

# 盐分胁迫下番茄盐分离子和重金属的分布特征

罗璇, 陈小娇, 李取生\*, 石雷, 王立立, 赖营

(暨南大学环境工程系, 水土环境毒害性污染物防治与生物修复广东省高校重点实验室, 广州 510632)

**摘要:**采用盆栽试验方法研究了不同盐分含量处理下番茄不同器官盐分离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ )和重金属离子( $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ )的分布特征,探讨盐分离子对番茄不同器官吸收重金属离子的影响机制,为重金属污染盐渍土壤的农业可利用性评价提供科学依据。结果表明,番茄根、茎、叶和果实  $\text{Na}^+$ 含量均随盐分含量增加而增加;番茄根  $\text{K}^+$ 含量随盐分含量增加小幅上升,茎  $\text{K}^+$ 含量则显著下降,叶  $\text{K}^+$ 含量无显著变化;番茄各器官  $\text{Ca}^{2+}$ 含量随盐分含量增加无明显变化。番茄根  $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Zn}$  和  $\text{Cu}$  含量以及番茄茎、叶  $\text{Cd}$  含量均随盐分含量增加而增加;番茄根  $\text{Ni}$  含量、番茄茎叶  $\text{Pb}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Zn}$  和  $\text{Cu}$  含量以及番茄果实各重金属含量受盐分含量变化影响不大。因此,土壤盐分含量的增加对番茄根部吸收重金属( $\text{Ni}$  除外)有促进作用。

**关键词:**盐分胁迫;番茄;重金属;分布;累积

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)04-0654-07

## Distribution Characteristics of Salt Ions and Heavy Metals in Tomato Under Salinity Stress

LUO Xuan, CHEN Xiao-jiao, LI Qu-sheng\*, SHI Lei, WANG Li-li, LAI Ying

(Department of Environmental Engineering, Jinan University, Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation, Department of Education of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** The distribution of salt ions( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and heavy metal ions( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ) in different organs of tomatoes grown in the soils with eight salinity levels was surveyed using a pot experiment. The influence of salt ions on uptake of heavy metal by tomato was investigated. The results showed that  $\text{Na}^+$  contents within roots, shoots, leaves and fruits increased as soil salinity increased.  $\text{K}^+$  contents in roots rose slightly,  $\text{K}^+$  contents in shoots decreased significantly, while contents of  $\text{K}^+$  in leaves remain unaltered from treatment two to treatment eight.  $\text{Ca}^{2+}$  contents in different parts of tomato also didn't change along with the soil salinity. The contents of  $\text{Cd}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Zn}$  and  $\text{Cu}$  in roots, and  $\text{Cd}$  in shoots and leaves increased along with the rise of soil salinity. However, the contents of  $\text{Ni}$  in roots,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$  and  $\text{Ni}$  in shoots and leaves and all six heavy metals within fruits were not significantly influenced by soil salinity. It was concluded that the increase of soil salinity had positive effect on the uptake of heavy metals by the roots of tomatoes, except for  $\text{Ni}$ . The results provide some useful scientific information for the agricultural land use of saline soils polluted by heavy metals.

**Keywords:** salinity stress; tomato; heavy metals; distribution; accumulation

我国东南沿海地区经济发展迅速、人口持续增长,建设占用耕地数量较大,土地后备资源相对匮乏,在保护海洋生态环境的前提下,适度开发利用沿海滩涂资源成为补充耕地、实现“占补平衡”的重要方式之一<sup>[1]</sup>。滩涂土壤由于其咸淡交汇的特殊地理位置而成

为重金属等难降解污染物最易累积的场所<sup>[2]</sup>,因而同时受到盐分和重金属双重污染,给滩涂土壤的围垦利用带来健康风险。国内外众多研究表明<sup>[3-6]</sup>,土壤中的盐分离子如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  等可通过争夺吸附位点、络合解离作用等改变土壤重金属的形态和生物有效性。土壤中  $\text{Cl}^-$  可与重金属离子  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Zn}^{2+}$  等形成稳定络合物,使土壤中固态重金属溶入土壤溶液; $\text{Ca}^{2+}$  对土壤  $\text{Cd}^{2+}$  吸附点位的竞争性吸附,增加了土壤溶液  $\text{Cd}^{2+}$  的浓度,生物有效性提高。盐分离子对植物的伤害方式主要有渗透胁迫、离子毒害和养分失衡<sup>[7]</sup>,

收稿日期:2011-08-31

基金项目:国家自然科学基金项目(40871154,U0833002);国家科技支撑计划项目(2009BADB3B03)

