

# 外源钙对平邑甜茶幼苗氮素吸收及利用的影响

付璐璐,王小非,康 慧,张婷婷,郝玉金\*

(山东农业大学园艺科学与工程学院·作物生物学国家重点实验室,山东泰安 271018)

**摘 要:**【目的】探究钙素施用量对平邑甜茶氮素吸收和利用的影响以及最适宜施钙量。【方法】以正常浓度氮( $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ )处理当年生平邑甜茶幼苗,在此基础上设0(CK)、0.1、1.0、3.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$  4种钙浓度梯度,以根部灌溉的方式施入。研究钙素施用量对平邑甜茶幼苗生物量、氮相关表观指标和氮同化以及氮积累的影响。【结果】与对照相比外施钙素增加了平邑甜茶幼苗地上部生物量、叶绿素含量、总叶面积以及株高,并在1.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 处理时达到最高水平。同时外施钙素提高了平邑甜茶幼苗的根系指标和根系活力,并在0.1  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 处理时达到最高水平。外施钙素促进了植株对硝态氮的吸收;降低了植物体内氨离子的含量;提高了氮同化通路中关键酶硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性并促进了氮在植物体内的积累,在1.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 处理下达到最高水平。此外发现不同浓度钙处理导致了植株体内多种元素含量发生改变。【结论】外源钙促进了幼苗氮素的吸收以及利用,正常氮素处理下1.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 可能是平邑甜茶幼苗氮素吸收以及利用的最佳钙浓度。

关键词:平邑甜茶;幼苗;钙素;氮素吸收利用

中图分类号:S661.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2020)11-1647-08

## Effects of exogenous calcium on nitrogen absorption and utilization of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

FU Lulu, WANG Xiaofei, KANG Hui, ZHANG Tingting, HAO Yujin\*

(College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University/National Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, Shandong, China)

**Abstract:** 【Objective】This study was to examine the effect of calcium application on nitrogen absorption and utilization in *Malus hupehensis* Rehd. and to screen the optimum amount of calcium for application. Calcium and nitrogen are both macronutrients needed by fruit trees. There are many studies on the effect of a single element on the growth of fruit trees, but there are few studies on the interactions of calcium and nitrogen. This study aimed to provide some data for improving the nitrogen use efficiency in apple. 【Methods】The seedlings of *M. hupehensis* Rehd. were applied with  $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ . On this basis, there were four calcium treatments: 0 (CK), 0.1, 1 and 3  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ . The calcium solutions applied were prepared with analytical pure  $\text{CaCl}_2$  and adjusted to pH 6.0. Nitrogen and calcium were applied by soil drenching. Twenty-four seedlings with even growth were selected for each treatment, and the effect of calcium on the biomass of different parts of the seedlings was analyzed by drying and weighing the samples. The difference in leaf area among different treatments was analyzed by image J software. The plant height was measured with a ruler and the stem diameter with an electronic Vernier caliper. A root morphology scanner (Epson V 700) was used to collect the root images, which were analyzed with software WinRHIZO and data of total root length, total root area and root tip number in different treatments were obtained. The content of nitrate nitrogen was determined with salicylic acid method. The activity of nitrate reductase was determined by sulfonamide colorimetry, and the changes in nitrate reductase activity were compared between calcium treatment and the control. Glutamine syn-

收稿日期:2020-04-26

接受日期:2020-07-19

基金项目:国家现代苹果产业技术体系(CARS-27);山东省农业良种工程(2019LZGC007);山东省现代农业产业技术体系(SDAIT-06-03)

作者简介:付璐璐,女,在读硕士研究生,研究方向:果树学。Tel:17854573795, E-mail:1592556484@qq.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel:13953888025, E-mail:haoyujin@sdau.edu.cn

thetase activity was determined by glutamine synthetase (GS) kit purchased from Suzhou Keming Technology Co., Ltd.. After the underground and aboveground parts of the seedlings were dried at 80 °C, they were digested using H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> method, and the contents of total nitrogen, total calcium and phosphorus, potassium, iron, magnesium, zinc and molybdenum were determined by automatic Kjeldahl nitrogen meter, atomic absorption spectrophotometer or Icp-MS. 【Results】 The aboveground indexes of *M. hupehensis* Rehd. seedlings was the highest level in the treatment with 1 mmol · L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>. The fresh weight and dry weight of the seedlings increased by 31.5% and 33.5%, respectively, and the seedling height increased by 129.3% compared with the control. The total leaf area of the seedlings increased by 49.2% compared with the control. In the treatment with 3 mmol · L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>, the stem diameter was the highest, which was 22.8% higher than that of the control. At the same time, calcium increased root length, root surface area, root tip number and root activity, which were highest level in the treatment with 0.1 mmol · L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>, where these indexes increased by 24.1%, 26.6%, 17.3% and 129.9% respectively compared with the control. The application of calcium promoted the absorption of nitrate nitrogen in different parts and reduced the content of ammonia ion in the plant. Calcium content in the plant increased with the increase of the calcium concentration applied. The activities of nitrate reductase (NR) and glutamine synthetase (GS), the key enzymes of nitrogen assimilation, increased with the increase in calcium concentration. Ca<sup>2+</sup> treatments significantly affected the nitrogen assimilation in *M. hupehensis* Rehd seedlings, and the nitrogen assimilation amount in the treatment with 1 mmol · L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup> was the highest under normal nitrogen level. In addition, we found that different concentrations of calcium led to changes in the contents of phosphorus, potassium, iron, magnesium, zinc and molybdenum in the plant. With the increase in calcium concentration, the aboveground phosphorus content decreased gradually, and phosphorus content in roots increased at first and then decreased, and was the highest at 1 mmol · L<sup>-1</sup>, while the contents of potassium, iron, magnesium, zinc and molybdenum increased at low calcium concentrations, but decreased at higher concentrations. Calcium application not only affected the absorption of nitrogen, but also influenced the absorption of the other mineral elements. It is suggested that calcium might play an important regulatory role in the process of nitrogen absorption and assimilation. 【Conclusion】 Exogenous calcium promotes nitrogen absorption and utilization in *M. hupehensis* seedlings. Under normal nitrogen treatment, 1 mmol · L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup> may be the best calcium concentration for nitrogen absorption and utilization.

