福建农业学报 2022,37（5）:626−631 http://www.fjnyxb.cn
Fujian Journal of Agricultural Sciences doi: 10.19303/j.issn.1008-0384.2022.005.010

夏营，曹洪建，丁荔，等. 钼对新疆野苹果幼苗生长和氮吸收利用特性的影响［J］. 福建农业学报，2022，37（5）：626−631.
XIA Y, CAO H J, DING L, et al. Effects of Molybdenum on Growth and Nitrogen Uptake/Utilization of *Malus sieversii* Seedlings［J］. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*，2022，37（5）：626−631.

钼对新疆野苹果幼苗生长和氮吸收利用特性的影响

夏　营[1]，曹洪建[1]，丁　荔[1]，王　龙[1]，姜颖霖[1]，田　歌[2]，姜远茂[2*]

（1. 山东省威海市农业科学院，山东　威海　264200；2. 山东农业大学园艺科学与工程学院，山东　泰安　271018）

摘　要：【目的】 研究钼对苹果砧木新疆野苹果幼苗生长和氮吸收利用特性的影响，为苹果生产中科学施钼，提高氮素利用率提供理论依据。**【方法】** 以新疆野苹果幼苗为试材，设置5个供钼水平：CK、M1、M2、M3、M4，相应为0.00、0.25、0.50、1.50、3.00 μmol·L^{-1} 的 $H_2MoO_4·H_2O$。运用^{15}N示踪技术，研究不同供钼水平对^{15}N利用率和各器官Ndff值（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）的影响，同时测定不同钼含量对幼苗生长、根系形态及活力和叶片中硝酸还原酶活性的影响。**【结果】** 与CK相比，施钼显著提高了幼苗各器官的生物量和^{15}N利用率，并且随着施钼水平的增加均表现为先升高后下降的趋势，至M2处理时均达到最大值，^{15}N利用率相对于CK处理提高了123%。0.00~0.50 μmol·L^{-1} 钼水平下，新疆野苹果根系长度、表面积及根尖数均显著增加，叶片中硝酸还原酶（NR）活性和根系活力显著提高，各器官Ndff值也显著增加，而1.50~3.00 μmol·L^{-1} 钼处理显著抑制了根系的生长，新疆野苹果幼苗根系长度、表面积、根尖数量均显著下降，叶片中NR活性及根系活力、各器官的Ndff值也表现出下降趋势，各指标均与M1处理差异不显著。**【结论】** 0.50 μmol·L^{-1} 的钼酸处理，一方面有利于植株生长和根系发生，增强对氮素的吸收；另一方面提高了硝酸还原酶活性，通过推进氮还原的进程促进了氮素的利用。因此，在此浓度钼酸处理下幼苗^{15}N利用率最高。

关键词： 新疆野苹果；钼；根系；氮素；^{15}N利用率

中图分类号： S 661.1　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1008-0384（2022）05−0626−06

Effects of Molybdenum on Growth and Nitrogen Uptake/Utilization of *Malus sieversii* Seedlings

XIA Ying[1], CAO Hongjian[1], DING Li[1], WANG Long[1], JIANG Yinglin[1], TIAN Ge[2], JIANG Yuanmao[2*]

（1. *Weihai Academy of Agricultural Sciences*, *Weihai*, *Shandong*　264200, *China*; 2. *College of Horticulture Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian*, *Shandong*　271018, *China*）

