

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.015

# 钙素对雾培马铃薯幼苗抗冷性的影响分析\*

于海业 乔建磊 肖英奎 张艳平 王淑杰

(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

**【摘要】** 针对雾培马铃薯幼苗根系器官常受气温影响而导致植株生育不良的生产实际, 试验探讨了增施钙素对低温环境下雾培马铃薯幼苗抗冷性的调节作用, 以为低温生产季节增施钙素来增强马铃薯幼苗抗冷性提供依据。试验结果表明, 增施钙素可以降低马铃薯幼苗叶片的离子渗透率和膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)的积累量, 同时还能有效提高叶片中抗氧化保护酶(POD、CAT和SOD)活性和渗透调节物质(可溶性蛋白质和可溶性糖)的含量以及抑制幼苗根系活力的下降, 但增施钙素未能显著提高幼苗叶片中脯氨酸的含量。以上结果说明, 钙素在雾培马铃薯幼苗抵御冷害的生理调节过程中发挥了重要作用, 通过增施适宜浓度的钙素在一定程度上可以改善雾培马铃薯幼苗的抗冷性。

**关键词:** 雾培马铃薯 低温胁迫 钙素 渗透调节 生理指标 根系活力

**中图分类号:** S632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0072-04

## Effect Analysis of Calcium on Cold Resistance of Aeroponic Potato Seedlings

Yu Haiye Qiao Jianlei Xiao Yingkui Zhang Yanping Wang Shujie

(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

The growth of aeroponic potato seedlings is sensitive to the ambient temperature as the roots are exposed to the air during cultivation. Effects of exogenous calcium treatment on physiological indexes of potato seedlings were studied in order to provide basis for improving the cold resistance by applying calcium reasonably in the low temperature production season. The results showed that the electrolyte leakage and MDA content in leaves of potato seedlings with calcium treatment were decreased, compared with the control, the activities of anti-oxidant enzymes (POD, CAT and SOD) in leaves were improved and the contents of osmotic adjustment substances (soluble sugar and soluble protein) in seedlings leaves were increased, however, the effect of calcium application on praline content in leaves was not obvious. Furthermore, calcium treatment could efficiently restrain the root activity drop of potato seedlings. The results above indicated that the calcium signaling was closely related to the physiological regulation of aeroponic potato seedlings in the low temperature condition, calcium application with appropriate concentration could improve the cold resistance of seedlings.

**Key words** Aeroponic potato, Low temperature stress, Calcium, Osmotic adjustment, Physiological index, Root activity

### 引言

采用雾培法生产马铃薯脱毒种薯是一项新兴的技术, 因该生产技术在结薯数量上较基质栽培法具

有明显的优势而备受重视<sup>[1-3]</sup>。然而, 雾培法植物根系是裸露在潮湿的空气中生长, 极易受到环境温度的影响<sup>[4]</sup>, 这使得生产技术难度加大。通常, 土壤温度的日变化较小, 但空气温度的日变化较大, 植

收稿日期: 2010-05-26 修回日期: 2010-07-12

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z203)和吉林省科技发展计划项目(20090566)

作者简介: 于海业, 教授, 博士生导师, 主要从事农业设施环境调控及植物生理信息检测研究, E-mail: haiye@jlu.edu.cn

物根系适应了土壤温度的变化,却不适应空气温度的变化,尤其是在冬季或早春采用雾培法生产马铃薯脱毒种薯时,常会因夜间根际低温而导致幼苗生育不良。因此积极探索有效途径来改善雾培马铃薯幼苗的抗冷性具有十分重要的意义。

钙是植物生长发育所需的一种矿质元素,在稳定细胞膜结构和生理代谢过程中起着重要的作用。近年来又有研究表明植物在遭受低温、盐碱、干旱等逆境胁迫时钙素有助于诱导植物启动防御系统来抵御胁迫引起的伤害<sup>[5-8]</sup>。目前关于钙素对雾培马铃薯幼苗抗冷性影响的研究还未见报道。本文重点探讨外源钙素处理对低温胁迫下雾培马铃薯幼苗抗冷性的调节作用,以期在低温生产季节增施钙素来改善雾培马铃薯幼苗抗冷性提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试验设计