作者简介:罗璇(1988—),女,广东湛江人,硕士研究生,主要从事环境生态与土壤环境研究。E-mail:fall-story@163.com

\* 通讯作者:李取生 E-mail:liqusheng@21cn.com

多种盐分离子同时存在则可发生协同或拮抗作用而影响植物生长。如管志勇等研究表明<sup>[8]</sup>, Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>的离子半径和水合能相似, Na<sup>+</sup>竞争 K<sup>+</sup>的吸收位点及活性位点, 致使在 NaCl 胁迫下大岛野路菊、萨摩野菊根系大量吸收 Na<sup>+</sup>而抑制了对 K<sup>+</sup>的吸收。

本试验采用经淡水淋洗达到不同盐分含量的土壤种植耐盐番茄, 分析其不同器官盐分离子和重金属离子的分布特征, 探讨盐分离子与重金属离子的相互作用机制, 为重金属污染盐渍土壤的农业可利用性评价提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为经土柱淡水淋洗后的滩涂表层土壤, 具体淋洗过程见前期报道<sup>[9-10]</sup>。淋洗脱盐试验共设计了 8 个脱盐梯度处理(T1~T8), 每个处理 3 个重复<sup>[10]</sup>。淋洗结束后, 取 0~10 cm 表层土壤过 2 mm 筛备用。供试土壤盐分和重金属含量见表 1。对原土以及淋洗后土壤重金属含量进行差异显著性分析( $P<0.05$ ), 结果表明, 除 Ni 以外, 淋洗后土壤重金属含量均较淋洗前显著下降, 而不同脱盐梯度处理(T1~T8)间重金属含量无显著差异。

供试植物为富丰 2 号番茄, 种子由广东省农科院蔬菜研究所提供。

### 1.2 盆栽试验

将供试土壤 1.5 kg 分别装入统一规格塑料盆(高 15 cm, 内径 15 cm)内, 并用双蒸水调节土壤含水量至田间持水量的 70%左右; 每盆播种 6 颗, 待植物正常生长后择株定植 2 株·盆<sup>-1</sup>。为避免其他元素对试验结果造成干扰, 盆栽过程中未喷施农药和追施化肥, 同

时记录番茄生长状况: 发芽率、长势、开花、结果等。盆栽试验在带有遮阳网和水帘降温的玻璃温室进行。4 个月作物成熟后收获植株, 用自来水清洗粘附在样品上的泥土等杂质, 再用蒸馏水反复冲洗, 将样品分为根、茎、叶和果实 4 部分。准确称取各部分鲜重后分装在牛皮纸袋中, 放入控温烘箱 100 ℃杀青 0.5 h, 再在 60 ℃下烘干至恒重, 称干重, 研磨过筛, 装入密封袋保存备用。

### 1.3 分析测试

土壤可溶盐总量采用 5:1 水土比浸提测定<sup>[11]</sup>; 土壤重金属分析采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 全消解法, 并用火焰原子吸收分光光度法测定<sup>[12]</sup>; 植物样品采用干灰化法消解<sup>[13]</sup>, 盐分离子用火焰原子吸收分光光度法测定, 重金属离子用石墨炉原子吸收法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐分胁迫对番茄植株生长状况的影响

低盐分含量(T8、T7)处理对番茄种子发芽、幼苗发育无显著影响, 随着盐分含量增加(T6~T4)种子萌发时间延后、幼苗发育缓慢, 当盐分含量达到 0.54% (T3)时, 种子发芽受到显著抑制, 甚至出现幼苗失水致死。最高盐分含量处理(T1)番茄不存活。中低盐分含量(T4~T8)处理未对番茄植株开花、结果产生显著影响, 低盐分含量甚至能刺激番茄生长使之开花繁盛、坐果率提高, 当盐分含量达到 0.54%(T3)以上时, 番茄开花受到明显抑制, 坐果率降低。

如图 1 所示, 中低盐分含量处理对番茄根、叶生长状况无显著影响, 高盐分含量(T3、T2)则对植株生长抑制显著。盐分含量为 0.60%(T2)时番茄根干质量仅为最大值的 37%, 叶干质量为最大值的 60%, 可见

