

# 根际低氧胁迫对网纹甜瓜果期根系氮代谢的影响\*

刘义玲 孙周平 李天来\*\*

(沈阳农业大学园艺学院, 设施园艺省部共建教育部重点实验室, 辽宁省设施园艺重点实验室, 沈阳 110866)

**摘要** 采用气雾法栽培系统,研究了根际低氧(10%和5% O<sub>2</sub>)胁迫对网纹甜瓜(*Cucumis melo*)果实发育期间根系氮代谢的影响。结果表明:在30 d试验期内,与对照(21% O<sub>2</sub>)相比,低氧胁迫网纹甜瓜根系硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量、硝酸还原酶(NR)活性、谷氨酰氨合成酶(GS)活性先增后降;在低氧处理20 d时,网纹甜瓜上述指标显著高于对照,低氧处理30 d时,显著低于对照,且5% O<sub>2</sub>处理变化的幅度大于10% O<sub>2</sub>处理;谷氨酸脱氢酶(GDH)活性在低氧处理10 d时显著低于对照,处理20 d时,与对照差异不显著;谷草转氨酶(GOT)活性在低氧处理20 d时与对照差异不显著,处理30 d时,显著低于对照;在5% O<sub>2</sub>处理期间谷丙转氨酶(GPT)活性显著低于对照,10% O<sub>2</sub>处理20 d时显著低于对照;在低氧处理期间,根系中可溶性蛋白质含量、根系伤流液中氨基酸的总量和大部分氨基酸的含量均随着根际O<sub>2</sub>浓度的降低而减少;网纹甜瓜果实发育期间根际O<sub>2</sub>浓度长期处于10% O<sub>2</sub>以下时,根系对氮的吸收、代谢能力下降,植株氮循环水平降低。

**关键词** 网纹甜瓜; 根际O<sub>2</sub>浓度; 氮代谢

**中图分类号** Q945.78 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)9-2332-07

**Effects of root zone hypoxia stress on root nitrogen metabolism of muskmelon.** LIU Yi-ling, SUN Zhou-ping, LI Tian-lai\*\* (College of Horticulture, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Protected Horticulture, Ministry of Education/Key Laboratory of Protected Horticulture of Liaoning Province, Shenyang 110866, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2332–2338.

**Abstract:** By using aeroponics culture system, this paper studied the effects of root zone hypoxia (10% and 5% O<sub>2</sub>) stress on the root nitrogen metabolism of *Cucumis melo* during its fruit development period. During the 30 days experiment, the root NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents and nitrate reductase (NR) and glutamine synthetase (GS) activities of *C. melo* in treatments 10% and 5% O<sub>2</sub> decreased after an initial increase, as compared with the control (21% O<sub>2</sub>). At the 20 days of hypoxia treatments, the above-mentioned indicators were significantly higher than those of the control, while it they were adverse at the 30 days of hypoxia stress treatments. Moreover, the magnitude of the change was greater in treatment 5% O<sub>2</sub> than in treatment 10% O<sub>2</sub>. The root glutamate dehydrogenase (GDH) activity at the 10 days of hypoxia stress treatments was significantly lower than that of the control, while the difference was not significant at the 20 days of hypoxia stress treatments. No significant difference was observed in the root glutamic acid oxaloacetate transaminase (GOT) activity among the hypoxia stress treatments at the 20 days, but the GOT activity was significantly lower than that of the control at the 30 days. The root glutamic acid-pyruvic acid transaminase (GPT) activity in treatment 5% O<sub>2</sub> at the 30 days and in 10% O<sub>2</sub> treatment at the 20 days was significantly lower than that of the control. During the 30 days experiment, the root soluble protein content and the total amino acid content and most amino acids in xylem sap decreased with the decrease of rhizosphere O<sub>2</sub> concentration. It was concluded that when the rhizosphere O<sub>2</sub> concentration during the fruit development period of muskmelon fall to 10%, the root nitrogen uptake and assimilation, amino acid synthesis, and nitrogen translocation of the muskmelon were inhibited.

