

# 不同形态氮素对东北山樱幼苗根系呼吸代谢及生物量的影响

秦嗣军<sup>1</sup>, 吕德国<sup>1,\*</sup>, 李志霞<sup>1,2</sup>, 马怀宇<sup>1</sup>, 刘灵芝<sup>3</sup>, 刘国成<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866; <sup>2</sup>中国农业科学院果树研究所, 辽宁兴城 125100; <sup>3</sup>沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 以东北山樱 (*Cerasus sachalinensis* Kom.) 幼苗为试材, 研究了不同形态氮素对根系呼吸代谢及植株生物量的影响。结果表明, 在施氮量相同的条件下, 施加硝态氮和酰胺态氮在整个试验过程中 (28 d) 均显著提高了幼苗根系活力及呼吸底物的积累, 而施加铵态氮对根系活力的促进作用只延续到处理后 14 d, 随后根系活力和呼吸底物含量逐渐降低; 硝态氮处理促进了三羧酸循环 (TCA) 关键酶的活性, TCA 循环在呼吸代谢途径中的比例较对照提高了 30.4%, 呼吸代谢中间产物丙酮酸和柠檬酸增加, 而磷酸戊糖途径 (PPP) 和交替途径 (AP) 较对照分别下降了 35.0% 和 32.7%。铵态氮处理效应基本与之相反。酰胺态氮处理除对 EMP 关键酶活性及电子传递途径无明显影响外, 与硝态氮处理效应相似; 3 种形态氮素处理对幼苗生长均有促进作用, 对植株生物量促进作用的大小表现为硝态氮 > 酰胺态氮 > 铵态氮 > 对照。

**关键词:** 东北山樱; 氮素; 呼吸; 生物量

**中图分类号:** S 662.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 06-1021-08

## Effects of Different Nitrogen Forms on Root Respiratory Metabolism and on Biomass in Seedlings of *Cerasus sachalinensis*

QIN Si-jun<sup>1</sup>, Lü De-guo<sup>1,\*</sup>, LI Zhi-xia<sup>1</sup>, MA Huai-yu<sup>1</sup>, LIU Ling-zhi<sup>2</sup>, and LIU Guo-cheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; <sup>2</sup>Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xingcheng, Liaoning 125100, China, <sup>3</sup>College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** The effects of different nitrogen forms on root respiratory metabolism and on biomass in seedlings of *Cerasus sachalinensis* Kom. were investigated. The results showed that, with a same amount of nitrogen application, the application of nitrate nitrogen and amidonitrogen significantly enhanced root activity and accumulation of respiratory substrates during the whole experimental period (28 d), while the application of ammonium nitrogen only enhanced the root activity and the accumulation of respiratory substrates during the 14 days after the application. Whereafter, the root activity and respiratory substrate content significantly decreased. Application of nitrate nitrogen enhanced the activities of key enzymes in tricarboxylic acid (TCA) cycle, increased the ratio of TCA cycle to the total respiratory pathway by 30.4%

**收稿日期:** 2010-11-23; **修回日期:** 2011-05-06

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (30871688, 30900967); 辽宁省教育厅项目 (2008631)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: lvdeguo@163.com)

compared to that in the control and increased the content of pyruvic acid and citric acid the intermediates of respiratory metabolism. Whereas, the pentose phosphate pathway (PPP) and the alternative oxidase (AOX) pathway were decreased by 35.0% and 32.7% respectively at the same time. The application of ammonium nitrogen had opposite effect to the application of nitrate nitrogen on activities of key enzymes in TCA cycle, on TCA cycle, intermediates of respiratory metabolism, PPP and AOX pathways. Application of amidonitrogen had similar effects to the application of nitrate nitrogen except having no obvious effect on activates of key enzyme in glycolysis pathway (EMP) and in respiratory electron transport. The application of the three different types of nitrogen improved the growth of the seedlings. The enhancement of biomass by the application of the 3 types of nitrogen was nitrate nitrogen > amidonitrogen > ammonium nitrogen > control.

**Key words:** *Cerasus sachalinensis* Kom.; nitrogen; respiration; biomass

前人研究表明, 氮素形态影响植物的氮素代谢 (葛体达 等, 2008)、光合机构及能量分配 (陈贵 等, 2007)、呼吸代谢 (Hyvönen et al., 2007)、矿质元素吸收 (Engels & Marsehner, 1993) 等, 最终引起植物形态和生物量上的差异 (曹翠玲和李生秀, 2003)。

