

## 外源添加 IAA 对铝胁迫下黑大豆根系生长的影响

王 平, 陈 奇, 陈东杰, 王闻闻, 宋 倩, 陈丽梅, 李昆志

(昆明理工大学 生物工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 铝对植物的毒害作用主要表现在抑制根系的生长和发育上。为了考察生长素(IAA)对铝毒的缓解效应,以铝耐受型黑大豆(简称 RB)和铝敏感型黑大豆(简称 SB)为材料,研究了铝胁迫下外源添加 IAA 对 RB 和 SB 根系生长的影响。结果表明:外源添加 IAA 可以明显缓解铝胁迫对 RB 和 SB 主根生长的抑制作用,并且能显著促进侧根的发 育以及生物量的增加。RB 在铝胁迫下外源添加不同浓度(0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) IAA 后,主根长、侧根数目和长度、根冠比和鲜重与仅有铝胁迫处理相比随着 IAA 浓度的升高而升高。其中,在铝胁迫下外源添加 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 对 RB 的主根长、单位主根上的侧根数、侧根长、根冠比和鲜重促进效果最佳,与仅有铝胁迫处理相比分别增加了 26.72%、110.69%、12.89%、58.76% 和 51.94%。与 RB 相似,SB 在铝胁迫下外源添加不同浓度(0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) IAA 处理后,其主根长、侧根数和侧根长、根冠比和总鲜重与仅有铝胁迫处理相比也得到有效的增加。在铝处理液中添加 25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 对 SB 主根长、单位主根上侧根数目、侧根长、根冠比和鲜重的促进效果最佳,与仅有铝胁迫处理相比分别增加了 41.02%、63.26%、16.01%、45.41% 和 39.43%。结果说明,外源添加 IAA 可以有效缓解铝对植物的毒害作用。

**关键词:** 黑大豆;铝胁迫;IAA;根系生长

**中图分类号:** S565.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-9841(2013)05-0650-05

## Effect of Exogenous IAA on Root Growth of Black Soybean under Aluminum Stress

WANG Ping, CHEN Qi, CHEN Dong-jie, WANG Wen-wen, SONG Qian, CHEN Li-mei, LI Kun-zhi

(Biotechnology Research Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The inhibition of root growth and development is the main toxic performance of aluminum (Al) on plant growth. To gain insight into the alleviative effects of auxin (IAA) on Al toxicity, the Al-resistant (RB) and Al-sensitive (SB) black soybeans were used as the materials to investigate the effect of exogenous IAA on root growth under Al stress conditions. The results showed that exogenous application of IAA could not only alleviate the Al-induced inhibition of primary root growth, but also promote the lateral root development and increase the biomass in both RB and SB. After application different concentrations of IAA (0.5, 1, 25 and 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) in 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Al treatment solution, primary root length, lateral root number and length, root/shoot ratio and fresh weight of RB were increased in a concentration-dependent manner, compared with Al treatment. Adding 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA in the Al treatment solution had the best promotion effect on primary root length, lateral root density and length, root/shoot ratio and fresh weight of RB, and increased approximately 26.72%, 110.69%, 12.89%, 58.76% and 51.94%, respectively, compared with Al treatment. Similarly, exogenous application of 0.5, 1, 25 and 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA in Al treatment solution, primary root length, lateral root density and length, root/shoot ratio and fresh weight of SB were also increased to some extent. Whereas, exogenous applying 25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA in 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Al treatment solution had the best promotion effect on SB primary root length, lateral root density and length, root/shoot ratio and fresh weight, and increased approximately 41.02%, 63.26%, 16.01%, 28.87% and 39.43%, respectively, compared with only Al treatment. Results suggested that exogenous applying IAA could efficiently alleviate Al toxicity to plant.