**Key words:** muskmelon; root zone O<sub>2</sub> concentration; nitrogen metabolism.

\* 国家自然科学基金项目(31101582)和辽宁省重大科技项目(2010215003)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: tianlaili@126.com

收稿日期: 2013-03-01 接受日期: 2013-05-22

在农业生产中,土壤板结或积水、浇水不当、洪涝灾害及无土栽培中根垫的形成等均易造成植物根际低氧逆境,影响植物正常的生长发育(Blokhina *et al.*, 2002)。网纹甜瓜属典型的低氧敏感性植物,生长介质氧不足是制约其大规模发展的决定性障碍因素(郭世荣, 2003),因此,如何从栽培措施上改善植物生长发育过程中根际通气状况,保证  $O_2$  的充足供给是目前生产中亟待解决的问题之一。根系是低氧胁迫的直接部位,深入研究根际低氧逆境对网纹甜瓜根系氮代谢的影响,探讨改善根际氧气环境的栽培措施尤为重要。研究表明,低氧胁迫下,植物的有氧呼吸受阻,植物体内氮代谢途径发生改变(Perata *et al.*, 1992)。根系中硝酸还原酶(NR)在低氧条件下被激活, $NO_3^-$ 可以代替氧作为电子传递链的最终电子受体,降低还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)水平,使线粒体和细胞质中的氧化型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸( $NAD^+$ )得以再生(Guo *et al.*, 1999; Kaiser & Huber, 2001),同时使过剩电子被消耗,减少氧自由基的产生和伤害(Botrel *et al.*, 1996; Aslam *et al.*, 2001)。根际低氧胁迫显著增加了网纹甜瓜(高洪波, 2004a)、黄瓜和番茄(Guo *et al.*, 1998)幼苗叶片  $NO_3^-$ -N、 $NH_4^+$ -N 含量和硝酸还原酶活性,降低了可溶性蛋白质含量。当根际氧水平为 5% 和 10% 时,番茄和黄瓜幼苗植株的相对生长速率显著低于 20%  $O_2$  浓度处理(Nichols *et al.*, 2002)。本课题前期研究也表明,在网纹甜瓜果实发育期根际氧浓度长期降为 5% 或 10% 时生长发育受到显著抑制,果实产量和品质显著降低(刘义玲等, 2009)。黄瓜幼苗在营养液溶氧浓度为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  条件下处理 2 d,根系有氧呼吸显著降低,无氧呼吸代谢产物显著增加(康云艳等, 2008)。目前有关低氧胁迫对网纹甜瓜生理代谢影响的研究大多在苗期进行(高洪波, 2004b, 2006; 孙艳军, 2005; 孙艳军等, 2006),对果实发育期影响的研究较少,而对网纹甜瓜在果实发育期根际低氧逆境下根系氮代谢的研究尚未见报道。本研究以“顶峰三号”网纹甜瓜(*Cucumis melo*)品种为试材,通过气雾法栽培系统,研究了不同浓度根际低氧胁迫对网纹甜瓜果实发育期间根系氮代谢的影响,以期为进一步探讨根际  $O_2$  浓度影响网纹甜瓜产量和品质的机制及设施栽培方式的改进提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2009 年 4—7 月在沈阳农业大学辽沈 I 型日光温室内进行。供试网纹甜瓜品种为“顶峰三号”。

### 1.2 试验设计

试验用栽培床为长 120 cm、宽 80 cm、高 40 cm 的气雾栽培装置,供气装置同李天来等(2009)研制的半封闭系统。用角铁作骨架,四周用 3 cm 厚苯板维护,黑色 PVC 塑料膜覆盖,保持栽培槽内不透光。在床一侧距上沿 10 cm 处和床底部附近分别打取直径为 1.5 cm 的孔,安装进水管和回水管。进水管与床同长,并在其上均匀安装雾化喷头,在盖板上均匀打两排孔(每排 3 个)作定植孔。营养液采用日本山崎甜瓜配方营养液,由水泵供给。每隔 300 s 供给营养液 40 s,通过定时器和电磁阀控制。雾化喷头的流量为  $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ,管道营养液压力在 0.2 Pa 左右。营养液循环利用,每周更换 1 次。每天根据测定的电导率(EC)值的变化对营养液浓度进行及时调控,以保证营养液中各营养元素含量的恒定。营养液 pH 保持在 6.5~6.8,温度保持在 22~26  $^{\circ}\text{C}$ 。

于 2009 年 3 月 14 日播种育苗,育苗基质组成为体积比草炭:蛭石=2:1,32 孔穴盘育苗。4 月 20 日(3 叶 1 心期)选取整齐一致的幼苗,洗净根系定植在栽培床上,株距 45 cm,行距 50 cm,每床 6 株,3 次重复。定植后 6 d 内挂遮阳网遮光,单干整枝,吊蔓栽培,人工授粉,单株留瓜 1 个,其他管理同生产。