东北山樱 (*Cerasus sachalinensis* Kom.) 是我国常用的甜樱桃砧木之一, 嫁接后植株地上部生长发育迅速, 而常表现出“小脚现象”, 加之果实发育与新梢旺长的时期相互叠加等特点, 决定甜樱桃需肥特性明显不同于其他果树。另外, 樱桃不耐涝, 生产中常因土壤水分过多引起根系呼吸障碍 (陈强 等, 2008)。有研究者认为适当提高氮素水平可以缓解低氧胁迫对樱桃根系线粒体的损害, 维持植株的生理代谢 (生利霞 等, 2009)。但到目前为止氮素形态对樱桃呼吸代谢的调控机制仍不清楚。本试验中研究了硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N)、铵态氮 ( $\text{NH}_4^+$ -N) 和酰胺态氮 ( $\text{CONH}_2$ -N) 3 种形态的氮素对东北山樱幼苗呼吸代谢及生长的影响, 旨在揭示其根系呼吸机制, 丰富樱桃需肥规律研究体系, 为樱桃园科学肥水管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

试材为东北山樱幼苗, 2009 年 2 月上旬在沈阳农业大学果树科研基地温室中穴盘播种, 出苗后 1 个月移植到口径 15 cm, 高 15 cm 的营养钵中, 常规管理。栽培基质由普通园土和堆肥 (猪粪、稻草) 按 2:1 混配, pH 7.2, 电导率  $139.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 碱解氮  $206.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $380.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效性钾  $471.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有机质  $47.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

6 月下旬进行硝酸钾 (硝态氮,  $\text{NO}_3^-$ -N)、硫酸铵 (铵态氮,  $\text{NH}_4^+$ -N) 和尿素 (酰胺态氮,  $\text{CONH}_2$ -N) 3 种形态氮素处理, 每次每株施用量为 0.5 g 纯氮, 分别为硝酸钾 3.61 g, 硫酸铵 2.36 g, 尿素 1.07 g。以硫酸钾将钾素水平调整一致后, 将肥料充分溶解于 100 mL 水中, 缓慢均匀浇施根部, 以浇等量清水为对照。每 7 d 施用 1 次, 连续 4 次。分别于第一次处理后 7、14、21、28 d 取样进行根系活力、呼吸速率和碳水化合物及叶绿素荧光等参数的测定, 处理 28 d 检测呼吸代谢途径、中间产物及呼吸关键酶活性。每处理共 20 株, 每次 3 株重复, 其余植株在处理结束后用于调查生物量。

采用英国 Hansateach 公司的 Oxytherm 型氧电极测定呼吸速率 (Bouma et al., 2001; 毛志泉 等, 2004)。测定时取直径 1.5 mm 左右, 长度 2~3 cm 的白色新根, 用双面刀片切成 2 mm 左右根段, 放置 15 min 左右以消除伤呼吸的影响, 然后称取 0.05 g 放入反应杯, 加盖启动测量程序。反应杯中反应液温度恒温浴控制在 25 °C。

参照余让才和潘瑞炽 (1996) 的方法测定呼吸途径。基础生化呼吸途径中糖酵解 (EMP)、三

羧酸循环 (TCA) 和磷酸戊糖 (PPP) 途径分别用  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaF、丙二酸和  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  抑制。电子传递途径中交替途径 (AP) 和细胞色素途径 (CP) 分别用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 SHAM 和 NaCN 抑制, 反应介质为  $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  磷酸缓冲液, pH 6.8。每途径测定重复 3 次。

可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮比色法 (李合生, 2000) 测定; 呼吸关键酶活性参照 Ling 等 (1996) 的方法测定; 丙酮酸含量采用 2, 4 - 二硝基苯肼比色法 (文树基, 1992) 测定; 柠檬酸含量采用酶促反应比色法 (王伟, 2008) 测定; 叶绿素荧光参数采用 Handy-PEA 测定; 根系活力采用 TTC 法 (李合生, 2000) 测定。试验数据采用 DPS 7.05 数据处理软件, Duncan's 多重比较法 ( $P < 0.05$ ) 进行统计分析, EXCEL 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素形态对东北山樱幼苗根系活力及呼吸速率的影响

如图 1 所示, 不同氮素形态对幼苗根系活力的生理效应不同。铵态氮处理前期提高了幼苗根系活力, 处理 14 d 后根系活力开始下降, 28 d 时显著低于对照。酰胺态氮和硝态氮处理 7 d 后幼苗根系活力上升, 14 d 后与对照均达到显著水平, 表现为酰胺态氮 > 硝态氮 > 对照。

如图 2 所示, 各处理不同程度提高了根系呼吸速率。硝态氮和铵态氮处理前期 (14 d) 较对照显著提高了幼苗根系呼吸速率, 而酰胺态氮处理与对照无显著差异, 表现为硝态氮 > 铵态氮 > 酰胺态氮和对照。酰胺态氮处理 14 d 后幼苗根系呼吸速率显著上升, 处理 28 d 时表现为铵态氮 > 硝态氮和酰胺态氮 > 对照。

