

李欣欣, 廖红, 赵静. GA₃、ABA 和 6-BA 对大豆根系生长的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 35-40.

GA₃、ABA 和 6-BA 对大豆根系生长的影响

李欣欣, 廖红, 赵静

(亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室/华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研究不同浓度赤霉素(GA₃)、脱落酸(ABA)和细胞分裂素(6-BA)对大豆根系生长的影响,为进一步利用激素调控大豆根系构型提供理论依据。【方法】以大豆品种“HN89”为材料,分别用浓度为0.05、0.50、1.00和5.00 μmol·L⁻¹的GA₃、ABA和6-BA处理大豆幼苗4 d,利用根系分析软件定量分析根系形态参数的变化。【结果和结论】0.05 μmol·L⁻¹ GA₃处理可使大豆总根长增加,但随着处理浓度的增加,主根、侧根生长和总根长会受到抑制,GA₃处理显著降低了根系平均直径,根变得纤细;0.05 μmol·L⁻¹ ABA处理不影响大豆根系生长,当ABA处理浓度大于0.5 μmol·L⁻¹后,显著抑制了主根生长和侧根数,从而降低了根系总根长,但对根平均直径影响较小;4种浓度的6-BA处理均显著抑制大豆根系生长发育,主根长、侧根数和总根长都显著降低,但提高了根平均直径,根变粗。研究结果说明,不同激素类物质及同一激素的不同浓度对大豆根系的主根、侧根生长有着不同的调控模式。

关键词:大豆; GA₃; ABA; 6-BA; 根系; 生长发育
中图分类号:S565.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2014)03-0035-06

Effects of GA₃, ABA and 6-BA on soybean, *Glycine max* L. Merrill, root growth and development

LI Xinxin, LIAO Hong, ZHAO Jing

(State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources/
College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】This experiment was conducted to explore effects of different concentrations of GA₃, ABA, and 6-BA on soybean root growth, which could provide a theoretical basis for a further control of soybean root architecture through phytohormone. 【Method】The seedlings of soybean cultivar “HN89” were treated with 0.05, 0.50, 1.00, and 5.00 μmol·L⁻¹ gibberellin (GA₃), abscisic acid (ABA) and cytokinin (6-BA) respectively for 4 days, then root morphological parameters were quantified and analyzed. 【Result and conclusion】The results showed that 0.05 μmol·L⁻¹ GA₃ promoted the total root length of soybeans, but increasing GA₃ concentration would constrain primary root and lateral root growth, which decreased the total root length. GA₃ decreased average root diameters, hence resulting in fine roots. 0.05 μmol·L⁻¹ ABA did not affect the soybean root growth, while increasing ABA concentration higher than 0.5 μmol·L⁻¹ inhibited primary root and lateral root growth, decreasing the total root length, and slightly increasing average root diameters. 6-BA significantly constrained the soybean root growth and development, for instance, it inhibited primary root elongation, lateral rooting, and the total root length, but it promoted average root diameter, resulting in thick roots. These results indicated

that different phytohormones or similar phytohormone with different concentrations can control soybean root architecture by controlling primary roots and lateral roots growth in different ways.

Key words: soybean; GA₃; ABA; 6-BA; roots; growth and development

根系是植物的固着器官,在吸收土壤水分和养分、合成和贮藏营养物质等方面起着重要的作用,同时它可以感知外界各种刺激从而调控植物的生长发育^[1].根系生长发育受到诸多内外因素的影响,而激素的调控作用是其中的重要部分.在传统的五大类植物激素中,赤霉素(GA₃)、脱落酸(ABA)和细胞分裂素(6-BA)对根系的生长发育具有重要作用.

