤 HCO_3^- 、 K^+ 增加,根中 K^+ 含量增加,根系通过储存 K^+ 适应盐碱环境。

4 结 论

(1)随着胡杨叶片的逐渐展开和成熟,胡杨各器官中离子的积累量随之逐渐增加,仅主干和老枝中部分离子呈先增加后减少的趋势;胡杨根系吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的能力呈现先增大后减小的变化规律,以叶片快速发育期的吸收能力最强;胡杨将 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 由根—主干及幼枝—叶片运输过程中,其运输能力随展叶物候呈先减少后增加趋势,而由主干—老枝运输能力相反。

(2)在萌芽期,蒸腾作用极弱,胡杨根系吸收和运输 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 能力不强,因此 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、

HCO₃⁻ 主要储藏于根系和主干等源或近源器官中;在展叶期胡杨吸收和运输各离子能力逐渐增强,各离子均主要储存于根和叶片、幼枝中;叶片快速发育期,为拮抗根系对 Na⁺ 的吸收,胡杨对 Ca²⁺ 的吸收和运输能力都增强,故主要储存在根系和叶片中;而 Mg²⁺ 和 SO₄²⁻ 主要储存在主干和老枝中;在叶片成熟期,胡杨蒸腾作用强烈,根系吸收和运输离子能力强,各离子多储存于叶片和根系。

参考文献:

[1] 张海欧. 浅析中国盐渍土分布及演变特征[J]. 农业与技术, 2022, **42**(5): 104-107.
ZHANG H O. Analysis on distribution and evolution characteristics of saline soil in China[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, **42**(5): 104-107.

[2] 罗廷彬, 任 威, 谢春虹. 新疆盐碱地生物改良的必要性与可行性[J]. 干旱区研究, 2001, **18**(1): 6-48.
LUOT B, REN W, XIE C H. Necessity and feasibility of biotic improving the saline and alkaline land in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2001, **18**(1): 46-48.

[3] 李保强, 陈绍荣, 邵建华, 等. 新疆土壤盐渍化的综合治理与改良[J]. 新疆农业科技, 2013(6): 15-21.
LI B Q, CHEN S R, SHAO J H, *et al.* Comprehensive treatment and improvement of soil salinization in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2013(6): 15-21.

[4] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 18.

[5] 陈向向, 盖中帅, 翟军团, 等. 中国西北地区天然胡杨群体遗传多样性及核心保护单元的构建[J]. 生物多样性, 2021, **29**(12): 1 638-1 649.
CHEN X X, GAI Z S, ZHAI J T, *et al.* Genetic diversity and construction of core conservation units of the natural populations of *Populus euphratica* in Northwest China[J]. *Biodiversity Science*, 2021, **29**(12): 1 638-1 649.

[6] 鲁 艳, 雷加强, 曾凡江, 等. NaCl 处理对胡杨生长及生理生态特征的影响[J]. 干旱区研究, 2015, **32**(2): 279-285.
LU Y, LEI J Q, ZENG F J, *et al.* Effects of NaCl treatments on growth and ecophysiological characteristics of *Populus euphratica*[J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(2): 279-285.

[7] 马焕成, 冯衍枝, 王沙生. 胡杨抗盐机理初探[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (English Edition), 1996(2): 36-44.
MA H C, FENG Y Z, WANG S S. Preliminary study on the salt resistance mechanisms of *Populus euphratica*[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (English Edition), 1996(2): 36-44.

[8] 赵 瑞, 陈少良. 杨树耐盐性调控的离子平衡与活性氧平衡信号网络[J]. 中国科学: 生命科学, 2020, **50**(2): 167-175.
ZHAO R, CHEN S L. The salt-stress signaling network involved in the regulation of ionic and ROS homeostasis in poplar [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2020, **50**(2): 167-175.

(3)相关性分析表明,在萌芽期,胡杨器官离子与土壤离子多呈负相关,仅土壤 HCO₃⁻ 与主干、根中 K⁺ 呈显著正相关;在展叶期,胡杨幼枝和主干 K⁺ 与土壤离子多呈极显著负相关,快速发育期,主干 Mg²⁺ 与土壤离子呈极显著正相关,在这 2 个时期,根中 Na⁺ 均与土壤离子呈显著正相关;在叶片成熟期,幼枝和根系中 K⁺ 与土壤 K⁺、Ca²⁺、HCO₃⁻ 均有显著相关性。

[9] 赵春彦, 秦 洁, 贺晓慧, 等. 荒漠河岸林胡杨对盐胁迫的适应机制[J]. 干旱区资源与环境, 2022, **36**(7): 166-172.
ZHAO C Y, QIN J, HE X H, *et al.* Mechanisms underlying adaption of *Populus euphratica* to salt stress in desert riparian forests[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, **36**(7): 166-172.