**Key words:** *Malus hupehensis* Rehd.; Seedling; Calcium; Nitrogen absorption and utilization

近年来,我国果园存在氮肥滥施的状况。吕殿青等<sup>[1]</sup>发现过量施氮会导致土层中过量积累硝态氮,引起水体环境污染。葛顺峰等<sup>[2]</sup>在研究中提到化肥不合理的使用造成了肥料利用率低、果树果实品质下降、果园土壤质量降低等问题。如何提高氮肥利用率则成为了现代果树产业可持续发展的关键问题。在高等植物中,氮素的吸收、同化、利用是一个占据关键地位的生理代谢过程。植物可以从土壤中吸收利用的氮素形态包括无机氮类的铵态氮、硝态氮与小分子的有机氮如甘氨酸、尿素等。基于植物对不同氮素吸收和利用的生理效应不同,植物对不同氮素形态的肥料响应也有差异<sup>[3]</sup>。硝态氮是陆

生植物最主要的氮素吸收形式。这一过程主要由植物体内两种关键酶调控,一种是把硝酸盐还原为铵的限速酶硝酸还原酶(nitrate reductase, NR; EC 1.7.1.1)<sup>[4-5]</sup>;另一种是把氨离子迅速同化的谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS, EC 6.3.1.2)<sup>[6]</sup>。硝酸盐还能以信号分子的身份参与植物生长发育的众多进程,包括调控植物生长、诱导植物侧根的生长、植物叶的发育等<sup>[7-9]</sup>。

钙是植物在非胁迫和胁迫条件下生长发育所必需的元素。因此,它具有双重功能,不仅是细胞壁和细胞膜稳定性的重要因素,而且在许多发育和生理过程中也是第二信使<sup>[10-12]</sup>。Riveras等<sup>[13]</sup>发现在硝酸

盐诱导的情况下,植物细胞内的钙浓度会产生特异性的变化。鲁翠涛等<sup>[14]</sup>发现钙通过影响氮同化关键酶活性,参与了对氮素同化的调节作用。王志强等<sup>[15]</sup>对小麦(*Triticum aestivum* L.)研究中发现,外施钙素能通过不同氮同化途径促进小麦氮素代谢。但在苹果中尚未有钙素影响氮吸收及利用详细的研究。笔者通过研究不同浓度钙素对平邑甜茶幼苗生物量、氮相关表观指标、氮同化以及氮积累的影响,以期为提高苹果氮素利用率提供理论依据,并确定最适宜施钙量。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料培养及处理

选用平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rehd.)为试验材料,平邑甜茶种子用1 000~3 000倍多菌灵浸泡过夜,冲洗后放入4℃冰箱层积30~45 d,露白后播种到育苗基质中。待生长出2~3片真叶后,选取长势基本一致的幼苗洗净移栽到只装有蛭石的7 cm×7 cm营养钵中预培养,预处理期间浇不加钙素的1/2MS营养液。待生长20 d后开始正式处理。幼苗生长温度控制在21~25℃。设4个Ca<sup>2+</sup>浓度处理,每个处理选取长势一致的48株幼苗,处理方法用CaCl<sub>2</sub>代替营养液中的Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,设0(对照)、0.1、1.0、3.0 mmol·L<sup>-1</sup>4个浓度梯度。处理35 d后,选择长势健壮且较为一致的平邑甜茶幼苗用于检测相关指标。每个处理均设3次重复。

### 1.2 测定方法

1.2.1 生物量 每种处理各取长势一致的平邑甜茶幼苗24株,洗净后用纸吸干幼苗表面水分,用千分之一电子天平测量幼苗地上部、地下部和总鲜质

量。测量结束之后放入烘箱烘干,检测各部位干质量。实验设置3次重复,每个重复处理8株幼苗。最后算出单株平邑甜茶幼苗各位的干质量、鲜质量。

1.2.2 株高、茎粗 子叶节到生长点(即主茎顶端)这段距离为株高,用直尺测量;茎粗为基茎粗,用电子游标卡尺测量。

1.2.3 叶面积 用根系扫描仪扫描单株整体叶片,后用Image J统计单株总叶面积。

1.2.4 根系构型及根系活力 每个处理选取8株平邑甜茶幼苗,经清水冲洗后用根系扫描仪和根系分析软件测定根系总长度、根系总表面积和根尖数。采用TTC法<sup>[16]</sup>检测根系活力。