设置 21% (对照)、10%、5% 3 个根际  $O_2$  浓度处理,每处理设 3 次重复,每个重复 6 株。21%  $O_2$  处理为室外正常大气,10% 和 5%  $O_2$  处理采用室外正常大气与钢瓶中  $N_2$  混合气体,用 PVC 导管通入栽培床中下部,10% 和 5%  $O_2$  处理栽培床中氧的分压( $PO_2$ )分别为  $10 \pm 1 \text{ kPa}$  和  $5 \pm 1 \text{ kPa}$ 。自第 1 雌花开放当天开始连续处理 30 d (花后 30 d 果实成熟),栽培床盖板上安装开闭可调的排气管,用 XPO-318 型数字式氧气浓度计实时监测  $O_2$  的浓度变化,通过调整流量及不间断通气使栽培床内气体浓度保持在试验设置浓度范围内。

### 1.3 测定指标与方法

于处理 0、10、20、30 d 时,在各处理植株根系中间位置进行破坏性取样,每个处理取 3 株(每个重复取 1 株),单株取样为 1 个重复,液氮速冻后超低

温冰箱保存。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  采用奈氏比色法测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用 SKALAR 流动分析仪法测定;NR 活性和蛋白质含量参照李合生(2000)方法,GS、GDH、GOT、GPT 活性参照《现代植物生理学实验指南》(中国科学院上海植物生理研究所和上海市植物生理学会,1999)的方法。

处理 30 d 时收集伤流液,每处理取 3 株,连续收集 14 h。用日立 835-50 型高速氨基酸自动分析仪测定伤流液中各种游离氨基酸含量。具体方法是:伤流液 5 mL 加入 5 mL 5% 的磺基水杨酸,4 ℃ 下 12000 g 离心 15 min,取上清液用于测定游离氨基酸种类和含量。仪器分析条件:离子交换层析柱为 2.5 mm×150 mm;离子交换树脂为 2619#;柱温为 53 ℃;缓冲液为柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液;显示剂为茚三酮溶液。

1.4 数据处理

所有指标每个处理均单独测定 3 株(取自 3 个重复),数据为 3 株的平均值。利用 DPS 软件对各指标数据进行方差分析,并对平均值进行 Duncan 新复极差测验,显著性水平设为  $\alpha = 0.05$ 。利用 Microsoft Excel 2003 进行做图。

2 结果与分析

2.1 低氧胁迫对根系氮含量的影响

根际低氧处理网纹甜瓜根系  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量较对照表现先增后降的变化趋势,处理 20 d 时,10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量分别比对照增加 15.49% 和 30.32% ( $P<0.05$ ), $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量分别比对照增加 9.46% 和 17% ( $P<0.05$ )。处理 20 d 后迅速下降。处理 30 d 时,低氧处理根系  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均显著低于对照。表明在网纹甜瓜果实发育期间,根际 10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理前 20 d 促进了根系内  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量的增加,随着处理时间的延长,根系内氮含量又随根际  $\text{O}_2$  浓度的降低而减少(图 1)。

2.2 低氧胁迫对根系氮代谢相关酶活性的影响

随着根际  $\text{O}_2$  浓度的降低,网纹甜瓜根系内 NR 和 GS 活性较对照先增后降,在处理的前 20 d 均显著高于对照,且 5%  $\text{O}_2$  处理高于 10%  $\text{O}_2$  处理(图 2)。随着处理时间的延长迅速下降,处理 30 d 时低于对照。GDH 活性在低氧处理 10 d 时,10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理分别比对照低 18.3% 和 29.34% ( $P<0.05$ ),处理 20 d 时,不同处理间差异不显著。GOT 活性在

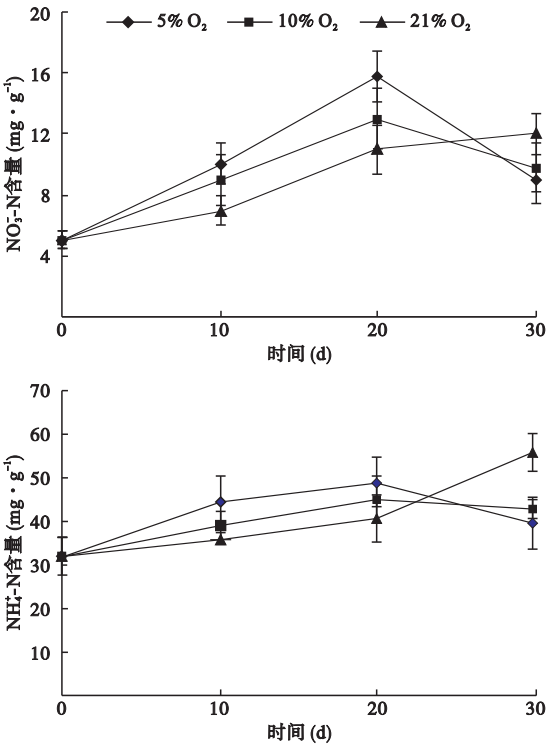


图 1 根际  $\text{O}_2$  胁迫对网纹甜瓜根系  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量的影响  
Fig. 1 Effect of root-zone low  $\text{O}_2$  stress on  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  content of muskmelon root