GA₃调控主根发育.拟南芥 GA₃ 缺失突变体 *gal-3* 主根变短,外施 GA₃ 处理时,能使突变体主根长恢复到野生型的状态^[2].GA₃ 能够调控拟南芥根系分生区长短. Ubeda - Tomás 等^[3]通过 GA₃ 合成抑制剂及遗传手段研究发现,利用多效唑抑制野生型拟南芥内源 GA₃ 生物合成,导致根系分生区缩短. 0.2 mg · L⁻¹ 的 GA₃ 是棉花幼苗发育的最适浓度,促进了棉花的主根伸长生长,并增加了侧根数^[4].GA₃ 能促进植物不定根生长.研究表明适当浓度的 GA₃ 处理促进了甘蔗试管苗根原基的形成和伸长,增加了根长和根数量,从而显著提高了试管苗的生根率和存活率^[5].

外源 ABA 会抑制拟南芥侧根发育.拟南芥在含有外源 ABA 的培养基培养 9 d 后没有形成侧根,ABA 抑制侧根发育不依赖于生长素的调控途径^[6].Chen 等^[7]发现外施 10 μmol · L⁻¹ ABA 导致水稻种子根膨胀、根毛形成和侧根原基突起进而调节水稻根系生长发育.ABA 可抑制主根静止中心细胞分裂.Zhang 等^[8]利用 ABA 抑制剂 - 氟啶酮处理拟南芥,发现静止中心细胞分裂加速,此外,ABA 会抑制拟南芥主根分生区细胞及干细胞的分化.魏金凤等^[9]综述了 ABA 调节植物根系补偿生长的机制,指出 ABA 对根系生长发育的调节,可在干旱缺水条件下使根吸收尽可能多的水分以供地上部水分的需要;干旱缺水条件下 ABA 对根系生长发育的正向调节将促进作物旱后复水的补偿生长.

6-BA 在控制细胞的分裂、分化以及在植株的整个发育过程中都发挥着重要功能.6-BA 可抑制主根伸长,阻碍侧根原基的起始和组织并直接影响侧根建成细胞而抑制侧根发育^[10].已有研究表明,6-BA 抑制侧根的发生是抑制了起始细胞的第一次垂周分裂^[11].Aloni 等^[12]发现 6-BA 通过由淀粉粒影响的根冠特异信号而非静止中心或根分生区来控

制根系的向地性反应.

大豆富含蛋白质、脂肪、维生素和各種矿物质,营养价值高,是我国主要粮食作物之一.有关植物激素调控拟南芥和水稻根系生长发育已有较深入的研究,但对大豆根系生长发育的影响鲜见报道.本研究探讨了 GA₂、ABA 和 6-BA 对大豆根系生长的影响,这对今后进一步研究激素调控大豆根系构型、指导大豆生产、丰富大豆根系研究方面具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 供试材料和培养液

供试植物为大豆 *Glycine max* L. Merrill 磷高效品种“HN89”.本试验采用 1/2 Hoagland 营养液的改良配方,其成分 [c/(μmol · L⁻¹)] 为 KH₂PO₄ 250、KNO₃ 1 500、Ca(NO₃)₂ · 4 H₂O 1 200、NH₄NO₃ 400、(NH₄)₂SO₄ 300、K₂SO₄ 300、MgSO₄ · 7H₂O 500、MgCl₂ 25、NaB₄O₇ · 10H₂O 2.5、MnSO₄ · H₂O 1.5、ZnSO₄ · 7H₂O 1.5、CuSO₄ · 5H₂O 0.5、(NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O 0.16 和 Fe - Na - EDTA 40.

激素母液配制:称取 GA₃ 和 6-BA(分析纯)各 13.85 和 9.01 mg,分别用 φ 为 95% 的乙醇溶液和 1 mol · L⁻¹ NaOH 少许溶解后定容至 40 mL 配置成 1 mmol · L⁻¹ 母液待用.称取 10.57 mg ABA 直接定容至 40 mL.试验中不同激素处理大豆幼苗的浓度分别为 0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹,工作液按相应比例稀释.