1.2.5 硝态氮 采用水杨酸法<sup>[17]</sup>进行测定。

1.2.6 铵态氮 按照Bräutigam等<sup>[18]</sup>的方法进行测定。

1.2.7 硝酸还原酶 采用磺胺比色法<sup>[19]</sup>进行测定。

1.2.8 谷氨酰胺合成酶 选购苏州科铭技术有限公司谷氨酰胺合成酶(GS)试剂盒,测定方法:分光光度法;规格:24样。

1.2.9 植物元素含量 全氮含量用全自动凯氏定氮仪测定;总钙含量用原子吸收分光光度计测定;磷、钾、铁、镁、锌、铜用Icp-MS测定。

1.2.10 数据处理与分析 文中数据均由3次重复的平均值和标准误组成,采用LSD法对数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施钙水平对平邑甜茶幼苗鲜、干质量的影响

待平邑甜茶幼苗长出2~3片真叶后,转移到纯蛭石的培养钵中对其缺钙处理20 d,之后施加不同钙素浓度梯度正式处理35 d。检测各处理幼苗地上部、地下部以及总的鲜质量,结果如图1、表1所示,

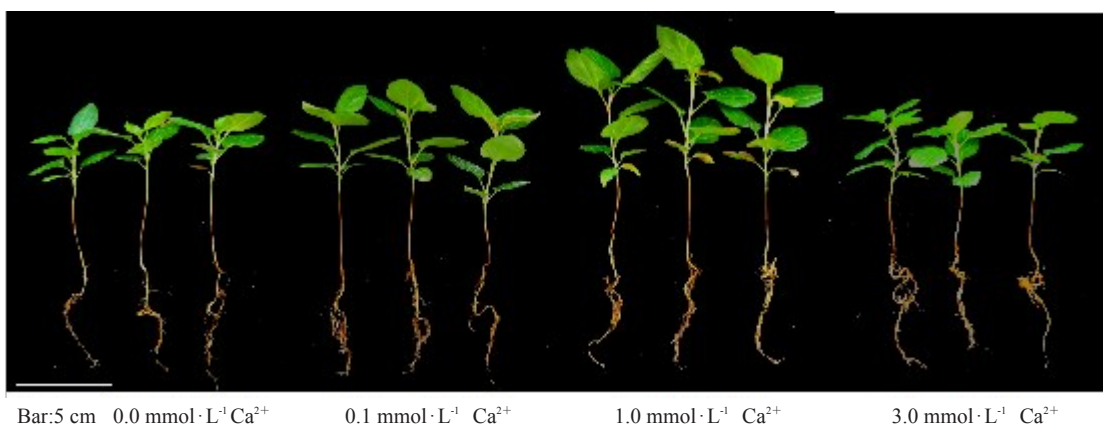


图1 不同施钙水平对平邑甜茶幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of different levels of calcium application on the growth of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

表1 不同施钙水平对平邑甜茶鲜质量的影响

Table 1 Effects of different levels of calcium application on fresh weight of various parts of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

$c(\text{CaCl}_2)/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	地下部鲜质量 Underground fresh mass/g	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass/g	总鲜质量 Total fresh mass/g
0.0	0.179±0.017 c	0.389±0.005 b	0.568±0.020 d
0.1	0.217±0.021 b	0.409±0.010 b	0.626±0.026 bc
1.0	0.203±0.011 bc	0.544±0.025 a	0.747±0.036 a
3.0	0.194±0.011 bc	0.398±0.021 b	0.591±0.022 cd

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

Note: Values followed by different letters in a column are significant difference among treatments at the 5% level. The same below.

随着钙浓度逐渐增加,平邑甜茶的鲜质量呈现先升高后降低的趋势,且1.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时,平邑甜茶幼苗地上部鲜质量与总鲜质量最重,其地上部鲜质量与总鲜质量分别为0.544、0.747 g,比不施加钙的处理分别提高了39.8%、31.5%;0.1  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时,平邑甜茶幼苗根部鲜质量最重,比不施加钙的处理提高了21.2%。为了进一步观测钙处理对平邑甜茶幼苗生物量的影响,随后检测了各处理干重的变化。

施加不同浓度梯度的钙对平邑甜茶幼苗干质量的影响由表2所示,随着钙浓度逐渐增加,平邑甜茶的干质量也呈现先升高后降低的趋势,且1.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时,平邑甜茶幼苗地上部干质量与总干质量最重,其地上部干质量与总干质量分别为0.191、0.232 g,比不施加钙的处理分别提高了41.5%、41.5%;平邑甜茶幼苗根部干质量在0.1  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时最重,比不施加钙的处理提高了55.2%。

表2 不同施钙水平对平邑甜茶干质量的影响

Table 2 Effects of different levels of calcium application on dry weight of various parts of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

$c(\text{CaCl}_2)/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	地下部干质量 Underground dry mass/g	地上部干质量 Aboveground dry mass/g	总干质量 Total dry mass/g
0.0	0.029±0.004 b	0.135±0.005 c	0.164±0.009 c
0.1	0.045±0.003 a	0.146±0.009 bc	0.191±0.012 b
1.0	0.042±0.004 a	0.191±0.008 a	0.232±0.005 a
3.0	0.044±0.003 a	0.156±0.003 b	0.201±0.003 ab

