

冷凉条件对山荆子幼苗根系氮素吸收动力学参数的影响

吕德国*, 王 英, 秦嗣军, 马怀宇, 刘国成, 杜国栋, 孟 倩

(沈阳农业大学园艺学院, 北方果树育种与生理生态研究所, 沈阳 110866)

摘 要: 采用常规耗竭法和改进耗竭法研究冷凉条件下山荆子 (*Malus baccata* Borkh.) 幼苗根系吸收不同形态氮素动力学特征。结果表明, 温度影响山荆子氮素吸收动力学特征, 常温 (25) 时山荆子根系载体蛋白对 NO_3^- 离子的亲和力大于 NH_4^+ 离子, 此时根系优先吸收 NO_3^- 离子; 冷凉 (10) 条件下山荆子幼苗对 NH_4^+ 离子的亲和力大于 NO_3^- 离子, 此时根系优先吸收 NH_4^+ 离子。冷凉条件降低了山荆子幼苗对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收能力, 表现为最大吸收速率 (I_{\max} 降低)、养分流入根系速率 (α 值降低) 和亲和力下降 (K_m 值增加), 其中对吸收 NO_3^- 离子的影响大于 NH_4^+ 离子。

关键词: 山荆子; 冷凉条件; 氮素; 吸收动力学

中图分类号: S 661

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2010) 09-1493-06

Effects of Cool and Cold Conditions on Nitrogen Uptake Kinetics in *Malus baccata* Borkh. Seedlings

Lü De-guo*, WANG Ying, QIN Si-jun, MA Huai-yu, LIU Guo-cheng, DU Guo-dong, and MENG Qian
(College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Research Laboratory for Breeding and Physiology-ecology of Northern Fruit Tree, Shenyang 110866, China)

Abstract: The method of conventional exhaustion and improved exhaustion was carried out to study the kinetics characteristics of nitrogen absorption in root of *Malus baccata* Borkh. seedlings in cool and cold conditions. The characteristics of nitrogen absorption kinetics were affected by cool and cold condition. In normal temperature (25) the affinity of NO_3^- was greater than that of NH_4^+ which indicated that root had the priority to absorb NO_3^- . But in cool and cold condition (10) the affinity of NH_4^+ was greater than that of NO_3^- , and in this moment the root had the priority to absorb NH_4^+ . The *M. baccata* Borkh. seedlings' absorption was decreased in cool and cold condition and it was indicated that the maximum absorption velocity, nutrient inflow velocity and affinity of NO_3^- and NH_4^+ were decreased in cool and cold condition. The influence of cool and cold condition in absorbing NO_3^- was greater than absorbing NH_4^+ .

Key words: *Malus baccata* Borkh.; cool and cold condition; nitrogen; uptake kinetics

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-05-18

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (nycyt-08-03-05); 辽宁省农业科技攻关计划项目 (2008204003); 辽宁省自然科学基金项目 (20082121)

* E-mail: lvdeguo@163.com

农业生产中普遍存在过量施氮现象,且施氮量呈逐年增加趋势(彭福田和姜远茂,2006),而根系对氮素利用率较低,过量的氮肥在土壤中积累或经雨水淋洗进入水体,导致次生盐渍化和水体富营养化现象,严重污染环境(司友斌等,2000;魏迎春等,2008)。因此如何提高植物对氮素的吸收和利用效率,找出影响氮素利用率的因素一直是国内外学者研究的重点。吸收、利用、转化以及根系对氮素吸收的动力学特征都会影响氮素利用率(孙敏等,2006;殷春渊等,2010)。

