

## 低磷胁迫下乙烯对大豆幼苗生理生化指标的影响

王法威<sup>1</sup>, 吕靖<sup>1</sup>, 田霄鸿<sup>2</sup>, 曹翠玲<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 生命科学学院; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为研究低磷胁迫下施用乙烯( $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )对大豆(中黄22)幼苗的影响,将培育至幼苗期的中黄22大豆分别置于高磷、高磷+乙烯、低磷、低磷+乙烯4组营养液中。利用水培法培养大豆15 d后,对大豆的光合速率、蒸腾速率、乙烯释放量、磷含量、根系活力等生理生化指标进行测定。结果表明:对低磷胁迫下的大豆植株施加乙烯后,植株根系乙烯释放量大幅增加,植株根中磷含量相对升高,同时大豆根系活力升高,根体积增加,说明乙烯具有促进大豆根系对磷的吸收的作用;但是乙烯的加入降低了硝酸还原酶活性、光合速率和蒸腾速率,因而最终导致大豆植株生物量的降低。

**关键词:**大豆;磷胁迫;乙烯含量;磷含量

**中图分类号:**S643.7;Q945.78

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2011)06-0936-05

## Effect of Ethylene on Physiological and Biochemical Indexes of Soybean Seedlings under Low Phosphorus

WANG Fa-wei<sup>1</sup>, LÜ Jing<sup>1</sup>, TIAN Xiao-hong<sup>2</sup>, CAO Cui-ling<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Northwest A & F University; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to analyze the effects of ethylene( $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) on physiological and biochemical of soybean seedlings under low phosphorus, pot experiments were conducted in 2010, with soybean cultivar Zhonghuang 22 as material. Soybean seedlings were transplanted into Hoagland solutions when the first true leaves were expanded. Four treatments including HP ( $2\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{Pi}$ ), LP ( $20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{Pi}$ ), HP + Eth and LP + Eth were set. After cultivation for 15 days, soybean seedlings were sampled and the physio-biochemical characters of soybean were determined, such as photosynthetic rate, transpiration rate, ethylene release quantity, phosphorus content, root activity, etc. The results showed that ethylene affected physiological and biochemical traits of soybean. Under low phosphorus stress, plant roots' ethylene production and phosphorus content increased obviously after adding ethylene. At the same time, ethylene promoted the growth of main root, root volume and root vigor. It showed ethylene could enhance the phosphorus absorbing ability by promoting root morphology and activity. For photosynthesis, transpiration and nitrate reductase activity, however, ethylene had inhibitory effect, which led to the decrease of dry matter accumulation and water absorption.

**Key words:** Soybean; Phosphate stress; Ethylene content; Physiological indicators

磷是植物所需的大量营养元素之一,对于植物生长发育起到关键性的影响。磷是不可再生资源,全球范围内土壤缺磷现象严重。我国有2/3耕地缺磷<sup>[1]</sup>,因此有关低磷胁迫对大豆的影响,前人做了大量的工作,低磷胁迫下,大豆根长、根表面积和根体积均比正常供磷条件下增加<sup>[2]</sup>,而大豆叶片含水量和地上部分生物量显著降低,水分饱和亏缺和根冠比增大<sup>[3]</sup>,低磷胁迫还会显著降低大豆的叶绿素含量,进而导致其光合速率与蒸腾速率的下降<sup>[4]</sup>。低磷胁迫降低了大豆的磷吸收效率,而增加了大豆的磷利用效率<sup>[5]</sup>。有报道称乙烯在植物对

缺铁响应的根形态形成中是重要的信号物质<sup>[6]</sup>。乙烯作为应激激素能调节植物形态和生理状态以应对各种不良环境<sup>[7]</sup>。但是关于低磷条件下乙烯对植物光合等生理生化特性的影响鲜有报道。为此该试验采用水培方法,施加外源乙烯,探究了低磷条件下外源乙烯对大豆幼苗光合等生理特性的影响,以期揭示乙烯在植物对低磷响应中的作用。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