处理前 20 d 与对照差异不显著,处理 20 d 后显著低于对照,处理 30 d 时,10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理分别比对照低 23.61% 和 64.56% ( $P<0.05$ ),且 5%  $\text{O}_2$  处理显著低于 10%  $\text{O}_2$  处理。GPT 活性在 5%  $\text{O}_2$  处理期间均显著低于对照,处理 10 d 时,比对照低 23.41% ( $P<0.05$ )。10%  $\text{O}_2$  处理 GPT 活性在处理 10 d 与对照差异不显著,处理 20 d 时显著低于对照,随着处理时间延长差异逐渐变小。表明网纹甜瓜在果实发育期间,根际在 10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理初期对 NR 和 GS 活性起到了诱导作用,促进了  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的还原和转化,氮代谢加强。但随着处理时间的延长,根系内氨的进一步同化受到了抑制。

2.3 低氧胁迫根系伤流液中氨基酸含量的影响

从表 1 可知,根际 10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理 30 d 后,不同程度地降低了根系伤流液中所检测到的 16 种氨基酸的含量,其中 5%  $\text{O}_2$  处理各种氨基酸的含量均显著低于对照,10%  $\text{O}_2$  处理除丝氨酸和酪氨酸与对照差异不显著外,而其他 14 种氨基酸的含量均显著低于对照。从各种氨基酸所占总氨基酸的比例看,根际 10% 和 5%  $\text{O}_2$  处理后,天冬氨酸、蛋氨酸、赖氨酸、组氨酸、亮氨酸和酪氨酸和对照差异不显

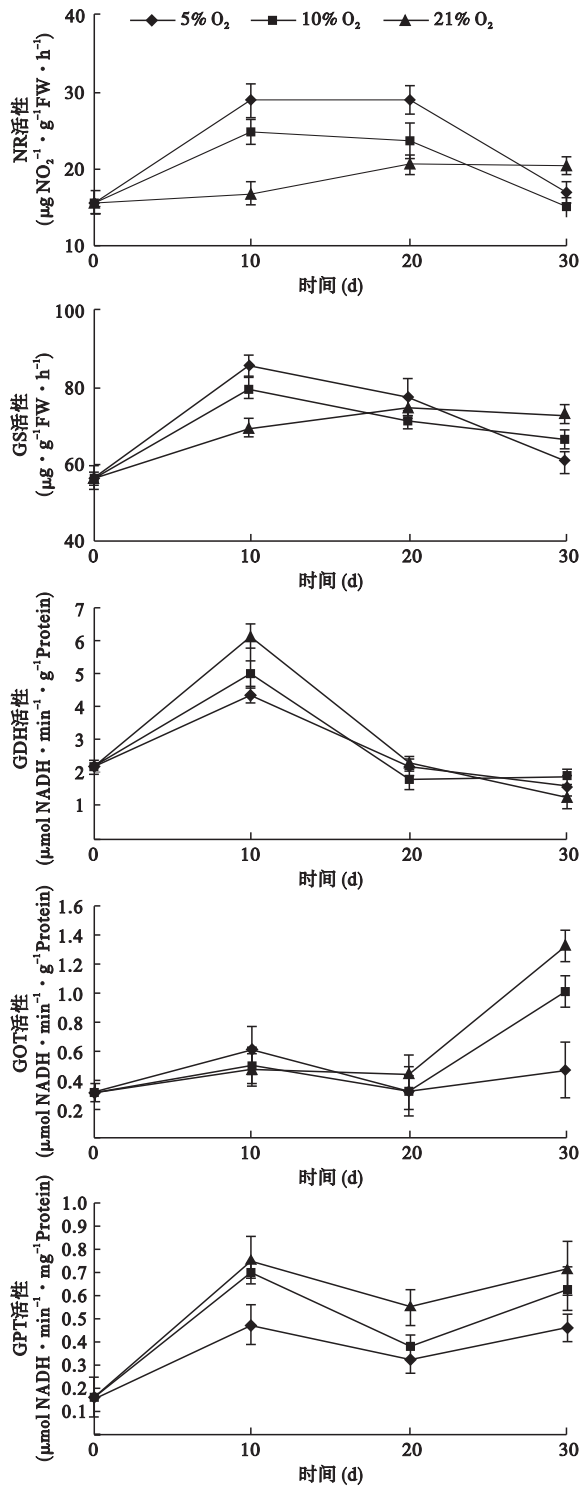


图2 根际  $O_2$  胁迫对网纹甜瓜果期根系氮代谢相关酶活性的影响  
Fig.2 Effect of root-zone  $O_2$  stress on nitrogen metabolism-related enzyme activities in muskmelon root