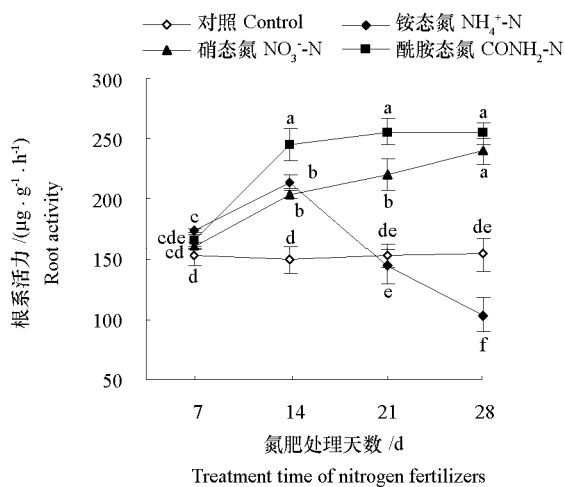


图 1 氮素形态对东北山樱幼苗根系活力的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen forms on root activities of *C. sachalinensis* seedlings

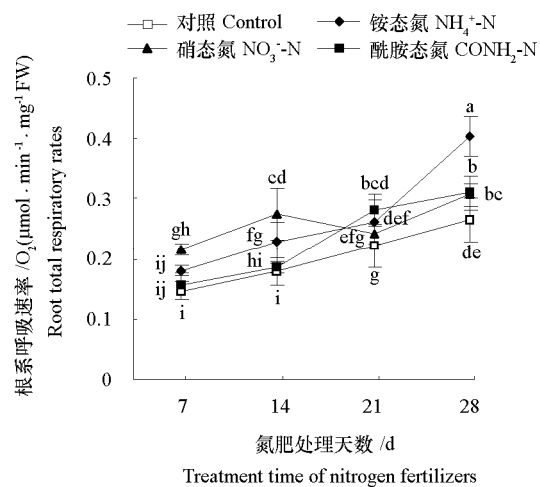


图 2 氮素形态对东北山樱幼苗根系呼吸速率的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen forms on total respiratory rates of *C. sachalinensis* seedling roots

### 2.2 氮素形态对东北山樱幼苗根系呼吸途径及相关酶活性的影响

如图 3 所示, 各处理与对照幼苗根系生化呼吸途径均以 TCA 为主, EMP 和 PPP 所占比例相对较小, 氮素处理改变了幼苗根系呼吸途径的运行比例。其中硝态氮和酰胺态氮处理幼苗根系呼吸的 TCA 比例显著高于对照, 而 PPP 比例低于对照。与之相反, 铵态氮处理幼苗根系呼吸的 TCA 比例显著下降, PPP 比例显著提高。各处理的 EMP 比例与对照均无显著差异。

如图 4 所示, 东北山樱幼苗根系呼吸链电子传递途径以 CP 为主, 占总呼吸的 50%左右, 且不受氮素形态所调控, 但硝态氮处理降低了 AP 运行比例, 而铵态氮处理提高了 AP 运行比例, 酰胺态氮处理无明显影响。

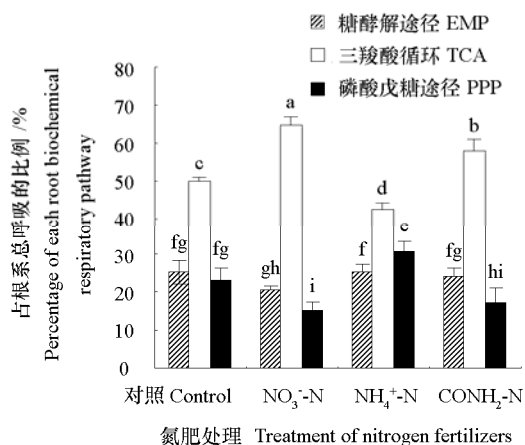


图 3 氮素形态对东北山樱幼苗根系呼吸生化途径的影响  
Fig. 3 Effects of different nitrogen forms on the root biochemical respiratory pathways of *C. sachalinensis* seedlings

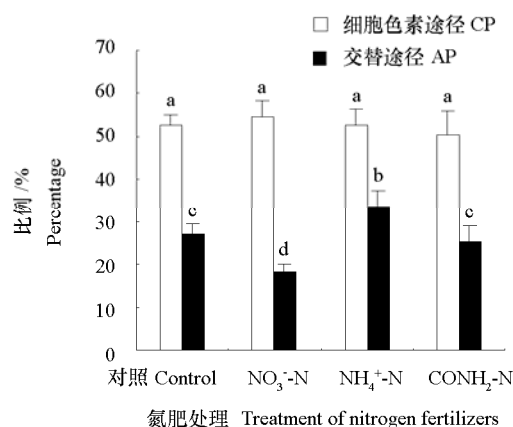


图 4 氮素形态对东北山樱幼苗根系呼吸链电子传递途径的影响  
Fig. 4 Effects of different nitrogen forms on the root respiratory electron transport chain paths of *C. sachalinensis* seedlings