Abstract: 【Objectives】 Effects of molybdenum (Mo) on the growth and nitrogen uptake/utilization of *Malus sieversii* seedlings were studied for the cultivation and crop production improvements.【Methods】 *M. sieversii* seedlings were grown under 5 levels of Mo supply equivalent to 0.00 (CK), 0.25 (M1), 0.50 (M2), 1.50 (M3), and 3.00 μmol·L^{-1} (M4) $H_2MoO_4·H_2O$. The ^{15}N utilization and Ndff (i.e., rate of ^{15}N absorbed by a plant organ from ^{15}N in fertilizer to total nitrogen in the organ) were determined using the ^{15}N labeled tracer method. The growth, root morphology, and nitrate reductase (NR) activity in leaves of the seedlings were monitored. 【Results】 The Mo applications significantly altered the biomass and ^{15}N utilization rate of seedlings in an increasing pattern with increasing Mo to peak at M2 (the ^{15}N utilization rate was 123% of that of CK), then followed by a decline. From 0 to 0.5 μmol Mo·L^{-1}, the length, surface area, number of tips and activities of the seedling roots, the NR in the leaves, and the Ndff of all organs significantly increased. But further increasing Mo from 1.5 to 3.0 μmol·L^{-1} caused significant decreases on all indicators to become not significantly different from those under the M1 treatment. 【Conclusions】 By treating potato rootstocks with Mo at 0.5 μmol·L^{-1}, the seedling growth, root formation, and plant nitrogen absorption were enhanced. The seedling ^{15}N utilization rate was maximized by the treatment that effectively promoted

收稿日期： 2021−12−23 初稿；2022−04−19 修改稿

作者简介： 夏营（1991−），男，农艺师，硕士，主要从事果树技术研究与推广工作（E-mail：956591705@qq.com）

* 通信作者：姜远茂（1964−），男，教授，博士生导师，主要从事果树营养生理和土壤肥力研究（E-mail：ymjiang@sdau.edu.cn）

基金项目： 国家现代农业产业技术体系建设项目（CARS-27）

nitrogen reduction due to the increased nitrate reductase activity.

Key words: *Malus sieversii*；molybdenum；root；nitrogen；^{15}N utilization

0　引言

【研究意义】氮素是植物生长发育所必需的生命元素[1]，对促进果树的生长、提高果树产量及果实品质具有重要的作用[2]，过量施氮不仅会导致氮素利用率偏低，而且造成了土壤质量、果实品质的下降和水污染等一系列问题。因此，研究如何减少氮肥的施用，促进氮素科学高效利用，对以节本增效、减少环境污染为主要目标的农业绿色可持续发展具有重要意义[3]。【前人研究进展】前人研究发现，钼在植物的氮代谢过程中扮演着非常重要的角色，钼可以参与到硝酸盐还原、固氮作用以及含氮化合物的运输等过程中，适量施用钼肥可以显著促进作物对氮素的吸收[4,5]。缺钼会导致植物不能有效利用和转化养分，造成植物体内营养分布失衡[6]。钼是硝酸还原酶的重要组分之一，合理供钼可通过组成钼酶或辅助因子催化氧化还原反应，提高硝酸还原酶的活性，加速 NO_3^-的还原，促进蛋白质合成，调控植物的碳、氮等生理代谢过程[7]。适当施钼能够促进草莓幼苗对氮素的吸收，显著提高氮素利用率[8]；施钼能显著提高玉米植株的钼含量，适宜的钼降低了植株的 NO_3^--N 浓度而增加了 NH_4^+-N 浓度，因此植株体内钼的稳态平衡可以提高植株对氮的吸收利用[9]。将氮肥和钼肥配施可以提高氨基酸、蛋白质的含量，可以提高硝酸还原酶的活性，可以降低硝态氮含量，提高苗蒜产量[10]。同时施钼还能明显提高烟叶钾含量和改善烟叶油分，提高烟叶品质[11]。适量钼供应可以明显提高小白菜[12]、甜瓜[13]、云南烤烟[14]、花生[15]等作物的产量。当前，苹果产业氮素投入过多，而对钼的重视程度不足，钼的不合理施用可能是导致氮素利用率过低的原因之一。【本研究切入点】综合前人研究表明，施钼可以促进作物对氮素的吸收，但是有关钼对苹果氮吸收利用的研究相对较少。【拟解决的关键问题】本文以一年生苹果砧木新疆野苹果为试材，运用^{15}N 同位素示踪技术，研究了 5 个不同钼水平对苹果砧木生长及氮素吸收利用的影响，以期为生产上钼肥的合理施用、促进氮素高效利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试材与设计

