

水培条件下不同磷水平对毛竹实生苗生长发育的影响

陈媛文, 高健*, 张颖, 马艳军, 齐飞艳

(国际竹藤中心, 国家林业局竹藤科学与技术重点开放实验室, 北京 100102)

摘要: 以毛竹(*Phyllostachys edulis*)实生苗为材料, 采用 Hoagland 营养液水培方法, 研究不同磷浓度下毛竹生长、根系发育、激素含量等的差异。结果表明: 磷浓度较低时, 可以促进毛竹实生苗根系长度及根系总表面积的增长。随着磷浓度的增加, 实生苗生物量干重及根冠比呈先上升后下降趋势, 磷浓度为 1 mmol L^{-1} 时达到最大。无磷处理时, 根中的 IAA、ZR、 GA_3 和 ABA 等 4 种内源激素含量随着处理时间的延长均先升高再降低; 其他浓度磷处理根中 IAA、ZR 和 GA_3 (0.5 mmol L^{-1} 磷除外) 含量随着处理时间的延长大致呈先降低后升高的趋势, 而 ABA (0.5 mmol L^{-1} 磷除外) 含量随着处理时间的延长变化不明显。不同浓度磷处理, 叶片中 IAA、 GA_3 和 ABA 含量总体上呈下降趋势, ZR 含量总体上呈上升趋势。以上结果表明不同浓度的磷处理对毛竹内源激素含量的变化有显著的影响, 而内源激素含量变化与毛竹实生苗根系变化密切相关。

关键词: 毛竹; 实生苗; 磷浓度; 根系; 内源激素; 水培

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.01.012

Effects of Different Phosphorus Concentration on Growth and Development of Moso Bamboo

CHEN Yuan-wen, GAO Jian*, ZHANG Ying, MA Yan-jun, QI Fei-yan

(International Centre for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100102, China)

Abstract: The effects of different phosphorus concentration on growth of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) were studied under hydroponic condition. With the decreasing phosphorus concentration, root length and root surface area was increased. The dry biomass and root to shoot ratio of moso bamboo tended to rise at first and then fall as phosphorus concentration increased. When the concentration of phosphorus was 0 mmol L^{-1} , the contents of the four endogenous hormone in root rose firstly and fall later. The contents of IAA, ZR and GA_3 in root fall firstly and rose later in other concentrations. The content of ABA in roots did not change obviously (except for 0.5 mmol L^{-1}). The contents of IAA, GA_3 and ABA in leaves were decreased, while ZR increased. Therefore, phosphorus concentration had significant effect on the contents of endogenous hormones in moso bamboo, which influenced growth of roots of moso bamboo.

Key words: Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*); Seedling; Phosphorus concentration; Root system; Endogenous hormone; Hydroponic

收稿日期: 2012-03-22 接受日期: 2012-05-18

基金项目: 十二五-林业科技支撑计划项目(2012BAD23B0503); 十一五-林业科技支撑计划项目(2006BAD19B02)资助

作者简介: 陈媛文(1986~), 女, 硕士研究生。主要从事竹子抗逆分子生物学的研究。E-mail: chenyw@icbr.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaojian@icbr.ac.cn

磷是植物正常生长发育所必需的 17 种营养元素之一,有多种重要的生理生化作用^[1],但是土壤中磷的有效性却很低。施肥虽然可以增加磷含量,但是施入到土壤中的可溶性无机磷除一小部分被植物直接吸收外,大部分会向吸附态或难溶性无机磷酸盐转化,导致植物无法吸收和利用^[2]。世界上现有 5.8×10^9 hm^2 土壤缺磷,约占世界耕地面积的 43%,严重制约着各国农林业的发展^[3]。更为严峻的是,磷肥的主要来源磷矿石,是一种非可再生资源,据估计我国高品位磷矿资源可用时间不足十年^[4]。

