植物营养与肥料学报 2015,21(3):727-733 doi: 10.11674/zwyf.2015.0320
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

钼对苹果砧木平邑甜茶幼苗硝态氮吸收、转化及分配的影响

刘 利, 欧志锋, 姜远茂, 魏绍冲*
(作物生物学国家重点实验室,山东果蔬优质高效生产协同创新中心,山东农业大学园艺科学与工程学院,山东泰安 271018)

摘要:【目的】氮肥利用率低是制约果树产业可持续发展的重要因素之一。过量施用氮肥以及不当的农业措施造成当前多数苹果果园发生不同程度的土壤酸化,而钼在酸性土壤中有效含量的降低会影响氮素吸收利用效率。本试验旨在探索能提高氮肥吸收利用效率的适宜钼用量,了解钼对苹果砧木平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rehd.)幼苗硝态氮吸收、转化和分配利用特性的影响,为苹果生产中钼肥与氮肥的合理施用提供科学数据。**【方法】**以平邑甜茶幼苗为试验材料,采用全硝态氮霍格兰营养液进行培养。试验设置5个供钼水平:营养液不含钼(CK);营养液含0.25 μmol/L钼酸(M1);营养液含0.5 μmol/L钼酸(M2);营养液含1.5 μmol/L钼酸(M3);叶片喷0.04%钼酸,营养液不含钼(M4)。运用^{15}N同位素示踪技术,研究不同供钼水平对幼苗^{15}N吸收量、全氮量、分配率和利用率的影响,同时测定钼对不同时期幼苗叶片和根系硝酸还原酶活性的影响。**【结果】**供钼处理幼苗的根系活力不同程度地高于不施钼处理(对照),其中营养液含0.5 μmol/L钼酸的处理(M2)效果最佳。培养8 d内M2处理的平邑甜茶幼苗的根系硝酸还原酶活性一直高于其他处理,且与对照差异显著;培养4 d时各种处理的叶片硝酸还原酶活性上升至最高值,随后下降,8 d后又出现上升和下降的趋势,但上升幅度明显小于培养4 d。M1、M2、M3和M4处理的植株总干重分别比CK提高3.88%、21.12%、12.38%和19.90%。与对照相比,0.5 μmol/L钼酸处理幼苗的^{15}N吸收量增加的比例最大,全氮量表现出相同的趋势。供钼处理的氮肥利用率均明显高于对照,其中以0.5 μmol/L钼酸处理的效果最显著,利用率为13.97%,比对照高48.92%。施钼处理对幼苗的^{15}N分配率有一定的影响,0.5 μmol/L钼酸处理(M2)和叶片喷施0.04%钼酸处理(M4)的茎和叶片的^{15}N分配率明显高于对照,对照根系中^{15}N分配率最高。0.5 μmol/L钼酸处理叶片、茎和根的Ndff均达到最高,分别为对照同一部位的1.59倍、1.56倍和1.33倍。以上结果表明适量供钼可促进幼苗对肥料^{15}N的吸收征调利用。**【结论】**供钼可以提高苹果砧木平邑甜茶幼苗的生物量、根系活力、^{15}N吸收量、全氮量和^{15}N利用率,其中经过0.5 μmol/L钼酸处理(M2),其对平邑甜茶幼苗生长及硝态氮吸收、转化和分配利用的影响最显著。

关键词: 钼; 平邑甜茶; ^{15}N; 吸收; 分配; 利用
中图分类号: S661.1.601; S143.7+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0727-07

Effect of molybdenum on absorption, transformation and distribution of nitrate-nitrogen of apple rootstock *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

LIU Li, OU Zhi-feng, JIANG Yuan-mao, WEI Shao-chong*
(*State Key Laboratory of Crop Biology/Shandong Collaborative Innovation Center for Fruit and Vegetable Production with High Quality and Efficiency/College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai' an, Shandong 271018, China*)

Abstract:【Objectives】 The low nitrogen fertilizer use efficiency restricts sustainable development of fruit industry. Excessive application of nitrogen fertilizer and improper agricultural measures lead to soil acidification with different degrees in current apple orchards in China, and soil acidification can cause low content of soil available molybdenum, which decreases nitrogen fertilizer use efficiency. The aim of the study was to explore appropriate molybdenum (Mo) level to enhance nitrogen fertilizer use efficiency of *Malus hupehensis* Rehd.

