

## NaCl 胁迫对 4 个树种体内离子分布的影响

夏尚光 (安徽省林业科学研究院, 安徽合肥 230031)

**摘要** 通过对木栓榆、厚叶榆、醉翁榆、黄连木 4 个树种盆栽苗在 NaCl 胁迫下不同组织中离子动态分布的研究, 结果表明: ①厚叶榆、木栓榆 Na<sup>+</sup> 总含量均随盐处理浓度的增大而提高, 醉翁榆、黄连木 Na<sup>+</sup> 总含量不呈单一变化趋势; Na<sup>+</sup> 在 4 个树种中分布趋势是根最大, 茎次之, 叶最小。②木栓榆、黄连木、厚叶榆 3 树种在 4 mg/g 盐度以下根向茎、叶选择性地运输 K<sup>+</sup> 而限制 Na<sup>+</sup> 的运输, 5 mg/g 盐度后根向茎、叶选择性地运输方式正好相反; 醉翁榆随盐梯度的升高, 根向茎、叶选择性地运输 Mg<sup>2+</sup> 而限制 Na<sup>+</sup> 的运输。③盐胁迫总体上降低了 4 树种叶片 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 比值, 但厚叶榆和黄连木叶片 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 值变化规律性不强; 盐胁迫对 4 个树种 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值的影响表现为, 醉翁榆、木栓榆在低盐下有所上升, 随盐浓度的升高而降低; 厚叶榆和黄连木 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值变化无规律。

**关键词** NaCl 胁迫; 离子分布; 选择性运输; 耐盐性

**中图分类号** S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)24-179-05

## Effects of NaCl Stress on the Distribution of Ions in 4 Tree Species

XIA Shang-guang (Forestry Research Institute of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031)

**Abstract** The potted seedlings of four tree species such as *Ulmus gaussonii*, *U. crassifolia*, *Pistacia chinensis* and *U. thomasi* were respectively treated with different salt densities, the dynamic distribution of the ions in different tissues under NaCl stress were studied. The results showed: ① the total contents of Na<sup>+</sup> in *U. crassifolia* and *U. thomasi* increased with the increase of salt concentration. Na<sup>+</sup> contents in *U. gaussonii* and *Pistacia chinensis* don't express a single changing trend. Na<sup>+</sup> distribution is the largest in roots, larger in stems, the minimum in leaves. ② Below 4 mg/g salinity, *U. crassifolia*, *U. thomasi* and *Pistacia chinensis* selectively transport K<sup>+</sup> and restrict Na<sup>+</sup> transport from root to shoot and leaf, in 5 mg/g salinity the selectively transporting ways are opposite; with the increase of salt concentration, *U. gaussonii* selectively transport Mg<sup>2+</sup> and restrict the Na<sup>+</sup> transport from root to shoot and leaf. ③ On the whole, under salt stress the K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratios of the 4 species leaves reduced, but the K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratios in *U. crassifolia* and *Pistacia chinensis* leaves don't express a stronger regularity. The ratio of Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> of the 4 species under lower salinity are up, and decreased with increase of salt concentration; the Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> ratios of *U. crassifolia* and *Pistacia chinensis* change without rules.

**Key words** NaCl stress; Ion distribution; Selective transport; Salt tolerance

盐胁迫对植物的影响主要是抑制其生长, 影响种子出苗率、成苗率、苗木生长量及嫁接成活率等, 植物受盐害的程度与盐胁迫处理的浓度和胁迫时间有关。一般地, 盐浓度越高、胁迫时间越长, 植物生长和发育受到的抑制就越大。盐胁迫下对植物造成的伤害, 主要是通过调节其细胞内离子转运而产生毒害。在我国盐胁迫一般多为钠盐, Na<sup>+</sup> 是盐渍环境中主要的阳离子, 也是植物生长遭受伤害主要的阳离子之一, 细胞中 Na<sup>+</sup> 浓度过高, 会伤害膜结构功能或细胞的代谢活动, 是植物致死主要可能原因。在盐渍条件下进入植物体内的 Na<sup>+</sup> 分布在叶片、茎和根中, 耐盐性强的植物即使在高盐度下也能保持较低水平的 Na<sup>+</sup> 浓度, 使植物生长免受伤害<sup>[1]</sup>。K<sup>+</sup> 在细胞质中是最丰富的无机离子, 其在植物的营养、发育和生理调节中起着重要作用, 是植物所必需的营养元素, 是保证植物正常代谢的关键离子, 并且是唯一一种在植物体内必需以高浓度存在的、具有活化作用的一价阳离子。在盐渍条件下, 保持细胞质内 K<sup>+</sup> 浓度高于某一特定值, 对于植物的生长和耐盐性都是非常必要的, 通常认为蛋白质合成及其他生理过程都需要 K<sup>+</sup>, 要求细胞质中具有一定量的 K<sup>+</sup> 存在。有人认为, K 营养是植物耐盐性的关键因素。Ca 是植物生长发育必需营养元素之一, 与细胞的分裂伸长、运动、原生质流动、植物向地性、抗衰老等生理过程密切相