**Key words:** Black soybean; Aluminum stress; IAA; Root growth

生长素(indole-3-acetic acid, IAA)是人类最早发现的一类植物激素,不仅在植物的正常生长中起重要作用,而且还参与调节多种胁迫下植物根系的生长和发育。如在盐胁迫下,IAA 调控了拟南芥初生根和侧根的生长与发育<sup>[1]</sup>。在低磷胁迫下,拟南芥根中的 IAA 含量显著性增加,进而促进了侧根的

大量形成以及根毛的伸长生长,使根系生物量接近土壤表面使其能有效地吸收营养物质。且在低磷胁迫下,IAA 运输抑制剂 TIBA 和 NPA 会分别抑制主根或侧根的形成<sup>[2]</sup>。

铝是地壳中含量最丰富的金属元素,约占地壳总矿质元素的 7%。土壤中的铝一般以不溶性的磷

收稿日期:2013-04-06

基金项目:国家自然科学基金(31260297,31360340);云南省人才培养项目(KKSY201326062)。

第一作者简介:王平(1987-),女,硕士,主要从事植物营养基因工程方面的研究。E-mail:way2454@163.com。

通讯作者:李昆志(1963-),男,教授,主要从事植物生理学方面的研究。E-mail:likunzhikm@yahoo.com.cn。

酸盐、硫酸盐、硅酸盐和氧化物等形式存在,对植物的生长发育毒性较小<sup>[3]</sup>。然而,在酸性土壤中( $\text{pH} < 5$ ),铝从难溶物中释放出来,形成对植物生长和发育具有毒害作用的铝离子( $\text{Al}^{3+}$ )<sup>[4]</sup>。铝首先抑制植物根系的生长和发育,影响侧根和根毛的生长,最终降低植物根系对水分和养分的吸收。鉴于 IAA 参与植物对多种胁迫的应答,推测其可能参与调控铝胁迫下植物根系的生长和发育。因此,以耐铝型黑大豆和铝敏感型黑大豆<sup>[5]</sup>为材料,分析铝胁迫下外源添加 IAA 对 2 种黑大豆主根长、侧根数、侧根长、根冠比和总生物量的影响,以期通过外源施加 IAA 增强植物的抗铝能力提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试耐铝型黑大豆(丹波黑大豆,简称为 RB)为日本引进品种,铝敏感型黑大豆(云南小黑豆,简称为 SB)为云南本地栽培品种<sup>[6]</sup>。用 5% 的次氯酸钠对黑大豆种子进行消毒,用无菌水冲洗干净后将种子放入含有滤纸的培养皿中,培养皿中加入 20 mL 无菌水,25℃ 暗培养催芽。种子露白发芽后挑选生长一致的幼苗置于有网眼的泡沫板上,在含有完全营养液<sup>[7]</sup>的塑料盆(5 L)中于温室(昼/夜温度为 30℃/25℃,光照时间为 12 h·d<sup>-1</sup>,光照强度为 1 200 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)条件下进行通气培养,营养液每天更换。

### 1.2 试验设计

选取长势一致且未出现侧根的 RB 和 SB 幼苗用完全营养液<sup>[7]</sup>(pH4.2)预处理 12 h。将预处理后的 RB 和 SB 置于 0 (CK)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 IAA 0.5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al + IAA 0.5)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 IAA 1  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al + IAA 1)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 IAA 25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al + IAA 25)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 IAA 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al + IAA 50)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 IAA 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  以及 TIBA(三碘苯甲酸)10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al + IAA 50 + TIBA 10)、 $\text{AlCl}_3$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 TIBA 10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Al + TIBA 10),共 8 个处理组,用锡箔纸将管子包住以避免光照对根系生长的影响,在温室(昼/夜温度为 30℃/25℃,光照时间为 12 h·d<sup>-1</sup>,光照强度为 1 200 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)处理 8 d,营养液每 2 d 更换 1 次,每个处理设置 6~12 个重复。对第 8 天黑大豆的主根长、侧根数、侧根长和鲜重进行测量和计算。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 主根长 用直尺测量植株的主根长。测量前用油性记号笔于根基部位进行标记,作为测量的基点。在处理前后小心用直尺测量从标记点到根尖顶端的距离。

1.3.2 侧根数目 分别取不同条件下处理的黑大豆幼苗,冲洗干净,计数侧根数目(仅包含长度大于 1 mm 的侧根),求其平均数。

1.3.3 侧根长 分别取不同条件处理 8 d 的黑大豆幼苗,将幼苗侧根自根结处剪下,冲洗干净,自然拉直,测定每条侧根根长,统计每株植株中 10 个最长根长的总和为侧根长。