[10] 曲文蕊, 韩晓莉, 翟军团, 等. 不同发育阶段胡杨、灰杨异形叶形态结构变化特征[J]. 塔里木大学学报, 2021, **33**(2): 14-24.
QU W R, HAN X L, ZHAI J T, *et al.* The morphological and institutional characteristics of heteromorphic leaves at different developmental stages in *Populus euphratica* and *Populus pruinosa*[J]. *Journal of Tarim University*, 2021, **33**(2): 14-24.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 中国农业出版社, 2000.

[12] 郑青松, 王仁雷, 刘友良. 钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响[J]. 植物生理学报, 2001, **27**(4): 325-330.
ZHENG Q S, WANG R L, LIU Y L. Effects of Ca²⁺ on absorption and distribution of ions in salt-treated cotton seedlings [J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 2001, **27**(4): 325-330.

[13] 陈少良, 李金克, 尹伟伦, 等. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(增刊 1): 88-92.
CHEN S L, LI J K, YIN W L, *et al.* Tissue and cellular K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ of poplar under saline salt stress conditions[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(Suppl.): 88-92.

[14] 孙兆军. 银川平原盐碱荒地改良模式研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.

[15] 张 芳. 土壤-小美早杨系统中盐分离子分布与运移[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.

[16] 李俊伟, 刘景辉, 王俊英, 等. 盐与碱胁迫对燕麦离子平衡和有机酸含量的影响[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(10): 1 700-1 710.
LI J W, LIU J H, WANG J Y, *et al.* Effect of salt and alkali stress on oat ion balance and organic acid content[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(10): 1 700-1 710.

[17] LIU D, ZHANG J A, BISWAS A, *et al.* Seasonal dynamics of leaf stoichiometry of phragmites australis: A case study from Yangguan wetland, Dunhuang, China [J]. *Plants*, 2020, **9**(10): 1 323.

[18] 宋爱云, 董林水, 陈纪香, 等. 绒毛白蜡雌雄株不同器官矿物质元素季节动态的比较[J]. 林业科学, 2019, **5**(10): 162-170.