1.2 方法

将粒大、饱满且均匀的大豆种子经 φ 为 10% H₂O₂ 表面消毒 1 min,无菌水漂洗 10 次,1/4 上述大豆水培营养液(pH 5.8)催芽至露白后,用 121 ℃ 20 min 高压灭菌的催芽纸卷纸催芽.种子卷纸后,放入盛有大豆水培营养液的培养杯中,卷纸在培养杯中竖直,确保大豆胚根向下,保鲜膜将卷纸围起,起到固定和保湿功能.大豆暗培养 2 d 后见光培养 1 d,此时幼苗没有侧根形成,并移植到分别加有 GA₃、ABA 和 6-BA 培养杯中处理 4 d,各激素浓度分别为 0 (CK)、0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹.各处理有 3 个重复.试验在光照度为 500 μmol · m⁻² · s⁻¹,空气相对湿度为 60 % 的大豆培养室中进行,白天温度

26 ℃、光照 13 h,晚上温度 24 ℃、光照 11 h.

1.3 根系参数的分析

用根系扫描仪(Epson1460XL,日本)对大豆植株根系进行扫描,根系总根长、主根长、根表面积和根直径采用根系分析软件 Win Rhizo (Canada, Regent Instrument Inc.)进行定量分析.

1.4 数据处理

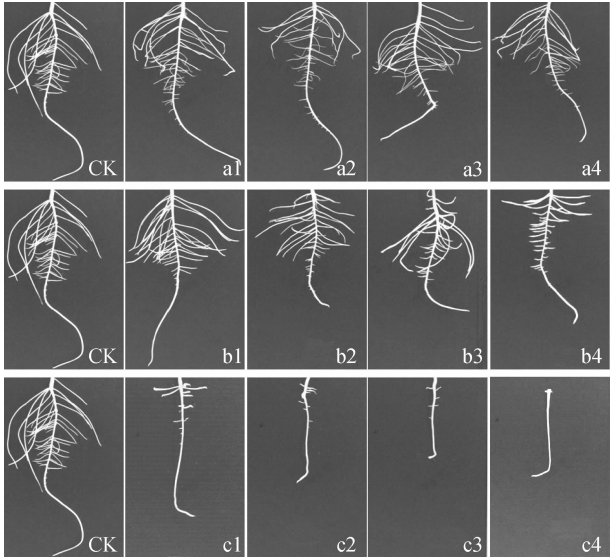
所有数据均用 Microsoft Excel 2007 进行平均数和标准误差计算,利用 SAS(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)统计软件进行单因素方差分析,Duncan's 多重比较.

2 结果与分析

2.1 不同浓度 GA₃、ABA 及 6-BA 对大豆生长发育的影响

2.1.1 不同浓度 GA₃、ABA 及 6-BA 对大豆根表型的影响 从图 1 可以看出,不同浓度 GA₃、ABA 和 6-BA处理大豆幼苗 4 d 后其根系形态发生了明显改变. GA₃ 处理的大豆根系变得纤细;0.05 和 0.50 μmol · L⁻¹ 的 GA₃ 对大豆主根生长影响不明显,1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ 的 GA₃ 则严重抑制了主根伸长;不同浓度的 ABA 对大豆幼苗主根出现不同程度的抑制作用,0.05 μmol · L⁻¹ 的 ABA 抑制作用不明显,其他 3 种浓度的 ABA 明显抑制了主根生长. 随着 ABA 浓度的增大,侧根伸长明显受到抑制,侧根数量有减少的趋势,侧根长缩短;4 种不同浓度的 6-BA 处理明显抑制了大豆幼苗主根和侧根的生长,和对照比,主根长、侧根数和侧根长明显减少,5 μmol · L⁻¹ 的 6-BA处理的大豆根系几乎没有长出侧根. 此外,6-BA处理使得大豆根尖弯曲生长,这表明 6-BA 可能调节大豆主根的向地性.