试验于2010年3~5月在西北农林科技大学进

收稿日期:2011-08-25

第一作者简介:王法威(1988-),男,在读硕士,研究方向为植物营养生理。E-mail:wfw\_014@163.com。

通讯作者:曹翠玲(1960-),女,博士,教授,主要从事植物养分和水分生理研究。E-mail:cuilingcao@163.com。

行。供试大豆品种为中黄 22,购于杨凌农业种子公司。

选取大小相近的大豆种子,用 95℃ 热水浸烫种子 5 s,然后将其播种于洗净的河砂中。播种 10 d 后,幼苗第一对真叶完全展开时,去掉子叶,将其转入 Hoagland 营养液中进行培养。试验用直径 13 cm、高 10 cm 的纸质小盆(内套保鲜袋)。每盆装 Hoagland 营养液 300 mL,栽种植株 5 株。试验设高磷(Hoagland 营养液的含磷水平为 2 mmol·L<sup>-1</sup> Pi,HP)、高磷+乙烯(HP+Eth)、低磷(将 Hoagland 营养液中磷水平降到 20 μmol·L<sup>-1</sup> Pi,LP)、低磷+乙烯(LP+Eth)4 个处理,5 次重复。低磷组中补加 KCl 以补充因减少 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 的施入而引起的 K 亏缺<sup>[8]</sup>。营养液中乙烯的浓度为 50 μmol·L<sup>-1</sup>。15 d 后(幼苗第三片复叶完全展开)取样测定大豆植株的各项生理指标。培养期间,7 d 更换 1 次营养液。每天通气 1~2 h,自然光照。

1.2 测定项目与方法

植株形态学指标及生物量测定:分别在 4 个处理组中随机采取 10 个植株,用直尺测量其主根长度、最长侧根长度,用排水法测定根系体积,然后称量其地上部分与地下部分的鲜重和干重。再利用最长根长与根干重做比,得出植株比根长。

光合速率及蒸腾速率:使用 CB-1101 型光合蒸腾测定系统仪,采用开路系统,上午 10:00~11:00 测定大豆倒数第 3 片复叶的光合速率及蒸腾速率。每个处理重复 3 次。

硝酸还原酶活性:外源基质法活体测定。

根系活力:利用 TTC 法测定。

叶片细胞膜损伤程度测定:使用 DDS307 型电导仪测定叶片的膜透性。

乙烯含量测定:使用 Trace(GC)ULTRA 气相色谱

谱仪(检测器为 FID;色谱仪为 Trace ULTRA;检测器温度:150℃;柱温:70℃;分离柱:2 m 乙烯专用填充柱;进样口温度:70℃;载气(N<sub>2</sub>)压力:40 kPa;空气流速:350 mL·min<sup>-1</sup>;H<sub>2</sub>流速:35 mL·min<sup>-1</sup>,进样量:1 mL)中测定乙烯释放量。

组织磷含量测定:利用钒钼黄法分别测定植株地上部分及地下部分的磷含量。

1.3 数据分析

应用 SPSS 16.0 软件程序对数据进行统计分析和 LSD 检验,采用 Excel 2003 绘图。

2 结果与分析

2.1 乙烯对低磷条件下大豆根系的影响

2.1.1 根系形态 由表 1 可知,低磷胁迫抑制了大豆主根的生长,而促进了侧根伸长生长,因而根系体积和比根长显著增加。加入乙烯后,HP 和 LP 的主根长分别增加了 26% 和 77%,根体积分别增加了 54% 和 14%,比根长分别增加了 24% 和 39%,而最长侧根长均降低了 50% 左右。这表明乙烯对于大豆具有增加主根生长、根体积及比根长的作用并抑制侧根生长,说明乙烯对于根系吸收磷具有促进作用。特别是在 HP 处理的条件下表现的更为显著。