著,丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、半胱氨酸、缬氨酸、异亮氨酸和苯丙氨酸所占比例随根际氧浓度的降低而增加,苏氨酸、丙氨酸和精氨酸随根际氧浓度的降低而降低。说明根际低氧会抑制网纹甜瓜果期根系部分氨基

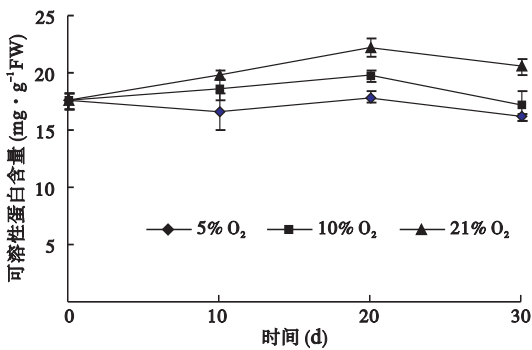


图3 根际  $O_2$  胁迫对网纹甜瓜果期根系蛋白质含量的影响  
Fig.3 Effect of root-zone  $O_2$  stress on protein content of muskmelon root

酸的合成及运输,使部分氨基酸所占总氨基酸的比例发生变化。

## 2.4 低氧胁迫对根系可溶性蛋白质含量的影响

由图3可知,10%和5%  $O_2$  浓度处理网纹甜瓜果期根系蛋白质含量均表现先增后降变化趋势,处理20d时达到最大值。5%  $O_2$  处理期间显著低于对照,10%  $O_2$  处理20d时显著低于对照。处理30d时,10%和5%  $O_2$  处理区根系蛋白质含量分别比对照下降了21.39%和21.53% ( $P<0.05$ )。说明根际低  $O_2$  处理显著抑制了网纹甜瓜果期根系蛋白质的合成。

## 3 讨论

根系最主要的功能就是吸收养分和水分,氮素是植物需求量最大、根系吸收最多的营养元素,甜瓜属于喜  $NO_3^-$ -N 作物。根系吸收的氮一部分运输到地上部,大部分在根细胞内还原为  $NH_4^+$  直接参与氨基酸的合成与转化(郭世荣,2003)。在此过程中,硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶和谷氨酸脱氢酶等关键酶参与了催化和调节,形成的谷氨酸或谷氨酰胺在转氨酶的作用下通过氨基交换作用形成多种多样的氨基酸或酰胺,再以氨基酸或酰胺为主要底物在细胞中合成蛋白质(许振柱和周广胜,2004)。研究表明,低氧胁迫下,  $NO_3^-$  在依赖 NADH 的硝酸还原酶作用下可以代替  $O_2$  作为电子传递链的最终电子受体(Guo *et al.*, 1999),在电子传递过程中  $NO_3^-$  还原形成  $NH_4^+$  和各种含氮化合物,同时生成  $NAD^+$ ,在低氧逆境下此过程可以短暂维持植物的生存(Tsuiji *et al.*, 2000),也说明在根际低氧胁迫下  $NO_3^-$ -N 含量和 NR 活性的提高可以增强植物的抗低氧胁迫能力。本试验中,根际 10% 和 5%  $O_2$  处理初期网纹甜瓜果期根系  $NO_3^-$ -N、 $NH_4^+$ -N 含量和 NR



表 1 根际 O<sub>2</sub>胁迫对网纹甜瓜根系伤流液中氨基酸含量的影响  
Table 1 Effect of root-zone O<sub>2</sub> stress on amino acid content in xylem sap of muskmelon root