雾培装置由吉林省农业机械研究院设计完成,装置由储液池、供液泵、供液管路、回水管路、雾化喷头、栽培槽等部件组成,其中营养液喷施时间通过 HB72 智能双数显计测器来控制。供试马铃薯品种为春薯 4 号,选取长势和形态相似的同批次幼苗(苗高为 15 cm 左右)用于试验。营养液的配制:采用改良的 Hoagland 营养液配方,其中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度用分析纯  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  来进行调控,共设计 4 个梯度,分别为 0 (缺钙处理)、3.5 (近似标准液配方浓度)、7.0 和 10.5 mmol/L,相应记为对照 (CK)、处理 I、处理 II 和处理 III,氮营养差异用  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  来调整。将试验幼苗分为 4 组,分别用上述不同  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的营养液预培养 3 d,然后再进行低温胁迫模拟试验。试验期间白天将幼苗置于温室以 18 ~ 23℃ 的温度正常培养,每间隔 10 min 喷雾 20 s,夜间移入智能型人工气候培养箱进行无光照低温胁迫(夜间每间隔 30 min 用喷壶喷施 1 次营养液,将幼苗根系喷透为止),低温胁迫的温度为  $(6 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,胁迫的时间为 7 d,分别于每天上午 8:00 进行采样,取不同处理相

同叶位的叶片和相同部位的根系进行生理指标测定。

### 1.2 指标测定方法

细胞膜渗透性采用电导率仪法测定(电导仪型号:DDS-11C 型),用相对电导率来表示。丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法,利用分光光度计测取滤液在波长 450、532 和 600 nm 处的吸光值,然后再计算鲜样组织中 MDA 的浓度<sup>[9]</sup>。可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法<sup>[10]</sup>,以葡萄糖作标准曲线。可溶性蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定,以牛血清白蛋白(BSA)作标准曲线。脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法,取甲苯萃取液于 520 nm 波长处进行比色,比色测定时以甲苯溶液为空白对照。超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法,以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活性单位。过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法,以 470 nm 波长处吸光值在 1 min 内的变化量来表示活性。过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用高锰酸钾滴定法,其活性以每克鲜样 1 min 内分解  $\text{H}_2\text{O}_2$  毫克数来表示。根系活力的测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法,用 TTC 的还原强度表示脱氢酶活性并作为根系活力的指标。以上各指标的测定均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 对幼苗叶片膜渗透率的影响

由表 1 可以看出,增施钙素明显降低了幼苗叶片细胞膜的渗透率,减轻了低温对叶片质膜造成的伤害,且处理 II 的效果要优于处理 I,但当外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度由 7.0 mmol/L 增加到 10.5 mmol/L 时,细胞膜的渗透率并没有发生显著的变化,在整个低温胁迫期间处理 II 和处理 III 的差异都不显著。

### 2.2 对幼苗叶片丙二醛(MDA)浓度的影响

从表 2 中可以观察到,在低温胁迫期间,对照组幼苗叶片 MDA 浓度随着胁迫时间的延长而持续增加;处理 I 和处理 II 在胁迫的前 4 天 MDA 浓度处于

表 1 增施钙素对低温胁迫下马铃薯幼苗叶片膜渗透率影响的试验结果

Tab. 1 Effect of calcium application on membrane permeability in seedlings leaves under low temperature stress %

| 处理  | 胁迫时间/d                     |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|-----|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|     | 1                          | 2                         | 3                         | 4                         | 5                         | 6                         | 7                         |
| CK  | 23.39 ± 1.87 <sup>a</sup>  | 30.52 ± 2.76 <sup>a</sup> | 36.61 ± 1.58 <sup>a</sup> | 41.84 ± 2.29 <sup>a</sup> | 47.29 ± 3.07 <sup>a</sup> | 43.28 ± 1.79 <sup>a</sup> | 44.83 ± 3.04 <sup>a</sup> |
| I   | 21.54 ± 2.05 <sup>ab</sup> | 26.51 ± 3.78 <sup>b</sup> | 29.35 ± 1.83 <sup>b</sup> | 32.81 ± 2.57 <sup>b</sup> | 36.94 ± 2.19 <sup>b</sup> | 33.56 ± 2.08 <sup>b</sup> | 31.41 ± 1.79 <sup>b</sup> |
| II  | 19.76 ± 1.12 <sup>bc</sup> | 21.17 ± 1.69 <sup>c</sup> | 24.67 ± 0.97 <sup>c</sup> | 26.08 ± 1.36 <sup>c</sup> | 27.36 ± 1.45 <sup>c</sup> | 25.61 ± 2.34 <sup>c</sup> | 24.87 ± 1.68 <sup>c</sup> |
| III | 18.58 ± 2.33 <sup>c</sup>  | 19.81 ± 1.87 <sup>c</sup> | 23.25 ± 2.63 <sup>c</sup> | 24.63 ± 2.20 <sup>c</sup> | 28.39 ± 2.04 <sup>c</sup> | 25.07 ± 1.13 <sup>c</sup> | 23.94 ± 2.03 <sup>c</sup> |