试验于 2018 年 3–8 月在山东农业大学园艺试验站完成。新疆野苹果（*Malus sieversii*）具有耐盐碱、抗旱、抗病虫、抗寒、耐瘠薄等特性[16]，在我国西北地区作为苹果生产的砧木被广泛利用[17]，笔者以一年生新疆野苹果为试验材料，于 2018 年 3 月初，将层积好的种子播在穴盘中，正常的温度湿度管理，当幼苗长出 4～5 片真叶时，将其移栽到装满石英砂的花盆中，石英砂在用前将其洗净晾干。移栽后缓苗 1 周，期间浇灌去离子水，缓苗后先用 1/2 浓度 Hoagland 营养液浇灌 1 周，随后每 5 d 浇 1 次 Hoagland 营养液，每次每盆 500 ml。

试验设 0.00（CK）、0.25（M1）、0.50（M2）、1.50（M3）、3.00（M4）μmol·L^{-1} $H_2MoO_4·H_2O$，其他营养元素与正常 Hoagland 营养液相同，每个处理重复 10 盆，每盆 4 株幼苗，本试验在避雨棚内进行。待幼苗长至 6～7 片真叶时（5 月 20 日），开始浇灌不同钼浓度的营养液。到试验结束时共浇灌营养液 20 次，每次 500 ml。每次浇灌营养液前用去离子水冲洗 3～5 次，将上次残留营养液冲洗干净，再浇灌新的营养液。其中每隔 1 次向每盆加入 0.01 g $Ca(^{15}NO_3)_2$（共施入 0.10 g，分 10 次加入，丰度为 10.20%）用于^{15}N 标记。于 2018 年 8 月 30 日测定根系活力、根系形态和氮素的吸收利用、分配等指标。

1.2　测定项目

1.2.1　*植株根系形态的测定*　每个处理选取 3 株幼苗，根部经去离子水清洗后，平铺于透明塑料板上，在水中展开，用专业版 WinRHIZO（2007 版）根系分析软件进行根总表面积、根尖数、根系总长度扫描分析。

1.2.2　*根系活力和叶片硝酸还原酶活性的测定*　每个处理选取长势基本一致、无病虫害的 3 株幼苗，采用氯化三苯基四氮唑（TTC）法测定根系活力，用四氮唑的还原强度（μg·h^{-1}·g^{-1}）表示根系活力（鲜根）。硝酸还原酶（NR）活性参照李合生[18]的方法测定。

1.2.3　*植株全氮和^{15}N 丰度的测量*　每个处理选取 3 株幼苗，分为根、茎、叶 3 部分，然后放入烘箱于 105 ℃杀青 30 min，随后 80 ℃烘干至恒重，用不锈钢电磨粉碎后过 0.25 mm 筛，测定器官全氮量和各器官的^{15}N 丰度。样品全氮用凯氏定氮法测定，^{15}N 丰度在中国农业科学院原子能研究所用 MAT-251 质谱仪测定。

1.3 数据处理

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

器官^{15}N 吸收量 = Ndff×器官全氮量。

氮肥利用率=（Ndff×器官全氮量）/施肥量×100%

用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理，用 DPS 数据处理系统进行单因素方差分析，*LSR* 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同供钼水平下新疆野苹果的生物量

由表 1 可以看出，M1、M2、M3 和 M4 处理的各器官干重都显著高于无钼对照（CK）。在 0～0.50 μmol·L^{-1} 钼水平时，新疆野苹果根、茎、叶生物量均随着钼浓度增加显著增大，至 M2（0.50 μmol·L^{-1}）处理时达到最大，之后随着钼浓度的进一步增加，各器官生物量显著降低，M4 处理的根、茎、叶和总生物量仅为 M2 处理的 73.96 %、63.08%、79.17% 和 73.15%。说明适量施钼促进了幼苗的生长，而钼浓度的过高或过低均抑制了幼苗生长。