植物根系一般仅吸收距地面 1~4 mm 根际土壤中的磷。在低磷条件下,植物根系通过形态学的变化如根的长度和粗细、根毛和侧根的数量和密度等来扩大根系与土壤磷的接触面积,以提高植物对磷的吸收效率^[5]。白羽扇豆在缺磷条件下,根的末端形成侧生根和根毛的簇生根^[6-7]。在低磷胁迫下,小麦根系的根轴长度和侧根密度显著增加^[8]。当植物感受到磷胁迫时,必然会产生某些信号,通常认为内源激素与植物生长过程中的主要生理生化反应有关,因而可能与低磷诱导根系形态特征的适应性变化有关。在植物低磷反应调控体系中,植物激素参与了根形态的改变,包括抑制主根生长和促进侧根发生等过程^[9-10]。Lynch 等^[11]认为低磷能诱导植物根系乙烯的生成,刘海国等^[12]指出缺磷小麦根系增大是由于体内磷调节锌的分配后增加生长素(IAA)含量进而诱导 *cyclAt* 基因表达的缘故。Nacry 等^[13]研究了缺磷条件下拟南芥根中生长素的分布变化,发现主根和幼嫩侧根的根尖伴随有生长素的积累,侧根原基也有生长素的积累,根尖的生长素敏感性增加,主根和衰老侧根的侧根原基发生部位生长素的含量下降。但是有关低磷条件下脱落酸(ABA)与赤霉素(GA₃)含量变化规律报道较少。

毛竹主产区的中国南方地区土壤中磷素含量较低。王海霞^[14]等对江西境内不同地理分布毛竹林土壤养分进行测定,发现江西毛竹林土壤中速效磷含量偏低。蒋俊明^[15]等发现川南毛竹林地土壤中磷极度缺乏。因此,本文通过研究不同磷浓度下毛竹实生苗的生长、根系发育、激素含量等的差异,为毛竹磷营养研究提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

毛竹(*Phyllostachys edulis*)实生苗由本实验室

培养,毛竹种子采自广西,千粒重约 21 g。毛竹种子去颖壳后,灭菌,25℃恒温生化培养箱催芽。长出胚芽后移入 1/2 Hoagland 营养液中培养,生长 1 周后再移到不同磷浓度营养液中进行处理。实验处理分 5 个磷水平,即营养液中含 0、0.5、1、1.5、2 mmol L^{-1} KH_2PO_4 ,各处理重复 3 次。由气泵通气,每隔 4 d 换一次营养液,光照强度为 250~300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,16 h 光照,8 h 黑暗,温度 25℃,相对湿度为 70%~80%。培养 25 d 后,各处理随机选取 30 株幼苗测量各项指标。用于测定内源激素含量的实生苗培养 30 d 后,设置 5 个磷处理水平(营养液中分别含 0、0.5、1、1.5、2 mmol L^{-1} KH_2PO_4),分别在处理后 2、5、8 和 12 d 取样。样品经液氮速冻后,用酶联免疫吸附法^[16]测定 IAA、玉米素核苷(ZR)、GA₃、ABA。

1.2 方法

毛竹实生苗主根长度用精度为 1 mm 的直尺测量,根系长度及表面积由植物图像分析仪系统(万深 LA-S 系列)得到。根冠比的测定将经处理的幼苗在 105℃下杀青 10 min,70℃烘干至恒重,用梅特勒-托利多 XS105DU 分析天平测定根干重、冠干重及干重。根冠比用地下部分与地上部分生物量干重的比值表示。

1.3 数据统计

采用 Excel 2003、SPSS 16.0 统计软件进行数据统计处理。采用 One-Way ANOVA 进行方差分析。

2 结果和分析

2.1 磷对根系生长发育的影响

不同磷浓度对毛竹侧根生长的影响见表 1,其

表 1 不同磷浓度对毛竹实生苗侧根生长的影响

Table 1 The effects of different phosphorus levels on growth of lateral roots of moso bamboo

P (mmol L^{-1})	总株数 Number	产生侧根的株数 number with lateral roots	Plant	平均侧根数 Mean lateral roots
0	30	21		4
0.5	30	13		3
1	30	9		1
1.5	30	7		1
2	30	4		1

中将长度大于 5 mm 的侧根计入侧根数量。随磷浓度升高,各处理测量的 30 株植株中,含侧根的植株数、平均侧根数都减少。相关研究表明,侧根的生长有利于对磷的吸收^[8],在低磷水平下侧根的数量及长度比高磷浓度处理的数量及长度都有所增加。由此可以说明毛竹实生苗根系在低磷环境下为获取更多的磷营养而增加侧根数量和长度,从而增加根系对磷的吸收面积。