注:同一列不同小写字母表示在 0.05 水平的差异显著,下同。

上升阶段,从第5天开始有所下降;而处理Ⅲ幼苗叶片MDA的浓度在第6天才开始下降。由4个不同处理的叶片MDA浓度的变化规律可知,通过增施

钙素在一定程度上可以减轻细胞膜脂的过氧化,其中处理Ⅱ的效果最佳,在整个低温胁迫期间其对应的幼苗叶片MDA浓度都维持在一个相对较低的水平。

表2 增施钙素对低温胁迫下马铃薯幼苗叶片MDA浓度影响的试验结果

Tab.2 Effect of calcium application on MDA concentration in seedlings leaves under low temperature stress

| 处理  | 胁迫时间/d                    |                           |                            |                           |                           |                           |                           |
|-----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|     | 1                         | 2                         | 3                          | 4                         | 5                         | 6                         | 7                         |
| CK  | 20.43 ± 0.98 <sup>a</sup> | 26.74 ± 1.17 <sup>a</sup> | 33.58 ± 2.36 <sup>a</sup>  | 36.61 ± 2.74 <sup>a</sup> | 38.04 ± 1.87 <sup>a</sup> | 40.51 ± 3.34 <sup>a</sup> | 41.08 ± 3.27 <sup>a</sup> |
| I   | 15.62 ± 1.78 <sup>b</sup> | 19.46 ± 1.65 <sup>b</sup> | 25.07 ± 1.57 <sup>b</sup>  | 28.12 ± 1.89 <sup>b</sup> | 27.13 ± 2.16 <sup>c</sup> | 26.63 ± 2.82 <sup>b</sup> | 24.70 ± 2.86 <sup>b</sup> |
| II  | 14.71 ± 1.46 <sup>b</sup> | 16.34 ± 1.42 <sup>c</sup> | 23.86 ± 1.30 <sup>bc</sup> | 24.27 ± 2.13 <sup>c</sup> | 23.78 ± 0.94 <sup>d</sup> | 21.14 ± 1.90 <sup>c</sup> | 20.96 ± 2.07 <sup>c</sup> |
| III | 15.04 ± 0.91 <sup>b</sup> | 17.52 ± 1.37 <sup>c</sup> | 22.67 ± 1.28 <sup>c</sup>  | 25.35 ± 2.07 <sup>c</sup> | 29.34 ± 2.13 <sup>b</sup> | 27.07 ± 1.83 <sup>b</sup> | 25.49 ± 2.39 <sup>b</sup> |

nmol/g

### 2.3 对幼苗叶片抗氧化保护酶活性的影响

从图1a可以看出,在低温胁迫的第3天,除对照之外其他3个Ca<sup>2+</sup>处理幼苗叶片POD活性均显著提高,而对照组幼苗叶片POD活性的变化幅度较小,在低温胁迫的第4天才开始缓慢增加,与钙素处理组相比,对照组幼苗对低温胁迫所做出的调节反应相对滞后;图1b中幼苗叶片CAT活性的变化曲线显示,在低温胁迫期间各处理幼苗叶片CAT活性

都呈现出先下降后上升再下降的趋势,其中在胁迫的前两天各处理幼苗对应的叶片CAT活性差异不大,但随着胁迫时间的进一步延长,其活性差异越来越明显;观察图1c可以发现,尽管各处理幼苗叶片SOD活性在低温胁迫期间都呈现出下降的趋势,但增施适宜浓度的钙素明显有利于抑制其活性的降低,其中Ca<sup>2+</sup>浓度为7.0 mmol/L时效果较佳。