关, 在植物生理活动中, 既起着结构成分的作用, 也具有酶的辅助因素功能<sup>[2]</sup>。同时, Ca 在植物体内又为难移动元素, Ca 素自根系向地上部运输十分缓慢, 而地上部在生长发育过程中又需要大量的 Ca 素。Mg<sup>2+</sup> 是叶绿素的中心金属离子, 是绿色植物进行光合作用不可缺少的元素, 同时它还是生物体内 300 余种酶的激活剂和 Ca<sup>2+</sup> 兴奋作用的拮抗剂, 对机体的多个组织功能稳定具有重要作用。在正常情况下生物机体中 Mg<sup>2+</sup> 的含量较多, 仅次于 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 而居第 4 位, 在细胞内的含量则仅次于 K<sup>+</sup> 而居第 2 位<sup>[3]</sup>。

该项目通过对木栓榆、厚叶榆、醉翁榆、黄连木 4 个树种在盐分胁迫下根、茎、叶中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 的转移规律进行研究, 旨在探寻出上述 4 个树种耐盐机理, 为盐胁迫环境下树种选择、栽培提供技术支撑。

## 1 材料与方法

**1.1 盐化处理** 2008 年 3 月初选择苗高、地径大小一致的黄连木、醉翁榆、木栓榆、厚叶榆 4 个树种 1 年生苗盆栽, 每盆栽土 9 kg。4 月初移至温室大棚内, 待幼苗成活定根后, 5 月 12 日实施一次性盐化处理, 试验设置 6 个盐度水平, 分别为 CK, 2, 3, 4, 5, 6 mg/g, 6 个重复。试验期间, 定期浇少量水, 以平衡蒸发量。

**1.2 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 含量的测定**

**1.2.1 样品处理。**取不同浓度 NaCl 胁迫的幼苗数株, 于水中清洗干净, 按叶、根和茎部位分开, 放置烘箱中烘干, 直至重量不再减少后, 进行粉碎处理。

**1.2.2 待测液制备。**称取样品 0.5 g 左右, 放入 50 ml 三角瓶中, 瓶口加一小漏斗, 加入硝酸和高氯酸(5:1)混合液 10

**基金项目** 国家林业局“948”项目(2001-35); 安徽省财政资金项目(2136203)。

**作者简介** 夏尚光(1968-), 男, 安徽全椒人, 高级工程师, 博士, 从事林木抗逆性、森林生态、林木种质资源开发与利用等研究。

**收稿日期** 2015-06-29

ml,低温加热过夜后加温煮沸,直至大量冒烟为止。然后加入2 ml的浓硝酸:水(1:1)加热溶解,再定容50 ml,摇匀待测。同时做2份标样与空白对照试验。

**1.2.3 离子测定。**在ICP离子仪上直接读数,得出 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 含量,并计算 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值。

## 2 结果与分析

**2.1 盐胁迫下4个树种不同部位 $\text{Na}^+$ 含量** 由图1可知,厚叶榆、木栓榆体内 $\text{Na}^+$ 总量(根、茎、叶)均随盐处理浓度的增大而增大。醉翁榆体内 $\text{Na}^+$ 总含量不呈单一的变化趋势,在0~2 mg/g盐处理浓度区间, $\text{Na}^+$ 总含量随盐浓度的增大而下降;在2~4 mg/g盐处理浓度区间,醉翁榆根、茎、叶中 $\text{Na}^+$ 含量随盐浓度的增大而上升, $\text{Na}^+$ 总含量达到最大值,5

mg/g浓度处理时体内 $\text{Na}^+$ 总含量下降幅度明显。在0~3 mg/g盐处理浓度区间,黄连木体内 $\text{Na}^+$ 含量随胁迫浓度的增大而上升,此后开始大幅度下降,在4~6 mg/g盐处理浓度区间, $\text{Na}^+$ 含量又随胁迫浓度的增大而上升。

以4 mg/g NaCl胁迫为例,醉翁榆、木栓榆、厚叶榆、黄连木4个树种体内 $\text{Na}^+$ 总含量分别高达为6.8、2.6、2.7、0.5 mg/g,分别是各自对照株 $\text{Na}^+$ 总含量的22.67、9.14、18.74、和13.34倍。在6 mg/g盐处理时,木栓榆、厚叶榆和黄连木体内 $\text{Na}^+$ 总含量分别为4.85、8.79、0.09 mg/g(这里只比较这3个树种,醉翁榆在6 mg/g梯度已死亡)。在4个供试树种中,醉翁榆死亡率最高,也就是说,醉翁榆对盐敏感,体内离子含量的骤增是其死亡的直接原因。植物的内源 $\text{Na}^+$ 浓度越低,其耐盐性越强,初步可说明黄连木耐盐性最强,木栓