由表 2 可见,随磷浓度的升高,毛竹实生苗

表 2 不同磷浓度对毛竹实生苗根系总长度及根系总表面积的影响
Table 2 Effects of phosphorus on root length and surface area of moso bamboo

P (mmol L ⁻¹)	根系总长度 Total length of roots (cm)	根系总表面积 Total area of roots (cm ²)
0	17.83±4.28c	2.26±0.44a
0.5	16.35±2.52bc	2.07±0.34a
1	14.04±3.26ab	2.06±0.37ab
1.5	13.77±3.13a	1.99±0.32a
2	15.25±2.95ab	1.98±0.30b

数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$, LSD 法检验)。表 3 同。
Date followed by different small letters indicate significant difference at 0.05 level by LSD. The same is Table 3.

表 3 不同磷浓度处理对毛竹实生苗干重和根冠比的影响

Table 3 Effects of phosphorus on dry biomass and root/shoot ratio of moso bamboo

P (mmol L ⁻¹)	根生物量 Root biomass (mg)	冠生物量 Crown biomass (mg)	总生物量 Total biomass (mg)	根冠比 Ratio of root to crown
0	3.241±0.098a	11.850±0.125b	15.091±0.141ab	0.274±0.0096a
0.5	3.095±0.075a	12.300±0.195ab	15.395±0.204ab	0.252±0.0075ab
1	3.047±0.0092a	12.712±0.140a	15.759±0.165a	0.240±0.0067bc
1.5	2.785±0.082b	12.035±0.280ab	14.827±0.317b	0.231±0.0074bc
2	2.644±0.098b	12.142±0.216ab	14.784±0.194b	0.218±0.0082c

2.3 对内源激素含量的影响

由图 1: A 可见,无磷处理的毛竹实生苗根中 IAA 含量随着处理时间的延长先升高后降低,在处理后 8 d 达到最大值,0.5 mmol L⁻¹ 磷处理的毛竹实生苗根中 IAA 含量随处理时间延长而增加,这与刘辉等^[19]研究结果相似,低磷胁迫下大麦根和叶中 IAA 含量随处理时间的延长而增加。1 mmol L⁻¹ 磷处理的毛竹实生苗根中 IAA 含量变化不大。1.5 mmol L⁻¹ 磷处理的毛竹实生苗根中 IAA 含量呈下降趋势,2 mmol L⁻¹ 磷处理的毛竹实生苗根中 IAA 含量则先下降后上升。可见磷浓度较低时,

根系总长度及总表面积都呈下降趋势。磷浓度为 0 mmol L⁻¹ 时,根系总长度和总表面积达到最大值,比最高磷浓度 2 mmol L⁻¹ 时分别增加了 16.9% 和 12.4%,差异显著。在磷浓度较低时,毛竹实生苗通过侧根的生长,增加根系的长度和总表面积,以增大吸收面积,从而更有效的利用磷素。这与张斌等^[17]研究结果一致,在低磷情况下植物可以采取增加根表面积,提高磷的吸收效率。在此情况下,主根生长会受到限制而侧根的密度和长度则会增加。

2.2 对干重及根冠比的影响

从表 3 可见,无磷处理的毛竹根干重和根冠比最大,分别比磷浓度为 2 mmol L⁻¹ 时增加 22.6%、25.7%,差异显著。磷缺乏时根干重和根冠比增加,是植物对低磷条件适应的一个重要特点,植物通过提高根冠比增加根系生物量,也增加了根系总的吸收面积^[18]。随着磷浓度的升高,毛竹实生苗干重及根冠比降低,当磷浓度高于 1.5 mmol L⁻¹ 时,根生物量显著降低,对毛竹实生苗生长具有抑制作用。在磷浓度为 1 mmol L⁻¹ 时,毛竹实生苗积累的生物量最高,与其他处理相比差异显著,说明该磷浓度较适合毛竹实生苗生长。

毛竹实生苗根中生长素含量升高,以促进根系的生长。由图 1: B 可见,毛竹实生苗叶中 IAA 含量随处理时间的延长变化不大,但整体呈下降趋势,这与刘辉等^[19]的研究结果不一致,还有待于进一步分析。