根系养分吸收动力学研究在研究植物对营养元素吸收方面占有重要地位。20世纪50年代初,Epstein和Hagen(1952)最早将酶促反应动力学方程应用于植物对离子吸收的研究,开创了植物吸收养分动力学研究的先河。70年代初期,Classen和Barber(1974)建立了根系养分吸收动力学方程,该方程中的离子最大吸收速率(I_{\max})和米氏常数(K_m)两个参数可定量描述植物吸收养分离子的特征,用于研究环境条件对植物吸收养分的影响。目前,吸收动力学研究在阐述栽培植物营养物质吸收特性方面的应用已十分普遍,前人对水稻(Youngdahl et al., 1982;汪晓丽等,2003)、空心菜(周晓红等,2008)、水曲柳(任军等,2008)、甜菜(赵越等,2006)、槐叶萍(Arunothai & Hans, 2009)、大叶藻(Lourdes et al., 2007)、美人蕉(Zhang et al., 2009)等植物根系氮素吸收动力学参数已经进行了较为广泛的研究,并比较了不同类型作物或品种对 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N吸收利用的差异,但研究结果不尽相同,且相关研究主要集中在大田作物和水生植物,对果树根系氮素吸收动力学的研究较少,只在葡萄(Yang et al., 2007)和柑橘(Miguel et al., 1997)中有所报道。

北方地区早春和初秋气温变化迅速而土温变化相对滞后,使根系处于冷凉胁迫状态,这种冷凉条件不同于0℃以下的低温,而是低于根系适温的亚低温环境,该环境严重影响果树根系对氮素的吸收和同化(Dong et al., 2001)。已有的研究表明,养分吸收动力学参数 I_{\max} 和 K_m 对温度较敏感(王永章等,2000)。因此,本试验中以北方生产中常用苹果砧木山荆子(*Malus baccata* Borkh.)为试材,探讨冷凉条件对其吸收不同形态氮素的影响,为明确早春施用氮肥的种类、合理比例和数量,提高氮素吸收效率,减少氮素过量引起的土壤污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试材培养

试验于2009年2-6月在沈阳农业大学果树科研基地温室中进行。山荆子种子经层积催芽后,于2月10日播种到育苗基质中,待长到5片真叶时挑选生长一致的幼苗移入装有基质的营养钵(12 cm × 13 cm)中,放入人工气候箱预培养。培养温度为25℃(昼)/15℃(夜),光照强度400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光照时间12 h,相对湿度70%~80%。预培养1个月后进行根系氮素吸收动力学试验。

1.2 试验处理

试验前两天将根系冲洗干净后放入无离子水中培养48 h,达到氮饥饿后,移入塑料瓶中进行根系吸收动力学试验。冷凉处理培养温度为10℃,以25℃常温处理为对照。

常规耗竭法:(1) NO_3^- 吸收动力学试验,将氮饥饿后的幼苗移入含有0.2 mmol · L⁻¹ CaSO₄和1 mmol · L⁻¹ KNO₃培养液中,pH调至6.5,培养液体积500 mL,每10株幼苗一组,3次重复。培养时间设为1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 h,每次取样后用蒸馏水补充。(2) NH_4^+ 吸收动力学试验,培养液为0.2 mmol · L⁻¹ CaSO₄和1 mmol · L⁻¹ NH₄Cl,其他操作过程与(1)相同。

改进耗竭法:(1)随 NO_3^- 浓度而变的 NO_3^- 吸收动力学试验,将氮饥饿后的幼苗移入含有0.2 mmol · L⁻¹ CaSO₄的KNO₃系列溶液中,KNO₃的浓度设为0、0.05、0.10、0.20、0.40、0.80、1.20、

2.00 mmol · L⁻¹ 8 个水平, 调节 pH 至 6.5, 培养液体积 200 mL, 每 4 株一组, 吸收 4 h 后取样测定。
(2) 随 NH₄⁺ 浓度而变的 NH₄⁺ 吸收动力学试验, 配制含 0.2 mmol · L⁻¹ CaSO₄ 的 NH₄Cl 的系列溶液, 溶液浓度和其他试验操作与常规耗竭法相同。所有试验均连续通气。