## 2.2 不同施钙水平对平邑甜茶幼苗地上部生长的影响

为了进一步观察钙素在哪些方面影响了植株生长,检测了不同钙浓度处理下平邑甜茶幼苗地上部

的各项生理指标。结果如图1、表3所示,随着施入的钙浓度的增加,幼苗的株高与叶面积呈现先升高后降低的趋势,且在1.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时最高,分别为4.966 cm、27.79  $\text{cm}^2$ ,比不施加钙处理分别增加了129.3%、49.2%;幼苗的茎粗随着钙浓度的增加而增加,3.0  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时最高,为0.925 cm,比不施加钙处理增加了22.8%。

表3 不同施钙水平对平邑甜茶株高、叶面积、茎粗的影响

Table 3 Effects of different levels of calcium application on plant height, leaf area and stem diameter of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

$c(\text{CaCl}_2)/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	株高 Plant height/ cm	叶面积 Leaf area/ $\text{cm}^2$	茎粗 Stem diameter/ cm
0.0	2.166±0.115 d	18.63±1.112 c	0.753±0.046 c
0.1	3.502±0.191 b	23.05±1.075 b	0.768±0.034 bc
1.0	4.966±0.263 a	27.79±1.301 a	0.837±0.032 b
3.0	3.004±0.242 c	19.00±0.956 c	0.925±0.033 a

## 2.3 不同施钙水平对平邑甜茶幼苗根系生长的影响

同时笔者发现不同钙处理间根长、根系总表面积、根尖数以及根系活力均存在显著性差异。如表4所示,随着钙浓度的增加平邑甜茶幼苗根系各项指标呈现先增大后降低的趋势。其中在0.1  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时,平邑甜茶幼苗根系长度较长、根系总表面积较大,且根尖数较多以及根系活力较高,分别是136.12 cm、3.86  $\text{cm}^2$ 、1 215个、118.40  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,与不施加钙处理相比分别增加了24.1%、26.6%、17.3%、129.9%。

表4 不同施钙水平对平邑甜茶幼苗根系生长的影响

Table 4 Effects of different levels of calcium application on root development of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

$c(\text{CaCl}_2)/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	根长 Root length/cm	总表面积 Total surface area/ $\text{cm}^2$	根尖数 Root number	根系活力 Root activity/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )
0.0	109.71±5.99 bc	3.05±0.18 bc	1 036±114 bc	51.49±2.18 c
0.1	136.12±13.63 a	3.86±0.19 a	1 215±95 a	118.40±3.86 a
1.0	116.56±6.54 b	3.35±0.31 b	1 079±88 ab	90.01±6.13 b
3.0	97.03±7.36 c	2.65±0.29 c	880±17 d	54.24±3.46 c

## 2.4 不同施钙水平对氮素吸收利用的影响

为了证实确实是钙素引起了苹果植株生长的变化,检测了幼苗总钙含量(地上部、地下部),从图2看出植株内钙含量确实随着外施钙浓度的增加而增加。为了探究钙素是在哪些方面影响了苹果氮素利用率,进一步检测了平邑甜茶幼苗 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 以及N

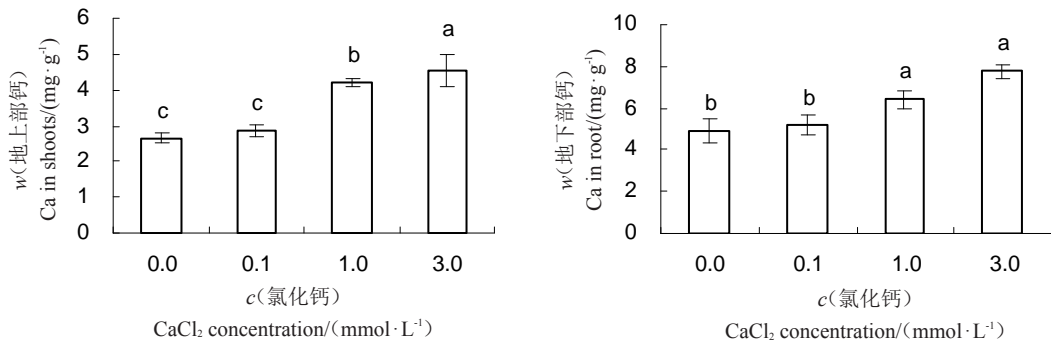


图 2 不同施钙水平下平邑甜茶幼苗总钙含量

Fig. 2 Total calcium contents in *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under different calcium application levels

含量。结果如图 3 所示, 外施不同浓度梯度的 CaCl<sub>2</sub>, 可以显著促进平邑甜茶幼苗对硝态氮的吸收。在 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 处理时地下部硝态氮含量最高, 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 处理时地上部硝态氮含量最高; 同时检测了氮同化中间过渡产物铵态氮的含量, 对于铵态氮而言, 随着施钙水平的提高, 地下部铵态氮含量是逐渐降低的, 地上部铵态氮含量基本保持不

变。随着钙浓度的提高, 平邑甜茶幼苗总氮含量显著升高, 在 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 处理时幼苗总氮含量最高, 地下部增加了 43.1%; 地上部增加了 65.9%。