由图 2: A 可见,无磷处理的毛竹实生苗根中 ZR 含量先上升后下降,在处理第 8 天达到最高,其他 4 种浓度处理的毛竹实生苗根中 ZR 含量都呈上升趋势。由图 2: B 可见,不同磷浓度处理的毛竹实生苗叶中 ZR 含量随处理时间延长呈增加趋势,但变化不大。

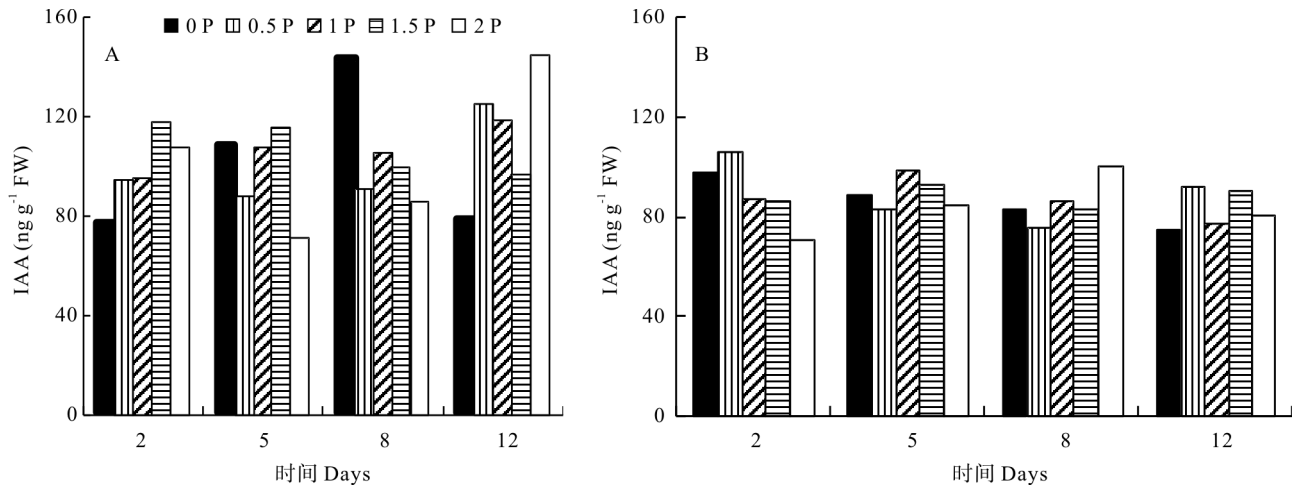


图 1 不同浓度磷(mmol L^{-1})处理毛竹实生苗根(A)和叶(B)中 IAA 含量的变化

Fig. 1 Changes in IAA of moso bamboo roots (A) and leaves (B) treated with phosphorus (mmol L^{-1})