表 1 土壤盐分含量和重金属含量

Table 1 Soil salinity contents and heavy metals concentrations

| 梯度处理 | 盐分含量/%    | Cu/mg·kg <sup>-1</sup> | Zn/mg·kg <sup>-1</sup> | Cd/mg·kg <sup>-1</sup> | Ni/mg·kg <sup>-1</sup> | Pb/mg·kg <sup>-1</sup> | Cr/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 原土   | 1.60±0.05 | 74.7±2.96a             | 251±6.70a              | 1.43±0.11a             | 50.0±1.89a             | 79.9±3.72a             | 80.5±3.33a             |
| T1   | 0.67±0.01 | 59.7±2.13b             | 209±5.98b              | 0.96±0.08b             | 52.1±0.98a             | 49.2±4.76b             | 74.3±0.53b             |
| T2   | 0.60±0.03 | 59.5±1.85b             | 214±6.97b              | 1.02±0.06b             | 49.4±1.41a             | 50.8±4.69b             | 72.1±0.73b             |
| T3   | 0.54±0.01 | 61.0±2.89b             | 227±10.6b              | 1.03±0.12b             | 51.0±1.93a             | 51.3±6.59b             | 72.3±0.98b             |
| T4   | 0.46±0.02 | 60.3±2.14b             | 218±9.29b              | 1.07±0.03b             | 50.6±1.21a             | 50.8±6.29b             | 66.2±0.90b             |
| T5   | 0.38±0.01 | 61.6±1.27b             | 222±10.5b              | 1.05±0.10b             | 49.4±1.38a             | 49.0±2.31b             | 71.3±1.50b             |
| T6   | 0.34±0.01 | 61.3±1.13b             | 216±7.15b              | 0.93±0.15b             | 49.6±1.87a             | 50.3±3.41b             | 72.1±0.28b             |
| T7   | 0.18±0.00 | 60.1±2.43b             | 220±6.34b              | 1.08±0.05b             | 51.1±1.18a             | 49.7±5.18b             | 67.5±0.16b             |
| T8   | 0.14±0.01 | 61.1±2.43b             | 207±5.46b              | 1.01±0.03b             | 49.3±1.50a             | 49.3±5.28b             | 70.1±0.21b             |

注: 同一列内不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。下同。

高盐分含量对番茄根生长抑制显著,而对番茄叶的影响稍小。番茄茎对盐分含量变化反应较为敏感,随着盐分含量的增加,茎干重明显下降,盐分含量为0.60%(T2)时的茎干重仅为0.14%(T8)时干重的35%;番茄果实干重随盐分含量增加呈先上涨后下降的趋势,并在盐分含量为0.38%时达到最大值,即中低盐分含量能够促进番茄果实生长,当盐分含量持续升高,胁迫所致营养失衡等抑制了果实生长。

## 2.2 番茄不同器官盐分离子含量和 $K^+/Na^+$ 比值分析

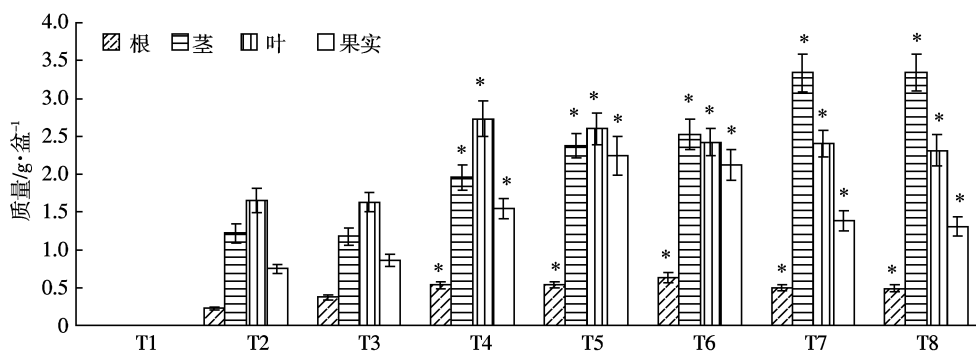
表2列出不同处理中番茄根、茎、叶和果实的盐分离子( $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ )含量和  $K^+/Na^+$  比值。随着盐分含量增加,番茄根、茎、叶和果实  $Na^+$  含量呈上升趋势,尤其当盐分含量达到0.38%(T5)以上时,各部分  $Na^+$  含量上升幅度加大。比较器官间分布可知,  $Na^+$  优先累积在茎中,其次到根和叶,果实  $Na^+$  含量明显降低,仅约为茎  $Na^+$  含量的20%~30%。盐分含量小于0.20%(T8、T7)时,根和茎优先积累  $Na^+$ ,并阻止其向叶运输,以减少对光合器官的破坏,随盐分含量持续升高,根和茎对  $Na^+$  截留能力下降,叶  $Na^+$  含量迅速增加,离子毒害作用明显。随盐分含量增加,番茄根  $K^+$  含量小幅度上升,而茎  $K^+$  含量显著下降。叶作为光合作用的功能器官,其  $K^+$  含量受盐分含量变化影响较小,维持在  $30\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  左右。番茄是含钾较高的果蔬之一,结实后对钾元素需求增加<sup>[14]</sup>,故番茄果实是所有器官中钾含量最高的部位。有研究表明<sup>[15]</sup>,番茄果色与果实中钾含量显著相关。本试验中由于盐分含量的影响,番茄长势不一致,果实成熟度不同,其  $K^+$  含量变化较大。番茄根、茎、叶和果实  $Ca^{2+}$  含量几乎不随盐分含量改变而改变,其器官间分布规律为叶>根≈茎>果实。作为植物最鲜嫩的部分,叶的生命力最强,是植物进行光合作用、蒸腾作用和气体交换的主要场所,尤其