- SONG A Y, DONG L S, CHEN J X, *et al.* Comparison of seasonal dynamics of mineral elements contents in different organs of male and female plants of *Fraxinus velutina* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(10): 162-170.
- [19] 郭天文, 郭全恩, 王益权, 等. 钠盐胁迫对苹果树体内钠累积的影响[J]. 核农学报, 2009, **23**(2): 354-357, 184.
- GUO T W, GUO Q E, WANG Y Q, *et al.* Effect of sodic salinity stress on sodium accumulation in apple trees[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, **23**(2): 354-357, 184.
- [20] 刘明, 马作国, 王武, 等. 洋白蜡行道树叶片养分动态及再吸收特征[J]. 天津农业科学, 2018, **24**(8): 74-76.
- LIU M, MA Z G, WANG W, *et al.* Dynamic variation and resorption efficiencies of foliar nutrients in *Fraxinus pennsylvanica* street tree [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018, **24**(8): 74-76.
- [21] VERGUTZ L, MANZONI S, PORPORATO A, *et al.* Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants[J]. *Ecological Monographs*, 2012, **82**(2): 205-220.
- [22] 樊博, 何光熊, 史克涛, 等. 干热河谷草本植物叶片养分含量与养分再吸收效率的种间差异[J]. 西南农业学报, 2017, **30**(9): 2 053-2 059.
- FAN B, HE G X, SHI L T, *et al.* Differences in nutrient content and nutrient resorption efficiencies of grass leaves among different species in arid-hot valley[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(9): 2 053-2 059.
- [23] 樊卫国, 刘进平, 文晓鹏, 等. 银杏叶片中营养元素含量的季节性变化研究[J]. 贵州农业科学, 2000, **28**(2): 6-8.
- FAN W G, LIU J P, WEN X P, *et al.* Seasonal changes of contents of nutrient elements in leaf of *Ginkgo biloba* [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2000, **28**(2): 6-8.
- [24] 朱海峰, 马建江, 刘艳, 等. 不同产量库尔勒香梨叶片矿质元素含量年动态变化研究[J]. 新疆农业科学, 2017, **54**(3): 452-459.
- ZHU H F, MA J J, LIU Y, *et al.* Annual variation study of mineral nutrient contents in the leaves of Korla pear[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, **54**(3): 452-459.
- [25] 黄小辉, 吴焦焦, 魏立本, 等. 不同缺素条件下核桃幼苗的生长和生理变化[J]. 北京林业大学学报, 2023, **45**(9): 33-41.
- HUANG X H, WU J J, WEI L B, *et al.* Growth and physiological changes of walnut seedlings under different nutrient deficiency conditions[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, **45**(9): 33-41.
- [26] 任运涛, 张晨曦, 尚振燕, 等. 阿拉善荒漠区 5 种植物叶片性状的季节动态[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(4): 823-831.
- REN Y T, ZHANG C X, SHANG Z Y, *et al.* Seasonal variation of leaf traits of five eremophyte species in the Alxa Desert[J]. *Arid Zone Research*, 2017, **34**(4): 823-831.
- [27] 王瑶, 董林水, 宋爱云, 等. 冬枣果实发育期结果枝叶与营养枝叶矿质元素动态变化的比较[J]. 中国生态农业学报, 2019, **27**(5): 738-746.
- WANG Y, DONG L S, SONG A Y, *et al.* Comparison of mineral elements between fruit and vegetative branch leaves of the Chinese winter jujube during the fruit development stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, **27**(5): 738-746.
- [28] 林惠荣. 水稻土壤重金属和硫分子形态转化的功能微生物作用机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [29] 新疆维吾尔自治区农业厅、新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [30] 黄丽萍, 帅芳, 张正, 等. 鲜食枣树体根部矿质元素含量的年动态变化[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(4): 85-90.
- HUANG L P, SHUAI F, ZHANG Z, *et al.* Dynamic changes of main mineral elements content in fresh jujubes roots[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(4): 85-90.
- [31] 陈良碧, 蔡丹, 张林安, 等. 植物镁离子转运及镁胁迫响应机制研究进展[J]. 生命科学研究, 2021, **25**(5): 442-447.
- CHEN L B, CAI D, ZHANG L A, *et al.* Advances in mechanisms of magnesium transport and response to magnesium stress in plants[J]. *Life Science Research*, 2021, **25**(5): 442-447.
- [32] 李娜, 张海林, 李秀芬, 等. 钙在植物盐胁迫中的作用[J]. 生命科学, 2015, **27**(4): 504-508.
- LI N, ZHANG H L, LI X F, *et al.* Function of Ca^{2+} in salt stress in plants[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2015, **27**(4): 504-508.
- [33] 李单凤, 于顺利, 王国勋, 等. 黄土高原优势灌丛营养器官化学计量特征的环境分异和机制[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(5): 453-465.
- LI D F, YU S L, WANG G X, *et al.* Environmental heterogeneity and mechanism of stoichiometry properties of vegetative organs in dominant shrub communities across the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(5): 453-465.
- [34] SUN J, CHEN S L, DAI S X, *et al.* Ion flux profiles and plant ion homeostasis control under salt stress[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2009, **4**(4): 261-264.
- [35] 李晓院, 解莉楠. 盐胁迫下植物 Na^+ 调节机制的研究进展[J]. 生物技术通报, 2019, **35**(7): 148-155.
- LI X Y, XIE L N. Research progress in Na^+ regulation mechanism of plants under salt stress[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, **35**(7): 148-155.
- [36] 乌凤章, 朱心慰, 胡锐锋, 等. NaCl 胁迫对 2 个蓝莓品种幼苗生长及离子吸收、运输和分配的影响[J]. 林业科学, 2017, **53**(10): 40-49.
- WU F Z, ZHU X W, HU R F, *et al.* Effects of NaCl stress on growth ion uptake, transportation and distribution of two blueberry (*Vaccinium corymbosum*) cultivars seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, **53**(10): 40-49.
- [37] 罗青红, 周斌, 李英仑, 等. 盐渍土壤大果沙枣树主要矿质阳离子的吸收和分配特征[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(8): 1371-1379.
- LUO Q H, ZHOU B, LI Y L, *et al.* Absorption and distribution of main mineral cations of *Elaeagnus moorcroftii* in salinized land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(8): 1371-1379.