1.3.4 根冠比 用蒸馏水将幼苗冲洗干净,吸水纸吸干表面水分,将地上部分和地下部分分开,分别测定地上部分(茎和叶)和地下部分(根系)的鲜重。计算根冠比(R/T),每次取 3 个重复。根冠比计算公式:(R/T) = 地上鲜重/地下鲜重。

### 1.4 数据分析

所有的生理生化指标分析设置 6~12 次重复,用 *t* 检验检测统计显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 铝胁迫下 IAA 对黑大豆主根长的影响

如图 1 所示,在铝胁迫下,RB 和 SB 主根长与对照相比分别被抑制了 19.69% 和 20.80%。外源添加 IAA 输出抑制剂 TIBA (Al + TIBA10)后,铝对 RB 和 SB 的主根长抑制效果更为明显,分别为对照的 80.30% 和 77.55%。然而,Al + IAA50 + TIBA10 处理对 RB 和 SB 主根生长的抑制作用更为明显。这可能是由于铝胁迫下 TIBA 的施加导致了 IAA 在 RB 和 SB 根中的输出过程发生了抑制,外源施加 IAA 使其在根系的过量积累而加剧铝对 RB 和 SB 主根生长的抑制效果。在铝胁迫下外源添加(0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) IAA 后,RB 主根长与仅有铝处理相比分别增加了 11.48%、20.11%、21.21% 和 26.72%。而 SB 分别增加了 31.85%、37.05%、41.02% 和 14.75% (图 1)。由此可见,IAA 参与到黑大豆响应铝毒胁迫的过程中,且在 IAA 运输不受影响的情况下,外源添加 IAA 可以有效缓解铝对黑大豆主根生长的抑制作用。

### 2.2 铝胁迫下 IAA 对黑大豆侧根数目的影响

为了进一步分析铝胁迫下 IAA 对黑大豆根系生长的影响,检测了 RB 和 SB 侧根数目以及单位主根上侧根的数目。结果表明,铝胁迫下 RB 和 SB 侧根数目与对照相比(CK)分别被抑制了 8.68% 和 17.55% (图 2A)。与之相似,RB 和 SB 单位主根上

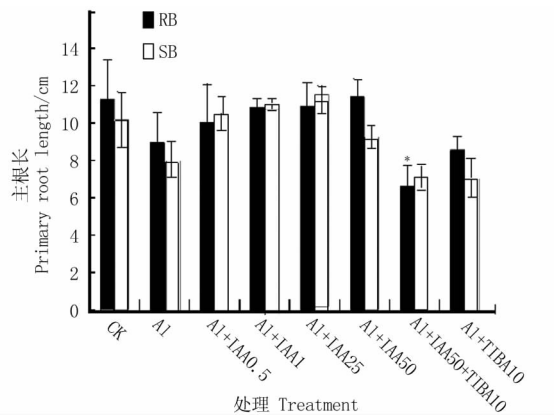
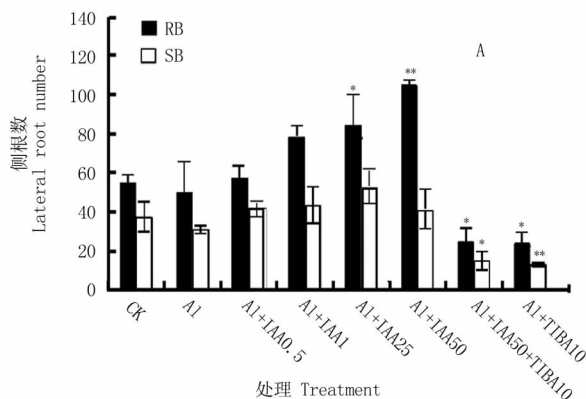


图1 铝胁迫下 IAA 对 RB 和 SB 主根长的影响

Fig.1 Effect of IAA on primary root length of RB and SB under Al stress

的侧根数目与对照相比 (CK) 也分别被铝抑制了 14.66% 和 20.87% (图 2B)。在铝胁迫下外源添加 TIBA (Al + TIBA10) 后, 与对照相比 RB 和 SB 侧根数目分别被抑制了 56.16% 和 65.43% (图 2A), 单



