植物营养与肥料学报 2009,15(6): 1425-1432
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同形态氮素对樱桃番茄果实发育和品质的影响

徐新娟[1,2], 李庆余[1], 孙 瑞[1], 仲 涛[1], 宋晓晖[1], 董彩霞[1*], 沈其荣[1]
(1 南京农业大学资源与环境科学学院,江苏南京 210095; 2 河南科技学院生命科学学院,河南新乡 453003)

摘要: 采用基质-营养液共培养法,研究了不同形态氮素及配施对樱桃番茄果实解剖结构、果实生长以及发育过程中与品质有关的生理指标的影响。结果表明: 1)与全硝(100% NO_3^-)处理相比,铵硝配施(75% NO_3^-:25% NH_4^+)处理下果实表皮细胞形状更加规则,排列紧密,且角质层覆盖均匀; 全铵(100% NH_4^+)处理的果实表皮细胞形状不规则,排列疏松,其角质层厚度在幼果期和绿熟期显著低于全硝和铵硝配施处理,在成熟期显著增加。2)全硝和铵硝配施处理果实单果重变化一致,成熟期铵硝配施处理单果重略高。花后 14 d 全铵处理显著降低单果重,抑制植株生长,并缩短生育时期。3)氮素形态显著影响果实发育过程中氨基酸的变化,全硝呈持续下降趋势; 铵硝配施先下降后升高又持续下降; 全铵则呈"W"型。不同形态氮素处理下果实总糖含量均先升后降,于花后 21 d 达到高峰,此时全铵处理的总糖显著高于全硝和铵硝配施处理。全硝及铵硝配施处理下可滴定酸度呈单峰曲线,花后 28 d 达到最高值; 全铵处理在花后 7 d 含量最高,随后逐渐下降。

关键词: 氮素形态; 番茄; 显微结构; 品质
中图分类号: S143.1; S641.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2009)06-1425-08

Effects of nitrogen forms on the development and quality of cherry tomato fruit

XU Xin-juan[1,2], LI Qing-yu[1], SUN Rui[1], ZHONG Tao[1], SONG Xiao-hui[1], DONG Cai-xia[1*], SHEN Qi-rong[1]
(*1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*
2 College of Life Sciences, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Effects of different N forms on fruit anatomy and growth, and contents of metabolites related to fruit quality during the development of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit were studied by using matrix-nutrient solutions co-cultivated with 100% NO_3^-, 100% NH_4^+ and 75% NO_3^-:25% NH_4^+. The results are as follows: 1) In comparison to the treatment with 100% NO_3^-, shapes of epidermal cells of the fruits are more regular and have a closer arrangement, and cuticle is distributed evenly under the treatment with 75% NO_3^-:25% NH_4^+. While, among all the treatments, shapes of the epidermal cells are irregular and have a looser arrangement, and the cuticle is thinner at young fruit and green-ripe stages and is thicker at the mature stage under the treatment with 100% NH_4^+. 2) During the development of the fruit, individual fruit weight of the treatment with 75% NO_3^-:25% NH_4^+ shows a similar change tendency as that of the treatment with 100% NO_3^-, and the weight of the treatment with 75% NO_3^-:25% NH_4^+ is a little higher than that of the treatment with 100% NO_3^- at the mature stage. While, under the treatment with 100% NH_4^+, the weight is significantly reduced since 14 days after flowering stage (DAF). 3) Content of amino acids of the fruits decreases gradually after 7 DAF under the treatment with 100% NO_3^-, but it decreased firstly, then increased from 14 to 21 DAF and decreased again in the treatment of 75% NO_3^-:25% NH_4^+. However, in the 100% NH_4^+ treatment, it showed a tendency like "W". Total sugar contents under all the treatments increase at beginning, reach to the highest content at 21 DAF, and then decrease. Total sugar content under the with 100% NH_4^+ is higher that that of the other treatments. The change of titratable acidity content shows a single peak at 28 DAF in the treatments with 100% NO_3^- and 75% NO_3^-:25%

收稿日期: 2008-11-12　　**接受日期**: 2009-03-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(30600382); 和南京农业大学 SRT 项目(0707B10)资助。
作者简介: 徐新娟(1979—),女,河南漯河人,助教,研究方向为植物营养生理。E-mail: xiaye0623@163.com
* 通讯作者 Tel: 025-84396393, E-mail: cxdong@njau.edu.cn

NH_4^+. While, under the treatment with 100% NH_4^+, titratable acidity content is the highest at 7 DAF, and then decreases.