在光合作用合成有机质的过程中营养需求较大,对钾、钙等必需元素需求也大,因此随蒸腾流等作用上升至叶中的钾、钙也较多。

盐分胁迫下细胞内离子失衡的一个典型指标是  $K^+/Na^+$  比值改变<sup>[16-17]</sup>,维持较高的  $K^+$  含量和  $K^+/Na^+$  比值可以减少盐分对植物的毒害,保持机体正常生命活动。从表2可看出,  $K^+/Na^+$  比值随盐分含量增加而降低。番茄根系是最先遭受胁迫的部分,为了维持正常生长,  $K^+/Na^+$  比值下降趋势缓慢,从T2到T8仅降低了35%。茎、叶  $K^+/Na^+$  比值受盐分含量影响较大,盐分含量上升到0.40%左右时,  $K^+/Na^+$  比值小1,番茄生长明显受到抑制。

## 2.3 番茄不同器官重金属离子分布情况

如图2所示, Cd 在番茄不同器官间的分布规律为叶>根>茎>果实,其中根和叶的 Cd 含量约占植株 Cd 总量的80%。随盐分含量增加,番茄根、茎和果实 Cd 含量均增加,叶 Cd 含量则先小幅上升后下降,并于T5达到最大值  $3.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Pb 在番茄根和叶的累积含量高达植株 Pb 总量的85%以上,远大于其在茎和果实的累积含量。随盐分含量增加,番茄根 Pb 含量增加,茎、叶和果实 Pb 含量变化不明显;T8根中 Pb 含量仅为叶 Pb 含量的39%,而T2~T4根和叶中 Pb 含量却无显著差异。Cr 和 Ni 在番茄不同器官间的分布规律分别为根>茎>叶≈果实和根≈茎>叶≈果实,其中根和茎 Cr 和 Ni 含量占植株 Cr 和 Ni 总量的70%~80%。随盐分含量增加,番茄根 Cr 含量增加,番茄茎、叶和果实 Cr 含量及番茄各个器官 Ni 含量变化不明显。Cu 和 Zn 是植物必需的两种微量元素,番茄对其累积含量较其他4种重金属元素高。它们在番茄不同器官间的分布规律为茎>根>叶>果实,其中根和茎的 Cu 和 Zn 含量约占植株 Cu 和 Zn 总量的70%~



\* 表示与同一系列最高盐分含量处理(T2)差异显著  $P<0.05$ 。下同

图1 番茄不同器官质量(干重)

Figure 1 Dry weight in different tomato organs

表 2 番茄不同器官盐分离子含量

Table 2 Salt ions concentrations in different tomato organs

| 处理 | 根                                   |                                    |                                      |                                 | 茎                                   |                                    |                                      |                                 |
|----|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
|    | Na <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> |
| T2 | 35.67±2.37a                         | 12.78±1.32a                        | 13.81±1.35a                          | 0.36                            | 52.96±4.54a                         | 22.84±2.65a                        | 13.87±0.98a                          | 0.43                            |
| T3 | 27.44±2.34bc                        | 12.43±1.41a                        | 12.01±1.20a                          | 0.45                            | 46.66±4.01ab                        | 19.56±2.32a                        | 14.93±1.03a                          | 0.42                            |
| T4 | 28.76±1.98b                         | 11.16±0.94ab                       | 14.16±1.24a                          | 0.39                            | 41.73±4.65ab                        | 29.93±2.52bc                       | 11.57±0.89a                          | 0.72                            |
| T5 | 21.59±1.82cd                        | 11.05±1.02abc                      | 11.90±1.23a                          | 0.51                            | 34.28±3.95ab                        | 28.81±2.58b                        | 13.45±1.07a                          | 0.84                            |
| T6 | 17.50±1.34d                         | 8.18±0.92c                         | 13.87±1.41a                          | 0.47                            | 28.24±3.23b                         | 29.53±3.65b                        | 9.61±0.86a                           | 1.05                            |
| T7 | 15.33±1.85d                         | 7.57±0.84c                         | 13.72±1.12a                          | 0.49                            | 28.25±2.28b                         | 36.17±3.35cd                       | 9.18±0.94a                           | 1.28                            |
| T8 | 16.12±1.62d                         | 8.79±0.82bc                        | 14.57±1.15a                          | 0.55                            | 32.25±3.41ab                        | 40.26±3.01d                        | 10.91±1.06a                          | 1.25                            |
| 处理 | 叶                                   |                                    |                                      |                                 | 果                                   |                                    |                                      |                                 |
|    | Na <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | Ca <sup>2+</sup> /mg·g <sup>-1</sup> | K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> |
| T2 | 49.20±4.96a                         | 30.28±2.46a                        | 37.66±1.63a                          | 0.51                            | 16.47±1.06a                         | 58.77±6.05bc                       | 1.75±0.23a                           | 3.57                            |
| T3 | 29.09±3.41b                         | 28.24±3.23a                        | 33.73±1.53a                          | 0.97                            | 10.18±0.95b                         | 59.11±3.89c                        | 1.01±0.15a                           | 5.81                            |
| T4 | 30.93±3.32b                         | 29.57±3.65a                        | 34.44±1.68a                          | 0.96                            | 10.43±0.87b                         | 39.40±3.56a                        | 1.41±0.32a                           | 3.78                            |
| T5 | 20.27±2.56c                         | 33.70±2.76a                        | 41.10±1.43a                          | 1.66                            | 9.13±1.06b                          | 47.22±4.26ab                       | 1.06±0.24a                           | 5.17                            |
| T6 | 15.68±1.34c                         | 31.45±3.86a                        | 37.65±1.95a                          | 2.01                            | 9.06±0.96b                          | 40.38±4.87a                        | 1.22±0.21a                           | 4.45                            |
| T7 | 8.00±0.96d                          | 30.72±3.25a                        | 36.49±1.38a                          | 3.84                            | 7.59±0.85b                          | 61.89±5.96c                        | 0.97±0.12a                           | 8.15                            |
| T8 | 8.28±1.01d                          | 27.15±2.53a                        | 38.49±1.23a                          | 3.28                            | 7.90±0.79b                          | 41.94±5.46ab                       | 1.12±0.14a                           | 5.31                            |