位主根上侧根数目也分别被抑制了 49.9% 和 48.94% (图 2B)。铝胁迫下经 TIBA 处理后外源添加 IAA 也并没有恢复铝胁迫对黑大豆侧根数目的抑制作用。然而, RB 在铝胁迫下经外源添加 (0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) IAA 后, 其侧根数目与仅有铝处理相比也分别增加了 12.67%、56.67%、68.0% 和 109.33% (图 2A), 其单位主根上侧根数目与仅有铝处理相比分别增加了 19.33%、60.88%、69.79% 和 110.69% (图 2B)。而 SB 在铝胁迫下外源添加 0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  IAA 后其单位主根上侧根数目与仅有铝处理的相比分别增加了 34.43%、40.42%、63.26% 和 47.27%, 其侧根数目分别增加了 35.48%、40.65%、69.68% 和 32.26%。说明铝胁迫明显抑制了 RB 和 SB 侧根的形成, 而外源添加 IAA 可以有效缓解这种抑制作用, 这可能是由于 IAA 促进了侧根原基萌发从而使侧根的数量增加。

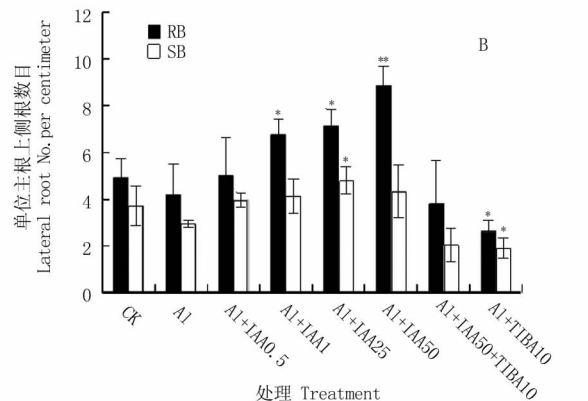


图2 铝胁迫下 IAA 对 RB 和 SB 总侧根数(A)和单位主根上侧根数(B)的影响

Fig.2 Effect of IAA on lateral root number(A) and lateral root density(B) of RB and SB under Al stress

### 2.3 铝胁迫下 IAA 对黑大豆侧根长的影响

侧根的长度也是衡量植物抗逆境胁迫的一个重要指标。铝胁迫下, RB 和 SB 侧根长与对照相比分别被抑制了 18.45% 和 24.62% (图 3)。在铝胁迫下外源添加 TIBA (Al + TIBA10) 后, 铝对 RB 和 SB 侧根生长的抑制率分别为对照的 56.61% 和 71.71%。然而, 与主根的生长情况相似的是, 由于 TIBA 可能破坏了 IAA 在根中的运输, 在 Al + IAA50 + TIBA10 处理也没有增加 RB 和 SB 侧根的生长。与仅有铝处理的相比, 在铝处理液中外源添加 0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  IAA 处理后, RB 侧根长分别增加了 1.31%、0.69%、4.78% 和 12.89%。而 SB 分别增加了 7.04%、9.18% 和 16.01%。然而, 铝胁迫下当外源 IAA 浓度升高到 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, SB 侧根的伸长受到了抑制作用, 其抑制率为 5.76%。这可能是由于 RB 和 SB 根对 IAA 的敏感程度不同造成的。由此可见, 外源添加 IAA 可以明显缓解铝对黑大豆侧根生长的抑制作用。

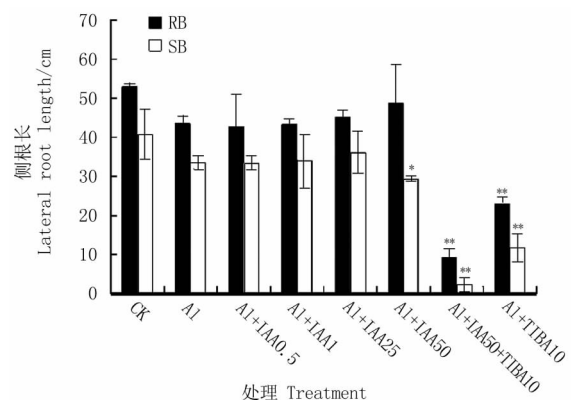


图3 铝胁迫下 IAA 对 RB 和 SB 侧根长的影响

Fig.3 Effect of IAA on lateral root length of RB and SB under Al stress

### 2.4 铝胁迫下 IAA 对黑大豆根冠比的影响

根冠比大小直接反映了植物根系的发达程度。由图 4 可知, 铝胁迫下 RB 和 SB 根冠比与对照相比 (CK) 分别被抑制了 5.02% 和 13.01%, 且在铝胁迫