Key words: nitrogen forms; tomato; anatomical structure; quality

番茄是一种重要的经济作物,也是研究果实发育和成熟的典型模式作物,其肉质果实在发育和成熟过程中发生了很多结构和代谢上的变化[1]。近年来,国内外有关氮素形态对植物生长的影响主要集中在 NO_3^-、NH_4^+ 及 NO_3^-、NH_4^+ 配施对植物的氮素同化[2-5]及叶菜类[6-8]品质安全方面的研究上。尽管 Khamis 等[9]和 Lugert 等[10]研究了水分和盐分胁迫下不同形态氮素对成熟番茄果实中糖、酸等品质指标的影响,但是氮素形态对果实发育过程中各种代谢物质的动态变化的影响很少报道。NH_4^+ 作为唯一氮源引起许多喜硝植物出现毒害特征如生长受限、叶片缩小、根冠比增加等[10-11],植物无法正常生长,导致全铵营养在生产上无实际应用意义。但是,NO_3^- 和 NH_4^+ 以一定比例配施能显著促进大部分蔬菜如番茄、辣椒、油菜等的生长,增加其单果重和产量[12-15],其最佳比例也随植物种类和生育期不同而不同[16]。研究表明,75% NO_3^-:25% NH_4^+ 是一个适合番茄生长的相对理想比例[15,17-18]。因此,在研究氮素形态及配比对果实生长、发育进程及品质的影响机理时有必要设置全铵处理。葛水莲等[19]利用石蜡切片制片法观察桃果实发育过程中果皮、子房等的解剖结构,直观了解果实的生长发育情况。这在许多果实如樱桃、绞股蓝、梨等都得到了应用[20-22]。但迄今为止,不同形态氮素对果实生长发育过程中解剖学结构的影响尚未见报道。

本试验以樱桃番茄为材料,从果实表皮的解剖结构及果实发育过程中蛋白质、糖、酸等品质指标的动态变化入手,研究 NO_3^-、NH_4^+ 及 NO_3^-、NH_4^+ 配施对番茄果实生长和发育的影响,探讨果实发育过程中各种代谢物质的变化规律,以期为氮素调控果实的生长和发育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验采用基质-营养液共培养方法。供试番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)品种为樱桃番茄(cherry tomato)"红洋梨"。种子在55℃的温水中消毒15 min后,用去离子水冲洗并浸泡12 h。将洗净的种子置于培养皿中在28℃恒温培养箱中催芽,然后播种于洗净的石英砂中。30 d后选择生长一致的幼苗移栽至体积为10 L特制的基质-营养液共培养塑料盆钵。该盆钵上方为填充基质(石英砂),下层为营养液,中间用有孔的聚乙烯塑料板隔开(图1),每盆3棵。每次添加营养液时,先将盆中剩余的营养液通过底端的软管流出并弃之,营养液从上面的聚乙烯管中加入。于下午5:00以后更换营养液,营养液浓度从1/2到全营养,逐步提高浓度。移栽初期每次浇液0.5 L,后期随蒸腾量增加浇液量增至1 L到2 L,隔天浇一次营养液,试验期间营养液的总用量约为40 L/盆。设置3个处理:全硝(100% NO_3^-,用100%NN表示)、铵硝配施(75% NO_3^-:25% NH_4^+,用75%NN:25%AN表示)、全铵(100% NH_4^+,用100%AN表示)。总氮浓度均为4 mmol,以 KNO_3 提供 NO_3^-,$(NH_4)_2SO_4$ 提供 NH_4^+。所有处理中K、Ca、P、Mg、S浓度分别为6、4、2、1、2 mmol/L,Cl、B、Mn、Zn、Cu、Mo浓度分别为50、25、2.0、2.0、0.5、0.5 μmol/L,以EDTA-Fe(20 μmol/L)为Fe源,加入双氰胺(7 μmol/L)作为硝化抑制剂,营养液pH设为6.0~6.1。试验采取随机排列,每个处理设16盆,重复4次。