收稿日期: 2014-06-14 **接受日期:** 2014-06-30
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-28);公益性行业(农业)科研专项资金(201103003)资助。
作者简介: 刘利(1989—),女,山东东平人,硕士研究生,主要从事果树营养诊断和施肥研究。E-mail: 15153871569@163.com
* 通信作者 Tel: 0538-8242134, E-mail: scwei@sdau.edu.cn

seedlings, and provide scientific data for utilization of nitrogen and molybdenum fertilizer in apple industry. 【**Methods**】*Malus hupehensis* Rehd. seedlings were used as experiment materials and the Hoagland solution with nitrate N was used as only N source in the study. The experiment included five different Mo levels: control (CK, no Mo in solution), M1 (0.25 μmol/L molybdic acid in solution), M2 (0.5 μmol/L molybdic acid in solution), M3 (1.5 μmol/L molybdic acid in solution) and M4 (spraying 0.04% molybdic acid, no Mo in solution). Effects of Mo on absorption, transformation, and distribution of nitrate-nitrogen in the seedlings were detected using the ^{15}N-labeled tracer method, meanwhile effects of Mo on nitrate reductase (NR) activity of leaves and roots in *Malus hupehensis* Rehd. seedlings were analysed in the study. 【**Results**】Mo can enhance root activity of the seedlings with different degrees and the treatment with 0.5 μmol/L Mo in solution has the highest effect in the study. The NR activity in roots of the treatment with 0.5 μmol/L Mo is higher than that of the other treatments on the 8 d, and there is significant difference between the treatment with 0.5 μmol/L Mo and the control. The leaf NR activities in all the treatments reach the maxima on the 4 d and then decrease. The dry weight amounts of M1, M2, M3 and M4 treatments are higher than that of the control and are increased by 3.88%, 21.12%, 12.38% and 19.90%, respectively. The ^{15}N absorption of M2 treatment is the largest and as well as the total N. The ^{15}N utilization ratios of all Mo treatments are higher than that of the control, and the treatment with 0.5 μmol/L Mo has the highest ratio of 13.97%, which is 48.92% higher than that of the control. Mo also has obvious effect on the ^{15}N distribution ratios in the seedlings. The ^{15}N ratios in stems and leaves of M2 treatment and M4 treatment are significantly higher than those of the control, while the highest ^{15}N distribution ratio in roots is found in the control. The Ndff values of leaves, stems and roots of M2 treatment are the highest among all the treatments, which are 1.59-, 1.56- and 1.33-fold compared with the same part in the control respectively. These results show that appropriate Mo supply can enhance the ^{15}N absorption, ^{15}N distribution and ^{15}N utilization of the seedlings. 【**Conclusions**】Mo can enhance biomass, root activity, ^{15}N absorption, the total N and the ^{15}N utilization ratio of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings. In short, the treatment with 0.5 μmol/L Mo is regarded as the most appropriate content to the growth, absorption, transformation, distribution and utilization of nitrate-nitrogen in *Malus hupehensis* Rehd. seedlings.

Key words: molybdenum; *Malus hupehensis* Rehd.; ^{15}N; absorption; utilization; distribution

钼是高等植物正常生长发育和生理代谢所必需的微量元素之一,其作用主要通过含钼酶来实现[1-2]。目前能证明存在于高等植物体内的有硝酸还原酶(Nitrate reductase, NR)、黄嘌呤脱氢酶(Xanthine dehydrogenase, XDH)、醛氧化酶(Aldehyde oxidase, AO)、亚硫酸盐氧化酶(Sulfite oxidase, SO)4种[3-5]。其中硝酸还原酶是氮素同化过程中的关键限速酶,钼是其活性成分,参与硝态氮还原为氨的过程,在植物的氮素代谢过程中发挥着重要作用[6-7]。研究还发现,钼可影响冬小麦叶绿素合成产物在叶绿体基质内的转化,施钼可促进叶绿素的合成,进而提高产量[8]。

植物氮素代谢中,铵态氮与硝态氮是两个互相依赖的氮素形态,它们之间保持着一定的平衡,平衡的协调程度与钼供应有关[9]。钼可增强大豆和花生的根系活力和根瘤生物量,降低叶片硝态氮的含量,增强硝酸还原酶的活性,从而促进植株氮素吸收利用以及氮素向籽粒的转移[10-11]。在非豆科植物中,施钼对小麦叶片硝酸还原酶有激活作用,能促进小麦的氮代谢,降低体内硝酸盐的含量,增加铵态氮的含量,进而提高氮肥利用效率[12-13]。钼和镍配合施用可以增加水稻叶片、茎和籽粒中的全氮含量,提高氨基酸和蛋白质含量[14]。用钼酸铵作基肥或喷施钼酸铵增产显著,亦可明显降低花椰菜花球硝酸盐含量,提高维生素C和可溶性糖含量[15]。对缺钼植株叶面喷钼可以明显提高美乐葡萄坐果率和果穗重量,降低畸形果粒的比例[16]。可见,合理施用钼肥可以提高硝态氮转化利用效率以及有效地改善果实品质。