如图 5 所示, 各处理与对照幼苗根系中 HK 在 EMP 关键酶中活性最高。硝态氮和铵态氮处理较对照均显著提高了 PK 活性, 而降低了 PFK 活性。另外硝态氮处理还降低了 HK 活性, 而酰胺态氮处理对幼苗根系呼吸的 EMP 3 种关键酶活性无显著影响。

如图 6 所示, 各处理与对照幼苗根系中 SDH 在 TCA 关键酶中活性最高, 硝态氮处理整体提高了 TCA 关键酶活性, IDH、MDH 和 SDH 活性是对照的 1.90、2.56 和 1.28 倍, 由此引起 TCA 运行水平的显著提高。铵态氮处理提高了幼苗根系中 MDH 活性, 但 IDH 和 SDH 活性显著下降。酰胺态氮处理提高了幼苗根系中 IDH 和 MDH 活性, 但 SDH 活性下降。

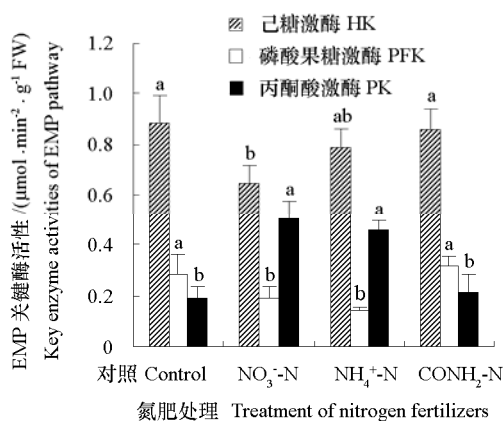


图 5 氮素形态对东北山樱幼苗根系糖酵解关键酶活性的影响  
Fig. 5 Effects of different nitrogen forms on the key enzyme activities of EMP pathway of *C. sachalinensis* seedling roots

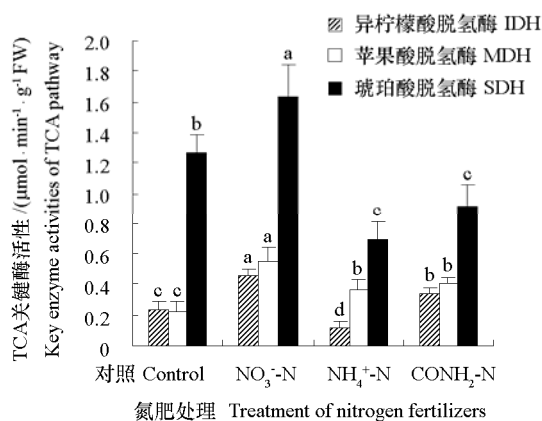


图 6 氮素形态对东北山樱幼苗根系三羧酸循环关键酶活性的影响  
Fig. 6 Effects of different nitrogen forms on the key enzyme activities of TCA pathway of *C. sachalinensis* seedling roots

如图 7 所示, G-6-PDH 和 6-GPDH 在 PPP 运行中占有同等重要位置。硝态氮和酰胺态氮处理较对照显著降低了 PPP 关键酶活性, 与之相反铵态氮处理整体提高了 PPP 关键酶活性。

### 2.3 氮素形态对东北山樱幼苗呼吸代谢底物及中间产物的影响

如图 8 所示, 硝态氮和酰胺态氮处理根系中的可溶性糖含量均表现为前期升高后期下降。铵态氮处理第 7 天时可溶性糖较对照提高 27.0%, 而后一直呈下降趋势, 28 d 时较对照降低 47.1%。不同氮素处理对幼苗根系中的淀粉含量有明显的影。硝态氮处理 7 d 后淀粉含量大幅提高, 到处理 28 d 达到最高, 为对照的 2 倍。铵态氮处理前期促进了幼苗根系中淀粉的积累, 处理 14 d 后开始下降。酰胺态氮处理 14 d 后幼苗根系中淀粉含量显著高于对照, 之后保持平稳。

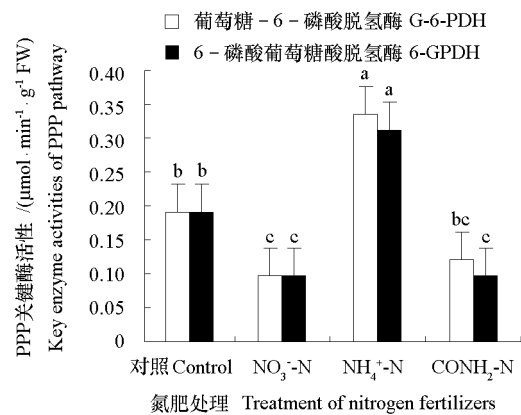


图 7 氮素形态对东北山樱幼苗根系戊糖磷酸途径关键酶活性的影响

Fig. 7 Effects of different nitrogen forms on the key enzyme activities of PPP pathway of *C. sachalinensis* seedling roots