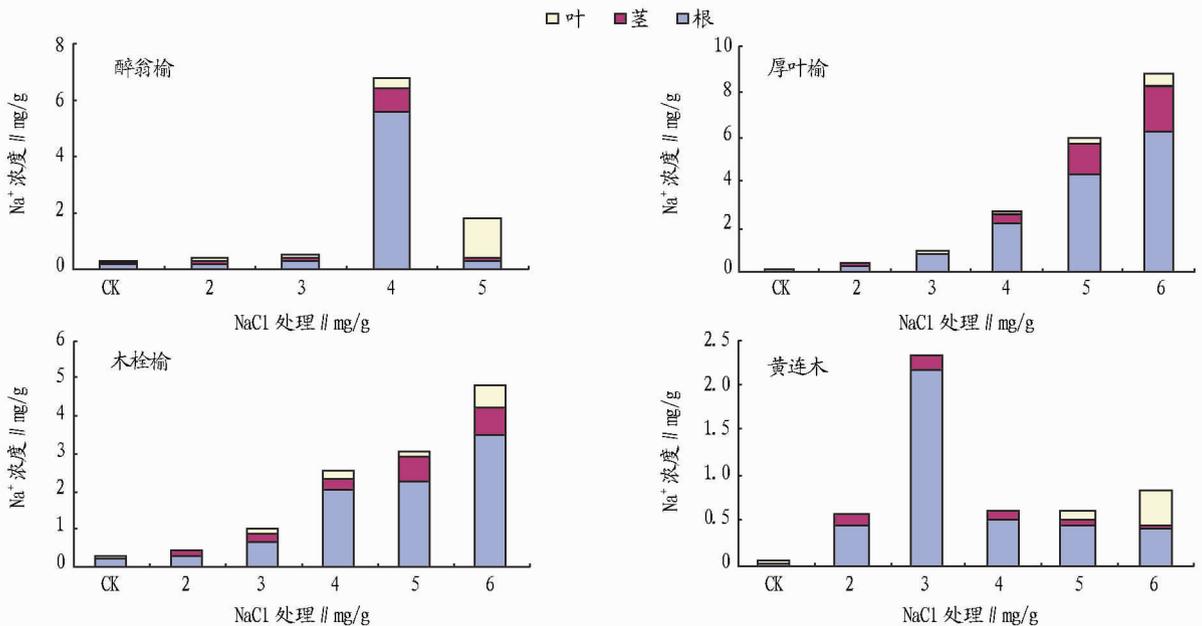


图1 盐胁迫对幼苗不同部位 $\text{Na}^+$ 含量的影响

榆次之,厚叶榆第3,醉翁榆耐盐性最弱。

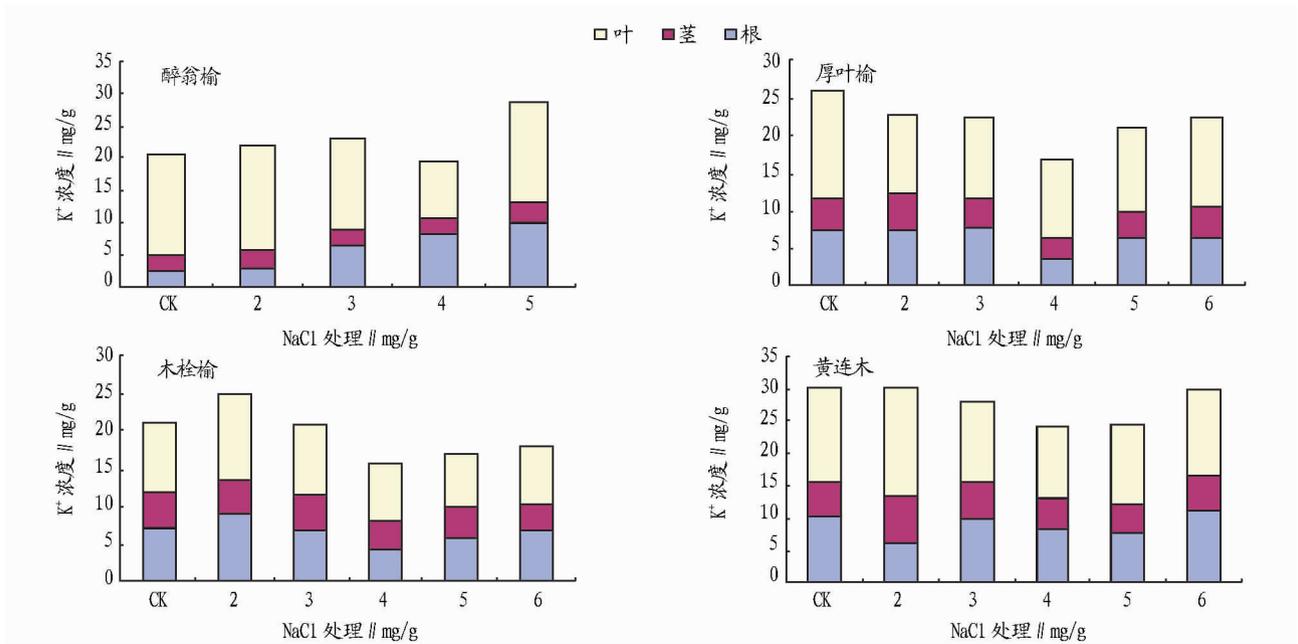
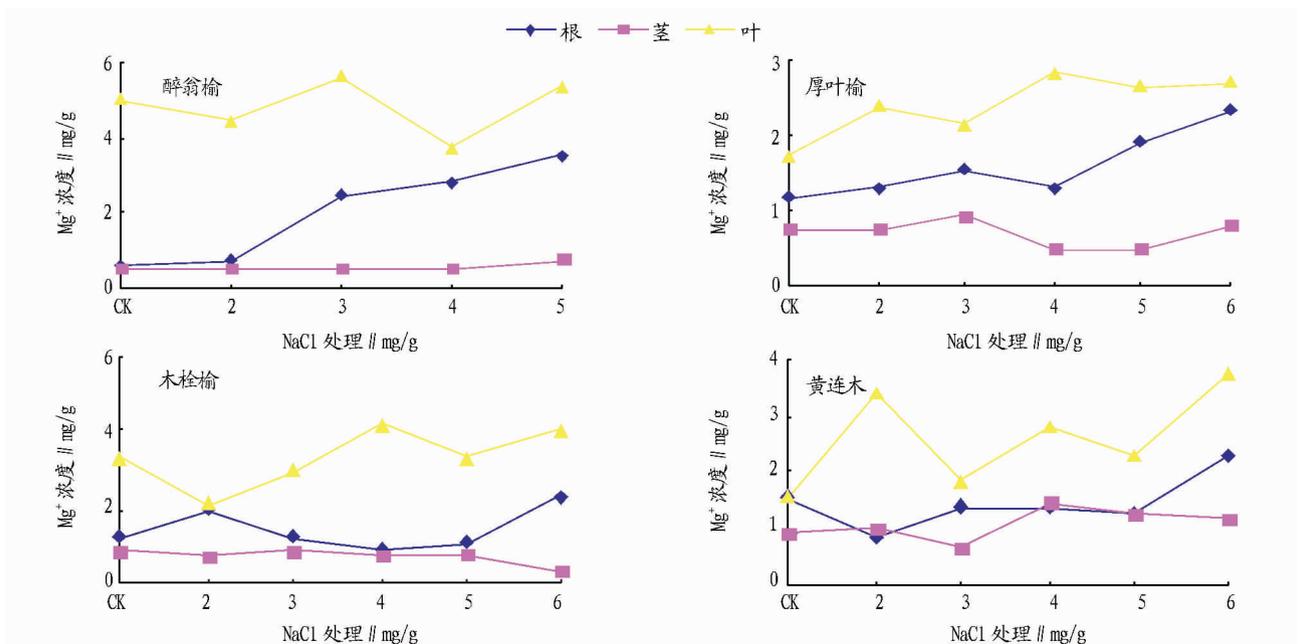
**2.2 盐胁迫下4个树种不同部位 $\text{K}^+$ 含量** 由图2可知,盐胁迫下4个树种不同部位 $\text{K}^+$ 含量的影响随盐胁迫浓度加大,醉翁榆体内 $\text{K}^+$ 总趋势呈上升状态,其他3个树种体内 $\text{K}^+$ 含量,木栓榆是呈先上升再下降,再上升的“S”型变化趋势,而厚叶榆与黄连木变化趋势是呈先下降后上升的“V”型变化状态。

**2.3 盐胁迫下4个树种不同部位 $\text{Mg}^{2+}$ 含量** 盐胁迫下厚叶榆根、叶中 $\text{Mg}^{2+}$ 含量,随盐胁迫浓度的增加而增大;黄连木根、叶中 $\text{Mg}^{2+}$ 含量变化趋势与木栓榆根、叶中 $\text{Mg}^{2+}$ 变化趋势相似,但茎中 $\text{Mg}^{2+}$ 含量下降不明显;醉翁榆根、茎、叶中 $\text{Mg}^{2+}$ 含量均随盐胁迫浓度的增加而增加,其中根中 $\text{Mg}^{2+}$ 含量上升最明显,具体见图3。