### 2.5 不同施钙水平对氮同化关键酶活性的影响

为了进一步探究外源钙素与氮素之间的关系, 检测了氮同化通路中最关键的两酶活性。如图 4 所示, 随着施钙浓度的增加, 硝酸还原酶活性呈现先

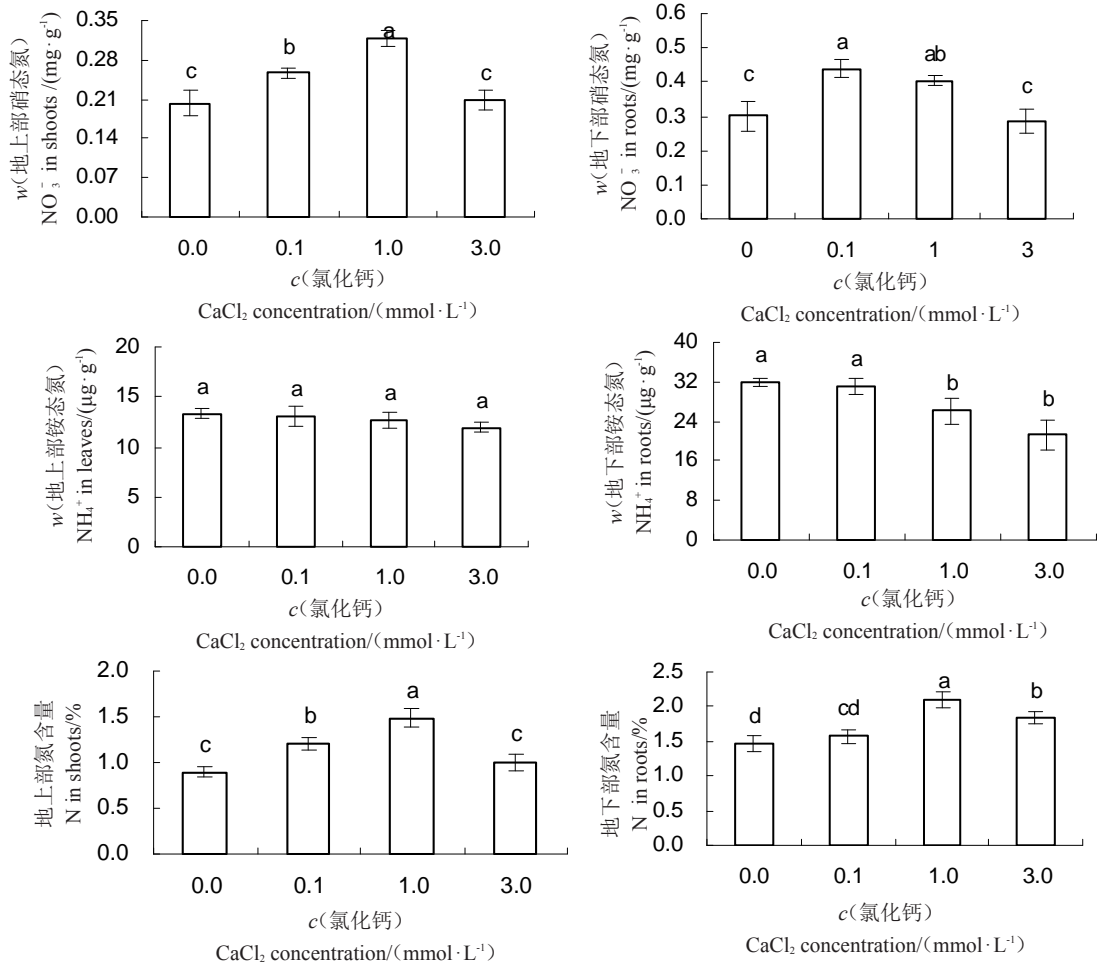


图 3 不同施钙水平下平邑甜茶幼苗 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以及 N 的含量

Fig. 3 Contents of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and N in *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under different levels of calcium application