75%。随盐分含量增加,番茄根 Cu 和 Zn 含量均增加,而茎、叶和果实 Cu 和 Zn 含量变化不明显。

### 3 讨论

盐分胁迫引发氧化胁迫、渗透胁迫和营养亏缺 3 种主要胁迫<sup>[18]</sup>,因此保持植物体和细胞内离子平衡对维持植物正常生长至关重要。盐分离子在植株内的绝对含量和离子在器官水平上分配的优先次序均影响植物的耐盐性<sup>[8,19-20]</sup>。植物耐盐性直接影响其在含盐土壤中的生长状况,而生长状况的好坏又影响植物对土壤中其他种类离子(如重金属离子)的吸收。很多研究表明<sup>[21-22]</sup>,植株生物量影响金属离子的吸收,低生物量植株往往较高生物量植株累积更高含量的金属离子。土壤和植物体内盐分离子和重金属离子之间相互作用、相互影响,从而最终决定其分配和含量。

#### 3.1 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>器官分布特征和耐盐性

离子在番茄不同器官间的区域分布由根系吸收选择性和器官间运输选择性共同决定。本研究选用耐盐性较强的“富丰 2 号”番茄为试验材料,对番茄不同器官 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>器官分布特征和耐盐性进行分析。试验显示,Na<sup>+</sup>在不同器官含量的分布规律为茎>根≈叶>果实。Na<sup>+</sup>主要累积在番茄茎,可能是由于番茄属于非盐生植物,其耐盐性相对较弱,而茎作为输导组织和支撑器官,其代谢活性较根和叶相对较弱,盐分

离子在茎中的积累可以减少对功能器官的伤害<sup>[23]</sup>。另外,本研究结果中番茄不同器官对 Na<sup>+</sup>的累积分布规律与王学征等<sup>[24]</sup>研究结果不同,可能是由于所选择番茄品种的耐盐性不同,随着材料耐盐水平的提高,Na<sup>+</sup>聚集部位相应上升,耐盐水平越高,则Na<sup>+</sup>主要聚集部位越高<sup>[25]</sup>。K 作为植物生长的必需元素,非盐生植物番茄对其吸收选择性比 Na 元素强。陈德明等<sup>[26]</sup>对盐胁迫下不同小麦品种的耐盐性及其离子分布特征的研究表明,小麦植株根系吸收的 K<sup>+</sup>多向茎叶中运输,从而保持茎叶中高 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值。本试验中番茄根系 K<sup>+</sup>含量随盐分含量增加稍微上升,不仅与根系对 K<sup>+</sup>吸收选择性有关,可能也与土壤中 K<sup>+</sup>含量有关。番茄茎 K<sup>+</sup>含量的降低主要是受到 Na<sup>+</sup>含量的抑制,而叶 K<sup>+</sup>含量的保持则是为了保证光合作用的进行,确保机体正常生长。

盐分胁迫下 Ca<sup>2+</sup>的存在对于细胞膜的完整性、细胞渗透调节和 K/Na 选择性有重要作用,叶片中高 Ca<sup>2+</sup>含量可降低 Na<sup>+</sup>的毒害性<sup>[27-29]</sup>。本试验中番茄叶 Ca<sup>2+</sup>含量远远高于根茎,是番茄保护植物光合功能部位、降低盐分毒害的适应性反应。

为保证机体正常生理活动,一般植物细胞质中的 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>的最小值在 1 左右,而盐渍环境中 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>远小于 1,植物通过提高 K<sup>+</sup>吸收选择性来保持细胞质内高 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比值,成为植物盐适应的决定因子之一<sup>[30]</sup>。本试