2.1.2 根系活力 由表 1 可知,LP 处理大豆的根系活力显著低于 HP 处理。加入乙烯后,HP+Eth 与 LP+Eth 的大豆根系活力分别升高了 206.17%、18.27%。这表明乙烯对大豆的根系活力有增强作用,特别是在 HP 水平下作用更加明显。LP+Eth 的根系活力低于 HP 处理,且与 HP 处理没有显著差异,说明在低磷条件下,乙烯对大豆根系活力的增强作用受到了一定的抑制。

表 1 乙烯对磷胁迫下大豆根系指标的影响

Table 1 Effect of ethylene on root traits of soybean under phosphate deficiency

处理 Treatment	主根长 Main root length /cm	最长侧根长 Longest lateral root length/cm	根体积 Root volume /mL	比根长 Specific root length/cm·g <sup>-1</sup>	根系活力 Root vigor /mg TTC·g <sup>-1</sup> FW·h <sup>-1</sup>
HP	14.07 ± 0.13b	1.93 ± 0.13c	1.60 ± 0.20d	90.55c	1.62 ± 0.0008b
HP + Eth	17.73 ± 0.27a	1.07 ± 0.17c	2.47 ± 0.07a	113.66b	4.96 ± 0.0213a
LP	6.07 ± 0.13d	11.17 ± 0.87a	1.83 ± 0.07c	101.31b	1.04 ± 0.0114c
LP + Eth	10.67 ± 0.53c	5.43 ± 0.63b	2.03 ± 0.03b	140.00a	1.23 ± 0.0191b

同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD 检验,P=0.05)

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level. (LSD test,P=0.05)

2.2 乙烯对低磷条件下大豆植株光合作用和蒸腾作用的影响

由图 1 和图 2 可知,与 HP 相比,LP 条件下大豆植株的光合速率和蒸腾速率显著降低。加入外

源乙烯后,HP+Eth 和 LP+Eth 处理的光合速率分别下降了 32.97% 和 47.33%,蒸腾速率分别下降了 31.01% 和 40.54%。说明乙烯对于大豆植株的光合作用和蒸腾作用都有明显的抑制作用,而且在低

磷环境下抑制作用更为明显。

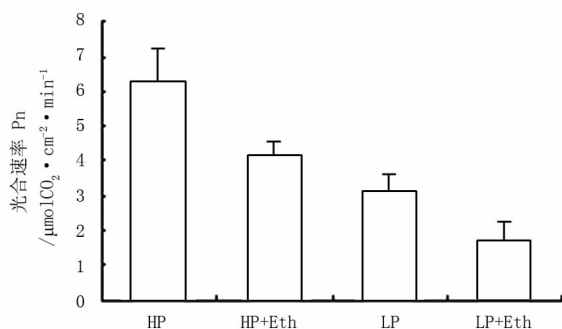


图1 乙烯利对大豆植株光合作用的影响

Fig.1 Effect of ethephon on soybean photosynthesis

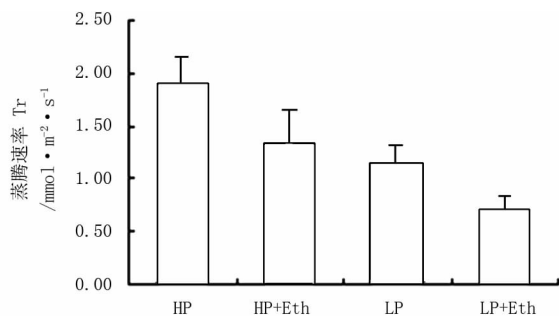


图2 乙烯利对大豆植株蒸腾作用的影响

Fig.2 Effect of ethephon on soybean transpiration

### 2.3 乙烯对低磷条件下大豆叶片相对膜透性和硝酸还原酶活性的影响

由图3可知,低磷胁迫导致大豆叶片膜透性增大,是HP处理的1.24倍;加入乙烯后,HP+Eth和LP+Eth处理的叶片膜透性均降低,降幅分别为41.38%和36.11%,且后者依然大于前者。说明该浓度的乙烯对于大豆叶片的膜透性有一定的抑制作用,而低磷胁迫下的这种抑制略有缓解。