当前,不当的农业措施及化肥过量施用等造成当前山东省多数苹果果园土壤发生不同程度的酸化,而钼在酸性条件下易与土壤中的游离铁、铝生成沉淀[17],使得有效钼含量降低,进而影响氮素吸收利用效率,因此提高肥料利用率对保护生态环境和农业可持续发展具有重要的意义。本试验以霍格兰完全营养液为培养基质,运用同位素示踪技术,研究

不同供钼水平对平邑甜茶幼苗硝态^{15}N 吸收、转化及分配特性的影响,为苹果生产中钼肥与氮肥的合理施用提供科学数据。

1　材料与方法

1.1　材料与试验设计

试验于 2013 年 3 ～9 月在山东农业大学园艺试验站进行。选取平邑甜茶幼苗为试验材料。种子经 4℃层积处理发芽后播入营养钵中,长到 5 片真叶时选取生长一致的幼苗移至塑料容器中培养。幼苗定植于泡沫板上,每板 9 孔,每孔定植 10 株,培养时加入营养液 3 L,营养液每日定时通气。先用 1/2 Hoagland 营养液预培养 5 d,再换 Hoagland 营养液培养,每周更换一次培养液,试验所有溶液均用蒸馏水配制。待幼苗长到 10 片真叶左右时,选取各方面相对一致的幼苗,参照文献[9]的方法进行饥饿处理 7 d,以消耗植株中积累的硝态氮。然后分别用含 $Ca(^{15}NO_3)_2$(上海化工研究院生产,丰度为 10.20%)的霍格兰营养液培养 20 d。

试验设 5 个供钼水平:1)营养液不含钼(CK);2)营养液含 0.25 μmol/L 钼酸(M1);3)营养液含 0.5 μmol/L 钼酸(M2);4)营养液含 1.5 μmol/L 钼酸(M3);5)叶片喷 0.04% 钼酸,营养液不含钼(M4)。营养液以全硝态氮[5 mmol/L $Ca(^{15}NO_3)_2$]为唯一氮源,每个处理 3 次重复。转入营养液培养后,每隔 4 d 取样测定幼苗的根系活力和根系及叶片的硝酸还原酶(NR)活性等。并于 12 d 幼苗长到 14 ～15 片真叶左右时,取样测定^{15}N 的分配、吸收及利用状况。

1.2　分析项目和方法

根系活力采用 TTC 法测定。硝酸还原酶(NR)活性参照李合生[18]的方法测定。植株解析参照文献[19]进行,分为根、茎和叶片 3 部分,放入烘箱中经 105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重,称重,研磨粉碎后过 0.25 mm 筛,装袋备用。植株全氮用凯氏定氮法测定[20]。^{15}N 丰度在中国农业科学院原子能利用研究所用 MAT－251 质谱仪测定。

1.3　数据处理

Ndff(%) = (植物样品中^{15}N 丰度% －^{15}N 自然丰度%)/(肥料中^{15}N 丰度% －^{15}N 自然丰度%) ×100

器官^{15}N 吸收量(g) = Ndff×器官全氮量(g)

器官全氮量(g) = 器官生物量(g) × 氮含量(%)

氮肥利用率(%) = 器官^{15}N 吸收量/施肥量(g) ×100

氮肥分配率(%) = 各器官从氮肥中吸收的氮量(g)/总吸收氮量(g) ×100

试验数据采用 DPS7.05 软件进行单因素方差分析,LSD 法进行差异显著性检验,应用 Microsoft Excel 2003 绘制图表。

2　结果与分析

2.1　不同供钼水平对平邑甜茶幼苗根系活力的影响

根系活力水平的高低直接影响植物矿质元素的吸收和地上部的生长[21-22]。由图 1 可以看出,各种供钼幼苗的根系活力水平一直高于同期对照的水平。除对照在第 4 d 根系活力达到最大值之外,其余各处理均在第 8 d 达到最大值,M1、M2、M3 和 M4 处理分别为 CK 的 1.76 倍、2.11 倍、1.49 倍和 2.04 倍,随后各处理的根系活力开始下降。