从总体上说,4个树种植株中 $\text{Mg}^{2+}$ 总含量均随着盐胁迫梯度的升高而升高。以4 mg/g盐胁迫为例,醉翁榆、厚叶榆、木栓榆、黄连木植株中 $\text{Mg}^{2+}$ 总含量分别为各自对照株的1.18、1.27、1.08和1.38倍。 $\text{Mg}^{2+}$ 在细胞外大量存在,可以

调节酶的活性。

**2.4 盐胁迫下对4个树种植株 $\text{Ca}^{2+}$ 含量影响** 随盐胁迫浓度的增加,4个树种叶部 $\text{Ca}^{2+}$ 含量也呈增加趋势。其中,醉翁榆叶部的 $\text{Ca}^{2+}$ 含量直线上升,黄连木叶部的 $\text{Ca}^{2+}$ 含量呈不规则上升,其他2树种叶部的 $\text{Ca}^{2+}$ 含量上升平缓。与对照相比,醉翁榆叶部 $\text{Ca}^{2+}$ 含量,在盐胁迫浓度为4 mg/g时达最大,这可能是由于盐胁迫浓度达到一定程度时,无机离子的渗透调节已经不起主要作用。从外观上看,醉翁榆的叶片也最先在4 mg/g盐胁迫下出现枯死,可能由于高盐胁迫下大多组织受损伤时,细胞内出现 $\text{Ca}^{2+}$ 超载或 $\text{Ca}^{2+}$ 超负荷状态,从而进一步加重细胞的损伤,以使细胞失去内稳态而致细胞坏死<sup>[4]</sup>。在盐胁迫梯度为0~5 mg/g时,随着盐梯度的升高,厚叶榆、木栓榆、黄连木3树种根中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量下降,而叶中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量则升高。在4 mg/g盐度下,醉翁榆、厚叶榆、木栓榆、黄连木茎中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量分别达到9.4、5.4、6.4、9.2 mg/g;醉翁榆、厚叶榆、木栓榆、黄连木根中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量分别达到11.5、3.9、3.1、2.8 mg/g;从总体上说,醉翁榆、厚叶榆、木

图2 盐胁迫对幼苗不同部位 K<sup>+</sup> 含量的影响图3 盐胁迫对幼苗不同部位 Mg<sup>2+</sup> 含量的影响

栓榆、黄连木 4 个树种在 4 mg/g 浓度处的根、茎、叶中 Ca<sup>2+</sup> 总含量分别达到 49.4、24.7、26.5 和 27.0 mg/g, 醉翁榆 Ca<sup>2+</sup> 含量最高。在 6 mg/g 盐度处, 厚叶榆、木栓榆、黄连木 3 树种根和叶中 Ca<sup>2+</sup> 含量变化趋势正好相反。而醉翁榆随着盐梯度的升高, 根中 Ca<sup>2+</sup> 含量也升高。4 树种茎中 Ca<sup>2+</sup> 含量均随着盐梯度的升高而下降, 厚叶榆、木栓榆茎中 Ca<sup>2+</sup> 含量随着盐梯度的升高下降很明显, 黄连木和醉翁榆茎中 Ca<sup>2+</sup> 含量呈波动式下降。

**2.5 盐胁迫下幼苗对离子的选择性吸收与分配** 植物对 NaCl 盐害非常敏感, 在盐害中真正起作用的是 Na<sup>+</sup>, 而不是 Cl<sup>-</sup>。所以, 决定林木耐盐能力的关键在于林木对 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 等离子的吸收, 即限制 Na<sup>+</sup> 进入体内, 选择性地吸收 K<sup>+</sup>, 才

能提高其耐盐能力。植物根中的 X(K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>) 向地上部分运输的选择性( $RSX, Na^+, R_sX, Na^+$ ) 参照公式<sup>[5]</sup> 计算。 $RS$  值反映的是植物根中的 X, Na<sup>+</sup> 向地上部分运输的选择性, 而  $R_s$  值反映的是植物叶对 X, Na<sup>+</sup> 吸收的选择性。 $RSX, Na^+$  和  $R_sX, Na^+$  值越大, X 运输的选择性越高, 留在根中的 Na<sup>+</sup> 越多。

在盐渍土上造林, 树木要长期经受盐胁迫, 并在盐逆境下生长发育, 盐分对植物的影响可归结于 3 个方面: 渗透、毒性及营养影响。对受盐胁迫时间最长(100 d)的试验苗矿质元素选择性吸收问题进行分析研究, 4 个树种的 X/Na<sup>+</sup>、 $RSX, Na^+$  和  $R_sX, Na^+$  值, 在处理第 100 天时, 盐胁迫降低了