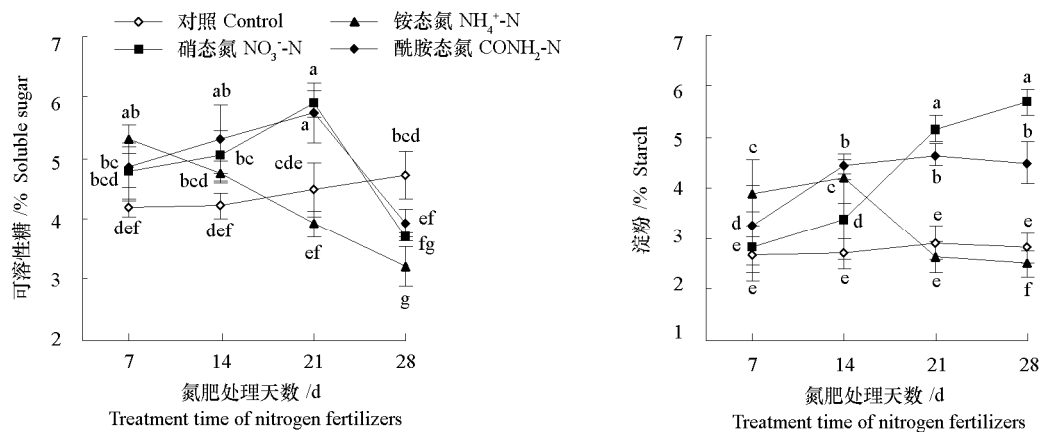


图 8 氮素形态对东北山樱幼苗根系可溶性糖和淀粉含量的影响

Fig. 8 Effects of different nitrogen forms on root soluble sugar and starch contents of *C. sachalinensis* seedlings

氮素形态对幼苗根系各呼吸途径运行水平的影响, 直接引起代谢中间产物的改变。硝态氮和铵态氮处理幼苗根系中丙酮酸含量较对照分别提高 89.6%和 60.6%; 硝态氮和酰胺态氮处理幼苗根系中柠檬酸含量较对照分别提高 59.8%和 45.4%, 而铵态氮处理较对照降低了 44.8% (图 9)。

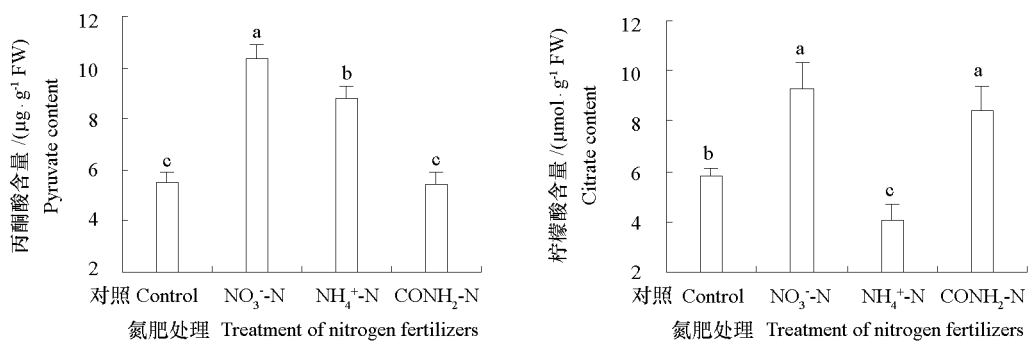


图 9 氮素形态对东北山樱幼苗根系丙酮酸和柠檬酸含量的影响

Fig. 9 Effects of different nitrogen forms on pyruvate and citrate contents in *C. sachalinensis* seedling roots

## 2.4 氮素形态对东北山樱幼苗生长的影响

从表 1 看出, 不同形态氮素处理均促进了幼苗的生长, 株高、根长、地上和地下生物量均显著高于对照。对株高和地上部生物量的促进作用表现为硝态氮 > 酰胺态氮 > 铵态氮 > 对照, 对根长和地下部生物量影响效应为酰胺态氮 > 硝态氮 > 铵态氮 > 对照。调查还发现, 硝态氮和酰胺态氮处理的幼苗叶片深绿, 营养状况良好, 而铵态氮处理后期幼苗叶片叶缘出现轻微干枯现象。

表 1 氮素形态对东北山樱幼苗生物量的影响  
Table 1 Effects of different nitrogen forms on biomass of *C. sachalinensis* seedlings