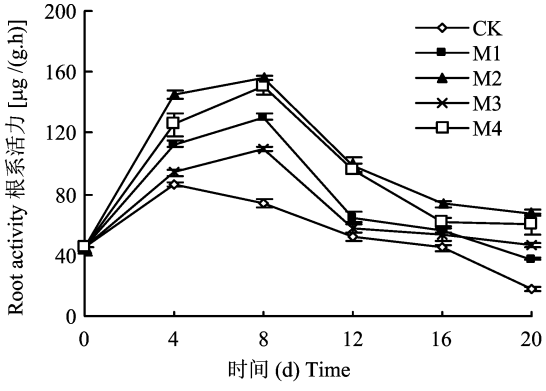

图 1　不同钼水平对平邑甜茶幼苗根系活力的影响

Fig. 1　Effect of different Mo levels on root activity of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

2.2　不同供钼水平对平邑甜茶幼苗根系硝酸还原酶(NR)活性的影响

硝酸盐饥饿处理后的平邑甜茶幼苗体内的硝态氮含量较低,当转移到全硝态氮营养液后大量地吸收硝态氮,从而诱导根系硝酸还原酶活性的提高。因此硝酸还原酶活性 4 d 时快速上升,并于 8 d 时各处理均达到最大值(图 2)。培养 8 d 内,M2 处理的幼苗根系硝酸还原酶活性一直高于其他处理,且与 CK 有显著差异。培养至 12 d 时,CK 处理的幼苗根系硝酸还原酶活性高于其他处理,16 d 后各种处理间差异不显著。

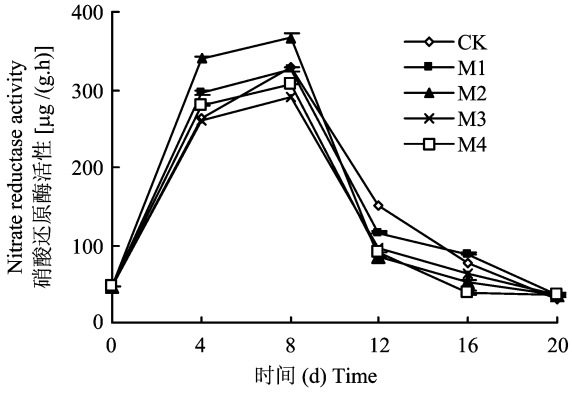

图2 不同钼水平对平邑甜茶幼苗根系硝酸还原酶活性的影响

Fig. 2 Effect of different Mo levels on nitrate reductase acitivity in roots of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

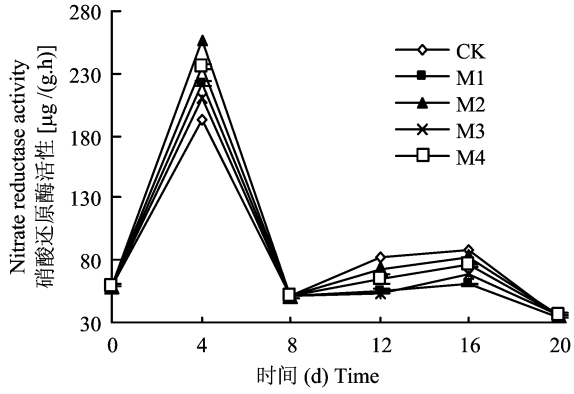

图3 不同钼水平对平邑甜茶幼苗叶片硝酸还原酶活性的影响

Fig. 3 Effect of different Mo levels on nitrate reductase acitivity in leaves of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings

2.3 不同供钼水平对平邑甜茶幼苗叶片硝酸还原酶(NR)活性的影响

平邑甜茶幼苗经硝酸盐饥饿处理后转入到全硝态氮营养液进行培养,4 d 时各处理叶片的硝酸还原酶活性上升至最高值,然后下降,8 d 后又出现上升和下降的趋势,但上升幅度明显小于第 4 d(图3)。第 4 d 时,M2 处理的叶片硝酸还原酶活性比 CK 提高 33.79%,而 M3 处理仅提高 9.94%。第 8 d 时,各处理叶片硝酸还原酶活性均降到 50 μg/(g·h)左右。培养至 12 d 时,对照处理的硝酸还原酶活性上升幅度最大。方差分析显示,到 20 d 时各处理间幼苗叶片硝酸还原酶活性无显著差异($P>0.05$)。