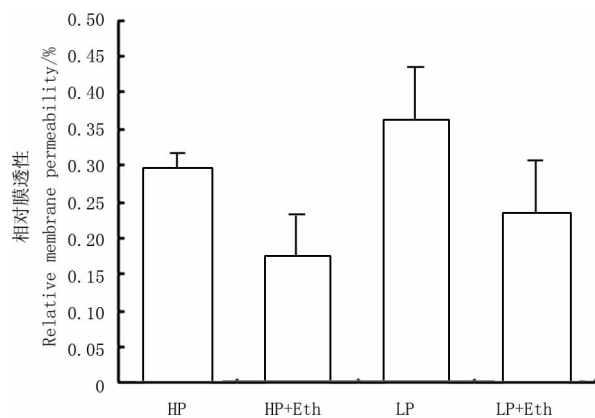


图3 乙烯利在磷胁迫下对大豆叶片相对膜透性的影响

Fig.3 Effect of ethylene on relative membrane permeability soybean leaf of under phosphorus stress

由图4可知,LP处理的大豆叶片和根系硝酸还原酶活性均低于HP处理,说明低磷胁迫可降低大豆硝酸酶的活性;加入乙烯后,无论是HP+Eth还

是LP+Eth,根与叶片的硝酸还原酶活性均有明显降低,且乙烯对大豆叶中的硝酸还原酶活性的抑制作用达显著水平( $P < 0.05$ )。

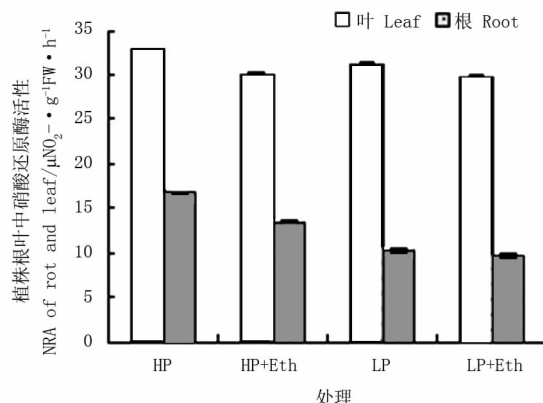


图4 乙烯利对低磷胁迫中大豆根及叶片中硝酸还原酶的影响

Fig.4 Effect of ethephon on nitrate reductase of soybean root and leaf under P deficiency

### 2.4 乙烯对大豆植株乙烯释放量的影响

由表2可知,在低磷胁迫下,大豆根系中乙烯含量显著升高( $P < 0.01$ ),而叶片则无变化。在培养液中添加乙烯后,根系中的乙烯释放量出现极显著的升高,且LP组根系的乙烯释放量仍大于HP组;叶片中乙烯释放量略有增加,但HP组和LP组之间无显著性差异。

表2 乙烯利对于大豆植株乙烯释放量的影响

Table 2 Effect of ethephon on ethylene production of soybean plants ( $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ )

处理 Treatment	根 Root	叶 Leaf
HP	3.668 ± 0.143B	1.877 ± 0.947B
HP + Eth	237.772 ± 6.615A	31.321 ± 0.701A
LP	8.055 ± 0.059B	1.714 ± 0.931B
LP + Eth	258.780 ± 52.777A	31.899 ± 2.834A

同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD检验,  $P = 0.01$ )

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.01 probability level. (LSD test,  $P = 0.01$ )

### 2.5 乙烯对大豆植株磷含量的影响

由表3可知,HP条件下的植株根、茎、叶中的磷含量均高于LP处理。添加乙烯后,与HP相比,HP+Eth处理根、茎中磷含量略有增加,叶片磷含量却下降约60%,全株磷含量亦降低;对于LP+Eth而言,植株根茎叶以及全株磷含量较LP均显著上升,其中根、茎的磷含量均上升50%;但添加乙烯后,HP+Eth处理根、茎、叶的磷含量依然高于LP+Eth处理。