表 1 不同钼水平下的植株生物量

Table 1 Biomass of *M. hupehensis* seedlings under Mo treatments

处理 Treatment	根干重 Dry weight of root/g	茎干重 Dry weight of stem/g	叶干重 Dry weight of leaf /g	总干重 Total dry weight/g
CK	0.62±0.03 e	0.39±0.02 d	0.63±0.02 e	1.63±0.03 e
M1	0.82±0.01 b	0.48±0.04 c	0.71±0.03 d	2.01±0.06 c
M2	0.96±0.03 a	0.65±0.01 a	0.96±0.03 a	2.57±0.06 a
M3	0.76±0.02 c	0.56±0.01 b	0.82±0.01 b	2.14±0.03 b
M4	0.71±0.02 d	0.41±0.02 d	0.76±0.01 c	1.88±0.04 d

同一列小写字母表示差异达0.05显著水平。表2～4同。

Data followed by lowercase letters on same column indicate significant difference at $P<0.05$. Same for Table 2–4.

2.2 不同供钼水平下新疆野苹果的根系形态指标和根系活力

供钼处理显著影响了新疆野苹果幼苗根系总长度、根系总面积、根尖个数及根系活力（表 2）。随着供钼水平的提高，新疆野苹果幼苗根系长度、根系总面积、根尖数和根系活力均呈先升高后降低的趋势。与 M2 处理相比，当供钼水平增加到 M3 和 M4 水平时，新疆野苹果幼苗根系长度、根系总面积、根尖数和根系活力显著下降，其中 M4 处理的根系活力仅为 M2 处理的 64.36%，但与 CK 处理间无显著差异，说明 0.5 μmol·L^{-1} 钼酸处理能显著促进幼苗根系生长，提高其根系活力。

表 2 不同供钼水平下新疆野苹果的根系形态指标

Table 2 Morphological indices of *M. sieversii* roots under Mo treatments

处理 Treatment	根系长度 Root Length/cm	根系总表面积 Total root surface area/cm^2	根尖数 Number of root tips/个	根系活力 Root activity/（μg·g^{-1}·h^{-1}）
CK	269.52±13.95 e	105.64±11.75 d	2 694.8±80.19 d	75.14±1.76 c
M1	447.56±29.56 b	119.97±8.27 c	3 011.6±101.59 c	85.14±2.09 b
M2	576.17±14.06 a	188.09±7.29 a	4 842.6±149.48 a	110.93±1.72 a
M3	399.09±17.68 c	143.38±6.36 b	3 424.2±152.93 b	83.77±0.60 b
M4	340.76±18.24 d	128.65±2.21 c	3 173.0±121.88 c	71.39±3.02 c

2.3 不同钼水平下植株各器官的 Ndff 值和叶片 NR 活性

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[19]。

由表 3 可以看出，不同钼水平下新疆野苹果幼苗各种器官的 Ndff 值差异显著。M2 处理叶片、茎、根的 Ndff 值均最高，分别为 CK 的 1.25 倍、1.18 倍和 1.19 倍，为 M4 处理的 1.18 倍、1.12 倍和 1.15 倍。表明适量施钼可以促进苹果幼苗各器官对氮的吸收征调能力。

与对照相比，所有供钼处理均显著提高了叶片 NR 活性（表 3）。随着供钼水平的提高，叶片 NR 活性呈现先升高后降低的趋势，M2 处理最高，其次是 M3 处理，M4 处理最低。因此，幼苗叶片硝酸还原酶活性受到 0.50 μmol·L^{-1} 钼酸处理的显著促进，受到低钼水平的显著抑制。