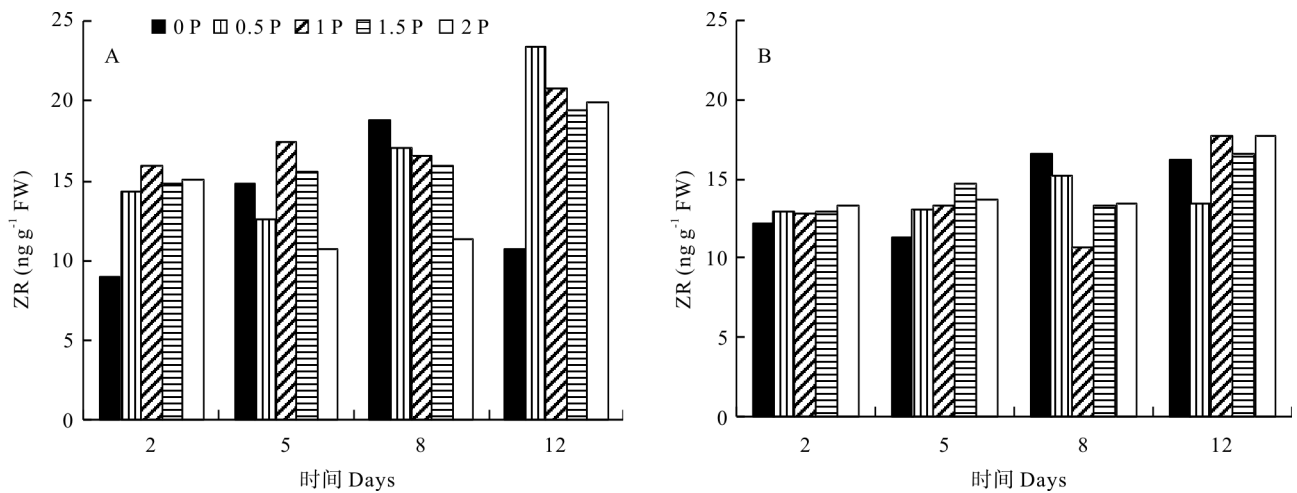


图 2 不同浓度磷(mmol L^{-1})处理毛竹实生苗根(A)和叶(B)中的 ZR 含量

Fig. 2 Changes in ZR of moso bamboo roots (A) and leaves (B) treated with phosphorus (mmol L^{-1})

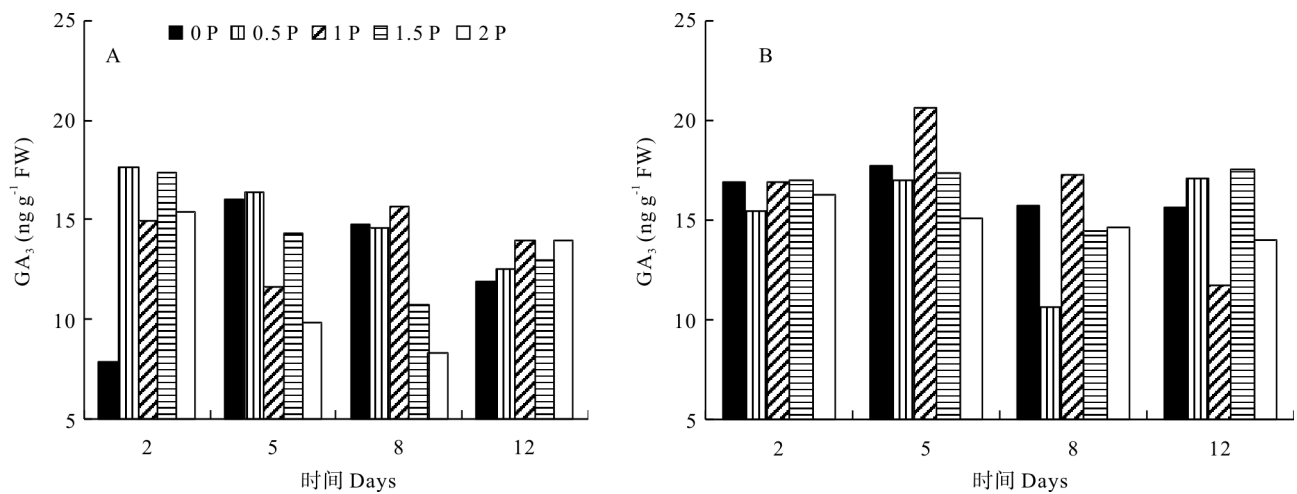


图 3 不同浓度磷(mmol L^{-1})处理毛竹实生苗根(A)和叶(B)中的 GA_3 含量

Fig. 3 Change in GA_3 of moso bamboo roots (A) and leaves (B) treated with phosphorus (mmol L^{-1})

由图 3: A 可见,无磷处理的毛竹实生苗根中 GA_3 含量随处理时间延长先上升后下降, 0.5 mmol L^{-1} 磷处理的毛竹实生苗根中 GA_3 含量则呈下降趋势, 1 mmol L^{-1} 磷处理的毛竹实生苗根中 GA_3 含量变化不大, 1.5 和 2 mmol L^{-1} 磷处理的毛竹实生苗根中 GA_3 含量则先下降后上升,处理 8 d 下降到最小值。由图 3: B 可以看出,不同磷浓度处理的毛竹实生苗叶中 GA_3 含量变化不大。