下外源添加 TIBA 后,对 RB 和 SB 根冠比的抑制作用更为明显,其抑制率分别为对照的 29.95% 和 28.57%。Al + IAA50 + TIBA10 处理并没有提高铝胁迫对黑大豆根冠比的抑制作用。然而,在铝处理液中外源添加 IAA, RB 和 SB 的根冠比均得到有效的提高。其中,铝胁迫下外源添加 0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 后, RB 根冠比分别比仅有铝胁迫的处理增加了 31.04%、42.15%、44.21% 和 58.76%; 而 SB 分别增加了 13.77%、14.86%、45.41% 和 33.23%。说明在铝胁迫下外源添加不同浓度 IAA 可以提高黑大豆幼苗根系的生长与发育,从而提高黑大豆在铝毒胁迫下对水分和养分的吸收。

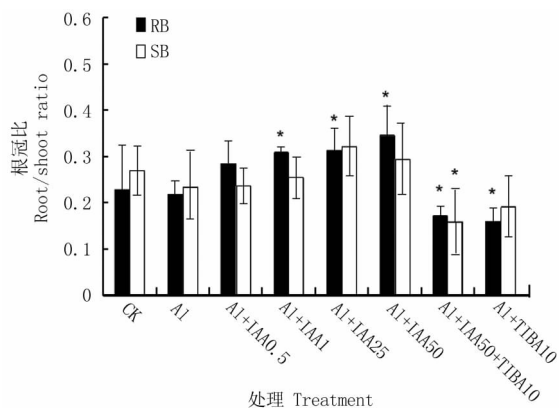


图4 铝胁迫下 IAA 对 RB 和 SB 根冠比的影响

Fig. 4 Effect of IAA on root/shoot ratio of RB and SB under Al stress

## 2.5 铝胁迫下 IAA 对黑大豆鲜重的影响

根系良好的发育情况直接影响了植物的生长,而植物的总鲜重是衡量植物生长和生物量的重要生理指标。如图 5 所示,铝胁迫下 RB 和 SB 的生物量明显受到抑制。与对照(CK)相比, RB 和 SB 的鲜重分别被抑制了 21.54% 和 24.01%。在铝胁迫下外源添加 TIBA 后, RB 和 SB 鲜重与对照(CK)相比分别被抑制了 23.5% 和 25.04%。Al + IAA50 +

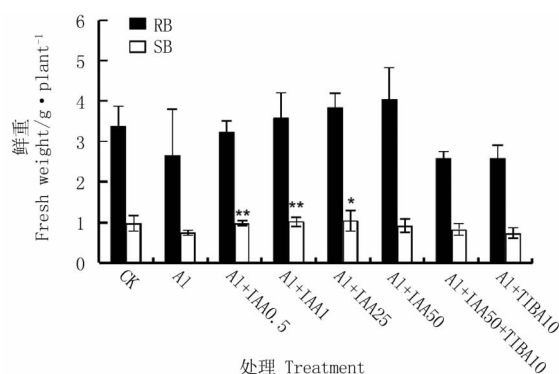


图5 铝胁迫下 IAA 对 RB 和 SB 总鲜重的影响

Fig. 5 Effect of IAA on fresh weight of RB and SB under Al stress

TIBA10 处理下 2 种黑大豆的鲜重也没有显著性的增加。然而,在铝处理液中添加 0.5, 1, 25 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 后, RB 和 SB 总鲜重与铝处理相比显著提高,其中 RB 的总鲜重分别提高了 21.99%、34.66%、44.73% 和 51.94%, 而 SB 的分别提高了 31.87%、35.9%、39.43% 和 23.48%。这进一步说明外源添加 IAA 可以有效缓解铝对植物生长的抑制作用。