根中  $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}/Na^+$  值,升高了  $Mg^{2+}/Na^+$  值,其中以  $K^+/Na^+$  比值降幅最大,其次  $Ca^{2+}/Na^+$ 。这可能是随着盐浓度提高,4个树种的表皮吸附  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  的位置被  $Na^+$  置换,从而抑制对  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  的吸收,同时地上部分的生命活动消耗这2种离子,而从根中吸收并上运至地上部分; $Mg^{2+}/Na^+$  值升高表明根中的  $Mg^{2+}$  抑制对  $Na^+$  的吸收。

盐胁迫对茎中  $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}/Na^+$ 、 $Mg^{2+}/Na^+$  值的影响不同于根系。与对照相比,盐胁迫对茎中  $K^+/Na^+$ 、 $Ca^{2+}/Na^+$  值总体呈下降趋势,而  $Mg^{2+}/Na^+$  值呈升高趋势。各树种间表现出一定的差异,如厚叶榆、木栓榆的  $Mg^{2+}/Na^+$  值几乎随盐梯度的提高持续增加,其他树种的  $Mg^{2+}/Na^+$  值则随盐梯度的提高呈波动性增加。而厚叶榆茎中的  $Ca^{2+}/Na^+$  值随盐梯度的提高而降低,其他树种的  $Ca^{2+}/Na^+$  值变化规律性不明显。盐胁迫总体上降低了上部叶  $K^+/Na^+$  值,但厚叶榆和黄连木上部叶  $K^+/Na^+$  值在盐处理下变化规律性不明显;对  $Ca^{2+}/Na^+$  值的影响,各树种有所不同,醉翁榆、木栓榆在低盐下有所上升,后随盐梯度的升高而降低;而厚叶榆和黄连木  $Ca^{2+}/Na^+$  值变化无规律。

在 0~3 mg/g 盐梯度范围,  $RS_{Mg^{2+},Na^+}$  值均随盐梯度的升高而降低,表明木栓榆的根向茎选择性地运输  $Na^+$  而限制  $Mg^{2+}$  的运输,在高浓度下正好相反,这也许是这些树种耐盐的原因;黄连木等树种的根向茎、叶选择性地运输  $Na^+$  而限制  $Mg^{2+}$  的运输;总体上说,醉翁榆、厚叶榆随盐梯度的升高,根向茎、叶选择性地运输  $Mg^{2+}$  而限制  $Na^+$  的运输。

黄连木树种随盐梯度的升高,根向茎、叶选择性地运输  $Ca^{2+}$  而限制  $Na^+$  的运输,5 mg/g 处理后根向叶选择性地运输方式正好相反;在 0~3 mg/g 低中盐梯度范围,醉翁榆根向茎叶选择性地运输  $Ca^{2+}$  而限制  $Na^+$  的运输,此后离子运输方式正好相反;木栓榆和厚叶榆随盐梯度的升高,根向茎、叶选择运输  $Ca^{2+}$  或  $Na^+$  的方式变换复杂,规律不强,这可能是与二者体内进行生理调节有关。

在 0~4 mg/g 盐梯度范围,木栓榆、黄连木、厚叶榆等树种的根向茎、叶选择性地运输  $K^+$  而限制  $Na^+$  的运输,5 mg/g 后根向茎、叶选择性地运输方式正好相反;在 0~3 mg/g 低中盐梯度范围,醉翁榆根向茎选择性地运输  $K^+$  而限制  $Na^+$  的运输,叶正好相反。从上述分析可知,木栓榆、黄连木、厚叶榆根向茎、叶选择性地运输  $K^+$  而限制  $Na^+$  的运输,其适应盐分梯度范围要比醉翁榆广,这说明木栓榆、黄连木、厚叶榆等3个树种耐盐的原因。高浓度  $Na^+$  干扰了植物对营养元素 K 及 N 等的吸收,造成植物体内营养元素亏缺,影响生长发育,此外根系环境中盐分浓度提高,水势下降而引起植物吸水困难,引起渗透胁迫。

### 3 结论与讨论

(1)  $Na^+$  在木栓榆、厚叶榆、黄连木和醉翁榆4个树种不同组织中分布的基本趋势是根最大,茎次之,叶最小。说明植物可利用这些积累在根部的  $Na^+$  进行渗透调节,降低水势,保持吸水能力,以免造成生理干旱。叶片中  $Na^+$  含量较低,这可能由于根部和茎部积累了大量的离子,限制了离子