氮肥处理 Treatments of nitrogen fertilizers	株高增长量/cm Increases of seedling height	根长/cm Root length	地上部生物量/g Dry weight of shoots	地下部生物量/g Dry weight of roots
对照 Control	1.00 ± 0.17 c	13.57 ± 0.67 c	21.43 ± 0.50 d	15.32 ± 1.21 c
酰胺态氮 CONH <sub>2</sub> -N	2.43 ± 0.25 a	20.57 ± 1.95 a	27.15 ± 1.35 b	25.52 ± 1.53 a
硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	2.53 ± 0.15 a	18.07 ± 2.37 ab	29.88 ± 1.77 a	24.15 ± 2.27 a
铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1.70 ± 0.17 b	16.90 ± 0.36 b	24.09 ± 1.17 c	20.75 ± 1.59 b

$P < 0.05$ ,  $n = 5$ .

## 3 讨论

多数研究 (Ryan et al., 1996; Burton et al., 2002; Desrochers et al., 2002) 表明, 根系呼吸速率与根组织中的氮浓度呈正相关。当土壤中的氮素亏缺时, 大多植物通过提高向根系分配的碳量提高对氮素的吸收能力以促进根系生长 (Anandacoomaraswamy et al., 2002; Levang & Biondini, 2002), 根系呼吸速率升高; 当土壤养分供给量提高时, 植物将降低向根系分配的碳量 (Vogel et al., 2005), 根系呼吸速度下降。也有研究认为根域碳浓度对多种树木根系呼吸无明显影响 (Burton & Pregitzer, 2002)。Hyvönen 等 (2007) 认为, 植物如果优先利用硝态氮, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在被吸收之前必须先被还原, 而为了维持硝酸还原酶活性和周转则需消耗一定比例的能量, 因而提高了根系的呼吸速率 (Zogg et al., 1996)。铵态氮则可直接被同化为具有生物活性的化合物。所以, 许多植物根系吸收利用硝态氮比利用铵态氮消耗的能量多, 铵态氮对根系呼吸速率的影响要小于硝态氮 (任军, 2009)。本研究发现, 处理前期硝态氮比铵态氮和酰胺态氮显著提高了根系呼吸速率, 但铵态氮处理 28 d 时幼苗根系呼吸速率显著高于其他处理。

供给氮素可调节植物呼吸关键酶活性, 进而调控呼吸途径的运行比例, 影响有机酸等中间产物的代谢水平。试验表明, 供给 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>可促进植物 TCA 循环, 从而使有机酸代谢速率显著增强 (Scheible et al., 1997; Stitt et al., 2002), 而细胞内 pH 值的改变又反馈影响各种酶的活性。给氮饥饿的烟草重新供给 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>后, 叶片中的柠檬酸含量显著增加 (Lancien et al., 1999), 供给 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>则可显著降低番茄幼苗叶片内苹果酸、柠檬酸等有机酸的含量 (Dong et al., 2004)。本研究也得到类似的结果, 硝态氮处理提高了东北山樱幼苗根系 TCA 关键酶活性, 降低了 PPP 关键酶活性, 引起 TCA 运行比例显著升高, PPP 运行比例降低, 丙酮酸和柠檬酸含量增加, 丙酮含量比对照高。

Kato (1986) 认为, 当呼吸底物不足, 根系吸收的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>超过了代谢的量, 就会在体内积累而发生 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>毒害, 而吸收的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>超出自身利用能力后, 多余的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>可以贮存在液泡中, 几乎不影响植物的其他代谢过程 (肖凯 等, 2000)。李学俊等 (2008) 也证实了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>处理根系组织生物膜透性最小, 稳定性最高, 有利于生物膜功能的发挥。本研究发现, 3 种氮肥处理对幼苗根系和地上部生长发育的影响效应不同, 整体上硝态氮和酰胺态氮对幼苗生物量积累的促进作用明显, 而铵态氮的促进作用较小。郝云红等 (2009) 研究也表明, 外源硝态氮可调控樱桃根系的糖代谢过程, 增强根系

的耐低氧能力, 促进植株生长发育。因此, 樱桃生产过程中施用氮肥宜以硝态氮为主。至于硫酸铵处理后期幼苗新根发生少, 叶缘出现轻微干枯, 根系活力和呼吸底物迅速下降, 根系呼吸速率和 AP 运行比例上升, 这是否与处理后期幼苗对  $\text{NH}_4^+$  吸收超过阈值而产生了胁迫有关需进一步验证。