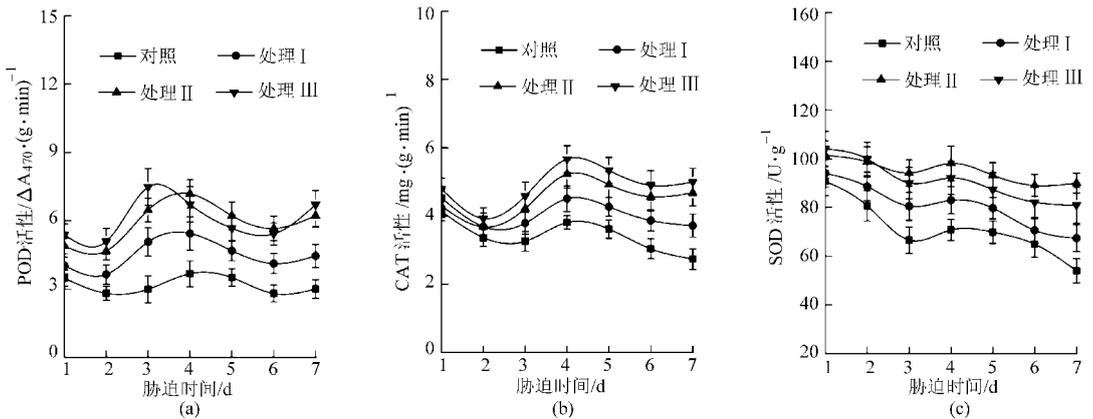


图1 增施钙素对低温胁迫下马铃薯幼苗叶片中抗氧化酶活性影响的试验结果

Fig.1 Effects of calcium application on antioxidant enzymes activities in seedlings leaves under low temperature stress

(a) POD (b) CAT (c) SOD

### 2.4 对幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

图2给出了低温胁迫期间不同浓度Ca<sup>2+</sup>处理下幼苗叶片中各渗透调节物质的平均质量分数。从图2a可以看出,与对照组相比,处理I和处理II幼苗叶片中可溶性蛋白质的质量分数分别提高了26.1%和29.6%,而当外源Ca<sup>2+</sup>浓度增加到10.5 mmol/L时可溶性蛋白质的质量分数却仅比对照组增加了18.5%,这一变化趋势充分说明了幼苗叶片中可溶性蛋白质的质量分数与外源Ca<sup>2+</sup>浓度密切相关;图2b表明,增施钙素使得幼苗叶片中可溶性糖的质量分数有所提高,与对照组相比,处理I、处理II和处理III的增幅分别为20.3%、37.2%

和36.9%,其中处理II和处理III的差异不大;通过比较图2c中各处理幼苗叶片中脯氨酸的质量分数可以发现,处理I较对照组增加了5.7%,处理II较对照组增加了6.3%,即使是外源Ca<sup>2+</sup>浓度增加到10.5 mmol/L,幼苗叶片中脯氨酸的质量分数也仅比对照组增加了6.7%,并且各处理间差异均未达到显著水平( $P > 0.05$ ),这一结果表明增施钙素对幼苗叶片中脯氨酸质量分数的影响并不明显。