## 3 讨论

根系是植物的重要营养器官,侧根是植物成熟根系的重要组成部分。根系为植物体的正常生长提供所需的水分和矿质营养的同时,也对植物体起到支撑作用。因此,根系良好的发育情况直接影响着植物的生长和产量。植物根系的发育除了受遗传因素控制外,与外界环境的变化也密切相关<sup>[2,8]</sup>。如在拟南芥中,低磷胁迫下发育较成熟的侧根原基占总数的比例明显大于高磷处理<sup>[2]</sup>。在酸性土壤下,铝对植物的毒害作用也首要表现为抑制根系的发育上。如 Ishikawa 等<sup>[9]</sup>的研究表明,铝毒胁迫下植物主根生长受到严重抑制,且根尖和侧根粗短而脆。Delhaize 等<sup>[10]</sup>认为较严重的铝毒会导致植物根系坏死。在本研究中,完全营养液中添加 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  铝胁迫 8 d 后, RB 和 SB 主根的生长受到了明显的抑制,且单位主根上的侧根数目和长度也明显降低。根冠比和植物的总鲜重是衡量植物生长状况的重要指标。铝胁迫下, RB 和 SB 的根冠比分别被抑制 5.02% 和 13.01% 的同时,总鲜重也分别被抑制了 21.54% 和 24.01%。由此可见,铝胁迫对 RB 和 SB 根系的生长与发育的抑制作用,最终表现为对植株生长的抑制。

IAA(吲哚乙酸)是最早发现的一类天然植物激素,它不仅可以影响植物生长发育、促进器官及组织分化,还在不定根和侧根的形成和生长过程中起重要作用<sup>[11]</sup>。近年来,生长素与植物响应逆境胁迫关系的研究越来越受重视。如在 Zn、Cd 和 Pb 等重金属胁迫下, IAA 能明显促进植物主根和侧根伸长,增加植株高度和地上部分生物量,这明显缓解了重金属胁迫对植物的毒害作用<sup>[12]</sup>。Ouzounidou 和 Ilias<sup>[13]</sup>对向日葵的研究证明, 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 可以显著缓解 80  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Cu}^{2+}$  对其根生长的抑制作用。本研究中,在铝胁迫下外源添加 IAA 运输抑制剂 TIBA 后, RB 和 SB 主根、侧根、根冠比和鲜重也受到了更为明显的抑制,说明 IAA 参与到 RB 和 SB 抵抗铝毒胁迫中。当铝处理液中外源添加不同浓度的 IAA 后,铝对主根、侧根、根冠比和鲜重的抑制

作用得到了明显的改善。其中在  $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  铝处理液中添加  $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 对 RB 的生长状况最优,而添加  $25\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  IAA 对 SB 的生长状况最优。这可能是由于二者对 IAA 的敏感程度不同造成的。