1.3 测定和计算方法

NO₃⁻ 离子用直接比色法测定, NH₄⁺ 离子采用纳氏试剂比色法测定。根据培养液浓度与吸收时间绘制根系离子吸收曲线, 再根据吸收曲线方程求出吸收动力学参数 I_{\max} 和 K_m (Classen & Barber, 1974)。采用 Microsoft Excel 2003 绘制图表, DPS7.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 冷凉条件下山荆子幼苗根系 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 吸收速率与时间的关系

由图 1 可知, 冷凉条件影响山荆子根系 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 吸收速率, 冷凉条件下根系 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 吸收量明显低于对照, 吸收 12 h 后, 二者吸收量分别比对照减少 0.113 和 0.036 mmol · L⁻¹。山荆子幼苗对 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的吸收进程有差异。常温条件下根系对 NH₄⁺ 的吸收量前 6 h 较多, 随后吸收量变化较小, 而根系对 NO₃⁻ 的吸收量开始较少, 6 h 后高于对 NH₄⁺ 的吸收量。冷凉条件下根系开始对 NH₄⁺ 的吸收量较大, 7 h 后低于对 NO₃⁻ 的吸收量。常温条件下, 山荆子根系对 NO₃⁻ 的吸收量高于对 NH₄⁺ 的吸收量, 但冷凉条件下山荆子对 NH₄⁺ 的吸收较多。山荆子根系对 NO₃⁻ 的吸收受温度影响较大, 而根系对 NH₄⁺ 的吸收受温度影响较小。

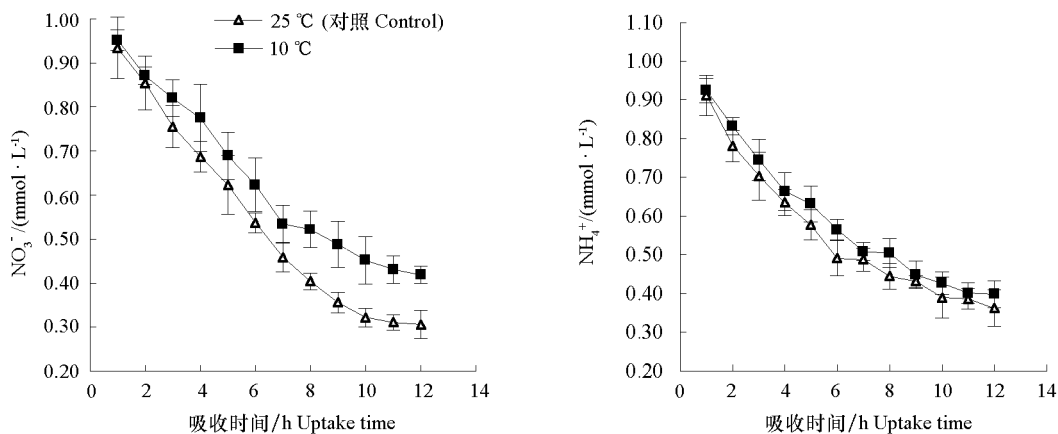


图 1 不同吸收时间对山荆子根系吸收 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 动力学曲线的影响

Fig. 1 Effects of different absorption time on the curve of NO₃⁻ and NH₄⁺ absorption kinetic of *M. baccata* Borkh. seedlings

2.2 冷凉条件下山荆子幼苗根系 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 吸收速率与培养液浓度的关系

不同温度下山荆子幼苗对 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 吸收速率随培养液浓度的增加而增加。当培养液浓度较低时, 吸收速率随培养液浓度增加迅速; 当培养液中 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 浓度大于 0.40 mmol · L⁻¹ 后, 根系对二者的吸收速率逐渐减缓并趋于饱和, 吸收减缓。当培养液浓度低于 0.10 mmol · L⁻¹ 时, 冷凉条件下根系对 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的吸收速率高于常温条件, 随着培养液浓度的提高冷凉条件下根系对 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的吸收速率低于常温对照。冷凉条件对山荆子吸收 NO₃⁻ 的影响大于 NH₄⁺ (图 2)。