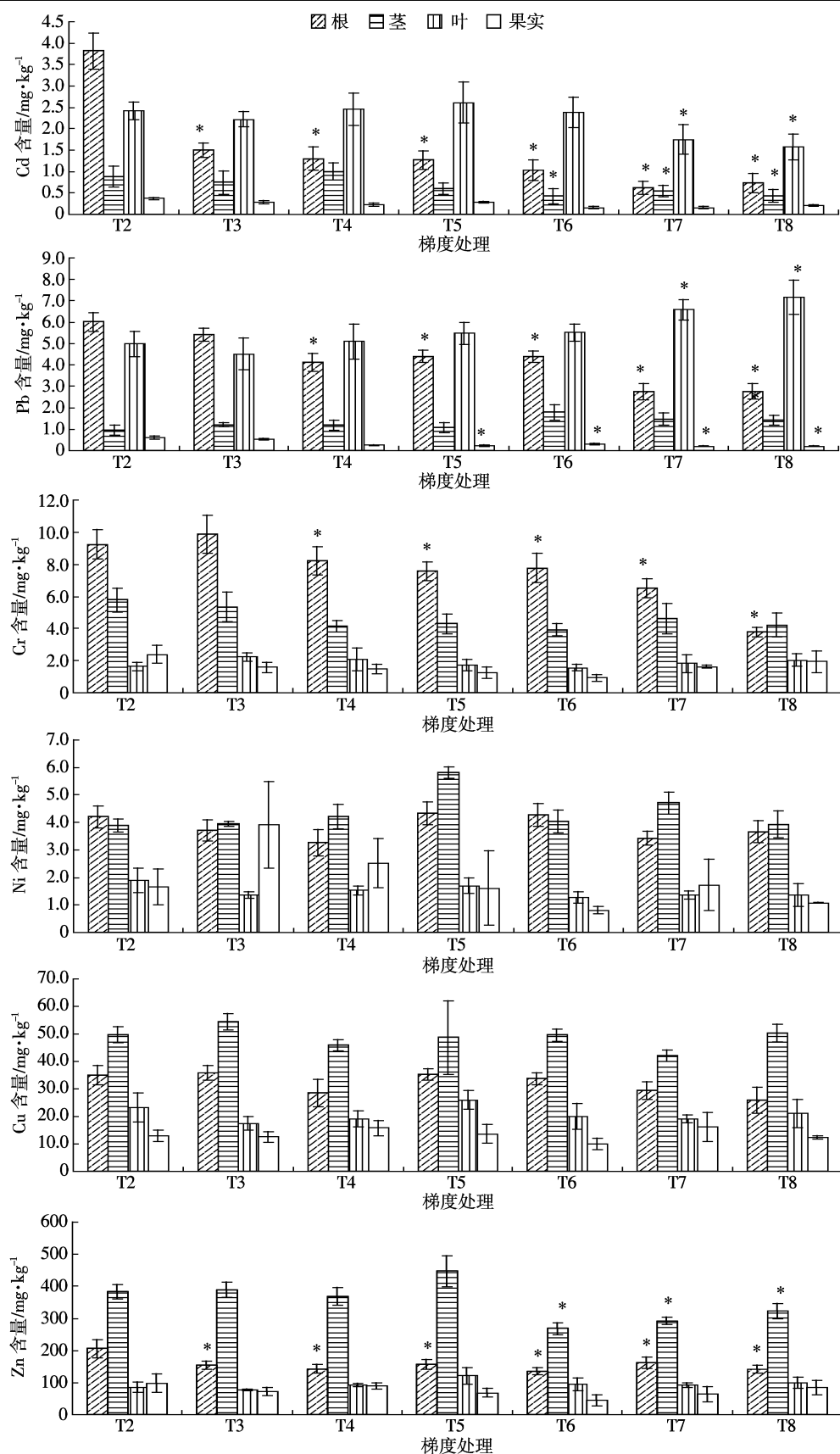


图 2 番茄不同器官重金属含量

Figure 2 Heavy metal contents in different tomato organs

验中番茄根系  $K^+/Na^+$  比值小于 1, 表明土壤  $Na^+$  含量的增加在一定程度上影响了番茄植株的生长, 低盐分含量对植株地上部分抑制作用不明显 ( $K^+/Na^+ > 1$ ), 高盐分含量对植株生长发育影响显著。