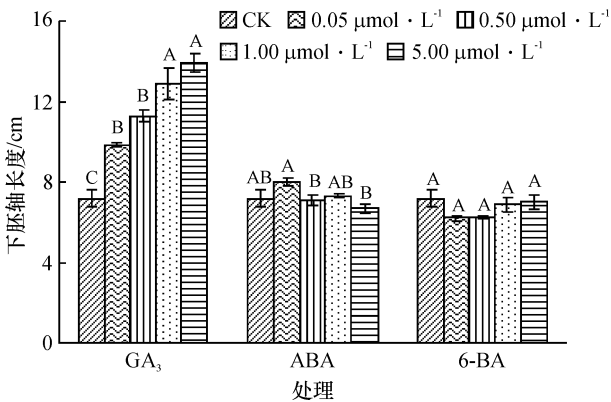
2.1.2 不同浓度 GA₃、ABA 及 6-BA 对大豆地上部表型的影响 不同浓度 GA₃、ABA 和 6-BA 处理大豆幼苗 4 d 后,植株地上部形态受到不同程度的影响,主要表现在对下胚轴和顶端真叶的生长方面(图 2 和图 3). 随着 GA₃ 处理浓度的增加,大豆下胚轴长度显著增加($P < 0.01$),相对于对照(CK)、0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ GA₃ 处理的大豆幼苗,下胚轴长度分别增加了 37.0%、56.4%、79.2% 和 93.1%;不同浓度的 ABA 和 6-BA 处理对大豆的下胚轴生长影响不大,各处理间差异不显著(图 2). 6-BA 的处理明显抑制真叶的生长,对照植株的 2 片真叶能正常生长展开,但 6-BA 处理的植株真叶都受到严重抑制(图 3).



CK:对照,不加任何激素;a1 ~ a4 分别为 0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ GA₃ 处理;b1 ~ b4 分别为 0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ ABA 处理;c1 ~ c4 分别为 0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ 6-BA 处理.

图 1 不同浓度 GA₃、ABA 和 6-BA 处理下大豆根系形态的变化

Fig. 1 Changes of soybean root morphology after 4-day treatment with different concentrations of GA₃, ABA and 6-BA



图中方差分析采用单因素方差分析,相同激素处理不同柱子上凡是一个相同大写字母者,表示差异不显著(Duncan's 法, $P > 0.01$);误差线为标准误.

图 2 不同浓度 GA₃、ABA 和 6-BA 对大豆下胚轴生长的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of GA₃, ABA and 6-BA on soybean hypocotyl growth

2.2 不同浓度 GA₃、ABA 及 6-BA 对大豆根系形态参数的影响

主根长、侧根数、总根长及根平均直径是评价根系生长发育的重要形态指标. 对处理后大豆的根形态指标进行分析发现,0.05 和 0.50 μmol · L⁻¹ 低浓度的 GA₃ 对主根长没有显著影响,但 1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ 的 GA₃ 显著地抑制了主根长度($P < 0.01$),相对于对照主根长分别降低了 19.4% 和

17.3%。ABA 处理抑制了大豆的主根长,0.50、1.00 和 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 显著抑制了植株主根长度 ($P < 0.01$), 比对照分别下降了 22.2%、24.5% 和 24.5%。虽然 0.05 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理下大豆主根长与对照比也降低了 3.7%, 但差异不显著。6-BA 处理显著减少大豆植株的主根长, 即使最低处理浓度 0.05 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 6-BA 也使大豆的主根长比对照降低了 72.4% (图 4a)。