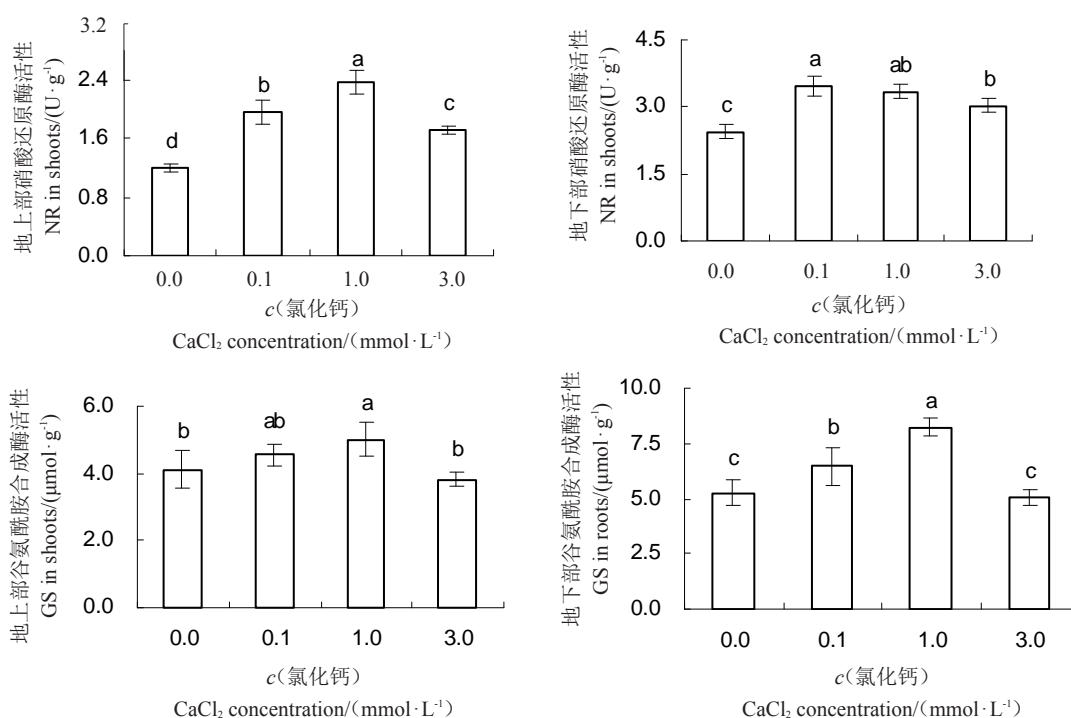


图4 不同施钙水平下平邑甜茶幼苗 NR、GS 酶活性

Fig. 4 NR and GS enzyme activities of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under different levels of calcium application

升高后降低的趋势,与底物硝态氮含量相似,在 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时地下部硝酸还原酶活性最高, $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时地上部硝酸还原酶活性最高;谷氨酰胺合成酶活性也呈现先升高后降低的趋势,幼苗地下部与地上部的谷氨酰胺合成酶活性在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时最高。

## 2.6 不同施钙水平对其他矿质元素含量的影响

从图5看出,随着钙处理浓度升高,幼苗地上部磷含量整体呈现逐渐下降的趋势,幼苗根部磷含量整体呈现先上升后下降的趋势,并在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高;幼苗钾、铁、镁、锌以及钼含量整体呈现先上升后下降的趋势,根中钾含量在 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高,地上部钾含量在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高;根中铁含量在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高,地上部铁含量在 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高;幼苗各部位镁、锌含量在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高;根中钼含量在 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高,地上部钼含量在 $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$ 处理时达到最高。

## 3 讨 论

钙素作为植株体内的必要元素,在植物的生长发育中起着十分重要的作用<sup>[10-11]</sup>。本试验中外施钙

素可以显著促进平邑甜茶幼苗地上部和地下部干质量和鲜质量的积累。进一步研究发现, $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 明显的增加了平邑甜茶幼苗株高,同时促进了幼苗叶的发育, $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 促进了茎的横向生长。与地上部不同的是,低浓度的钙对于根系构型以及根系活力有最显著的促进作用。前人研究表明<sup>[20-21]</sup>,根系吸收水分和营养,从而供给地上部生长,地上部合成有机物运输到根部,促进根系形态的建成,根和地上部是一个完整的良性循环体系。根系生长的状况越好越有利于植株从环境中吸收营养物质。本试验得到结果, $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 促进根系生长,但与 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 相比,地下部生物量并没有显著增加,而 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 对植株整体生长有更显著的促进作用。笔者猜测, $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 都促进了氮吸收,并且 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}^{2+}$ 更显著地促进了氮从地下部到地上部的转运。

接下来检测的 $\text{NO}_3^-$ 含量结果,进一步支持了笔者的推测。在低浓度钙水平下,幼苗根系中 $\text{NO}_3^-$ 的含量较高。在中等钙浓度下,幼苗叶茎中 $\text{NO}_3^-$ 的含量较高。说明与对照相比,低等、中等浓度的钙有利于 $\text{NO}_3^-$ 的吸收,并且中等浓度的钙更利于 $\text{NO}_3^-$ 由地下部向地上部的转运。