### 2.5 对幼苗根系活力的影响

从图3可以看出,在低温胁迫期间幼苗根系活力呈现出先下降后上升的趋势。在胁迫的前两天各处理幼苗根系活力差异不大,但随着胁迫时间的进

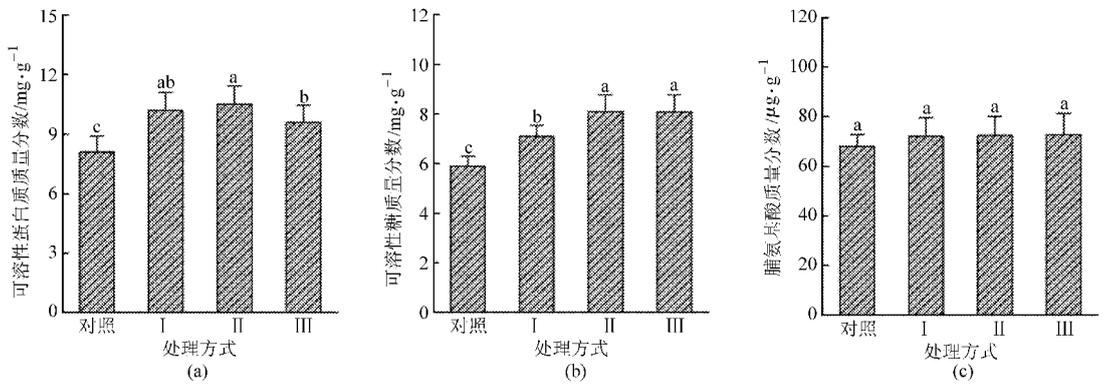


图2 增施钙素对低温胁迫期间马铃薯幼苗叶片中渗透调节物质平均含量影响的试验结果

Fig. 2 Effects of calcium application on average contents of osmotic adjustment substances in seedlings

leaves during low temperature stress

(a) 可溶性蛋白质 (b) 可溶性糖 (c) 脯氨酸

一步延长,经外源  $\text{Ca}^{2+}$  处理的幼苗根系活力明显高于对照组,其中处理II和处理III的效果更佳,这表明增施适宜浓度钙素有利于抑制幼苗根系活力的降低。

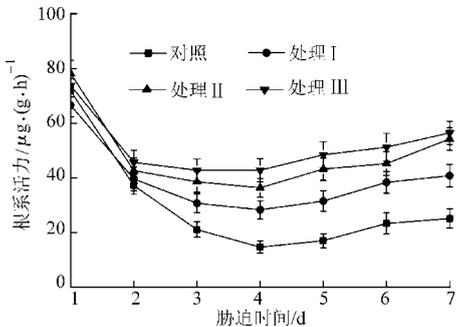


图3 增施钙素对低温胁迫下马铃薯幼苗根系活力影响的试验结果

Fig. 3 Effect of calcium application on root activity of potato seedlings under low temperature stress

### 3 结束语

钙作为偶联植物细胞的胞外信号与胞内生理反

应的第二信使<sup>[11]</sup>,在植物逆境胁迫信号传导过程中起着重要作用。探讨了增施钙素对低温胁迫下雾培马铃薯幼苗抗冷性的调节作用,试验结果表明,增施钙素可以降低雾培马铃薯幼苗叶片的离子渗透率和膜脂过氧化产物丙二醛的积累量,同时还能有效提高幼苗叶片中渗透调节物质(可溶性蛋白质和可溶性糖)的含量以及抑制幼苗根系活力的下降,但增施钙素未能显著提高幼苗叶片中脯氨酸的含量。不同处理幼苗叶片中 POD、CAT 和 SOD 活性的变化趋势表明,增施适宜浓度的钙素不仅使得马铃薯幼苗叶片中抗氧化酶活性增强,而且幼苗对低温逆境所做出的生理调节反应也相对提前。因此,通过增施钙素在一定程度上可以改善雾培马铃薯幼苗的抗冷性,这对减轻和预防幼苗的低温冷害具有积极的意义,试验结果表明当外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 7.0 mmol/L 时处理效果更佳。

### 参 考 文 献

- 1 杨元军,孙慧生,王培伦,等. 马铃薯脱毒小薯雾培结薯特点及增产效果[J]. 园艺学报, 2002, 29(4): 333~336.  
Yang Yuanjun, Sun Huisheng, Wang Peilun, et al. Features of potato tuberization and effect of minituber yield increase from invitro virus-free plantlets by aeroponics[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(4): 333~336. (in Chinese)
- 2 孙周平,李天来,姚莉,等. 雾培法根际  $\text{CO}_2$  对马铃薯生长和光合作用的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(1): 59~63.  
Sun Zhouping, Li Tianlai, Yao Li, et al. Effects of  $\text{CO}_2$  treatment of root zone on potato growth and photosynthesis by areoponics culture[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004, 31(1): 59~63. (in Chinese)
- 3 Imma F, Angel M. Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals [J]. American Journal of Potato Research, 2006, 83(1): 47~53.
- 4 孙周平,李天来. 根际环境因子对马铃薯块茎生长发育影响的研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(5): 386~389.  
Sun Zhouping, Li Tianlai. Influence of rhizosphere factors on the growth and development of potato tuber[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(5): 386~389. (in Chinese)