综上所述, 氮素对根系呼吸代谢的调控是一个复杂的过程, 目前国内外在这方面的研究还十分有限, 今后应结合其他指标和试验手段进行更加深入和系统的研究。

## References

- Anandacoomaraswamy A, de Costa W A J M, Tennakoon P L K, Werf D. 2002. The Physiological basis of increased biomass partitioning to roots upon nitrogen deprivation in young clonal tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz]. *Plant and Soil*, 238: 1 - 9.
- Bouma T J, Yanai R D, Elkin A D, Hartmond U, Flores-Alva D E, Eissenstat D M. 2001. Estimating aged-dependent costs and benefits of roots with contrasting life span: Comparing apples and oranges. *New Phytologist*, 150: 685 - 695.
- Burton A J, Pregitzer K S. 2002. Measurement carbon dioxide concentration does not affect root respiration of nine tree species in the field. *Tree Physiology*, 22 (1): 67 - 72.
- Burton A J, Pregitzer K S, Ruess R W, Hendrick R L, Allen M F. 2002. Root respiration in North American forest: Effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 131: 559 - 568.
- Cao Cui-ling, Li Sheng-xiu. 2003. Effect of N form on the accumulation of carbohydrate nutrients of corn seedlings. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 22 (5): 457 - 461. (in Chinese)
- 曹翠玲, 李生秀. 2003. 氮素形态对玉米幼苗碳水化合物及养分累积的影响. *华中农业大学学报*, 22 (5): 457 - 461.
- Chen Gui, Zhou Yi, Guo Shi-wei, Shen Qi-rong. 2007. The regulatory mechanism of different nitrogen form on photosynthetic efficiency of rice plants under water stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 40 (10): 2162 - 2168. (in Chinese)
- 陈贵, 周毅, 郭世伟, 沈其荣. 2007. 水分胁迫条件下不同形态氮素营养对水稻叶片光合效率的调控机理研究. *中国农业科学*, 40 (10): 2162 - 2168.
- Chen Qiang, Guo Xiu-wu, Hu Yan-li, Mao Zhi-quan. 2008. Effects of waterlogging on root respiration intensity and respiratory enzyme activities of sweet cherry. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19 (7): 1462 - 1466. (in Chinese)
- 陈强, 郭修武, 胡艳丽, 毛志泉. 2008. 淹水对甜樱桃根系呼吸强度和呼吸酶活性的影响. *应用生态学报*, 19 (7): 1462 - 1466.
- Desrochers A, Landhäusser S M, Lieffers V J. 2002. Coarse and fine root respiration in aspen (*Papulus tremuloides*). *Tree Physiology*, 22: 725 - 732.
- Dong C X, Shen Q R, Wang G. 2004. Tomato growth and organic acid changes in response to partial replacement of  $\text{NO}_3^-$  by  $\text{NH}_4^+$ . *Pedosphere*, 14 (2): 159 - 164.
- Engels C, Marschner H. 1993. Influence of the nitrogen supply on root uptake and translocation of cations in the xylem exudates of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*, 44: 1695 - 1670.
- Ge Ti-da, Huang Dan-feng, Song Shi-wei, Lu Bo, Yang Dong-dong. 2008. Effects of nitrogen forms on carbon and nitrogen accumulation in tomato seedling. *Scientia Agricultura Sinica*, 41 (10): 3168 - 3176. (in Chinese)
- 葛体达, 黄丹枫, 宋世威, 芦波, 杨冬冬. 2008. 不同氮素形态对番茄幼苗碳、氮积累的影响. *中国农业科学*, 41 (10): 3168 - 3176.
- Hao Yun-hong, Hu Yan-li, Shen Xiang, Mao Zhi-quan, Wang Yuan-zheng, Su Li-tao, Yang Shu-quan. 2009. Exogenous  $\text{NO}_3^-$  enhanced sugar contents and sucrose correlated enzymes activity in roots of sweet cherry under waterlogging condition. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (7): 937 - 944. (in Chinese)
- 郝云红, 胡艳丽, 沈向, 毛志泉, 王元征, 苏立涛, 杨树泉. 2009. 外源硝态氮提高淹水甜樱桃根系糖含量及蔗糖相关酶活性. *园艺学报*, 36 (7): 937 - 944.
- Hyvönen R, Ågren G I, Linder S, Persson T, Cotrufo M F, Ekblad A, Freeman M, Grelle A, Janssens I A, Jarvis P G, Kellomäki S, Lindroth A, Loustau D, Lundmark T, Norby R J, Oren R, Pilegaard K, Ryan M G, Sigurdsson B D, Strömberg M, Ojien M, Wallin G. 2007. The likely impact of elevated  $[\text{CO}_2]$ , nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: A literature review. *New Phytologist*, 173: 463 - 480.
- Kato T. 1986. Nitrogen metabolism and utilization in citrus. *Horticultural Reviews*, 8: 181 - 216.
- Lancien M, Ferrario-Méry S, Roux Y, Bismuth E, Masclaux C, Hirel B, Gadal P, Hodges M. 1999. Simultaneous expression of NAD-dependent