2.4 不同供钼水平对植株生物量的影响

由表1可以看出,M1、M2、M3 和 M4 处理的总干重分别比对照提高 3.88%、21.12%、12.38% 和 19.90%。叶片干重 M4 和 M2 处理提高的幅度最大。M2、M3 和 M4 处理的根部干重也显著高于对照,但这3个处理间差异不显著。

表1 不同钼水平下的植株生物量(g/plant)

Table 1 The biomass of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under different Mo levels

处理 Treatment	叶片干重 Dry weight of leaves	茎干重 Dry weight of stems	根部干重 Dry weight of roots	总干重 Total dry weight
CK	1.30 ±0.14 b	1.40 ±0.05 bc	1.42 ±0.10 bc	4.12 ±0.13 c
M1	1.37 ±0.04 b	1.36 ±0.13 c	1.55 ±0.12 ab	4.28 ±0.18 c
M2	1.63 ±0.10 a	1.64 ±0.08 a	1.72 ±0.16 a	4.99 ±0.16 a
M3	1.39 ±0.11 b	1.56 ±0.12 ab	1.68 ±0.10 a	4.63 ±0.07 b
M4	1.64 ±0.01 a	1.58 ±0.14 ab	1.72 ±0.12 a	4.94 ±0.38 ab

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.5 不同供钼水平下植株各器官的 Ndff

Ndff 是指植株器官从肥料 ^{15}N 中吸收分配到的 ^{15}N 量对该器官全氮量的贡献率,它反映了植株器官对肥料 ^{15}N 的吸收征调能力[23]。不同处理平邑甜茶幼苗各种器官的 Ndff 具有较大差异(表2)。M2 处理叶片、茎和根的 Ndff 均达到最高,分别为对照的1.59倍、1.56倍和1.33倍。方差分析表明,M2 和 M4 处理各种器官的 Ndff 均显著高于对照($P<0.05$)。

表 2　不同钼水平下植株各器官的 Ndff(%)

Table 2　The Ndff values of various organs under different Mo levels

处理 Treatment	叶片 Leaves	茎 Stems	根 Roots
CK	3.16 ± 0.43 c	5.02 ± 0.57 c	10.02 ± 0.70 c
M1	3.90 ± 0.46 bc	5.91 ± 0.48 bc	12.33 ± 1.50 ab
M2	5.02 ± 0.16 a	7.83 ± 1.20 a	13.35 ± 0.86 a
M3	3.70 ± 0.58 bc	5.75 ± 0.71 bc	11.12 ± 0.58 bc
M4	4.27 ± 0.29 b	6.36 ± 0.30 b	12.41 ± 0.69 ab

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.6　不同供钼水平的植株各器官的全氮量和 ^{15}N 吸收总量

表 3 显示,随着营养液供钼水平的提高,平邑甜茶幼苗的全氮量和 ^{15}N 吸收总量呈先上升后下降的趋势。与对照相比,M2 处理的全氮量增加的比例最大,其次是 M4 和 M3 处理,M1 处理最小。植株 ^{15}N 吸收总量也表现出同样的趋势。

表 3　不同钼水平下植株的全氮量和 ^{15}N 吸收总量(mg)

Table 3　The total N and ^{15}N absorption of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under different Mo levels

处理 Treatment	全氮量 Total N	^{15}N 吸收总量 ^{15}N absorption
CK	78.82 ± 2.50 bc	5.55 ± 0.32 c
M1	82.24 ± 2.65 c	6.49 ± 0.74 bc
M2	94.20 ± 6.36 a	8.83 ± 1.23 a
M3	87.83 ± 5.56 ab	6.89 ± 0.55 b
M4	93.40 ± 5.47 a	7.39 ± 0.19 b

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.7　不同供钼水平的植株 ^{15}N 利用率

不同供钼水平之间氮肥利用率差异显著,其中 M2 处理高达 13.97%,而对照仅为 9.38%(图 4)。M1、M2、M3 和 M4 处理分别比对照提高 21.26%、48.92%、11.96% 和 38.44%。

2.8　不同供钼水平的植株各器官 ^{15}N 分配率

器官中 ^{15}N 占全株 ^{15}N 总量的百分率反映了肥料氮在树体内的分布及在各器官迁移的规律[24]。^{15}N主要分配在根系中,其次是茎,叶片最少(表 4)。

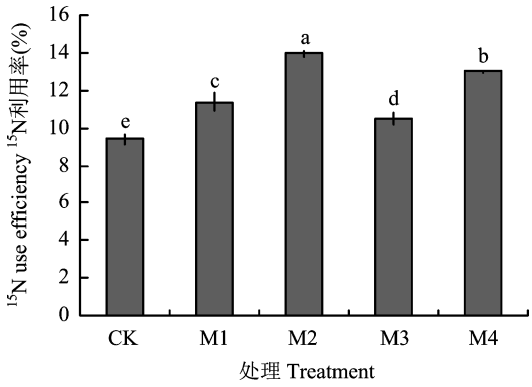

图 4　不同钼水平下植株的 ^{15}N 利用率(%)

Fig. 4　^{15}N Use efficiency of seedlings under different Mo levels

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% level.]