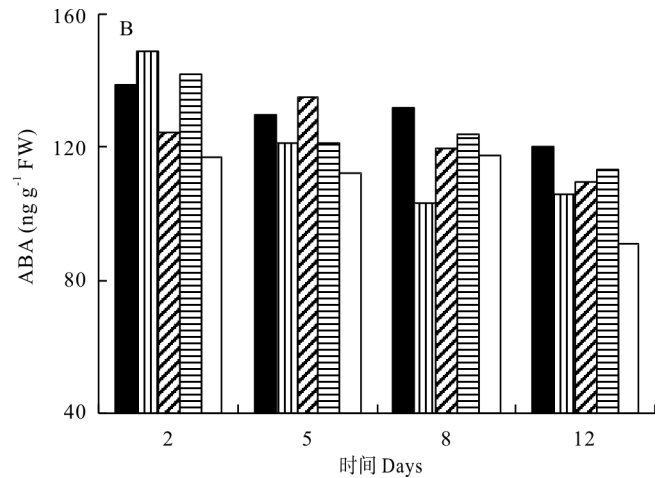
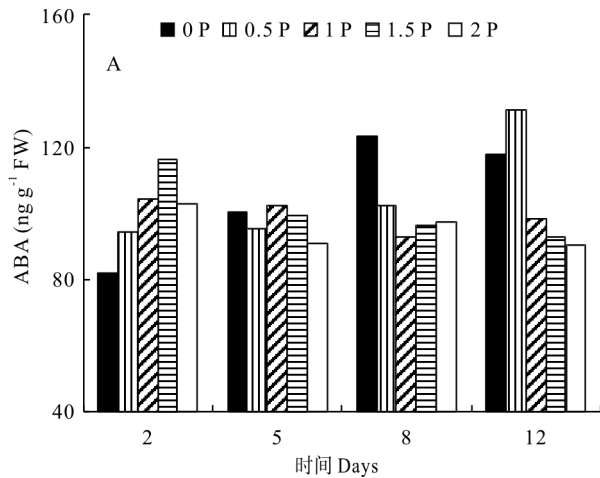


图 4 不同浓度磷(mmol L^{-1})处理毛竹实生苗根(A)和叶(B)中的 ABA 含量

Fig. 4 Change in ABA of moso bamboo roots (A) and leaves (B) treated with phosphorus (mmol L^{-1})

延长,各浓度磷处理毛竹实生苗叶中 ABA 含量都呈下降趋势,其中 0.5 mmol L^{-1} 磷处理和 2 mmol L^{-1} 磷处理变化较大,其他 3 种处理变化不大。这说明 ABA 含量的变化与不同浓度磷处理尤其是低磷处理有一定的关系。

3 结论和讨论

在营养液培养条件下,不同供磷水平对毛竹实生苗的主根长度及直径、侧根数量及长度、根系总表面积及根冠比产生了显著的影响。磷浓度为 1 mmol L^{-1} 时,毛竹实生苗积累的生物量干重最大,根冠比也最大,说明此种磷浓度是毛竹实生苗幼苗生长的最适磷浓度。

相关研究表明,在低磷条件下,植物的主根长度减小,增加侧根的生长来扩大根系对土壤磷素的吸收面积和能力,从而提高植物对磷胁迫的适应能力^[20-21]。李海波^[22]的研究表明,低磷对水稻的侧根发生发育具有明显的诱导作用。王学敏^[18]的研究

表明,低磷胁迫使得拟南芥主根缩短,根毛数量和密度增加,侧根密度提高,增加了根系的比表面积,增强了植物的吸收能力。王建霄等^[23]的研究表明,橡胶树幼苗通过侧根数量的增多和总长度的增加,来适应低磷的环境。Rufty 等^[24]研究表明,处于低磷条件下的植物,其地上部分同化物向根系的运输量增加,进而使缺磷植物的根冠比增大。本研究所得结果与上述相似,即低磷条件下,毛竹实生苗主根长度减小,侧根数量和长度、根系总表面积及根冠比增大。

无磷处理的毛竹根中 4 种内源激素含量均是先升高再降低,其他浓度磷处理根中 IAA、ZR 和 GA_3 (0.5 mmol L^{-1} 磷除外)含量大致呈先降低后升高的趋势,根中 ABA (0.5 mmol L^{-1} 磷除外)含量变化不明显。不同浓度磷处理,叶中 IAA、 GA_3 和 ABA 含量总体上呈下降趋势,其中 0.5 mmol L^{-1} 磷处理各激素含量变化较为明显;而 ZR 含量总体上呈上升趋势。根系的改变与地上部分之间分配比例的改变很可能与体内激素平衡的改变有关。孙