- isocitrate dehydrogenase and other krebs cycle genes after nitrate resupply to short-term nitrogen starved tobacco. *Plant Physiology*, 120: 717 – 725.
- Levang-Brilz N, Biondini M E. 2002. Growth rate, root development and nutrient uptake of 55 plant species from the great plains grasslands. *Plant Ecology*, 165: 117 – 144.
- Li He-sheng. 2000. Principles and technology of plant physiology and biochemistry experiments. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- Li Xue-jun, Wen Jian-lei, Han Shu-cheng, Cao Cui-ling, Li Sheng-xiu. 2008. Effect of N form on physiological mechanism and biomass in corn seedlings. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 36 (3): 192 – 196. (in Chinese)
- 李学俊, 文建雷, 韩书成, 曹翠玲, 李生秀. 2008. 氮素形态对玉米幼苗生物机制及生物量的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 36 (3): 192 – 196.
- Ling K H, Paetkau V, Marcus F, Lardy H A. 1996. Phosphofructokinase from skeletal muscles // Wood W A. *Methods in enzymology*. New York: Academic Press: 425 – 426.
- Mao Zhi-quan, Wang Li-qin, Shen Xiang, Shu Huai-rui, Zou Yan-mei. 2004. Effect of organic materials on respiration intensity of annual *Malus hupehensis* Rehd. root system. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 10 (2): 171 – 175. (in Chinese)
- 毛志泉, 王丽琴, 沈 向, 束怀瑞, 邹岩梅. 2004. 有机物料对平邑甜茶实生苗根系呼吸强度的影响. 植物营养与肥料学报, 10 (2): 171 – 175.
- Ren Jun. 2009. Characteristic and mechanisms of root respiration of *Fraxinus mandushurica* Rupr. to soil nitrogen [Ph. D. Dissertation]. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)
- 任 军. 2009. 水曲柳根系呼吸特性及其对土壤氮素反应机理研究 [博士论文]. 北京: 北京林业大学.
- Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S, Raison R J, McMurtrie R E. 1996. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status. *Tree Physiology*, 16: 333 – 343.
- Scheible W R, Gonzalez-Fontes A, Lauerer M, Muller-Rober B, Caboche M, Stitt M. 1997. Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco. *The Plant Cell*, 9 (5): 783 – 798.
- Sheng Li-xia, Feng Li-guo, Shu Huai-rui. 2009. Effects of nitrogen on the activity of antioxidant enzymes and functions of mitochondria in cherry rootstock roots under hypoxia stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (11): 1575 – 1580. (in Chinese)
- 生利霞, 冯立国, 束怀瑞. 2009. 氮对低氧胁迫下樱桃根系抗氧化酶活性及线粒体功能的影响. 园艺学报, 36 (11): 1575 – 1580.
- Stitt M, Müller C, Matt P, Gibon Y, Carillo P, Morcuende R, Scheible W, Krapp A. 2002. Steps towards an integrated view of nitrogen metabolism. *Journal of Experimental Botany*, 53: 959 – 970.
- Vogel J G, Valentine D W, Russ R W. 2005. Soil and root respiration in mature Alaskan black spruce forests that vary in soil organic matter decomposition rates. *Canadian Journal of Forest Research*, 35 (1): 161 – 174.
- Wang Wei. 2008. Effect of plant hormone and aluminum on organic acid metabolism and secretion of wheat root tip [M. D. Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University. (in Chinese)
- 王 伟. 2008. 植物激素及铝对小麦根尖有机酸代谢与分泌的影响 [硕士论文]. 武汉: 华中农业大学.
- Wen Shu-ji. 1992. Guidance of basic biochemistry experiments. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press. (in Chinese)
- 文树基. 1992. 基础生物化学试验指导. 西安: 陕西科学技术出版社.
- Xiao Kai, Zhang Shu-hua, Zou Ding-hui, Zhang Rong-xian. 2000. The Effects of different nitrogen nutrition forms on photosynthetic characteristics in wheat leaves. *Acta Agronomica Sinica*, 26 (1): 53 – 58. (in Chinese)
- 肖 凯, 张树华, 邹定辉, 张荣銓. 2000. 不同形态氮素营养对小麦光合特性的影响. 作物学报, 26 (1): 53 – 58.
- Yu Rang-cai, Pan Rui-chi. 1996. Effect of blue light on the respiration of rice (*Oryza sativa*) seedlings. *Chinese Journal of Rice Science*, 10 (3): 159 – 163. (in Chinese)
- 余让才, 潘瑞炽. 1996. 蓝光对水稻幼苗呼吸代谢的影响. 中国水稻科学, 10 (3): 159 – 163.
- Zogg G P, Zak D R, Burton A J, Pregitzer K S. 1996. Fine root respiration in northern hardwood forests in relation to temperature and nitrogen availability. *Tree Physiology*, 16: 719 – 725.