通过比较植株地上与地下部分的磷含量发现,HP地上部分的磷含量略高于地下部分,而LP处理的地上部分磷含量却明显低于地下部分;加入乙烯后,HP+Eth和LP+Eth的地上部分磷含量均低于

表 3 乙烯利对大豆植株磷含量的影响

Table 3 Effect of ethephon on soybean phosphorus content (mg·plant<sup>-1</sup>)

处理	根	茎	叶	地上部	全株
Treatment	Root	Stem	Leaf	Stem and leaf	Whole plant
HP	97.35 ± 2.36b	16.03 ± 0.91bc	94.91 ± 0.00a	110.94 ± 0.74a	186.61 ± 2.38a
HP + Eth	104.66 ± 1.45a	52.71 ± 4.90a	38.99 ± 3.63b	91.70 ± 3.82b	153.55 ± 5.00b
LP	33.09 ± 1.78d	9.15 ± 1.57c	12.70 ± 2.36d	21.85 ± 1.68d	31.92 ± 1.63d
LP + Eth	59.77 ± 1.94c	18.21 ± 1.18b	20.61 ± 0.39c	38.82 ± 1.02c	56.53 ± 2.09c

同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD 检验,  $P=0.05$ )

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level. (LSD test,  $P=0.05$ )

地下部分。可见乙烯促使植株中磷向根系运输,且在磷胁迫情况下,有助于植株对外界磷的吸收。

2.6 乙烯对植株生物量的影响

由表 4 可知,与 HP 处理相比,LP 导致大豆植株生物量显著降低,植株干、鲜重仅是 HP 组的 65% 和 61%。施加乙烯后,HP + Eth 与 LP + Eth 的干鲜

重均小于相应对照组,这说明乙烯对植株的物质积累和水分吸收有一定的抑制作用。对比植株地下与地上部分生物量可以看出,低磷胁迫及施加乙烯对根系干重的影响并不显著;而地上部分干重仅在低磷胁迫下有显著降低,因此,LP 处理的根冠比显著高于其它处理。

表 4 乙烯在磷胁迫下对生物量的影响

Table 4 Effect of ethephon on biomass of soybean under low P stress

处理	地上部分鲜重	根鲜重	地上部分干重	根干重	植株鲜重	植株干重	根冠比
Treatment	Shoot fresh weight	Root fresh weight	Shoot dry weight	Root dry weight	Fresh biomass	Dry biomass	R/S( Dw/Dw )
	/g · plant <sup>-1</sup>	/g · plant <sup>-1</sup>	/g · plant <sup>-1</sup>	/g · plant <sup>-1</sup>	/g · plant <sup>-1</sup>	/g · plant <sup>-1</sup>	
HP	5.26 ± 0.19a	2.36 ± 0.09a	0.72 ± 0.09a	0.18 ± 0.09a	7.20 ± 0.28a	0.90 ± 0.31a	0.24 ± 0.18b
HP + Eth	2.88 ± 0.05b	1.50 ± 0.17b	0.62 ± 0.01a	0.16 ± 0.08a	4.38 ± 0.22c	0.78 ± 0.09a	0.27 ± 0.13b
LP	2.73 ± 0.06b	1.94 ± 0.28ab	0.41 ± 0.07b	0.17 ± 0.00a	4.67 ± 0.34b	0.58 ± 0.35a	0.41 ± 0.34a
LP + Eth	1.74 ± 0.04c	0.91 ± 0.13c	0.46 ± 0.02b	0.12 ± 0.01a	2.65 ± 0.17d	0.57 ± 0.03a	0.25 ± 0.22b

同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD 检验,  $P=0.05$ )。

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level. (LSD test,  $P=0.05$ ) .