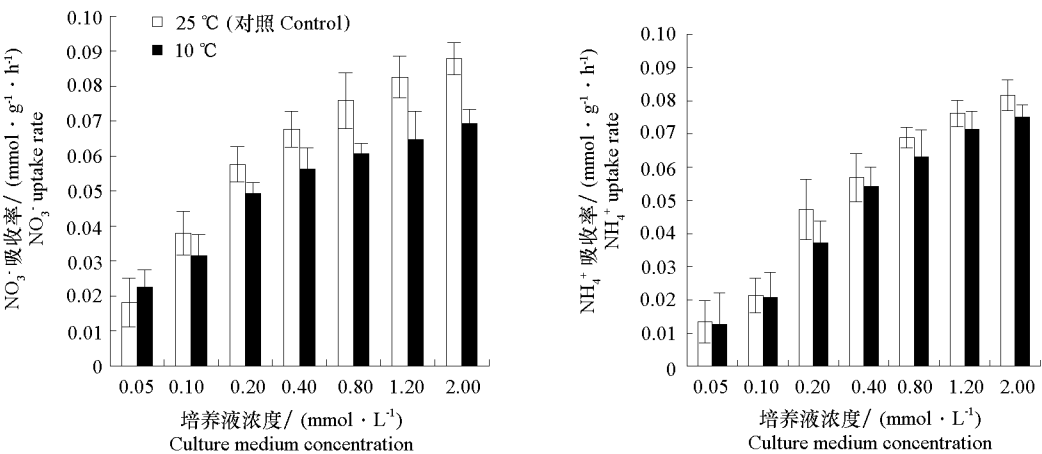


图 2 不同温度下山荆子幼苗 NO₃⁻和 NH₄⁺吸收速率随 NO₃⁻和 NH₄⁺浓度的变化
Fig. 2 Changes of NO₃⁻ and NH₄⁺ uptake rate by a fluctuation of NO₃⁻ and NH₄⁺ concentration under different temperature in *M. baccata* Borkh. seedlings

2.3 冷凉条件对山荆子幼苗根系 NO₃⁻ 和 NH₄⁺吸收动力学参数的影响

根据山荆子幼苗常规耗竭试验中不同吸收时间培养液中 NO₃⁻ 和 NH₄⁺的浓度变化曲线，得出山荆子幼苗离子耗竭方程，由此求出离子吸收动力学参数 I_{max} 、 K_m 和 α 。由表 1 可知，温度显著影响根系 NO₃⁻ 和 NH₄⁺吸收动力学参数，冷凉条件下山荆子幼苗吸收 NO₃⁻ 的最大吸收速率为 0.167 mmol·g⁻¹·h⁻¹，比常温时降低了 20.85%；NH₄⁺的最大吸收速率为 0.190 mmol·g⁻¹·h⁻¹，比常温时降低了 17.03%，与常温相比差异均达显著水平。而冷凉条件下山荆子幼苗吸收 NO₃⁻离子的 K_m 比常温时增加了 16.67%，差异显著，但吸收 NH₄⁺离子的 K_m 仅比常温时增加 0.28%，没有显著差异。 α 反映养分流入根系的速率， α 值越大，养分离子流入根系的速率越快，反之越慢。冷凉条件降低了山荆子幼苗吸收 NO₃⁻ 和 NH₄⁺离子的 α 值，分别比常温时降低了 31.11%和 18.60%。常温条件下山荆子幼苗吸收 NO₃⁻ 的 I_{max} 和 α 值大于吸收 NH₄⁺，而吸收 NO₃⁻ 的 K_m 小于吸收 NH₄⁺，但冷凉条件下反之，说明冷凉条件对山荆子幼苗吸收 NO₃⁻ 的动力学参数影响较大。