### 3.2 盐分胁迫下番茄中重金属离子的分布特征

共存阳离子主要是通过和重金属离子争夺土壤吸附位点使之解离或争夺植物吸附位点从而增加或降低重金属离子被植物吸收的可能性; 共存阴离子对植物吸收重金属离子影响机制较为复杂, 其中最常见的作用机制是络合作用。更有研究表明<sup>[4]</sup>, 盐度是影响重金属从植物根系向茎运输的关键因子。本试验中, 随着盐分含量增加, 番茄根系累积 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量呈上升趋势, 表明土壤中大量存在的盐分离子 ( $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Cl^-$  等) 通过争夺土壤吸附位点和络合作用等增加了土壤中易于被植物吸收的重金属形态, 并最终导致植物根系吸收重金属含量的上升。一般而言, 植物不同器官累积重金属 Cd 和 Pb 的分布规律为根 > 茎 > 叶, 而本研究中, 番茄叶积累两种重金属含量远大于茎, 可能是由于叶片中保证其相对稳定生长的  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  含量较高且稳定存在, 从而增加了 Cd 和 Pb 的累积。番茄根 Cr 含量随着盐分含量增加也增加。目前尚无研究表明其与  $Cl^-$  等阴离子络合强度大小对植物吸收能力的具体影响, 但作为 6 种重金属元素中原子半径最小的一个, 无疑其被各种共存盐分阳离子交换吸附的可能性更大, 这也是植物根系累积 Cr 含量随盐分含量变化的主要原因。表 1 数据显示经淡水淋洗后, 土壤中 Ni 含量没有出现显著下降, 表明其在土壤中的存在以残渣态等较稳定的形态为主, 因而盐分含量变化对番茄不同器官中 Ni 含量影响不大。

## 4 结论

(1) 番茄体内主要盐分毒害离子  $Na^+$  在各个器官的含量随盐分含量增加而上升, 而  $K^+$  和  $Ca^{2+}$  含量随盐分含量变化相对较小。  $Na^+$  优先累积于番茄茎,  $K^+$  和  $Ca^{2+}$  则更多累积于番茄叶。番茄叶保持高浓度  $K^+$  和  $Ca^{2+}$  降低了  $Na^+$  对植物光合作用器官的损害, 以保持机体正常生长。

(2) 盐分离子的大量存在不同程度地影响番茄对土壤中重金属元素的吸收。番茄根 Cd、Pb、Cr、Zn 和 Cu 含量随盐分含量增加而增加, 番茄茎叶 Cd 含量也随盐分含量增加而增加, 番茄茎叶 Pb、Cr、Zn 和 Cu 含量受盐分含量变化影响不明显, 番茄果实各金属含量以及番茄各器官 Ni 含量受盐分含量变化影响不

大。Cd 和 Pb 主要积累在根和叶, 而 Cr、Ni、Cu 和 Zn 则趋向于累积在番茄根和茎。

### 参考文献:

- [1] 国土资源部. 全国土地开发整理规划 (2001—2010)[R]. 2003.  
The national plan for land consolidation and development (2001—2010)[R]. 2003.
- [2] The Ministry of Land and Resources. Williams T P, Bubbs J M, Lester J M. Metal accumulation within salt marsh environment: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28(5): 277—290.
- [3] Du Laing G, De Vos R, Vandecasteele B, et al. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary[J]. *Coastal and Shelf Science*, 2008, 77: 589—602.
- [4] Fitzgerald E J, Caffrey J M, Nasaratnam S T, et al. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 123: 67—74.
- [5] 刘平, 徐明岗, 宋正国. 伴随阴离子对土壤中铅和镉吸附-解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 252—256.  
LIU Ping, XU Ming-gang, SONG Zheng-guo. Effects of accompanying anions on adsorption-desorption of Pb and Cd by two typical soils of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 252—256.
- [6] 徐明岗, 李菊梅, 陈世宝. 共存阳离子对土壤吸附  $Cu^{2+}$  的影响特征[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 935—938.  
XU Ming-gang, LI Ju-mei, CHEN Shi-bao. Adsorption of  $Cu^{2+}$  by soils under different co-existing cations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 935—938.
- [7] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1998: 752—769.  
YU Shu-wen, TANG Zhang-cheng. Plant physiology and molecular biology[M] (2nd Edition). Beijing: Science Press, 1998: 752—769.
- [8] 管志勇, 陈发棣, 陈素梅, 等. NaCl 胁迫对 2 个菊属野生种幼苗体内  $K^+$ 、 $Na^+$  和  $Cl^-$  分布及生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3198—3205.  
GUAN Zhi-yong, CHEN Fa-di, CHEN Su-mei, et al. Effects of NaCl stress on organ compartmental allocation of  $K^+$ ,  $Na^+$  and  $Cl^-$  and growth of two *Dendranthema* species seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3198—3205.
- [9] Li Q S, Liu Y N, Du Y F, et al. The behavior of heavy metals in tidal flat sediment during the fresh water leaching[J]. *Chemosphere*, 2011, 82: 834—838.
- [10] 刘亚男, 李取生, 杜焱烽, 等. 滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 231—235.  
LIU Ya-nan, LI Qu-sheng, DU Ye-feng, et al. Salinity change and its impact on heavy metals during beach soil leaching and desalination[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 231—235.
- [11] 国家环保总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.  
Chinese Environmental Agency. HJ/T 166—2004 Technical Specifications of Soil Environmental Monitoring[S]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2004.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社,