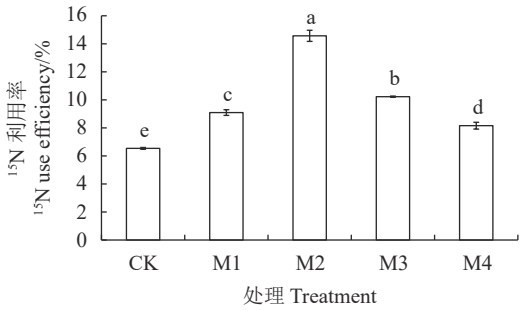
2.4 不同供钼水平的植株^{15}N 利用率

不同供钼水平之间氮肥利用率差异显著，M2 处理最高，M3 和 M1 处理，CK 处理最低（图 1）。与 CK 处理相比，M2 处理氮肥利用率提高了 123%，说明适量供钼可显著提高幼苗的^{15}N 利用率。

表 3　不同钼水平下植株各器官的 Ndff 值和叶片 NR 活性

Table 3　Ndff of organs and NR activity of leaves under Mo treatments

处理 Treatment	Ndff/%			NR活性 NR activity/ ($\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)
	叶片 Leaves	茎 Stems	根 Roots	
CK	0.73±0.02 d	1.12±0.03 d	1.09±0.02 c	10.44±0.39 d
M1	0.81±0.03 b	1.19±0.01 c	1.18±0.02 b	16.78±1.25 bc
M2	0.91±0.02 a	1.33±0.03 a	1.30±0.07 a	22.52±2.55 a
M3	0.78±0.02 bc	1.29±0.01 b	1.19±0.03 b	17.25±1.26 b
M4	0.77±0.02 c	1.19±0.01 c	1.13±0.01 bc	14.29±1.05 c



柱上不同字母表示处理间达 0.05 显著水平。

Different letters on top of columns indicate significant difference at $P<0.05$.

图 1　不同供钼水平的植株 ^{15}N 利用率

Fig. 1　^{15}N utilization efficiency of seedlings under Mo treatments

2.5　不同钼水平下植株的全氮量和 ^{15}N 吸收总量

表 4 显示，随着供钼水平的提高，新疆野苹果幼苗的全氮量和 ^{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，M3 和 M1 处理，M4 处理最小；植株 ^{15}N 吸收总量也表现出同样的趋势。这表明适量供钼可提高植株全氮量的累积和对 ^{15}N 的吸收。

表 4　不同钼水平下植株的全氮量和 ^{15}N 吸收总量

Table 4　Total N and ^{15}N absorption of *M. hupehensis* seedlings under Mo treatments

处理 Treatment	全氮量 Total N/mg	^{15}N吸收总量 ^{15}N absorption/mg
CK	29.53±0.34 e	0.27±0.01 e
M1	37.44±0.76 c	0.39±0.01 c
M2	53.56±0.86 a	0.62±0.02 a
M3	41.74±0.47 b	0.43±0.01 b
M4	35.44±0.96 d	0.35±0.01 d

3　讨论与结论

本研究结果表明，当钼酸在 0.50 $\mu mol \cdot L^{-1}$ 水平处理下根系活力处于最高水平，相对于 CK 处理能够显著促进根系的生长和根系活力的提高，与前人研究[20]结果一致；硝酸盐作为苹果氮素的重要来源，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[21]。钼作为植物体内硝酸还原酶的重要组分，影响着植株体内硝态氮的转化。相关研究证明，钼和氮相互促进，缺钼会使硝态氮向铵态氮转化受阻，导致硝态氮积累而使植物出现缺氮症状，施钼可促进植物体内氮素营养吸收转化[22]。本研究中，与对照相比，各供钼处理的叶片中硝酸还原酶活性均显著增加，随着供钼水平的增高，硝酸还原酶活性呈现先提高后下降的趋势。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，这可能与氮素的转化与运输趋于动态平衡有关。