## 参考文献

- [1] Zolla G, Heimer Y M, Barak S. Mild salinity stimulates a stress-induced morphogenic response in *Arabidopsis thaliana* roots [J]. Journal Experimental Botany, 2010, 61: 211-224.
  - [2] López-Bucio J, Hernández-Abreu E, Sánchez-Calderón L, et al. Auxin transport independent pathway is involved in phosphate stress-induced root architectural alterations in *Arabidopsis*. Identification of BIG as a mediator of auxin in pericycle cell activation [J]. Plant Physiology, 2005, 137: 681-691.
  - [3] Chen Q, Wu K H, Zhang Y N, et al. Physiological and molecular responses of broad bean (*Vicia faba* L.) to aluminum stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34: 2251-2263.
  - [4] MacDonald T, Martin R B. Aluminum ion in biological systems [J]. Trends in Biological Science, 1998, 13: 15-19.
  - [5] 武孔焕, 陈奇, 李昆志, 等. 铝胁迫对黑大豆膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响 [J]. 西北植物学报, 2012, 32 (3): 511-517. (Wu K H, Chen Q, Li K Z, et al. Effects of aluminum stress on membrane lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in black soybean [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32 (3): 511-517.)
  - [6] 钱绍方, 陈丽梅, 陈宣钦, 等. 酸性土壤胁迫下丹波黑大豆和云南小黑豆生理特性研究 [J]. 大豆科学, 2011, 30 (6): 941-945. (Qian S F, Chen L M, Chen X Q, et al. Physiological properties of soybean (*Glycine max*) Tamba and Yunnanxiaohaidou under acid soil stress [J]. Soybean Science, 2011, 30 (6): 941-945.)
  - [7] Lipton D S, Blanchar R W, Blevins D G. Citrate, malate, and succinate concentration in exudates from P-sufficient and P-stressed *Medicago sativa* L. seedlings [J]. Plant Physiology, 1987, 85: 315-317.
  - [8] Malamy J E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture [J]. Plant Cell & Environment, 2005, 28: 67-77.
  - [9] Ishikawa S, Wagatsuma T, Ikarashi T. Comparative toxicity of  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ , and  $\text{La}^{3+}$  to root-tip cells differing in tolerance to high  $\text{Al}^{3+}$  in terms of ionic potentials of dehydrated trivalent cations [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1996, 42: 613-625.
  - [10] Delhaize E, Ryan P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants [J]. Plant Physiology, 1995, 107: 315-321.
  - [11] 杨野, 王巧兰, 耿明建, 等. 生长素对铝胁迫下不同耐铝性小麦根苹果酸分泌的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, 43 (10): 2016-2022. (Yang Y, Wang Q L, Geng M J, et al. Effect of indole-3-acetic acid on aluminum-induced efflux of malic acid from wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Acta Agricultura Sinica, 2010, 43 (10): 2016-2022.)
  - [12] 周建民, 党志, 陈能场, 等. 3-吡啶乙酸协同螯合剂强化植物提取重金属的研究 [J]. 环境科学, 2007, 28 (9): 2085-2088. (Zhou J M, Dang Z, Chen N C, et al. Enhanced phytoextraction of heavy metal contaminated soil by chelating agents and Auxin Indole-3-Acetic acid [J]. Environmental Science, 2007, 28 (9): 2085-2088.)
  - [13] Ouzounidou G, Ilias I. Hormone-induced protection of sunflower photosynthetic apparatus against copper toxicity [J]. Biologia Plantarum, 2005, 49: 223-228.
- 
- (上接第 649 页)
- [8] 张风琴, 王友绍, 董俊德, 等. 重金属污水对木槿幼苗几种保护酶及膜脂质过氧化作用的影响 [J]. 热带海洋学报, 2006, 25 (2): 66-70. (Zhang F Q, Wang Y S, Dong J D, et al. Effects of wastewater borne heavy metals on some protective enzymes and lipid peroxidation of *Bruguiera gymnorhiza* seedling [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25 (2): 66-70.)
  - [9] 孙继颖, 高聚林, 薛春雷, 等. 不同品种大豆抗旱性能比较研究 [J]. 华北农学报, 2007, 22 (6): 91-97. (Sun J Y, Gao J L, Xue C L, et al. Comparative study on drought resistant characters of different soybean [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22 (6): 91-97.)
  - [10] 赵宏伟, 李秋祝, 魏永霞. 不同生育时期干旱对大豆主要生理参数及产量的影响 [J]. 大豆科学, 2006, 25 (3): 329-332. (Zhao H W, Li Q Z, Wei Y X. Effect of drought at different growth stages on main physiological parameters and yield in soybean [J]. Soybean Science, 2006, 25 (3): 329-332.)
  - [11] Mclord J M. Superoxide dismutase: An enzymic function for erythrocyte (hemocuprein) [J]. Biological Chemistry, 1969, 224: 6049-6055.
  - [12] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31 (5): 1303-1311. (Zhang R H, Zheng Y J, Ma G S, et al. Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (5): 1303-1311.)
  - [13] 吴建华, 张汝民, 高岩. 干旱胁迫对冷蒿保护酶活性及膜脂质过氧化作用的影响 [J]. 浙江林学院学报, 2010, 27 (3): 329-333. (Wu J H, Zhang R M, Gao Y. Membrane lipid peroxidation and protective enzyme systems with drought stressed *Artemisia frigida* leaves [J]. Journal of Zhejiang Forestry University, 2010, 27 (3): 329-333.)
  - [14] 邓胜兴, 曾明, 熊伟, 等. 干旱胁迫对柑橘叶片保护酶系统的影响 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2009, 31 (2): 61-64. (Deng S X, Zeng M, Xiong W, et al. Effects of drought stress on the antioxidative enzyme system in Citrus leaves [J]. Journal of Southwestern University (Natural Science), 2009, 31 (2): 61-64.)