氨基酸组分	含量 (mg · L <sup>-1</sup> )			比例 (%)		
	5% O <sub>2</sub>	10% O <sub>2</sub>	21% O <sub>2</sub>	5% O <sub>2</sub>	10% O <sub>2</sub>	21% O <sub>2</sub>
天冬氨酸 Asp	16.71±2.41 c	25.41±3.12 b	40.14±3.52 a	1.43±0.11 a	1.12±0.19 a	1.08±0.21 a
苏氨酸 Thr	91.02±5.46 c	829.33±15.34 b	955.06±21.41 a	7.81±1.65 c	36.66±5.01 a	25.76±3.51 a
丝氨酸 Ser	11.66±1.47 b	11.86±1.32 ab	19.41±0.98 a	1.00±0.11 a	0.52±0.15 b	0.52±0.13 b
谷氨酸 Glu	567.15±21.32 c	690.45±25.64 b	1425.35±20.64 a	48.69±2.55 a	30.52±1.52 b	38.45±3.41 ab
甘氨酸 Gly	17.51±2.55 b	21.69±3.51 b	32.21±2.45 a	1.50±0.22 a	0.96±0.16 b	0.87±0.22 b
丙氨酸 Ala	5.72±1.54 c	10.91±2.31 b	34.69±4.65 a	0.49±0.14 b	0.48±0.09 b	0.94±0.16 a
半胱氨酸 Cys	141.64±8.25 b	154.15±10.31 b	357.91±12.52 a	12.16±2.31 a	6.81±1.65 b	9.65±2.84 ab
缬氨酸 Val	71.52±5.31 b	77.74±3.78 b	128.70±8.94 a	6.14±1.42 a	3.44±0.53 b	3.47±0.68 b
蛋氨酸 Met	34.66±4.12 c	52.23±3.51 b	79.00±5.75 a	2.97±0.63 a	2.31±0.54 a	2.13±0.79 a
异亮氨酸 Ile	35.04±3.41 b	43.02±4.68 b	101.07±6.41 a	3.01±0.24 a	1.90±0.61 b	2.73±0.63 ab
苯丙氨酸 Phe	85.63±3.51 b	85.61±2.84 b	94.31±4.21 a	7.35±1.32 a	3.78±0.54 b	2.54±0.61 b
赖氨酸 Lys	33.52±2.64 c	81.33±4.68 b	119.95±8.75 a	2.88±0.54 a	3.60±0.65 a	3.24±0.97 a
组氨酸 His	16.16±2.34 b	18.88±3.65 b	33.99±5.68 a	1.39±0.42 a	0.83±0.21 a	0.92±0.64 a
精氨酸 Arg	25.69±4.65 c	139.04±8.64 b	250.47±12.41 a	2.21±0.87 b	6.15±1.31 a	6.76±1.65 a
亮氨酸 Leu	4.96±1.65 c	11.33±2.54 b	23.15±4.12 a	0.43±0.12 a	0.50±0.11 a	0.62±0.08 a
酪氨酸 Tyr	6.35±1.23 b	8.96±1.56a b	12.15±2.65 a	0.55±0.09 a	0.40±0.07 a	0.33±0.04 a
总氨基酸	1164.94±71.86 c	2261.93±100.43 b	3707.43±125.09 a			

不同字母表示邓肯氏显著性检验,小写字母为  $P<0.05$ 。

活性均增加,随着处理时间的延长迅速下降。说明根系中 NR 在低氧条件下被激活,增加了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>向 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的转化,促进了根系对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的吸收,根系 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量升高。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在 NR 的作用下作为电子传递链中的电子受体,在 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>还原过程中再生 NAD<sup>+</sup>,同时生成较多的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,以维持细胞的代谢功能。与网纹甜瓜幼苗(高洪波等,2004a)、黄瓜和番茄(郭世荣等,2003)根系在低氧条件下的反应相似。这也是网纹甜瓜根系为适应缺氧环境,通过 NR 作用来提高对氮的吸收和转化进而缓解逆境伤害的一种临时适应性反应。但随着处理时间的延长,低氧胁迫程度的加深,无氧呼吸产生的能量供应不足(刘义玲等,2010),根系对矿质营养的吸收和运输速率减慢,根系活力下降(孙艳军,2005;康云艳等,2008),抑制了根系对水分和 N、P、K 等营养元素的吸收(Glinka & Reinhold,1962; Matocha & Mstoghim,1998),导致根系内 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量下降, NR 活性降低,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>还原为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>受到抑制,根系内氮含量降低。GS 是处于氮代谢中心的多功能酶,催化无机氮转变成有机氮的第一步反应,其活性的高低可以反映氮素同化能力的强弱(Becker *et al.*,2000;王月福等,2003)。本试验根际低氧处理前 10 d 网纹甜瓜根系内 GS 活性高于对照,然后迅速下降。这可能是由于在处理初期 GS 作用的底物 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的积

累刺激了 GS 活性的增加,促进了氮的初始同化,随着处理时间的延长,有氧呼吸受影响后,氮同化所需的能量 ATP 减少及根系对氮的吸收能力下降,导致 NR 和 GS 活性下降,造成氨基酸的合成及氨基交换作用受到抑制,进而也会影响蛋白质的合成。