前人研究发现，冬小麦低温期缺钼会产生黄化死苗现象，导致其产量严重降低，而施用钼肥则能促进冬小麦壮苗、壮蘖，并提高产量[23]。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[24]。氮同位素示踪技术能深入研究施入氮肥的去向及在作物体内的分配利用，为作物氮肥运筹管理提供理论依据[25]。本试验利用 ^{15}N 示踪技术发现，0.50 $\mu mol \cdot L^{-1}$ 钼酸处理时新疆野苹果幼苗全氮量和 ^{15}N 吸收总量显著高于其他处理，这与适宜钼含量供应可以有效地促进小麦吸收更多的氮素结果一致[26]。本试验结果表明，缺钼处理和钼过量处理条件下，植株的全氮量和 ^{15}N 利用率均会显著下降，这可能是因为缺钼处理和钼过量处理均会抑制根系的生长和硝酸还原酶的活性，从而抑制了植株对氮素的吸收，降低了 ^{15}N 利用率。

刘利等[27]研究了平邑甜茶幼苗在不同含量钼酸处理下的 ^{15}N 吸收利用情况，其 ^{15}N 利用率最高为 13.97%，略低于本试验的最适宜处理下的 ^{15}N 利用率，这可能是两方面的原因导致：一是所用试材不同，不同的苹果砧木幼苗对生产中不同的环境响应不同，平邑甜茶和新疆野苹果都是生产中较为常用的砧木，但平邑甜茶的根系对环境变化非常敏感[28]，而新疆野苹果的抗逆性较强，在各种环境中均能表现出不错的营养生长能力[29–31]，结合本文对根系形态指标的测定分析，因此新疆野苹果对氮素的吸收相对更强；另一方面是培养环境不同，刘利等[27]使用水培试验的方式，而本文采用砂培环境。通常苹果砧木幼苗的试验条件有 3 个，分别是水培、土培、砂培。水培的试验环境更为稳定，可以更精确的研究适宜的养分浓度，但是不适宜模拟土壤的物

理环境。土壤的物理结构是影响植物根系乃至整株生长的重要原因之一，土培的环境比较接近生产，但是土壤养分含量复杂，很难调节到适宜的水平去进行试验，尤其是对于微量元素的研究更为困难，因此本文中设置的砂培环境，既有利于研究适宜的养分浓度，又可以模拟土壤物理条件，接近于生产环境，细砂模拟的土壤物理结构会刺激植物根系的生长，进一步增强了对氮素的吸收。

综上所述，0.50 μmol·L^{-1} 的钼酸处理，一方面有利于植株生长和根系发生，增强对氮素的吸收；另一方面提高了硝酸还原酶活性，通过推进氮还原的进程促进了氮素的利用。因此，在此浓度钼酸处理下幼苗^{15}N 利用率最高。

参考文献：

[1] 张合琼, 张汉马, 梁永书, 等. 植物硝酸盐转运蛋白研究进展 [J]. 植物生理学报, 2016, 52（2）：141−149.
ZHANG H Q, ZHANG H M, LIANG Y S, et al. Research progress of nitrate in plant transport mechanism [J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52（2）: 141−149.（in Chinese）

[2] 李洪娜, 许海港, 任饴华, 等. 不同施氮水平对矮化富士苹果幼树生长、氮素利用及内源激素含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21（5）：1304−1311.
LI H N, XU H G, REN Y H, et al. Effect of different N application rates on plant growth, ^{15}N-urea utilization and hormone content of dwarf apple trees [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21（5）: 1304−1311.（in Chinese）

[3] STEFANELLI D, GOODWIN I, JONES R. Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients [J]. *Food Research International*, 2010, 43（7）: 1833−1843.

[4] NIE Z J, HU C X, LIU H E, et al. Differential expression of molybdenum transport and assimilation genes between two winter wheat cultivars (*Triticum aestivum*) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 82: 27−33.

[5] HU Y L, RIBBE M W. Biosynthesis of the iron-molybdenum cofactor of nitrogenase [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2013, 288（19）: 13173−13177.