的向上运输,从而减少了盐胁迫对地上部的毒害。木栓榆和厚叶榆不同组织  $Na^+$  含量基本是随盐处理浓度增大而增大,但增加幅度较小,其中根、茎较为稳定,根、茎在  $Na^+$  向上运输的过程中起到抑制作用,表明非盐生植物通过控制离子进入茎的木质部来限制离子进入地上部分,茎在缓解盐害过程中起着重要的作用,因此,根、茎可能是木栓榆和厚叶榆受盐害的主要部位。醉翁榆在 3~4 mg/g NaCl 胁迫梯度间,茎部  $Na^+$  含量随盐处理浓度的增大而下降,同时发现其根或叶中  $Na^+$  含量随盐处理浓度的增大而增大;黄连木受盐害的原因不在于体内  $Na^+$  含量的多少,而是因为叶片  $Na^+$  积累过快、过多导致产生盐害,而茎不能有效控制离子进入根的木质部来限制离子进入叶片是黄连木致害和死亡的根本所在。

该研究表明,叶片是黄连木、醉翁榆受盐害的主要部位,叶片中  $Na^+$  含量变化的幅度是衡量这些苗木抗盐性的指标之一;根、茎是木栓榆和厚叶榆受盐害的主要部位,同时它们也是衡量木栓榆和厚叶榆耐盐性的主要部位。

(2) 总体上说,4个树种在 4 mg/g 梯度处,醉翁榆根茎叶中  $Ca^{2+}$  总含量最高,此时  $Ca^{2+}$  浓度足以使细胞失去内稳态而致细胞坏死,厚叶榆、木栓榆、黄连木3树种含量较低,主要原因是随着盐梯度的升高,细胞质  $Ca^{2+}$  浓度也出现短暂的上升,以使细胞失去内稳态,但这3种树组织细胞内可能存在维持  $Ca^{2+}$  浓度内稳态的转运体  $Ca^{2+}$  泵 ( $Ca^{2+}$ -ATPase) 和  $Ca^{2+}$ /阳离子反向转运体 ( $Ca^{2+}$ /Canon-Antiporter),当细胞受到刺激后,由于  $Ca^{2+}$  通道开放,胞外及胞内“钙库”中的  $Ca^{2+}$  就跨膜转运到细胞质中,使  $Ca^{2+}$  浓度出现短暂的上升,当  $Ca^{2+}$  将信号传递到下游调控分子后,存在于质膜及内膜系统上的  $Ca^{2+}$  泵和  $Ca^{2+}$  阳离子反向转运体就迅速地将细胞质  $Ca^{2+}$  跨膜释放到胞外和胞内“钙库”中,从而维持细胞质  $Ca^{2+}$  浓度的稳态<sup>[4]</sup>。结合4个树种在盐胁迫下的形态和生长指标进行分析,醉翁榆体内高浓度的  $Ca^{2+}$  可能是其受害的原因之一,而厚叶榆、木栓榆、黄连木体内较低的  $Ca^{2+}$  含量可能是其耐盐的原因。

(3) 盐胁迫使厚叶榆根、叶中  $Mg^{2+}$  含量随盐胁迫浓度的增加而增加;黄连木根、叶中  $Mg^{2+}$  含量变化趋势与木栓榆根、叶中  $Mg^{2+}$  变化趋势相似,但茎中  $Mg^{2+}$  含量下降不明显;醉翁榆根茎叶中  $Mg^{2+}$  含量均随盐胁迫浓度的增加而增加,其中根中  $Mg^{2+}$  含量上升最明显。

(4) 随盐胁迫时间的延长,植物体对  $Na^+$ 、 $K^+$  的吸收明显增加,但对  $Na^+$  的吸收量明显大于  $K^+$ 。长时间的盐胁迫,耐盐能力弱的植物  $Na^+/K^+$  值升高较快,而耐盐能力强的植物  $Na^+/K^+$  值较小。盐胁迫总体上降低了上部叶  $K^+/Na^+$  值,但厚叶榆和黄连木上部叶  $K^+/Na^+$  值在盐处理下变化规律性不明显;对  $Ca^{2+}/Na^+$  值的影响,醉翁榆、木栓榆在低盐下有所上升,后随盐梯度的升高而降低,而醉翁榆降低幅度最明显;而厚叶榆和黄连木  $Ca^{2+}/Na^+$  值变化无规律。在离子毒害、营养缺乏、渗透胁迫的共同作用下,醉翁榆发生盐害较重。需要指出的是黄连木根部向茎、叶选择运输  $Na^+$ ,但抗盐性较强,说明盐胁迫下黄连木可能主动选择吸收一部分

无机离子作为渗透调解物质来缓解盐害,黄连木可能是一种类盐生植物,具有盐生植物的某些特征。

## 参考文献

- [1] 夏尚光. 两种美国岩榆的资源培育及抗逆性研究[D]. 南京:南京林业大学,2008.  
[2] 吴永波. 四种白蜡树幼苗耐盐性的比较研究[D]. 南京:南京林业大学,

2002.