表 1 冷凉条件下山荆子幼苗根系氮素吸收动力学参数
Table 1 Dynamic parameters of nitrogen absorption in the root of *Malus baccata* Borkh. seedlings under low temperature

温度/ Temperature	NO ₃ ⁻			NH ₄ ⁺		
	$I_{max}/$ (mmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	$K_m/$ (mmol·L ⁻¹)	α (I_{max}/K_m)	$I_{max}/$ (mmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	$K_m/$ (mmol·L ⁻¹)	α (I_{max}/K_m)
25	0.241 ± 0.05 a	0.468 ± 0.063 b	0.51 a	0.229 ± 0.04 a	0.533 ± 0.066 a	0.43 a
10	0.167 ± 0.03 b	0.546 ± 0.077 a	0.31 b	0.190 ± 0.05 b	0.548 ± 0.051 a	0.35 b

注：表中每列字母表示 0.05 水平差异显著。
Note：Different letters in each line indicate significant difference at 0.05 level.

3 讨论

I_{max} 是离子吸收所能达到的最大速率， I_{max} 越大，离子吸收的内在潜力越大，与载体的数目和载体的转运效率有关； K_m 为表观米氏常数，是1/2 I_{max} 时的外液浓度，反应载体活性中心与离子亲和力的大小， K_m 越小，亲和力越大。 I_{max} 较大， K_m 较小时有利于植物对养分的吸收 (Cacco et al., 1980)。

本试验中山荆子幼苗根系对不同形态氮素的吸收存在差异,同时氮素吸收动力学参数也受温度的明显影响。常温条件下山荆子幼苗对 NO_3^- 离子的 I_{\max} 、 α 值均高于 NH_4^+ 离子,而对 NO_3^- 离子的 K_m 值小于 NH_4^+ 离子,说明山荆子幼苗对 NO_3^- 离子的吸收与 NH_4^+ 离子相比有明显的优势,这与顾曼如等(1987)对苹果的研究结果一致。冷凉条件降低了山荆子幼苗吸收 NO_3^- 和 NH_4^+ 的 I_{\max} 和 α 值,但 K_m 值增加,这与李振侠等(2005)对不同温度下苹果砧木铁吸收动力学研究结果一致。研究表明,根系吸收 NO_3^- 是逆浓度梯度而进入细胞的,需要由 H^+ 浓度梯度提供能量,而 NH_4^+ 的吸收是逆化学势进行的主动吸收过程。本试验中冷凉条件对吸收 NO_3^- 离子的影响大于 NH_4^+ 离子,导致山荆子幼苗对 NH_4^+ 离子的吸收更具优势,这可能是根系对冷凉条件的适应性反应,通过较多吸收 NH_4^+ 离子减少能量消耗(Miller & Cramer, 2004)。

冷凉条件下山荆子幼苗吸收 NO_3^- 离子的最大吸收速率(I_{\max})、养分流入根系速率(α)和反应载体活性中心与离子的亲和力(K_m 值增加)均显著降低,但仅降低了根系吸收 NH_4^+ 离子的最大吸收速率和养分流入根系速率,而反应载体活性中心对 NH_4^+ 离子的亲和力与常温相比并没有明显差异,由此可见冷凉条件下山荆子载体蛋白与 NO_3^- 离子和 NH_4^+ 离子亲和力的差异是导致根系吸收 NO_3^- 离子能力下降的主要原因,而不是由于根系中 NO_3^- 和 NH_4^+ 离子载体数量差异引起的。前人对不同温度下苹果砧木离子吸收动力学的研究表明,低温下载体数量和亲和力均有所降低(王永章等, 2000; 杨洪强等, 2003),这与本研究结果不同,可能与根系对不同元素的吸收机制存在差异有关。