[6] 喻敏, 王运华, 胡承孝. 种子钼对冬小麦硝酸还原酶活性、干物质重及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6（2）：220−226.
YU M, WANG Y H, HU C X. Influence of seed molybdenum on nitrate reductase activity, shoot dry matter and grain yield of winter wheat cultivars [J]. *Plant Natrition and Fertilizen Science*, 2000, 6（2）: 220−226.（in Chinese）

[7] KAISER B N, GRIDLEY K L, NGAIRE BRADY J, et al. The role of molybdenum in agricultural plant production [J]. *Annals of Botany*, 2005, 96（5）: 745−754.

[8] 刘利, 张蕊, 杨超, 等. 叶面喷施钼肥对草莓幼苗氮代谢关键酶活性与^{15}N吸收、分配及利用的影响 [J]. 植物生理学报, 2016, 52（7）：1035−1044.
LIU L, ZHANG R, YANG C, et al. Effect of sodium molybdate foliar sprays on key enzymes activities of nitrogen metabolism and ^{15}N absorption, distribution and utilization of strawberry seedlings [J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52（7）: 1035−1044.（in Chinese）

[9] KOVÁCS B, PUSKÁS-PRESZNER A, HUZSVAI L, et al. Effect of molybdenum treatment on molybdenum concentration and nitrate reduction in maize seedlings [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 96: 38−44.

[10] 刘红耀. 氮钼配施对大蒜生长发育、产量及品质的影响 [J]. 山西农业大学学报（自然科学版）, 2016, 36（2）：116−119,132.
LIU H Y. Effect of N and Mo fertilizer of different combination on the growth and development, yield and quality of garlic [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 36（2）: 116−119,132.（in Chinese）

[11] 李章海, 宋泽民, 黄刚, 等. 缺钼烟田施钼对烟草光合作用和氮代谢及烟叶品质的影响 [J]. 烟草科技, 2008, 41（11）：56−58,66.
LI Z H, SONG Z M, HUANG G, et al. Effects of molybdenum applying in tobacco field on photosynthesis, nitrogen metabolism and quality of tobacco [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2008, 41（11）: 56−58,66.（in Chinese）

[12] 聂兆君, 胡承孝, 孙学成, 等. 钼对小白菜叶色、营养品质及硝酸盐含量的影响 [J]. 中国蔬菜, 2008（8）：7−10.
NIE Z J, HU C X, SUN X C, et al. Effects of molybdenum on leaf color, nutritional quality and nitrate contents of Chinese cabbage [J]. *China Vegetables*, 2008（8）: 7−10.（in Chinese）

[13] 张宇, 施园, 马光恕, 等. 钼营养对甜瓜果实发育的影响 [J]. 北方园艺, 2016（13）：22−26.
ZHANG Y, SHI Y, MA G S, et al. Effect of molybdenum nutrition for fruit development of muskmelon [J]. *Northern Horticulture*, 2016（13）: 22−26.（in Chinese）

[14] 崔国明, 张辉. Mo肥对烟叶产量品质的影响 [J]. 烟草科技, 2000, 33（3）：39−41.
CUI G M, ZHANG H. Effects of Mo fertilizer on quality and yield of flue cured tobacco [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2000, 33（3）: 39−41.（in Chinese）

[15] 杜应琼, 廖新荣, 黄志尧, 等. 硼、钼对花生氮代谢的影响 [J]. 作物学报, 2001, 27（5）：612−616.
DU Y Q, LIAO X R, HUANG Z Y, et al. Effect of boron and molybdenum on nitrogen metabolism of peanut [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27（5）: 612−616.（in Chinese）

[16] 梅闯, 闫鹏, 艾沙江·买买提, 等. 新疆野苹果(*Malus sieversii*)受苹小吉丁虫危害程度与树皮厚度、径阶的关系 [J]. 中国农业科技导报, 2016, 18（4）：24−30.
MEI C, YAN P, AISHAJIANG M M T, et al. The relationship between bark thickness and diameter class on *Agrilus mali* damage in Xinjiang wild apple [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18（4）: 24−30.（in Chinese）

[17] 时强. 浅析新疆野苹果在库尔勒地区的引种表现以及其应用[C]. 2014 年3月建筑科技与管理学术交流会, 2014.