GOT 和 GPT 是 2 种最普遍的转氨酶,在植物氮代谢中起着重要作用。GOT 还连接碳氮两大代谢,GPT 负责有机、无机氮间的氨基转移,其活性的高低反映了植物体内氮代谢强度变化(宁书菊等,2009)。谷氨酸在 GOT 的催化下通过转氨作用或氨基交换作用将其 α-氨基转移给草酰乙酸的 α-酮基,从而形成天冬氨酸和 α-酮戊二酸。丙酮酸和谷氨酸在 GPT 的催化下,形成丙氨酸和 α-酮戊二酸,进一步还可以合成其他氨基酸。本研究表明,根际 10% 和 5% O<sub>2</sub> 处理下根系内 GDH、GOT 和 GPT 活性均低于对照,说明网纹甜瓜果实发育期根系长期处在低氧逆境下,根系氮的同化及氨基酸的形成受到抑制。氨基酸既是氮代谢的重要底物也是其重要产物,是羧酸和氨基的结合物,其中羧酸提供形成氨基酸的碳链骨架,氮为其新增加的官能基团。地上部光合作用产生的碳水化合物通过韧皮部向根部运输,通过呼吸代谢的转化提供各种羧酸(吴亚维,2008)。氮可以直接来源于植物根系从营养液中吸收的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的还原。根系是氨基酸合

成的重要器官,伤流液中各种氨基酸的含量可以反映出根系合成和运输氨基酸的能力,也可以判断出根系无机氮吸收、同化水平及地上与地下氮循环水平。本研究中,根际 10% 和 5%  $O_2$  处理 30 d 时不同程度地降低了根系伤流液中所检测到的 16 种氨基酸的含量,根系中蛋白质含量下降,表明长期根际低氧抑制了根系对氮的吸收、同化和氨基酸的合成或转化,扰乱了植物体的氨基酸代谢。由于作物根系对氮的吸收与代谢,需要根系有氧呼吸提供能量,而根系在长期的低氧条件下根系有氧呼吸受到抑制(刘义玲等,2010)。能量不足一方面使根系对氮的吸收、还原能力下降;另一方面也使光合产物向根部运输或碳水化合物向羧酸的转化受到抑制,最终导致了根系氨基酸的合成和向地上部的运输能力下降。郭世荣等(2003)研究表明,营养液溶氧浓度为  $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  低氧胁迫下黄瓜幼苗植株体内氨基酸代谢增强,根系和叶片内氨基酸含量明显升高,这可能是由于在短期低氧胁迫下,游离氨基酸的大量形成有利于提高植株的耐低氧能力,是黄瓜对低氧胁迫的适应性反应。而本研究表明,低氧处理 30 d 的网纹甜瓜根系中氨基酸的合成及在植物体内的运输能力是下降的,不同结果的得出可能是由于处理时间不同及植物发育的不同阶段对低氧逆境反应不同所致。蛋白质作为氮素代谢的终极产物,其生物合成主要在 NR、GS、GDH 等一系列酶催化下完成。植物体内可溶性蛋白质含量的变化是反映环境胁迫下植物代谢变化较为敏感的生理指标之一(高洪波和陈贵林,2002)。本研究结果表明,在根际 10% 和 5%  $O_2$  处理期间根系蛋白质含量下降。这一方面可能是由于根系氮代谢受到抑制,蛋白质合成的前体减少了;另一方面可能是由于蛋白质的合成需要能量,ATP 的降低阻碍了氨酰-tRNA 的合成,导致蛋白质合成速率下降。同时,能量不足也可能抑制了地上部蛋白质的合成或向根系的运输,植株氮循环水平下降所致,还有待于进一步研究。

## 参考文献

高洪波,陈贵林. 2002. 钙调素拮抗剂与 Ca 对茄子幼苗抗冷性的影响. 园艺学报, **29**(3): 243–246.  
高洪波,郭世荣,汪 天. 2004a. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜硝态氮、氨态氮和蛋白质含量的影响. 园艺学报, **31**(2): 236–238.