3 讨 论

磷是影响植物生长发育最重要的矿质元素之一,而植物根系是活跃的营养吸收与合成器官,根系活力是评价根系生长与代谢的综合指标。该试验发现,低磷胁迫会降低大豆的根系活力,敖雪等<sup>[9]</sup>也得出相似的研究结果。但是施用外源乙烯后,不论是 LP 还是 HP 条件下,其根系活力均高于其相应对照。这是因为乙烯显著提高了淀粉酶的活性<sup>[10]</sup>,从而增加了根系呼吸基质,因而其根系活力显著升高。由于低磷环境中磷的相对供给不足导致植株的磷含量下降。施加外源乙烯后,HP 组与 LP 组植株根系乙烯释放大幅增加,同时植株根中磷含量相对升高。这可能是由于乙烯存在时,植株根系活力较强而导致磷的主动运输加强,而磷含量增加又会进一步促进根系活力,这样就使根系在短时间内形成一个良性循环,有利于植株的生长。另外由于加入乙烯后大豆植株根体积、侧根比根长增加,而根体积与根的吸收效率成正比,根长与磷的吸收量成正相关<sup>[11-12]</sup>,这也使其吸收外界磷

素的速率极大提高。

光合作用受细胞内外诸多因素的调控。在试验中,磷缺乏条件下大豆光合速率明显降低,其原因是缺磷不仅导致叶绿素含量降低,而且还导致气孔变小,气孔密度降低,同时蒸腾速率也降低,势必导致光合速率降低<sup>[8]</sup>。结果还显示,在乙烯存在条件下,不论是 HP 还是 LP 条件下,大豆的光合速率及蒸腾速率均降低。究其原因,可能是乙烯诱导了气孔关闭<sup>[13]</sup>,从而导致光合速率下降。

磷是 NADPH 和 ATP 的重要组成元素,ATP 是生命活动能量的直接来源,因此磷对氮素代谢有较大的影响。磷素也影响了氮素代谢。试验中低磷胁迫下大豆植株的 NR 活性略有降低,主要是由于低磷下植株吸收的硝态氮减少<sup>[14]</sup>,从而使植物氮素同化代谢受阻并影响其它生理代谢过程。该文结果还显示无论是 HP 组还是 LP 组,加入乙烯后,大豆根与叶片的硝酸还原酶活性均低于相应的对照组。郭予榕<sup>[15]</sup>在研究马铃薯叶片的 NR 活性中也有类似结果。这很可能是由于外源乙烯增强了植株蛋白水解酶活性<sup>[16]</sup>,导致可溶性蛋白的分解<sup>[17]</sup>而造成了硝酸还原活性下降。

生物量是植物生理代谢的重要表现形式。加入乙烯利后,HP组与LP组的生物量都低于相应的对照组,这与廖永霞等<sup>[18]</sup>的结果相似。从生理代谢来看,外源乙烯虽然增加了根系活力,促进了磷的吸收,但是降低了NR活性、光合速率和蒸腾速率,因而最终导致大豆植株生物量的降低。