氮素的同化对于植物的生长发育是一个很重要

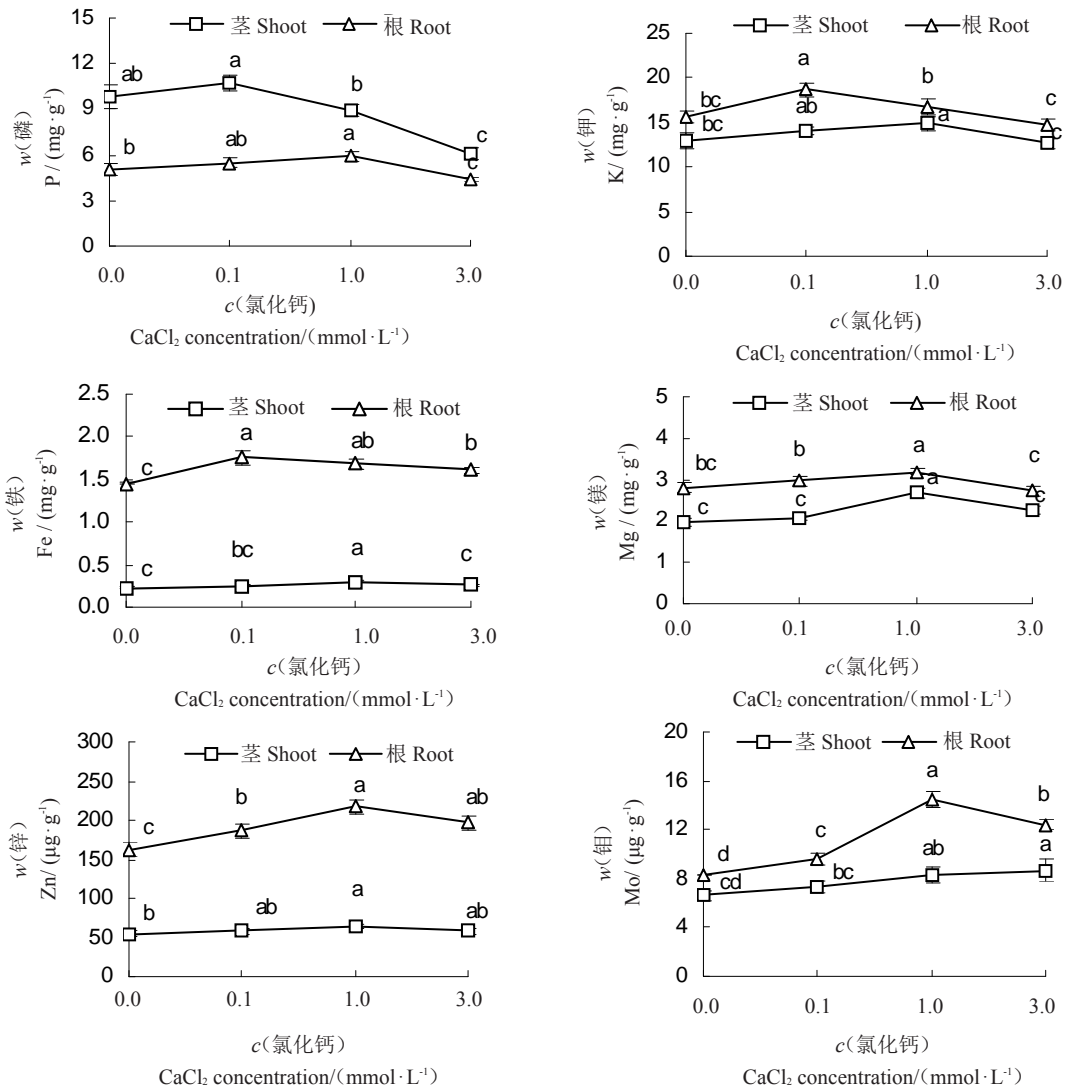


图 5 不同施钙水平对其他矿质元素含量的影响

Fig. 5 Effects of different levels of calcium application on the contents of other mineral elements

的生理过程<sup>[14]</sup>。高等陆生植物中硝态氮是最主要的吸收方式。首先硝态氮被幼苗根系吸收,在维持根系可以正常生长的条件下,大部分硝态氮会被转运到地上部同化。与此同时硝态氮会在NR酶的存在下被同化为铵<sup>[4-5]</sup>,铵离子会对植物造成危害,所以会在短时间内在GS酶的催化下同化为有机氮<sup>[6]</sup>,从而被植物顺利利用。笔者在检测氮同化中间产物以及氮同化过程中关键酶活性时发现,幼苗根中NR酶活性在0.1 mmol·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>水平下最高,叶茎中NR酶活性在1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>水平下最高;幼苗根和叶茎中GS酶活性在1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>水平下最高。外施钙素对幼苗根中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的含量也有明显影响,随着Ca<sup>2+</sup>浓度的升高,幼苗中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的含量逐渐降低,这一点与王志强等<sup>[15]</sup>的结果相反。这个结果可能表明

对于苹果幼苗而言,外施钙可以增加NR与GS酶活性,并且对GS酶活性的提高更显著,从而促进了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>进一步同化,降低NH<sub>4</sub><sup>+</sup>对植物造成的毒害。3.0 mmol·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>处理下平邑甜茶幼苗NH<sub>4</sub><sup>+</sup>含量较低,可能是3.0 mmol·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>处理下NR酶活较低导致的。

最后笔者检测了平邑甜茶幼苗中各部位的总氮量,作为衡量幼苗氮同化能力强弱的指标。从试验结果看,Ca<sup>2+</sup>显著影响了平邑甜茶幼苗氮的同化量,且在1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>处理下最高。幼苗内总钙含量随着施钙量的增加而增加也证明钙确实被植株体吸收。幼苗体内其他矿质元素检测结果表明了外施钙素不仅仅影响了氮的吸收,也可以或多或少促进或者抑制其他矿质元素的吸收。暗示了其他元素与氮素之间可能存在着种种联系,或许钙素在中间起

着重要的调节作用。

## 4 结 论

本试验揭示了外源钙促进了平邑甜茶幼苗氮素的吸收及利用,且  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 可能是正常氮素处理下平邑甜茶幼苗氮素吸收以及利用的最佳钙浓度。