海国等^[12]研究表明,低磷信号通过增加的生长素诱导了细胞周期蛋白基因 *cyclAt* 的表达,进而促进了小麦根的生长,使根冠比增加。本研究表明低磷条件可能引起 IAA 含量的变化,从而改变毛竹根系的生长以提高对磷的吸收效率。Salama 等^[25]研究表明,向日葵幼苗磷素供应不足使根系的细胞分裂素含量降至对照的 44.5%,叶片内细胞分裂素含量降至对照的 38.1%。本研究中细胞分裂素含量变化与前人研究结果有差异,可能因为 ZR 只是细胞分裂素中的一种,其他种类的细胞分裂素,如 iPA 等,笔者未测定,所以哪一类细胞分裂素对毛竹不同磷条件下生长发育的影响较大有待于进一步的研究。研究同时发现低磷对毛竹实生苗 ABA 和 GA₃ 含量有影响,特别是处理初期变化较大,可能是胁迫初期通过 ABA 和 GA₃ 的变化引起其他的变化进而促进根系的变化。

缺磷条件下毛竹实生苗生物量积累较少,但缺磷促进了根系的生长发育,表现出毛竹实生苗对缺磷有一定的适应性。不同磷浓度下毛竹实生苗内源激素含量变化情况与其根系生长发育有密切的关系。在低磷营养液中培养的毛竹实生苗根系形态特征可作为有效筛选磷高效基因型毛竹的指标。

参考文献

- [1] Wang R C, Cheng S H, Cao L Y. Advancements in phosphorus deficiency tolerance study in rice [J]. *Chin Agri Sci Bull*, 2009, 25(6): 77–83.
王汝慈,程式华,曹立勇.水稻耐低磷胁迫研究进展[J].*中国农学通报*,2009,25(6):77–83.
- [2] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization [J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 248–256.
- [3] Liu J Z, Li Z S, Li J Y. Utilization of plant potentialities to enhance the bio-efficiency of phosphorus in soil [J]. *Eco-Agri Res*, 1994, 2(5): 16–23.
刘建中,李振声,李继云.利用植物自身潜力提高土壤中磷的生物有效性[J].*生态农业研究*,1994,2(5):16–23.
- [4] Zhang W F, Ma W Q, Zhang F S, et al. Comparative analysis of the superiority of China's phosphate rock and development strategies with that of the United States and Morocco [J]. *J Nat Res*, 2005, 20(3): 378–386.
张卫峰,马文奇,张福锁,等.中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析[J].*自然资源学报*,2005,20(3):378–386.
- [5] Li F, Pan X H. The research development of morphological and physiological characteristics of plant root system under phosphorus deficiency [J]. *Chin Agri Sci Bull*, 2002, 18(5): 65–69.
李锋,潘晓华.植物适应缺磷胁迫的根系形态及生理特征研究进展[J].*中国农学通报*,2002,18(5):65–69.
- [6] Shane M W, Vos M D E, Roock S D E, et al. Shoot P status regulates cluster-root growth and citrate exudation in *Lupinus albus* grown with a divided root system [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, 26(2): 265–273.
- [7] Liang R X, Li C J, Song J L. Effects of 6-BA on cluster root formation and organic acid exudation in white lupin grown under phosphorus deficiency [J]. *J Plant Physiol Mol Biol*, 2004, 30(6): 619–624.
梁瑞霞,李春俭,宋建兰.6-BA对缺磷白羽扇豆排根形成和有机酸分泌的影响[J].*植物生理与分子生物学学报*,2004,30(6):619–624.
- [8] Sun H G, Zhang F S. Morphology of wheat roots under low phosphorus stress [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(3): 295–299.
孙海国,张福锁.缺磷胁迫下的小麦根系形态特征研究[J].*应用生态学报*,2002,13(3):295–299.
- [9] López-Bucio J, Hernández-Abreu E, Sánchez-Calderón L, et al. Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the *Arabidopsis* root system [J]. *Plant Physiol*, 2002, 129(1): 244–256.
- [10] López-Bucio J, Hernández-Abreu E, Sánchez-Calderón L, et al. An 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 Physiol*, 2005, 137(2): 681–691.
- [11] Lynch J P, Brown K M. Ethylene and plant responses to nutritional stress [J]. *Physiol Plant*, 1997, 100(3): 613–619.
- [12] Sun H G, Zhang F S. Growth response of wheat roots to phosphorus deficiency [J]. *Acta Bot Sin*, 2000, 42(9): 913–919.
孙海国,张福锁.小麦根系生长对缺磷胁迫的反应[J].*植物学报*,2000,42(9):913–919.
- [13] Nacry P, Canivenc G, Muller B, et al. A role for auxin redistribution in the responses of the root system architecture to phosphate starvation in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiol*, 2005, 138(4): 2061–2074.
- [14] Wang H X, Ying G Q, Peng J S, et al. A preliminary study on soil fertility of moso bamboo stands in Jiangxi Province [J]. *J Bamboo Res*, 2008, 27(3): 42–44.
王海霞,应国庆,彭九生,等.江西毛竹林土壤肥力初步研究[J].*竹子研究汇刊*,2008,27(3):42–44.
- [15] Jiang J M, Zhu W S, Liu G H, et al. Soil fertility in a *Phyllostachys pubescens* forest of southern Sichuan [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, 25(4): 486–490.