References

- Arunothai Jampeetong, Hans Brix. 2009. Effect of NH_4^+ concentration on growth, morphology and NH_4^+ uptake kinetics of *Salvinia natans*. Ecological Engineering, 35: 695–702.
- Cacco G, Ferrari G, Saccomani M. 1980. Variability and inheritance of sulfate uptake efficiency and ATP-sulfurylase in maize. Physiol Plant, 48: 375–378.
- Claassen N, Barber S A. 1974. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. Plant Physiol, 54: 564–568.
- Dong S F, Carolynf S, Cheng L L, Leslie H F, Paul T R. 2001. Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. Tree Physiology, 21: 541–547.
- Epstein E, Hagen C E. 1952. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. Plant Physiol, 27: 457–474.
- Gu Man-ru, Shu Huai-rui, Zhou Hong-wei. 1987. A study on the nitrogen nutrition of apple trees. Journal of Shandong Agricultural University, 18 (4): 17–24. (in Chinese)
- 顾曼如, 束怀瑞, 周宏伟. 1987. 苹果氮素营养研究. 不同形态 ^{15}N 的吸收、运转特性. 山东农业大学学报, 18 (4): 17–24.
- Li Zhen-xia, Xu Ji-zhong, Gao Yi. 2005. Kinetic parameters of iron absorption of two apple dwarf rootstocks SH₄₀ and M₂₆. Journal of Fruit Science, 22 (5): 548–550. (in Chinese)
- 李振侠, 徐继忠, 高 仪. 2005. 苹果矮化砧木 SH₄₀ 和 M₂₆ 铁吸收动力学参数比较. 果树学报, 22 (5): 548–550.
- Lourdes Rubio, Adolfo Linares-Rueda, Maria J Garcia-Sanchez, Jose A Fernandez. 2007. Ammonium uptake kinetics in root and leaf cells of *Zostera marina* L. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 352: 271–279.
- Miguel Cerezo, Pilar Garcia-Agustin, M Dolores Serna, Eduardo Primo-Millo. 1997. Kinetics of nitrate uptake by *Citrus* seedlings and inhibitory effects of salinity. Plant Science, 126: 105–112.
- Mill A J, Cramer M D. 2004. Root nitrogen acquisition and assimilation. Plant and Soil, 274: 1–36.
- Peng Fu-tian, Jiang Yuan-mao. 2006. Characteristics of N, P, and K nutrition in different yield level apple orchards. Scientia Agricultura Sinica, 39 (2): 361–367. (in Chinese)
- 彭福田, 姜远茂. 2006. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究. 中国农业科学, 39 (2): 361–367.
- Ren Jun, Xu Cheng-yang, Lin Yu-mei, Zhou Rui-zhi, Zhang Ai-hua. 2008. Kinetic characteristics of different forms of absorbing nitrogen in root system of *Fraxinus mandshurica* Rupr. seedling. Plant Physiology Communications, 44 (5): 919–922. (in Chinese)