表 4　不同钼水平下植株各器官的 ^{15}N 分配率(%)

Table 4　^{15}N distribution ratios of leaves, shoots and roots under different Mo levels

处理 Treatment	叶片 Leaves	茎 Stems	根 Roots
CK	11.73 ± 1.11 b	17.18 ± 0.96 c	71.09 ± 0.20 a
M1	12.63 ± 1.80 b	20.55 ± 1.18 bc	66.82 ± 1.19 a
M2	16.26 ± 1.27 a	22.54 ± 2.23 ab	61.20 ± 1.11 b
M3	12.04 ± 1.27 b	19.61 ± 4.58 bc	68.35 ± 5.59 a
M4	16.76 ± 0.90 a	25.96 ± 1.56 a	57.28 ± 1.56 b

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

M2 和 M4 处理地上部 ^{15}N 分配率明显高于对照,叶片分别提高 38.80% 和 42.72%。方差分析表明,M1 和 M3 处理 ^{15}N 分配率和对照无显著差异。

3　讨论

氮素是生态系统中最重要、最活跃的营养元素之一,也是影响果实产量和品质的重要因素[25-27]。硝酸盐是果树氮素的重要来源,通过硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的共同作用转变为铵,进入植物氮代谢途径,合成氨基酸和核苷酸等成分,并进一步影响到植物碳素代谢过程,起到以氮增碳作用。硝酸还原酶的活性受 NO_3^- 和 Mo 共同诱导[28-29],因此植株缺钼后其活性降低,施钼后活性恢复,其活性的高低决定着硝酸盐同化为有机氮化物的速度。本试验结

果表明,饥饿处理的植株转移到硝态氮营养液后,大量硝态氮进入细胞质,诱导硝酸还原酶的合成,因此根系和叶片的硝酸还原酶活性急剧上升,但不同处理的提高幅度明显不同,0.5 μmol/L 钼酸处理的提高幅度一直最大,0.25 μmol/L和 1.5 μmol/L 钼酸处理次之。随着叶片硝酸还原酶活性的提高,大量的硝态氮被还原,细胞质中的硝态氮浓度下降,与此同时硝酸还原酶活性相应下降,随后又略有上升,这可能与氮素的转化与运输趋于动态平衡有关。由于平邑甜茶幼苗叶片生物量远大于具有吸收矿质元素功能的根系,因此叶片可能是硝态氮转化的主要器官。

适宜浓度钼供应不但可以有效地降低小麦硝态氮的累积,促进铵态氮形成,而且能促进小麦吸收更多的氮素,增加小麦有机氮含量[9]。单施钼肥明显降低大白菜硝酸盐的含量,促进氮素的吸收利用,钼锌与复合生物肥配施可提高大白菜品质,增加产量[30]。本试验研究表明,当钼浓度为 0.5 μmol/L 钼酸时平邑甜茶幼苗的氮肥利用率为 13.97%,而对照仅为 9.38%,其比对照提升达 48.92%,钼浓度为 0.25 μmol/L 和 1.5 μmol/L 钼酸处理的氮肥利用率均明显低于 0.5 μmol/L 钼酸处理,叶片喷钼也可以起到提高氮肥利用率的效果。0.5 μmol/L 钼酸处理各种器官 Ndff 值均显著高于对照,1.5 μmol/L钼酸处理各种器官中的 Ndff 出现下降,与对照无显著差异。0.5 μmol/L 钼酸处理根系活力较高,茎和叶片的^{15}N 分配率高于对照,但 0.25 μmol/L和 1.5 μmol/L 钼酸处理叶片和根部^{15}N 分配率和对照差异并不显著,表明合适浓度的钼供应可能更有利于地上部的生长发育,提高植株氮素吸收利用效率。由于叶片中的钼可能难于向根系运输,因此喷钼主要提高叶片硝酸还原酶活性,对根系硝酸还原酶活性影响不大。喷钼处理的叶片^{15}N 分配率最高,而 0.5 μmol/L 钼酸处理根系吸收的钼则可以通过蒸腾作用运输到叶片,因此叶片和根系的硝酸还原酶活性都有较大程度提高(图 2,图 3)。