[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.

[19] 顾曼如, 束怀瑞, 周宏伟. 苹果氮素营养研究Ⅳ. 贮藏^{15}N的运转、分配特性 [J]. 园艺学报, 1986, 13（1）：25−30.

GU M R, SHU H R, ZHOU H W. A study on the nitrogen nutrition of apple trees iv-the characters of translocation and distribution of the reserved ^{15}n [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1986, 13（1）: 25−30.（in Chinese）

[20] 郜怀峰, 肖元松, 彭福田, 等. 含钼袋控复混缓释肥对土壤酶活性及桃树植株生长的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33（2）：220−226.

GAO H F, XIAO Y S, PENG F T, et al. Effects of molybdenum bag-controlled release fertilizer on soil enzyme activity and growth of peach [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33（2）: 220−226.（in Chinese）

[21] MENDEL R R, BITTNER F. Cell biology of molybdenum [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research*, 2006, 1763（7）: 621−635.

[22] 胡承孝, 王运华, 谭启玲, 等. 钼营养对冬小麦无机氮组分的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2001, 20（2）：125−129.

HU C X, WANG Y H, TAN Q L, et al. Effect of molybdenum nutrition on inorganic nitrogen compounds of winter wheat [J]. *Journal of Huazhong Agricultural*, 2001, 20（2）: 125−129.（in Chinese）

[23] YANEVA I A, HOFFMANN G W, TISCHNER R. Nitrate reductase from winter wheat leaves is activated at low temperature via protein dephosphorylation [J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 114（1）: 65−72.

[24] 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 in Chinese cabbage [J]. *Northern Horticulture*, 2010（22）: 53−55.（in Chinese）

[25] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 应用^{15}N研究氮肥运筹对棉花氮素吸收利用及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21（3）：590−599.

LI P C, DONG H L, LIU A Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer application strategy on N uptake, utilization and yield of cotton using ^{15}N trace technique [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21（3）: 590−599.（in Chinese）

[26] 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 X. Effects of molybdenum on nitrate metabolism of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11（2）: 205−210.（in Chinese）

[27] 刘利, 欧志锋, 姜远茂, 等. 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 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21（3）：727−733.

LIU L, OU Z F, JIANG Y M, et al. Effect of molybdenum on absorption, transformation and distribution of nitrate-nitrogen of apple rootstock *Malus hupehensis* Rehd. seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21（3）: 727−733.（in Chinese）

[28] 杨洪强, 接玉玲. 苹果砧木实生苗根系个体差异研究 [J]. 山东农业大学学报, 1997, 28（4）：487−491.

YANG H Q, JIE Y L. Studies of individual difference in seedlings of apple rootstock [J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1997, 28（4）: 487−491.（in Chinese）

[29] 谭冬梅. 干旱胁迫对新疆野苹果及平邑甜茶生理生化特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, 40（5）：980−986.

TAN D M. The physiology and biochemistry of programmed *Malus* siversii and M. hupehensis cell death under drought stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40（5）: 980−986.（in Chinese）

[30] 郑点, 吴玉霞, 覃伟铭, 等. 新疆野苹果作为苹果砧木利用的研究进展 [J]. 中国野生植物资源, 2019, 38（2）：56−59,65.

ZHENG D, WU Y X, QIN W M, et al. Advance in research on application of *Malus sieversii* as rootstock [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2019, 38（2）: 56−59,65.（in Chinese）

[31] 徐佳宁, 刘钢, 马盼, 等. 新疆野苹果逆境响应机制研究进展 [J]. 山东农业科学, 2014, 46（8）：138−141.

XU J N, LIU G, MA P, et al. Research progress of adversity response mechanism of *Malus sieversii* [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46（8）: 138−141.（in Chinese）

（责任编辑：黄爱萍）