外施 GA_3 、ABA 及 6-BA 可调控大豆侧根生长

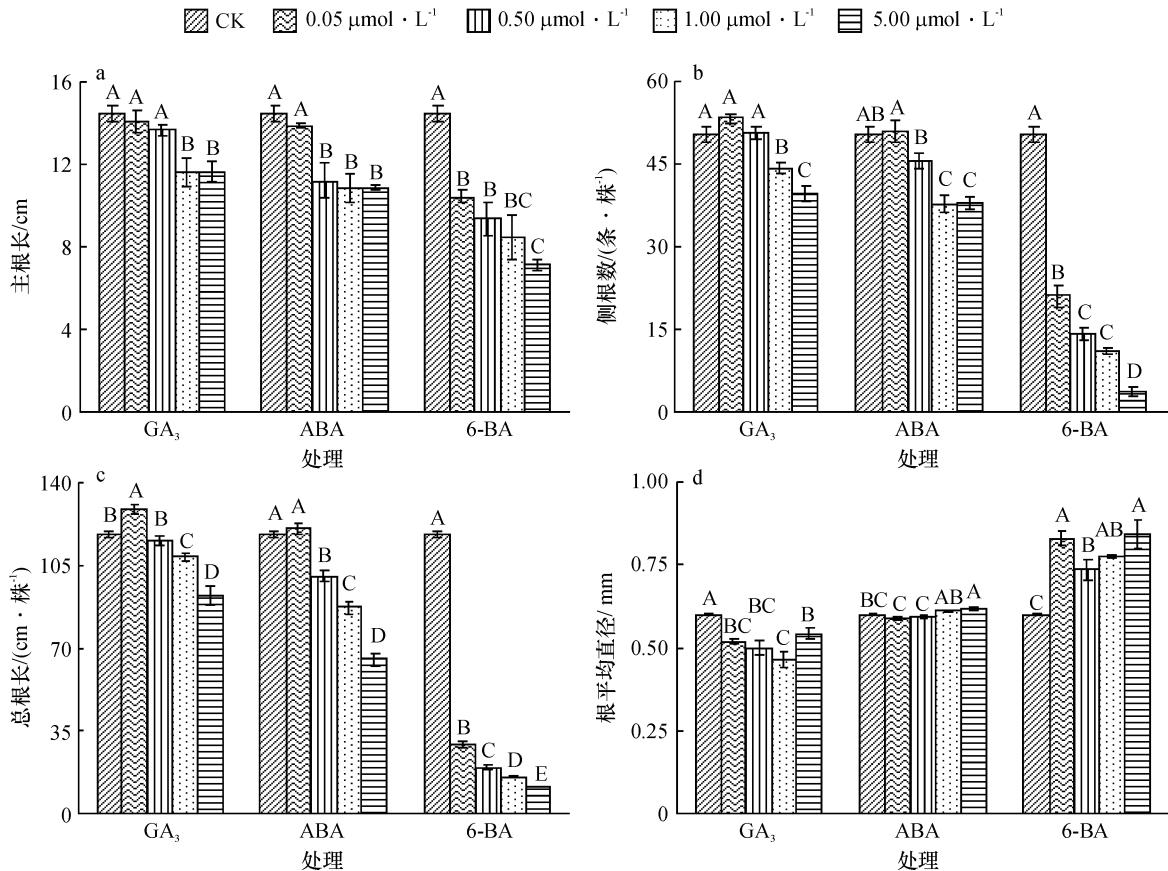
发育(图 4b)。高浓度的 GA_3 抑制了侧根生长,侧根数减少, GA_3 处理浓度达到 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可降低侧根数 20.7%。同 GA_3 的效果一样,0.05 及 0.50 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 对侧根生长影响不大,但随着处理浓度的升高则抑制程度加剧。6-BA 处理显著地抑制侧根发育,大豆侧根数随处理浓度的增加而显著降低 ($P < 0.01$), 最低处理浓度 0.05 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 6-BA 就可使侧根数降低 58%, 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 6-BA 几乎完全抑制大豆侧根发育。



a: GA_3 处理, b: ABA 处理, c: 6-BA 处理; 各图从左至右处理浓度依次为 0、0.05、0.50、1.00 和 5.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

图 3 不同浓度 GA_3 、ABA 和 6-BA 对大豆地上部形态的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of GA_3 , ABA and 6-BA on soybean shoot morphology



图中方差分析采用单因素方差分析,各图中同一处理不同柱子上凡是有有一个相同大写字母者,表示差异不显著 (Duncan's 法, $P > 0.01$); 误差线为标准误。

图 4 不同浓度 GA_3 、ABA 和 6-BA 对大豆根系参数的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of GA_3 , ABA and 6-BA on soybean root parameters