喻敏等[31]研究表明,钼高效冬小麦品种 97003 和钼低效冬小麦品种 97014 在相同缺钼逆境下,97003 钼利用率较高,可获得较高的产量,而 97014 则表现出严重的缺钼症状,产量不到施钼处理的一半。因此,钼高效苹果砧木品种筛选将对苹果产业的良性发展具有重要意义。

4 结论

施钼可不同程度地提高苹果砧木平邑甜茶幼苗的根系活力水平及根系和叶片的硝酸还原酶活性,其中以营养液浓度为 0.5 μmol/L 钼酸处理的效果最好。0.5 μmol/L 钼酸处理的植株^{15}N 利用率最高,各种器官的 Ndff 值也均最大。供钼可以提高植株茎和叶片的^{15}N 分配率,叶面喷施 0.04% 钼酸提高的幅度最大,其次为 0.5 μmol/L 钼酸处理。

参考文献:

[1] Mendel R R, Hansch R. Molybdoenzymes and molybdenum cofactor in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(375): 1689-1698.

[2] Nivol C L, Leimkühler S. Molybdenum enzymes, their maturation and molybdenum cofactor biosynthesis in *Escherichia coli*. [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2013, 1827(8-9): 1086-1101.

[3] Mcgratha S P, Micóa C, Curdy R, Zhao F J. Predicting molybdenum toxicity to higher plants: Influence of soil properties [J]. Environmental Pollution, 2010, 158: 3095-3102.

[4] Hille R, Nishino T, Bittner F. Molybdenum enzymes in higher organisms[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2011, 255(9): 1179-1205.

[5] Zdunek Z E, Lips H S. Plant molybdoenzymes and their response to stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2003, 25(4): 437-452.

[6] Kaiser B N, Gridley K L, Brady J N *et al*. The role of molybdenum in agricultural plant production [J]. Annals of Botany, 2005, 96(5): 745-754.

[7] Mendel R R, Kruse T. Cell biology of molybdenum in plants and humans[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2012, 1823(9): 1568-1579.

[8] 喻敏, 胡承孝, 王运华. 低温条件下钼对冬小麦叶绿素合成前体的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 702-708.
Yu M, Hu C X, Wang Y H. Effect of molybdenum on the precursors of chlorophyll biosynthesis in winter wheat cultivars under low temperature[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 702-708.

[9] 门中华, 李生秀. 钼对冬小麦硝态氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 205-210.
Men Z H, Li S H. Effects of molybdenum on nitrate metabolism of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 205-210.

[10] 刘鹏, 杨玉爱. 钼、硼对大豆氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 347-351.
Liu P, Yang Y I. Effect of molybdenum and boron on nitrogen metabolism of soybean [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(4): 347-351.

[11] 张智猛, 万书波, 戴良香, 等. 施氮水平对不同花生品种氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 280-290.
Zhang Z M, Wan S B, Dai L X *et al*. Effects of nitrogen application rates on nitrogen metabolism and related enzyme activities of two different peanut cultivars [J]. Scientia

Agricultura Sinica, 2011, 44(2): 280-290.

[12] 孙学成，胡承孝，谭启玲，等. 施用钼肥对冬小麦游离氨基酸，可溶性蛋白质和糖含量的影响[J]. 华中农业大学学报，2002, 21(1): 40-43.
Sun X C, Hu C X, Tan Q L *et al*. Effects of molybdenum application on contents of free amino acid, soluble sugar and protein of winter wheat at different growth stages[J]. Journal of Huazhong Agricutural University, 2002, 21(1): 40-43.

[13] Yu M, Hu C X, Sun X C, Wang Y H. Influences of Mo on nitrate reductase, glutamine synthetase and nitrogen accumulation and utilization in Mo-efficient and Mo-inefficient winter wheat cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 9(3): 355-361.

[14] Moraes M F, Reis A R, Moraes L A C *et al*. Effects of molybdenum, nickel and nitrogen sources on the mineral nutrition and growth of rice plants[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(21-22): 3238-3251.

[15] 朱凤林. 钼、硼对花椰菜产量及品质的影响[J]. 园艺学报，2005, 32(2): 310-313.
Zhu F L. Effects of Mo and B on the yield and quality of cauliflower[J]. Acta Horticiturae Sinca, 2005, 32(2): 310-313.