- 蒋俊明, 朱维双, 刘国华, 等. 川南毛竹林土壤肥力研究 [J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(4): 486–490.
- [16] Wu S R, Chen W F, Zhou X. Enzyme linked immunosorbent assay for endogenous plant hormones [J]. *Plant Physiol Commun*, 1988(5): 53–57.
吴颂如, 陈婉芬, 周燮. 酶联免疫法(ELISA)测定内源植物激素 [J]. 植物生理学通讯, 1988(5): 53–57.
- [17] Zhang B, Qin L. Plants tolerance to low phosphorus and its molecular basis [J]. *Mol Plant Breed*, 2010, 8(4): 776–783.
张斌, 秦岭. 植物对低磷胁迫的适应及其分子基础 [J]. 分子植物育种, 2010, 8(4): 776–783.
- [18] Wang X M. Effect of low-phosphate supply on the root system architecture in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Bull Bot Res*, 2010, 30(4): 496–502.
王学敏. 低磷供应对拟南芥根系构型的影响 [J]. 植物研究, 2010, 30(4): 496–502.
- [19] Liu H, Wang S G. Influences of P deficiency stress on endogenous hormones in barley [J]. *J SW Agri Univ*, 2003, 25(1): 48–51.
刘辉, 王三根. 低磷胁迫对大麦内源激素的影响 [J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(1): 48–51.
- [20] Drew M C. Comparison of the effect of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley [J]. *New Phytol*, 1975, 75(3): 479–490.
- [21] Williamson L, Ribrioux S, Fitter A, et al. Phosphate availability regulates root system architecture in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiol*, 2001, 126(2): 875–882.
- [22] Li H B, Xia M, Wu P. Effect of phosphorus deficiency stress on rice lateral root growth and nutrient absorption [J]. *Acta Bot Sin*, 2001, 43(11): 1154–1160.
李海波, 夏铭, 吴平. 低磷胁迫对水稻苗期侧根生长及养分吸收的影响 [J]. 植物学报, 2001, 43(11): 1154–1160.
- [23] Wang J X, Luo W, Cha Z Z, et al. Effects of different phosphorus concentration on buddings' growth of *Hevea brasiliensis* [J]. *Nat Sci J Hainan Univ*, 2009, 27(3): 265–269.
王建霄, 罗薇, 茶正早, 等. 水培条件下不同磷水平对橡胶树幼苗根系生长发育的影响 [J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2009, 27(3): 265–269.
- [24] Rufty Jr T W, Israel D W, Volk R J, et al. Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean [J]. *J Exp Bot*, 1993, 44(5): 879–891.
- [25] Salama A M S, Wareing P F. Effects of mineral nutrition on endogenous cytokinins in plants of sunflower [J]. *J Exp Bot*, 1979, 30(5): 971–981.