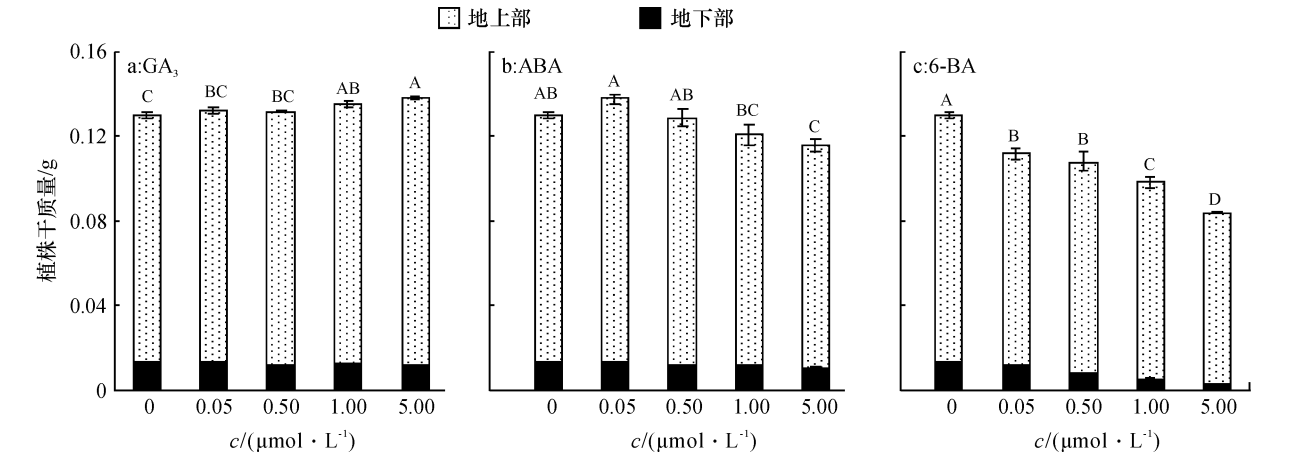
大豆的总根长受到外施 GA₃、ABA 及 6-BA 的影响(图 4c). 与对照相比,尽管 0.05 μmol · L⁻¹ 低浓度的 GA₃ 处理促进了总根长度,随着处理浓度的加大,这种促进作用转为抑制作用,当浓度达到 1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ 时,总根长受到显著抑制; ABA 的施用也抑制了总根长,尽管 0.05 μmol · L⁻¹ 的 ABA 处理浓度对大豆总根长没有影响,但随处理浓度的增加大豆总根长呈递减趋势,当处理浓度达到 5.00 μmol · L⁻¹ ABA 时,与对照相比,植株总根长降低了 44.7%. 6-BA 严重的抑制了大豆的总根长,与对照相比,0.05、0.50、1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ 6-BA 显著抑制了植株总根长($P < 0.01$),使其分别下降了 75.6%、83.9%、80.1% 和 90.4%.

GA₃、ABA 和 6-BA 对大豆根系平均直径的影响不一样(图 4d). GA₃ 处理显著降低了大豆根平均直径($P < 0.01$),与试验中 GA₃ 处理的大豆主根和侧根根系变得纤细的表型相一致(图 1). ABA 处理则对根系的平均直径影响不大,尽管 5.00 μmol · L⁻¹ 的 ABA

处理会使根系变粗,但变幅并不大. 6-BA 则使大豆根系显著变粗,试验中 4 个处理浓度使得根平均直径增加了 22.6% ~ 40.4%.

2.3 不同浓度 GA₃、ABA 及 6-BA 对大豆生物量的影响

从图 5 可以看出,不同浓度 GA₃、ABA 和 6-BA 通过影响大豆根系及地上部生长进而影响了大豆整株生物量. 与对照相比较,各浓度的 GA₃ 对大豆地下部影响不显著,低浓度的 GA₃ 对地上部干质量的影响不明显,而当 GA₃ 浓度达到 1.00 μmol · L⁻¹ 以上时,增加了大豆地上部生物量,进而增加了整株的生物量. 低浓度的 ABA 对大豆幼苗生物量影响不大,只有当 ABA 的浓度达到 5.00 μmol · L⁻¹ 时,地上部、地下部生物量都受到抑制,总生物量可降低为对照的 85.6%. 6-BA 负调控了地上部和根系发育,抑制主根和侧根生长(图 3 和图 4),随着 6-BA 处理浓度的增加,抑制作用增强,根部与地上部生物量急剧下降,总生物量降至对照的 65.5% ~ 92.5%.