### 参考文献 References:

- [1] 吕殿青,同延安,孙本华,EMTERYD O. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):8-15.  
LÜ Dianqing, TONG Yan'an, SUN Benhua, EMTERYD O. Study on the effect of nitrogen application on environmental pollution[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1998,4(1): 8-15.
- [2] 葛顺峰,朱占玲,魏绍冲,姜远茂. 中国苹果化肥减量增效技术途径与展望[J]. 园艺学报,2017,44(9):1681-1692.  
GE Shunfeng, ZHU Zhanling, WEI Shaochong, JIANG Yuanmao. Technical approach and Prospect of reducing chemical fertilizer and increasing efficiency of apple in China[J]. Acta Horticultura Sinica, 2017,44 (9): 1681-1692.
- [3] DUTILLEUL C, LELARGE C, PRIOUL J L, DE P R, FOYER C H, NOCTOR G. Mitochondria-driven changes in leaf NAD status exert a crucial influence on the control of nitrate assimilation and the integration of carbon and nitrogen metabolism[J]. Plant Physiology, 2005, 139(1): 64-78.
- [4] CAMPBELL W H, REDINBAUGH M G. Ferric-citrate reductase activity of nitrate reductase and its role in iron assimilation by plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 1984, 7(1/5): 799 - 806.
- [5] 刘丽,甘志军,王宪泽. 植物氮代谢硝酸还原酶水平调控机制的研究进展[J]. 西北植物学报,2004,24(7):1355 - 1361.  
LIU Li, GAN Zhijun, WANG Xianze. Advances of studies on the regulation of nitrate metabolism of plants at nitrate reductase level[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(7): 1355 - 1361.
- [6] KRONZUCKE H J, BRITTO D T, DAVENPORT R J, TESTER M. Ammonium toxicity and the real cost of transport[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6(8): 335-337.
- [7] KROUK G, CRAWFORD N M, CORUZZI G M, TSAY Y F. Nitrate signaling: adaptation to fluctuating environments[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 3(3): 265-272.
- [8] ALVAREZ J M, VIDAL E A, GUTIÉRREZ R A. Integration of local and systemic signaling pathways for plant N responses[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2012, 15(2): 185-191.
- [9] RAHAYU Y S, WALCH-LIU P, NEUMANN G RÖMHELD V, VON WIRÉN N, BANGERTH F. Root-derived cytokinins as long-distance signals for  $\text{NO}_3^-$ -induced stimulation of leaf growth [J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 56(414): 1143-1152.
- [10] 周卫,林葆. 植物钙素营养机理研究进展[J]. 土壤学进展, 1995,23(2):12-17.  
ZHOU Wei, LIN Bao. Research progress on the mechanism of plant calcium nutrition[J]. Progress in Soil Science, 1995, 23 (2): 12-17.
- [11] CLAPHZM D E. Calcium signaling[J]. Cell, 1995, 27(1): 259-268.
- [12] 郑远,陈兆进. 植物细胞器钙信号研究进展[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1195-1203.  
ZHENG Yuan, CHEN Zhaojin. Advances in the study of calcium signals in plant organelles[J]. Plant Physiology Communications, 2015, 51(8): 1195-1203.
- [13] RIVERAS E, ALVAREZ J M, VIDAL E A, OSES C, VEGA A, GUTIERREZ R A. The calcium ion is a second messenger in the nitrate signaling pathway of *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology, 2015, 169(2): 1397-1404.
- [14] 鲁翠涛,李合生,王学奎. 钙对小麦氮同化关键酶活性的影响及其与蛋白质磷酸化的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 28(1): 110-114.  
LU Cuitao, LI Hesheng, WANG Xuekui. Effect of calcium on the activities of key enzymes of nitrogen assimilation in wheat and its relationship with protein phosphorylation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 28 (1): 110-114.
- [15] 王志强,王春丽,林同保. 外源钙离子对小麦幼苗氮素代谢的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3662-3667.  
WANG Zhiqiang, WANG Chunli, LIN Tongbao. Effects of exogenous calcium ions on nitrogen metabolism in wheat seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3662-3667.
- [16] 赵世杰,史国安,董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2000.  
ZHAO Shijie, SHI Guo'an, DONG Xinchun. Plant physiology experimental guide[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 相里炳铨. 磺酸水杨酸法测定土壤硝态氮[J]. 北京农业科学, 1993, 11(3): 28-30.  
XIANGLI Bingquan. Determination of nitrate nitrogen in soil by sulfonic salicylic acid method[J]. Beijing Agricultural Sciences, 1993, 11(3): 28-30.
- [18] BRÄUTIGAM A, ANDREAS D G, WEBER P M. High-throughput colorimetric method for the parallel assay of glyoxylic acid and ammonium in a single extract[J]. Analytical Biochemistry, 2007, 362(1): 151 - 153.
- [19] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 1993.  
ZHANG Zhiliang. Experiment guide for plant physiology [M]. 2 ed. Beijing: Higher Education Press. 1993.
- [20] 刘弋菊,孔箐铨,苏胜宝. 玉米氮素代谢机制的研究进展[J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 135-138.  
LIU Yiju, KONG Jingzi, SU Shengbao. Study progress on maize nitrogen metabolism[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17 (1): 135-138.
- [21] 陶荣荣,蔡晗,朱庆权,周益雷,王康平,余超,侯丹平,刘海浪,张耗. 水稻高产高效的根-冠互作机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(5): 1-4.  
TAO Rongrong, CAI Han, ZHU Qingquan, ZHOU Yilei, WANG Kangping, YU Chao, HOU Danping, LIU Hailang, ZHANG Hao. Research progress on root-shoot interaction mechanism of high yield and high efficiency in rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34 (5): 1-4.