- [3] 刘淑萍,王燕. 金属叶绿素荧光性在金属对植物光合作用影响中的应用[J]. 河北联合大学学报:自然科学版,2013(1):23-26.  
[4] 沈国明. 水稻根质膜  $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$  反向转运体的存在及其特性[J]. 中国水稻科学,2005,19(4):308-314.  
[5] 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.

(上接第 165 页)

析,产生区域性降雹多为西北气流型和低涡切变型,分别占总降雹日数的 54% 和 27%,其次为蒙古冷涡型,占 15%,而阶梯槽型仅占总降雹日数的 4%。延安出现大范围区域性冰雹时一般具有以下特征:①在 850 hPa 层面上河套区存在一定面积湿层,水汽通量散度场对应辐合区。②500 hPa 层面上河套上游有较强干冷空气侵入河套,一般延安测站处于假相当位温锋区附近,850 hPa 层面上河套区有高能舌配置,延安测站假相当位温 6~9 月为 50~70 °C、5 和 10 月为 40~55 °C。③500 hPa 层面上银川和延安 500 hPa 的温度差  $T_{\text{银川}-\text{延安}} \leq -2$  °C。延安测站上空  $T_{500-850} \leq -25$  °C,即中层有一定强度的冷平流。

表 2 延安气象观测站历史雹日 0 °C 层高度 km

	0 °C 层高度			降雹高度范围
	平均	最大	最小	
5 月	3 779	4 981	2 000	3 500~4 300
6 月	4 467	5 285	3 200	4 000~4 800
7 月	4 925	6 019	4 029	4 100~4 500
8 月	4 866	6 168	3 683	3 800~4 700
9 月	4 313	5 994	3 196	3 500~4 000

**4.2 连续性降雹** 根据 2005~2011 年的降雹资料分析,产生连续性降雹的日数中有 23 d 属于西北气流型,占总降雹日数的 62%,低涡切变型有 8 d,占总降雹日数的 22%,蒙古冷涡型和阶梯槽型均占总降雹日数的 8%。从 2005~2011 年间连续性降雹过程中的 08:00 延安探空资料分析出以下特征:①垂直风切变均较低,大多数在 850~700 hPa。②中层 500~400 hPa 有较明显的干冷空气。③低层有逆温层出现,基本在近地面到 850 hPa 之间;有时地面伴有锋面,探空图上有锋面逆温。④ 0 °C 层高度在 600 hPa 及其附近,-20 °C 高度在 6 km 附近。⑤一般低层相对湿度 > 80% 的湿层浅薄,若湿层较深厚,则在降雹时伴有不同程度的降水。⑥不稳定层较深厚,一般在 850~500 hPa。⑦当低层有逆温层存在

时,SI 指数的参考意义不大,K 指数 > 30 °C,当 K 指数在 30 °C 以上时,降雹的同时伴有强降水产生。⑧在连续性降雹中垂直风若低层(850~700 hPa)和 中层(700~500 hPa)均有风切变存在,则可能出现区域性冰雹。

## 5 小结

(1)延安年平均降雹日数为 17 d 左右。延安市降雹有明显的月变化特征,6 月是降雹最频繁的时期,月平均降雹日为 6 d 左右,占全年总次数的 34%;7、8 月次之,月平均降雹日为 3 d 左右;10 月最少,仅占全年总次数的 4%。

(2)延安降雹日的 500 hPa 环流形势可以分为西北气流型、低涡切变型、蒙古冷涡型和阶梯槽型 4 种类型。

(3)由 08:00 高空环境场和延安测站探空资料得出,近地面层有偏南气流进入河套,一般在边界层附近有薄的相对湿度 ≥ 80% 的湿层,对应 850 hPa 上有一自南向北的假相当位温高能舌进入河套。当对流中下层湿层较厚时,且河套上游 500 hPa 有干冷平流,一般伴有强降水。

(4)对流层中上层冷空气的入侵容易出现降雹天气,延安出现降雹天气其上空一般 -20 °C 层高度在 8 000~7 000 m,0 °C 层高度各月表现不一。在 500 hPa 银川与延安的温差为负,河套西北侧一般表现有较强的冷平流。

(5)中低层有较强的垂直风切变存在,一般 500 hPa 以下风速较小 (< 8 m/s)。当 08:00 700 hPa 和 850 hPa 有切变和辐合存在时,便构成了较强的触发机制。

## 参考文献

- [1] 熊秋芬,章丽娜,王秀明. 强天气预报员培训手册[M]. 北京:中国气象局培训中心,2012:3-60.  
[2] DOSWELL C A III, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. Weather and Forecasting, 1996, 11: 560-581.  
[3] DOSWELL C A III. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example[J]. Wea Forecasting, 1987, 2:4-16.  
[4] 雷崇典,张爱丽,吴春青,等. 延安市降雹气候特征及雹云回波移动路径的考证[J]. 陕西气象,2013(1):11-14.