## 4 结论

(1) 栅条式挖掘铲使土块产生纵向、横向折断劈裂和剪切破坏,提高了碎土效果,为后续薯土分离创造了良好的条件。

(2) 拨指轮与纵向集条栅的设计,提高了分离

效率,缩小了整机尺寸。

(3) 拨指轮工作时为旋转运动,没有往复惯性力,机组工作平稳。

(4) 田间试验表明:挖净率、伤薯率和明薯率指标达到了有关标准规定。

## 参 考 文 献

- 1 贾晶霞. 马铃薯收获机关键部件设计与实验研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.  
Jia Jingxia. Design and experiment study on the critical parts of potato harvester[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 2 刘俊峰,杨欣,马跃进,等. 4U-1A型马铃薯收获机的设计[J]. 农业机械学报,2004,35(2):181~183.
- 3 刘宝,张东兴,李晶. MZPH-820型单行马铃薯收获机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5):81~86.  
Liu Bao, Zhang Dongxing, Li Jing. Design on MZPH-820 single-row potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 81~86. (in Chinese)
- 4 江苏工学院. 农业机械学:下册[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981:305.
- 5 北京农业工程大学. 农业机械学:下册[M]. 北京:农业出版社,1997:198.
- 6 赵满全,赵士杰,余大庆,等. 组合分离式马铃薯挖掘机设计与研究[J]. 农机化研究,2007(4):69~72.  
Zhao Manquan, Zhao Shijie, She Daqing, et al. Combined separation type potato digger[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(4):69~72. (in Chinese)
- 7 李翰如. 薯类收获机械[M]. 中国大百科全书. 北京:中国大百科全书出版社,2000.
- 8 杨莉. 马铃薯挖掘机摆动分离筛的仿真与参数优化[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.  
Yang Li. Simulation and optimization on parameters of separation of potato digger[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 9 贾晶霞,张东兴,郝新明,等. 马铃薯收获机参数化造型与虚拟样机关键部件仿真[J]. 农业机械学报,2005,36(11):64~67.  
Jia Jingxia, Zhang Dongxing, Hao Xinming, et al. Parametric modeling and computer simulation of potato harvester parts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11):64~67. (in Chinese)
- 10 NY/T 648—2002 马铃薯收获机作业质量评价技术规范[S].  
NY/T 648—2002 Technical specification of quality evaluation for potato harvesters[S]. (in Chinese)

(上接第75页)

- 5 朱义,何池全,杜玮,等. 盐胁迫下外源钙对高羊茅种子萌发和幼苗离子分布的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(11):133~137.  
Zhu Yi, He Chiquan, Du Wei, et al. Effects of exogenous calcium on the seed germination and seedling ions distribution of *Festuca arundinacea* under salt-stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11):133~137. (in Chinese)
- 6 卢少云,黎用朝,郭振飞,等. 钙提高水稻幼苗抗旱性的研究[J]. 中国水稻科学,1999,13(3):161~164.  
Lu Shaoyun, Li Yongchao, Guo Zhenfei, et al. Enhancement of drought resistance of rice seedlings by calcium[J]. Chinese Journal of Rice Science, 1999, 13(3):161~164. (in Chinese)
- 7 闫童,王秀峰,杨凤娟,等. 钙对根区低温胁迫下黄瓜幼苗抗冷相关生理指标的影响[J]. 西北农业学报,2006,15(5):172~176.  
Yan Tong, Wang Xiufeng, Yang Fengjuan, et al. Effect of calcium on chilling resistance of cucumber seedlings under root zone low temperature stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(5):172~176. (in Chinese)
- 8 Pandey S, Tiwari S B, Upadhyaya K C, et al. Calcium signaling: linking environmental signals to cellular function[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2000, 19(4):291~318.
- 9 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯,1994,30(3):207~210.  
Zhang Shijie, Xu Changcheng, Zou Qi, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues [J]. Plant Physiology Communications, 1994, 30(3):207~210. (in Chinese)
- 10 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 11 Yang T, Pooviah B W. Calcium/calmodulin-mediated signal network in plants [J]. Trends in Plant Science, 2003, 8(10):505~512.