- 任 军, 徐程扬, 林玉梅, 周睿智, 张爱华. 2008. 水曲柳幼苗根系吸收不同形态氮素的动力学特性. 植物生理学通讯, 44 (5): 919–922.
- Si You-bin, Wang Shen-qiang, Chen Huai-man. 2000. Water eutrophication and losses of nitrogen and phosphates in farmland. Soil, 32 (4): 188–193. (in Chinese)
- 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 2000. 农田氮、磷的流失与水体富营养化. 土壤, 32 (4): 188–193.
- Sun Min, Guo Wen-shan, Zhu Xin-kai, Feng Chao-nian, Guo Kai-quan, Peng Yong-xin. 2006. Kinetics of nitrate and ammonium uptake by different wheat genotypes at seedling stage. Journal of Triticeae Crops, 26 (5): 84–87. (in Chinese)
- 孙 敏, 郭文善, 朱新开, 封超年, 郭凯泉, 彭永欣. 2006. 不同氮效率小麦品种苗期根系的 NO_3^- 、 NH_4^+ 吸收动力学特征. 麦类作物学报, 26 (5): 84–87.
- Wang Xiao-li, Feng Ke, Sheng Hai-jun, Chen Ping. 2003. Kinetics of nitrate uptake by different rice genotypes and the effects of ammonium on nitrate uptake at the seedling stage. Scientia Agricultura Sinica, 36 (11): 1306–1311. (in Chinese)
- 汪晓丽, 封 克, 盛海君, 陈 平. 2003. 不同水稻基因型苗期 NO_3^- 吸收动力学特征及其受吸收液中 NH_4^+ 的影响. 中国农业科学, 36 (11): 1306–1311.
- Wang Yong-zhang, Han Zhen-hai, Sun Wen-bin. 2000. Influence of temperature on iron absorption kinetics in genus *Malus*. Journal of Fruit Science, 17 (1): 12–16. (in Chinese)
- 王永章, 韩振海, 孙文彬. 2000. 温度对不同苹果基因型铁离子吸收动力学的影响. 果树科学, 17 (1): 12–16.
- Wei Ying-chun, Li Xin-ping, Liu Gang, Zhu Hui-juan. 2008. Effect of nitric nitrogen on different greenhouse soil in Yangling area. Journal of Soil and Water Conservation, 22 (2): 174–176, 190. (in Chinese)
- 魏迎春, 李新平, 刘 刚, 朱辉娟. 2008. 杨凌地区大棚土壤硝态氮积累效应研究. 水土保持学报, 22 (2): 174–176, 190.
- Yang Hong-qiang, Zhang Lian-zhong, Qi Jin-liang, Jie Yu-ling. 2003. The kinetics of calcium uptake in apple rootstock roots. Acta Horticulturae Sinica, 30 (3): 253–257. (in Chinese)
- 杨洪强, 张连忠, 戚金亮, 接玉玲. 2003. 苹果砧木根系钙素吸收动力学研究. 园艺学报, 30 (3): 253–257.
- Yang Tianyi, Zhu Lina, Wang Shiping, Gu Weijun, Huang Danfeng, Xu Wenping, Jiang Aili, Li Shicheng. 2007. Nitrate uptake kinetics of grapevine under root restriction. Scientia Horticulturae, 111 (4): 358–364.
- Yin Chun-yuan, Zhang Qing, Wei Hai-yan, Zhang Hong-cheng, Dai Qi-gen, Huo Zhong-yang, Xu ke, Ma Qun, Hang Jie, Zhang Sheng-fei. 2010. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance. Scientia Agricultura Sinica, 43 (1): 39–50. (in Chinese)
- 殷春渊, 张 庆, 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许 轲, 马 群, 杭 杰, 张胜飞. 2010. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异. 中国农业科学, 43 (1): 39–50.
- Youngdahl L J, Pacheco R, Street J J, Vlek P L G. 1982. The kinetics of ammonium and nit rate uptake by young rice plants. Plant Soil, 69 : 225–232.
- Zhao Yue, Ma Feng-ming, Zhang Duo-ying. 2006. Study on the absorption kinetics of different nitrogen in sugar beet. Journal of Northeast Agricultural University, 37 (3): 294–298. (in Chinese)
- 赵 越, 马凤鸣, 张多英. 2006. 甜菜对不同氮素吸收动力学的研究. 东北农业大学学报, 37 (3): 294–298.
- Zhang Zhenhua, Zed Rengel, Kathy Meney. 2009. Kinetics of ammonium, nitrate and phosphorus uptake by *Canna india* and *Schoenoplectus validus*. Aquatic Botany, 91 : 71–74.
- Zhou Xiao-hong, Wang Guo-xiang, Yang Fei, He Wei, Yang Zhou. 2008. Uptake kinetic characteristics of different ammonium and nitrate by *Ipomoea aquatica* Forsk. Research of Soil and Water Conservation, 15 (5): 57–60. (in Chinese)
- 周晓红, 王国祥, 杨 飞, 何 伟, 杨 周. 2008. 空心菜对不同形态氮吸收动力学特性研究. 水土保持研究, 15 (5): 57–60.