高洪波,郭世荣,汪 天. 2004b. 营养液低氧胁迫对网纹甜瓜幼苗脯氨酸和多胺含量的影响. 植物生理学通讯, **40**(4): 434–436.  
高洪波,郭世荣,章铁军,等. 2006. 营养液低氧胁迫对网纹甜瓜幼苗生长和生理代谢影响. 沈阳农业大学学报, **37**(3): 368–372.  
郭世荣,橘昌司,李谦盛. 2003. 营养液温度和溶解氧浓度对黄瓜植株氮化合物含量的影响. 植物生理与分子生物学学报, **29**(6): 593–596.  
郭世荣. 2003. 无土栽培学. 北京: 中国农业出版社.  
康云艳,郭世荣,段九菊. 2008. 根际低氧胁迫对黄瓜幼苗根系呼吸代谢的影响. 应用生态学报, **19**(3): 583–587.  
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.  
李天来,陈亚东,刘义玲,等. 2009. 根际  $CO_2$  浓度对网纹甜瓜根系生长和活力的影响. 农业工程学报, **25**(4): 210–215.  
刘义玲,李天来,孙周平,等. 2009. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜光合作用、产量和品质的影响. 园艺学报, **36**(10): 1465–1472.  
刘义玲,李天来,孙周平,等. 2010. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜生长、根呼吸代谢及抗氧化酶活性的影响. 应用生态学报, **21**(6): 1439–1445.  
宁书菊,窦慧娟,陈晓飞,等. 2009. 水稻生育后期根系氮代谢生理活性变化的研究. 应用生态学报, **17**(3): 506–511.  
孙艳军,郭世荣,胡晓辉,等. 2006. 根际低氧逆境对网纹甜瓜幼苗生长及根系呼吸代谢途径的影响. 植物生态学报, **30**(1): 112–117.  
孙艳军. 2005. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜幼苗伤害生理的研究(硕士学位论文). 南京: 南京农业大学.  
王月福,姜 东,于振文,等. 2003. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础. 中国农业科学, **36**(5): 513–520.  
吴亚维. 2008. 土壤紧实胁迫对苹果生长的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学.  
许振柱,周广胜. 2004. 植物氮代谢及其环境调节研究进展. 应用生态学报, **15**(3): 511–516.  
中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 1999. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社.  
Aslam M, Travis RL, Rains DW. 2001. Enhancement of nitrate reductase activity and metabolic nitrate concentration by methionine sulfoximine in barley roots. *Plant Science*, **161**: 133–142.  
Becker TW, Carrayol E, Hirel B. 2000. Glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase isoforms in maize leaves: Localization, relative proportion and their role in ammonium assimilation or nitrogen transport. *Planta*, **211**: 800–806.

- Blokhina O, Virolainen E, Fagerstedt KV. 2002. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: A review. *Annals of Botany*, **91**: 179–194.
- Botrel A, Magne C, Kaiser WM. 1996. Nitrate reduction, nitrite reduction and ammonium assimilation in barley roots in response to anoxia. *Plant Physiology and Biochemistry*, **34**: 645–652.
- Glinka Z, Reinhold L. 1962. Rapid changes in permeability of cell membranes to water brought about by carbon dioxide and oxygen. *Plant Physiology*, **37**: 481–486.
- Guo SR, Nada K, Katoh H, *et al.* 1999. Differences between tomato and cucumber in ethanol, lactate and malate metabolisms and cell sap pH of roots under hypoxia. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, **68**: 152–159.
- Guo SR, Nada K, Tachibana S. 1998. A role for nitrate reductase in the high tolerance of cucumber seedlings to root-zone hypoxia. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, **67**: 613–618.
- Kaiser WM, Huber SC. 2001. Post-translational regulation of nitrate reductase: Mechanism, physiological relevance and environmental triggers. *Journal of Experimental Botany*, **52**: 1981–1989.
- Matocha JE, Mostoghi S. 1988. Effects of carbon dioxide and iron enrichment of a calcareous soil on Fe-chlorosis, root and shoot development of grain sorghum. *Journal of Plant Nutrition*, **11**: 1503–1515.
- Nichols MA, Woolley DJ, Christic CB. 2002. Effect of oxygen and carbon dioxide concentration in the root zone on the growth of vegetable. *Acta Horticulturae*, **578**: 119–122.
- Perata P, Vernieri P, Armellini D, *et al.* 1992. Immunological determination of acetaldehyde-protein adducts in ethanol-treated carrot cell. *Plant Physiology*, **98**: 913–918.
- Tsuji H, Nakazono M, Saisho D, *et al.* 2000. Transcript levels of the nuclear-encoded respiratory genes in rice decrease by oxygen deprivation: Evidence for involvement of calcium expression of the alternative oxidase 1a gene. *FEBS Letters*, **471**: 201–204.
- 
- 作者简介** 刘义玲,女,1975年生,博士,副研究员,主要从事设施蔬菜栽培生理及根系生理生态研究。E-mail: liuyiling2008@126.com
- 责任编辑** 魏中青
-