图中方差分析采用单因素方差分析,各图中柱子上凡是有有一个相同大写字母者,表示不同浓度间总植株干质量差异不显著(Duncan's 法, $P > 0.01$);误差线为标准误.

图5 不同浓度 GA₃、ABA 和 6-BA 对大豆幼苗干质量的影响
Fig. 5 Effects of different concentrations of GA₃, ABA and 6-BA on soybean dry mass

3 讨论

根系是植物的营养器官,吸收土壤中的水分和养分,具有支持、贮存合成有机物的作用. 已有研究证明:外源和内源激素都会影响根系生长发育. 本文利用大豆为材料,分析比较了 3 种外源激素赤霉素(GA₃)、脱落酸(ABA)和细胞分裂素(6-BA)对大豆根系生长发育的影响.

GA₃ 最显著的生理效应就是促进茎和主根的生长^[13],其作用与其促进细胞的伸长密切相关^[14]. 与此一致,本试验结果表明 GA₃ 处理能显著促进大豆下胚轴伸长,且随着处理浓度的增加下胚轴长度增

加,进而株高也相应增加. GA₃ 对根系生长的影响与地上部不同,不同试验表现出了不同结果:外源施加 GA₃ 有的试验表现为促进根生长,也有些出现抑制效应^[15]. 本研究发现 0.05 μmol · L⁻¹ 的 GA₃ 有促进侧根数量的趋势,由于侧根数及长度的增加,导致了总根长的增加. 高浓度 GA₃ 对根系生长调控作用则相反,1.00 和 5.00 μmol · L⁻¹ 的 GA₃ 处理显著抑制了主根长与侧根发育,虽然 2 个浓度处理的主根长差异不显著,但侧根数 1.00 μmol · L⁻¹ 的处理明显比 5.00 μmol · L⁻¹ 的多,1.00 μmol · L⁻¹ 的 GA₃ 对侧根伸长没有起到抑制作用,进而最终导致 1.00 μmol · L⁻¹ 处理的总根长明显比 5.00 μmol · L⁻¹ 处

理的总根长要长. 由于 GA_3 处理显著促进了大豆地上部下胚轴伸长生长, 且随着浓度的增加这种促进作用增强, 进而出现高浓度的 GA_3 (1.00 和 $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 增加了大豆生物量的情况.

ABA 通常作为根源逆境信号而备受关注, 它在增强作物根系导度、诱导气孔关闭, 进而提高作物抗旱性等方面发挥着重要作用. 通常, ABA 被认为是一种胁迫激素和生长抑制剂, 除了极少数情况外, ABA 对根系有抑制作用, ABA 与生长素对根的作用是相反的, 低浓度的生长素对根的促进作用可以被 ABA 抑制^[16]. 本试验中发现 $0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 有抑制主根生长趋势, 这在一定程度上促进了侧根形成及侧根伸长, 最终导致总根长有所增加, 但没有显著差异. 和对照比, 0.05 、 1.00 和 $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 处理显著抑制总根长且三者之间差异显著, 虽然 3 种浓度 ABA 都显著抑制了主根生长且三者之间差异不显著, 但总根长差异显著, 同时 $0.50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理的侧根数明显多于 1.00 和 $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的侧根数, 说明 $0.50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 对侧根伸长生长的抑制作用程度小于 1.00 和 $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 1.00 和 $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理在主根长和侧根数抑制程度方面差异不显著, 而总根长却变化显著, 从根形态改变也可看出, $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 抑制了侧根的伸长生长, 这可能是导致 $1.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理总根长比 $5.00 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理长的原因.

6-BA 是一种细胞分裂素, 农业上常被用于调节植株生长发育, 它抑制根系生长和促进芽的形成, 并能通过由淀粉粒调控的根冠特异信号来控制根系的向地性反应, 致使根尖弯曲生长^[12]. 本试验中发现, 不同浓度的 6-BA 处理能引起大豆根尖弯曲, 影响了根系向地性, 抑制主根伸长和侧根起始及生长发育, 最终导致大豆生物量下降. 这些结果表明 6-BA 负调控大豆根系生长发育, 然而其抑制大豆根系发育的机制还需进一步深入探讨.