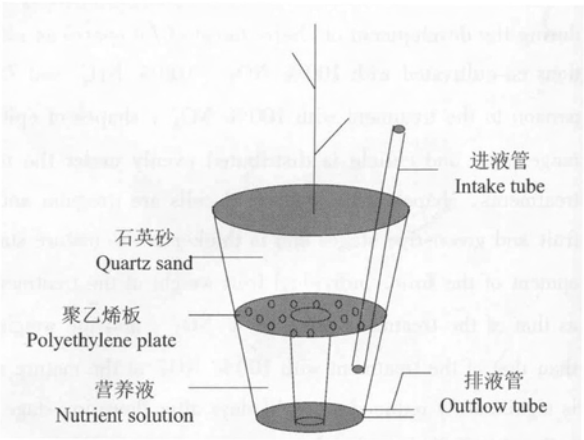

图1 基质-营养液共培养装置示意图

Fig.1 The skeleton diagram of co-cultivated device of matrix-nutrient solution

1.2 采样方法

于花后7 d开始(盛花期为2008年5月20号到5月27号),选择同一日开花、发育正常、大小均匀的茎秆挂牌标记,每7 d采样一次。于上午10:00采

样，采样时在同一花序上选取开花后天数一致的果实，每 4 盆取 12 个果实作为一个重复。记录果实鲜重，用游标卡尺测量果实纵径和横径，随后将果实用四分法采样，液氮速冻，-20℃保存，用以测定各项生理指标。

根据番茄果实发育的形态结构变化，将其发育的动态过程分为 3 个时期。分别在幼果期（花后 7 d）、绿熟期（花后 21 d）和成熟期（全铵处理在花后 35 d；全硝和铵硝配施处理在花后 42 d）进行采样，选择果实中部赤道区切块放入 FAA 固定液中，抽气 30 min，用于制作石蜡切片。

1.3　测定项目及方法

显微结构观察：采用常规石蜡制片[23]，切片厚度 8 μm，番红-固绿双重染色，中性树胶封片，用 OLYMPUS BX 51 自动显微装置观察并照相。

果实各生理指标测定：可溶性蛋白质含量用考马斯亮蓝 G-250 法[24]测定；游离氨基酸含量测定用水合茚三酮法[24]测定；维生素 C（Vc）含量用 2,6-二氯靛酚法[24]测定；可溶性总糖含量用蒽酮比色法[24]测定；果实可滴定酸度用酸碱滴定法，以 0.1 mol/L NaOH 进行滴定，用柠檬酸（K = 0.064）表示果实酸度。

数据采用 SAS 8.0 软件处理，LSD 法多重比较。

2　结果与分析

2.1　氮素形态对番茄果皮微观结构的动态变化的影响

番茄果实属于浆果类，果皮的三层区分不显著，都由子房发育而来。其外果皮有一层表皮细胞组成，中果皮和内果皮则为大而薄的薄壁细胞。切片结果（见图 2）显示：幼果期全硝处理下果实表皮细胞排列较为整齐，但形状不太规则，角质层的厚薄不