## 参考文献

- [1] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988. (Lu R K. Soil-plant nutrition principle and fertilization[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 1988.)
- [2] 王应祥, 廖红, 严小龙. 大豆适应低磷胁迫的机理初探[J]. 大豆科学, 2003, 22(3): 208-212. (Wang Y X, Liao H, Yan X L. Preliminary studies on the mechanisms of soybean in adaptation to low P stress[J]. Soybean Science, 2003, 22(3): 208-212.)
- [3] 王旭明, 张铮, 史刚荣. 磷营养和土壤含水量对大豆光合特性的交互影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 143-148. (Wang X M, Zhang Z, Shi G R. Interaction of phosphorus concentration and soil moisture on photosynthetic traits in soybean plants[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 143-148.)
- [4] 钟鹏, 吴俊江, 刘丽君, 等. 低磷和干旱胁迫对不同基因型大豆光合生理特性的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(5): 806-810. (Zhong P, Wu J J, Liu L J, et al. Effects of phosphorus deficiency and drought stress on photosynthetic characters in different genotypic soybeans[J]. Soybean Science, 2009, 28(5): 806-810.)
- [5] 王树起, 韩晓增, 李晓慧, 等. 缺磷胁迫下的大豆根系形态特征研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(2): 192-196. (Wang S Q, Han X Z, Li X H, et al. Root Morphology of soybean (*Glycine max* L.) under phosphorus deficiency stress[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, 26(2): 192-196.)
- [6] Zaid H, Morabet R E I, Diem H G, et al. Does ethylene mediate cluster root formation under iron deficiency? [J]. Annals of Botany, 2003, 92: 673-677.
- [7] Abeles F B. Ethylene in plant biology[M]. New York: Academic Press, 1973.
- [8] 曹翠玲, 毛圆辉, 曹朋涛, 等. 低磷胁迫对豇豆幼苗叶片光合特性及根系生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1373-1378. (Cao C L, Mao Y H, Cao P T, et al. Effects of phosphorous stress on photosynthesis rate and root physiological characteristic of cowpea seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1373-1378.)
- [9] 敖雪, 谢甫绀, 张惠君, 等. 磷素处理对不同磷效率基因型大豆根系性状的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(5): 787-791. (Ao X, Xie P T, Zhang H J, et al. Effect of phosphorus on root traits of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies[J]. Soybean Science, 2008, 27(5): 787-791.)
- [10] 王强. 1-MCP 保持猕猴桃品质和果实硬度的机理研究[C]. 合肥: 安徽农业大学, 2010: 1-45. (Wang Q. Study on the mechanism of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) for keeping quality and fruit firmness in Kiwifruit[C]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010: 1-45.)
- [11] Barber S A, Mackay A D. Root growth and phosphorus and potassium uptake by two corn genotypes in the field[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1986, 10: 217-230.
- [12] Fhse D, Claassen N, Jungk A. Phosphorus efficiency of plants II: Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species[J]. Plant and Soil, 1991, 132: 261-272.
- [13] 刘国华, 侯丽霞, 刘菁, 等.  $H_2O_2$  介导的 NO 合成参与乙烯诱导的拟南芥叶片气孔关闭[J]. 自然科学进展, 2009, 19(8): 841-851. (Liu G H, Hou L X, Liu J, et al.  $H_2O_2$ -mediated NO synthesis in ethylene-induced stomatal closure[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(8): 841-851.)
- [14] 齐柄林, 曹翠玲, 王菲, 等. 磷胁迫对豇豆幼苗硝酸还原酶活性和硝态氮含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 28(1): 147-151. (Qi B L, Cao C L, Wang F, et al. Influence of low phosphorus on nitrate reductive activity and  $NO_3^-$ -N content in cowpea seedling[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 28(1): 147-151.)
- [15] 郭予榕. 生长调节剂对马铃薯某些生理特性的协同效应[J]. 河南科学, 1996(14): 36-38. (Guo Y R. Synergetic effect of growth regulators on some physiological characteristics of potato[J]. Henan Science, 1996(14): 36-38.)
- [16] Peterson L W, Huffaker R C. Loss of ribulose 1,5-diphosphate carboxylase and increase in proteolytic activity during senescence of detached primary barley leaves[J]. Plant Physiology, 1975, 55: 1009-1015.
- [17] 唐光木, 徐万里, 葛春辉, 等. 喷施化学调控剂缩节胺、乙烯利对棉花植株氨挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4862-4870. (Tang G M, Xu W L, Ge C H, et al. Effects of spraying chemical regulator dimethylpiperidinium chloride and ethephon on plant ammonia volatilization in cotton of Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(23): 4862-4870.)
- [18] 廖永霞, 康玉凡, 王保民, 等. 乙烯、6-BA 对大豆幼苗生长、生化成分及细胞组织结构的效应[J]. 大豆科学, 2009, 28(1): 41-52. (Liao Y X, Kang Y F, Wang B M, et al. Effects of ethylene and 6-BA on growth, chemical composition and anatomical structure of soybean seedling[J]. Soybean Science, 2009, 28(1): 41-52.)