了解植物激素对大豆根系的调控, 对于利用外源植物激素对根系进行调控和改良有着重要的意义. 李欣欣等^[17]前期工作也研究报道了不同浓度的吲哚乙酸 (IAA)、吲哚丁酸 (IBA) 及萘乙酸 (NAA) 对大豆根系生长的影响, 发现不同外源生长素类物质不同程度调控了大豆根系形态构型^[17]. 本试验则探讨了 GA_3 、ABA 和 6-BA 对大豆根系生长的影响, 补充了这一方面的数据, 为进一步利用激素调控大豆根系构型提供理论依据.

参考文献:

- [1] HODGE A, BERTA G, DOUSSAN C, et al. Plant root growth, architecture and function [J]. *Plant Soil*, 2009, 321: 153-187.
- [2] FU Xiangdong, HARBERD N P. Auxin promotes *Arabidopsis* root growth by modulating gibberellin response [J]. *Nature*, 2003, 421: 740-743.
- [3] UBEDA-TOMÁS S, FEDERICI F, CASIMIRO I, et al. Gibberellin signaling in the endodermis controls *Arabidopsis* root meristem size [J]. *Current Biology*, 2009, 19: 1194-1199.
- [4] 王荣, 丁娜. 不同浓度赤霉素溶液对棉花幼苗发育的影响 [J]. 阜阳师范学院学报: 自然科学版, 2010, 27 (3): 48-51.
- [5] 何为中, 汪森, 刘红坚, 等. 赤霉素 (GA_3) 处理对甘蔗试管苗瓶外生根的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (4): 2059-2060.
- [6] SMET I D, SIGNORA L, BEECKMAN T, et al. An abscisic acid-sensitive checkpoint in lateral root development of *Arabidopsis* [J]. *Plant J*, 2003, 33: 543-555.
- [7] CHEN Chaowen, YANG Yunwei, LUR Hursheng et al. A novel function of abscisic acid in the regulation of rice (*Oryza sativa* L.) root growth and development [J]. *Plant Cell Physiol*, 2006, 47(1): 1-13.
- [8] ZHANG Hanma, HAN W, SMET I, et al. ABA promotes quiescence of the quiescent centre and suppresses stem cell differentiation in the *Arabidopsis* primary root meristem [J]. *Plant J*, 2010, 64: 764-774.
- [9] 魏金凤, 赵翔, 张骁. 脱落酸调节植物根系补偿生长机制分析 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37 (26): 12403-12405.
- [10] LAPLAZE L, BENKOVA E, CASIMIRO I, et al. Cytokinins act directly on lateral root founder cells to inhibit root initiation [J]. *The Plant Cell*, 2007, 19: 3889-3900.
- [11] LI Xiang, MO Xiaorong, SHOU Huixia, et al. Cytokinin-mediated cell cycling arrest of pericycle founder cells in lateral root initiation of *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell Physiol*, 2006, 47(8): 1112-1123.
- [12] ALONI R, LANGHANS M, ALONI E, et al. Role of cytokinin in the regulation of root gravitropism [J]. *Planta*, 2004, 220: 177-182.
- [13] 王忠. 植物生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 278.
- [14] 王立静, 哈丽旦, 张素梅, 等. 新的玉米矮秆突变基因的鉴定与遗传分析 [J]. 华北农学报, 2008, 23 (5): 23-25.
- [15] 赵毓橘, 张军. 植物生长调节剂生理基础与检测方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [16] 罗璉, 孙长忠, 王琦, 等. 根系的发育及其激素调控作用 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (26): 11219-11222.
- [17] 李欣欣, 赵静, 廖红. 吲哚乙酸、吲哚丁酸和萘乙酸对大豆幼根生长的影响 [J]. 植物生理学报, 2013, 49 (6): 1-6.

【责任编辑 周志红】