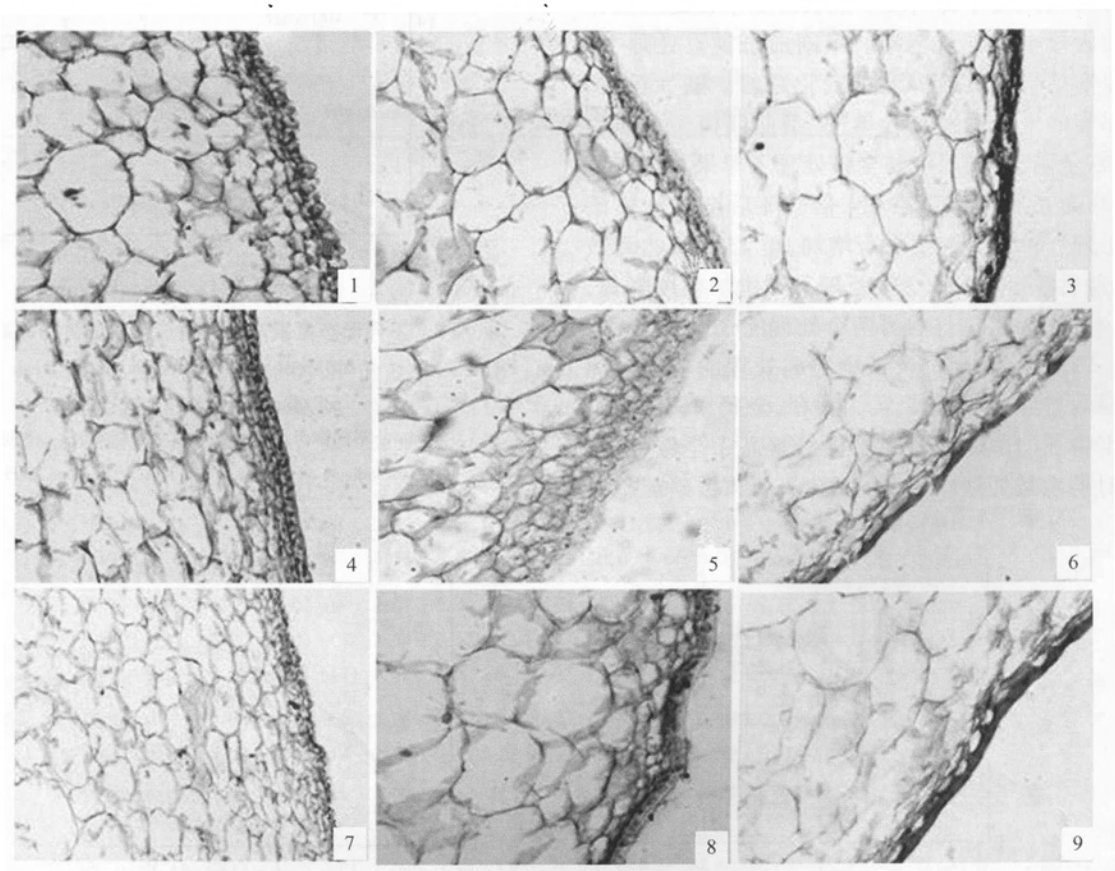

图 2　氮素形态对番茄果皮微观结构影响切片图

[注：1、2、3 为 100% NO_3^- 处理下果实表皮结构横切面；4、5、6 为 75% NO_3^-：25% NH_4^+ 处理下果实表皮横切面；7、8、9 为 100% NH_4^+ 处理下果实表皮横切面。其中 1、4、7 为幼果期，×40；2、5、8 为绿熟期，×20；3、6、9 为成熟期，×20。

Note: 1, 2 and 3 are the transverse sections of tomato fruit under the treatment with 100% NO_3^-; 4, 5 and 6 are the transverse sections of tomato fruit under the treatment with 75% NO_3^-:25% NH_4^+; 7, 8 and 9 are the transverse sections of tomato fruit under the treatment with 100% NH_4^+. In which, 1, 4 and 7 are the at the young fruit stage, ×40; 2,5 and 8 are the at the green ripe stage, ×20; 3,6 and 9 are the at the mature stage, ×20.)

均匀；铵硝配施处理下果实表皮细胞形状规则，排列紧密整齐，角质层均匀的覆盖在表皮细胞外面；相反，全铵处理的果实表皮细胞体积小而且极不规则，排列疏松，导致外面的角质层极不平整，出现凹陷和凸起。绿熟期不同氮素处理下果实的中果皮和内果皮细胞体积均显著增加，其中全硝和铵硝配施处理下果实的角质层厚度显著高于全铵处理，且全铵处理下果实的表皮细胞仍排列不整齐，角质层厚度不均匀。至成熟期，全硝和铵硝配施处理下果实表皮细胞呈扁平型，全铵处理下果实表皮细胞形状不规则，大小不一且胞间隙显著；中果皮细胞破损程度为全硝 > 铵硝配施 > 全铵，角质层厚度则相反。