- 1999.
- LU Ru-kun. Soil agriculture and chemical analyzing methods[M]. Beijing: Chinese Agriculture and Technology Press, 1999.
- [13] 杨祖英, 马永健, 常凤启. 食品检验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 222-262.
- YANG Zu-ying, MA Yong-jian, CHANG Feng-qi. Food inspection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 222-262.
- [14] 饶立华, 薛建明, 蒋德安, 等. 钾营养对番茄光合作用和产量形成的效应[J]. 浙江农业大学学报, 1989, 15(4): 341-348.
- RAO Li-hua, XUE Jian-ming, JIANG De-an, et al. Effect of potassium on photosynthesis and yield formation of tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Acta Agriculture University Zhejiangensis*, 1989, 15(4): 341-348.
- [15] Trudel M J, Ozbun J L. Influence of potassium on carotenoid content of tomato fruit[J]. *J Amer Soc Hort Sci*, 1971, 96: 763-765.
- [16] Maathuis F J M, Amtmann A. K<sup>+</sup> nutrition and Na<sup>+</sup> toxicity: The basis of cellular K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratios[J]. *Annals of Botany*, 1999, 84: 123-133.
- [17] Ding L, Zhu J K. Reduced Na<sup>+</sup> uptake in the NaCl hypersensitive sos-mutant of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Physiology*, 1997, 113: 795-799.
- [18] 刘友良, 汪良驹. 植物对盐胁迫的反应和耐盐性: 植物生理与分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 752-767.
- LIU You-liang, WANG Liang-ju. Plants' reaction under salt stress and salt tolerance: Plant physiology and molecular biology[M]. Beijing: Science Press, 1999: 752-767.
- [19] 张玉鑫, 刘芳, 康恩祥, 等. NaCl胁迫下甜瓜幼苗离子吸收特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 533-539.
- ZHANG Yu-xin, LIU Fang, KANG En-xiang, et al. Study on ion absorption of muskmelon seedlings on NaCl stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 533-539.
- [20] Lin H X, Zhu M Z, Yan M. QTLs for Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> uptake of the shoots and roots controlling rice salt tolerance[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2004, 108: 253-260.
- [21] Fritioff A, Kautsky L, Greger M. Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133: 265-274.
- [22] Ekvall L, Greger M. Effects of environmental biomass-producing factors on Cd uptake in two Swedish ecotypes of *Pinus sylvestris*[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 121: 401-411.
- [23] 王素平, 郭世荣, 胡晓辉. NaCl胁迫对黄瓜幼苗体内 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>分布的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 348-354.
- WANG Su-ping, GUO Shi-rong, HU Xiao-hui. Effects of NaCl stress on K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> allocation in different organs of cucum seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(3): 348-354.
- [24] 王学征, 李秋红, 吴凤芝. NaCl胁迫下栽培型番茄 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>吸收、分配和转运特性[J]. 中国农业科学, 2010, 43(7): 1423-1432.
- WANG Xue-zheng, LI Qiu-hong, WU Feng-zhi. Study on the characteristics of absorption, distribution and selective transport of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> in tomato plants under salt stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(7): 1423-1432.
- [25] 叶武威, 庞念厂, 王俊娟, 等. 盐胁迫下棉花体内 Na<sup>+</sup>的积累、分配及耐盐机制的研究[J]. 棉花学报, 2006, 18(5): 279-283.
- YE Wu-wei, PANG Nian-chang, WANG Jun-juan, et al. Characteristics of absorbing, accumulation and distribution of Na<sup>+</sup> under the salinity stress in cotton[J]. *Cotton Science*, 2006, 18(5): 279-283.
- [26] 陈德明, 俞仁培. 盐胁迫下不同小麦品种的耐盐性及其离子特征[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 88-94.
- CHEN De-ming, YU Ren-pei. Salt-resistant and ionic characteristic three wheat varieties under salt stress[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 88-94.
- [27] Cramer G R, Lynch J, Lauchli A, et al. Influx of Na, K and Ca into roots of salt-stressed cotton seedlings. Effects of supplemental Ca[J]. *Plant Physiology*, 1987, 83: 510-516.
- [28] Mansfield T A, Hetherington A M, Atkinson C J. Some aspects of stomatal physiology[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1990, 41: 55-75.
- [29] Rengel Z. The role of calcium in salt toxicity[J]. *Plant Cell & Environment*, 1992, 15: 625-632.
- [30] 刘友良, 毛才良, 汪良驹. 植物耐盐性研究进展 [J]. 植物生理学通讯, 1987, 4: 1-7.
- LIU You-liang, MAO Cai-liang, WANG Liang-ju. Recent progress in studies on salinity tolerance in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1987, 4: 1-7.