[16] Longbottom M L, Dry P R, Sedgley M. Effects of sodium molybdate foliar sprays on molybdenum concentration in the vegetative and reproductive structures and on yield components of *Vitis vinifera* cv. Merlot[J]. Austalian Journal of Grape Wine Research, 2010, 16(3): 477-490.

[17] 龚子同，黄标，欧阳洮. 我国土壤地球化学及其在农业生产中的意义[J]. 地理科学，1998, 18(1): 1-9.
Gong Z T, Huang B, Ouyang T. Pedogeochemistry of China and its significance in agriculture[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(1): 1-9.

[18] 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. 123-128.
Li H S. Experimental principle and technique for plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 123-128.

[19] 王海宁，葛顺峰，姜远茂，等. 施氮水平对五种苹果砧木生长、以及氮素吸收、分配和利用特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012, 18(5): 1262-1268.
Wang H N, Ge S F, Jiang Y M *et al*. Effects of nitrogen fertilization on growth characteristics and absorption, distribution and utilization of $NH_4{}^{15}NO_3$ of five apple rootstocks[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1262-1268.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000.
Bao S D. Analytical methods for soil agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[21] 生利霞，束怀瑞. 低氧胁迫对平邑甜茶根系活力及氮代谢相关酶活性的影响[J]. 园艺学报，2008, 35(1): 7-12.
Sheng L X, Shu H R. Effects of hypoxia on the root activity, respiratory rate and the activities of enzymes involved in nitrogen metabolism in roots of *Malus hupehensis* Rehd. [J]. Acta Horticiturae Sinca, 2008, 35(1): 7-12.

[22] Li Z J, Xie X Y, Zhang S Q, Liang Y C. Negative effects of oxytetracycline on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth, root activity, photosynthesis, and chlorophyll contents[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 10(10): 1545-1553.

[23] 顾曼如，束怀瑞，周宏伟. 苹果氮素营养研究Ⅴ. 贮藏 N 的运转、分配特性[J]. 园艺学报，1986, 13: 25-30.
Gu M R, Shu H R, Zhou H W. A study on the nitrogen nutrition of apple trees Ⅴ. The characters of translocation and distribution of the reserved ^{15}N[J]. Acta Horticiturae Sinca, 1986, 13: 25-30.

[24] 徐季娥，林裕益，吕瑞江，等. 鸭梨秋施^{15}N-尿素的吸收与分配[J]. 园艺学报，1993, 20(2): 145-149.
Xu J E, Lin Y Y, Lu R J *et al*. Studies on the absorption and the distribution of ^{15}N-labelled urea to 'Yali' pear trees following autumn application[J]. Acta Horticiturae Sinca, 1993, 20(2): 145-149.

[25] 彭福田，姜远茂，顾曼如，束怀瑞. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2003, 9(2): 208-213.
Peng F T, Jiang Y M, Gu M R, Shu H R. Effect of nitrogen on apple fruit hormone changing trends and development[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 208-213.

[26] Warner J, Zhang T Q, Hao X. Effects of nitrogen fertilization on fruit yield and quality of processing tomatoes[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2004, 84(3): 865-871.

[27] Raese J T, Drake S R, Curry E A. Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of 'Golden Delicious'[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(10): 1585-1604.

[28] Mendel R R, Bittner F. Cell biology of molybdenum[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2006, 1763(7): 621-635.

[29] 孙学成，胡承孝. 高等植物含钼酶与钼营养[J]. 植物生理学通讯，2005, 41(3): 395-399.
Sun X C, Hu C X. Molybdoenzymes and molybdenum nutrition in higher plants[J]. Plant Physiology Communications, 2005, 41(3): 395-399.

[30] 段晓琴. 钼锌与不同肥料配施对大白菜硝酸盐积累及品质的影响[J]. 北方园艺，2010, (22): 53-55.
Duan X Q. Effects of Mo and Zn microelement fertilizer prescribe fertilizing on nitrate accumulation and qualities of Chinese cabbage[J]. Northern Horticulturae, 2010, (22): 53-55.

[31] 喻敏，胡承孝，王运华. 不同钼效率冬小麦品种钼的吸收和分配[J]. 中国农业科学，2004, 37(11): 1749-1753.
Yu M, Hu C X, Wang Y H. Molybdenum efficiency in winter wheat cultivars as related to molybdenum uptake and distribution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(11): 1749-1753.