2.2 氮素形态对番茄鲜果重和果径的动态变化的影响

全硝处理及铵硝配施处理植株的地上部并没有太大差异；而全铵处理植株则较为矮小，尤其在果实发育后期及接近成熟时。生长后期全铵处理植株根系较为短小且颜色转褐。不同形态氮素处理下，番茄果实单果重具有一致的变化趋势。图3看出，番茄果实的生长发育符合单“S”型曲线模型。花后14 d时，全硝、铵硝配施和全铵处理下单果重急剧增加，平均为花后7 d时的4.4倍。随后全硝和铵硝配施处理下单果重继续显著增加，至35 d时达到最高值，然后缓慢下降；全铵处理下则增加幅度降低，在21 d时的单果重仅为另两个处理的62%。花后7～14 d时，全硝、全铵及铵硝配施处理的单果重间没有显著差异，但随着果实的发育，全硝和铵硝配施处理下番茄的单果重增加量极显著高于全铵处理。成熟时期全铵处理(35 d)分别是全硝和铵硝配施处理(42 d)下单果重的82%和76%。可见，全铵处理显著缩短了番茄果实的生育期，在开花后35 d即达到了果实成熟。

果实直径与果实大小和重量密切相关，它的变化趋势能较好地反映果实的生长速度。图4表明，不同氮素处理下果实纵径变化一致，花后7 d开始急剧增加，14 d至成熟时增加缓慢。果实横径则差异显著：全硝和铵硝配施处理下果实横径从7 d至21 d时显著增加，21 d时约为7 d时的2.4倍，随后增加缓慢，至果实成熟时略有下降；全铵处理下的果实横径14 d时约为7 d时的1.7倍，21 d时约为另两个处理的77%，随后一直缓慢增加。果实成熟时期，全硝和铵硝配施处理下果实纵、横径均高于全铵处理。

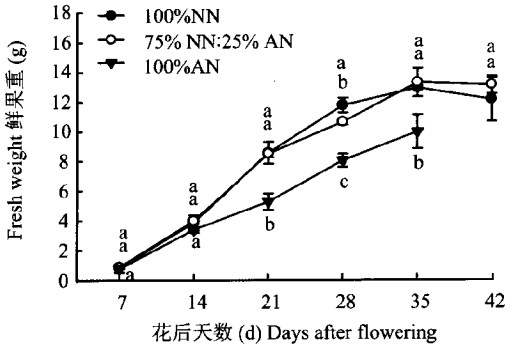

图3 不同形态氮素对樱桃番茄果实鲜重的影响

Fig.3 Effect of different nitrogen forms on the fresh weight of cherry tomato fruit

[注(Note)：不同字母的表示差异达5%显著水平，下同。Different letters indicate significant at 5% level. The same as Fig.4.]

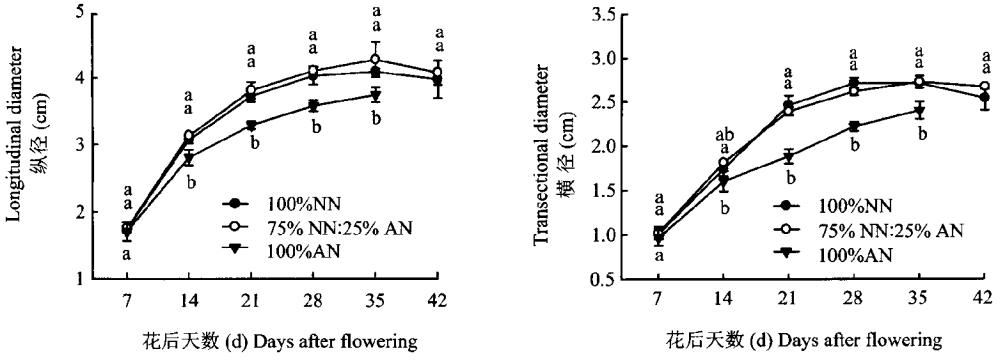

图4 不同形态氮素对樱桃番茄果实纵径和横径的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen forms on the longitudinal and transectional diameter of cherry tomato fruit

2.3 氮素形态对番茄果实品质指标的动态变化的影响

表 1 看出，随着番茄果实的发育，花后 7 d～21 d，全硝、铵硝配施和全铵处理下果实中可溶性蛋白质含量均呈显著下降趋势，花后 21 d 含量分别降为 7 d 时的 28.43%、35.29% 和 21.01%，随后全硝处理继续下降，但差异不显著；成熟前，铵硝配施和全铵处理的蛋白质含量有一个回升，成熟时的含量分别为全硝处理的 2.13 倍和 2 倍。除花后 14 d 和 21 d 外，同一生育时期不同氮素处理下的蛋白质含量均有显著差异。7 d 时全铵处理的蛋白质含量显著高于全硝和铵硝配施，分别是它们的 1.17 和 1.4 倍；28 d 时则分别下降为 33% 和 25%。全硝和铵硝配施处理只在成熟期(42 d)差异显著。果实发育过程中，全硝、铵硝配施和全铵处理下果实中氨基酸含量呈现不同的变化趋势：全硝处理花后 7 d 果实中氨基酸含量最高，随着果实的发育，果实中氨基酸含量呈现逐渐下降趋势，28 d 时含量最低，约为花后 7 d 的一半；此后，逐渐回升，成熟时果实的氨基酸含量是 7 d 的 55.71%。全铵处理下果实氨基酸含量变化趋势呈“W”型，花后 21 d 达到整个生育期中的最高值，花后 7 和 35 d 果实中氨基酸含量基本一致，约为 21 d 的 78%；花后 14 和 28 d 氨基酸含量最低，仅有 21 d 的 43%。铵硝配施处理下，果实氨基酸含量的变化趋势介于全硝和全铵之间，呈现先下降再升高随后持续下降的趋势。花后 7 和 21 d 果实氨基酸含量一致，为整个生育期的最高值，其它时期均显著低于这两个时期，其中，14 d 时氨基酸含量降为 7 d 时的 46%，而 28 d 之后，果实中氨基酸含量无显著变化。每个采样时期中铵硝配施处理中氨基酸含量基本处于最低水平，成熟时约为全硝和全铵处理的 60% 和 45%。

表 1　氮素形态对番茄果实各测试品质性状的比较结果

Table 1　Comparison of nitrogen forms on protein, amino acids, Vc, total souble sugar, titratable acid and sugar-acid ratio of tomato fruit

花后天数 DAF (d)	处理 Treatment	蛋白质 Protein	可溶性总糖 TSS	氨基酸 AA	维生素 C Vc	可滴定酸度 TTA (%)	糖酸比 S/A ratio
		(mg/g, FW)		(mg/g, FW)			
7	100% NN	1.02 ± 0.05 bA	1.63 ± 0.18 bC	0.74 ± 0.02 aA	0.20 ± 0.01 aA	0.35 ± 0.00 bBC	4.67 ± 0.55 abC
	75% NN:25% AN	0.85 ± 0.13 bA	1.69 ± 0.06 abB	0.56 ± 0.11 bA	0.23 ± 0.01 aA	0.31 ± 0.01 bB	5.48 ± 0.29 aB
	100% AN	1.19 ± 0.01 aA	1.89 ± 0.06 aC	0.63 ± 0.01 abB	0.16 ± 0.02 bA	0.46 ± 0.08 aA	4.16 ± 0.65 bB
14	100% NN	0.68 ± 0.06 aB	2.27 ± 0.11 aB	0.61 ± 0.01 aB	0.11 ± 0.01 bB	0.31 ± 0.01 aD	7.31 ± 0.46 aAB
	75% NN:25% AN	0.57 ± 0.06 aB	1.80 ± 0.28 bB	0.26 ± 0.09 bB	0.09 ± 0.01 bB	0.33 ± 0.05 aB	5.55 ± 1.49 abB
	100% AN	0.50 ± 0.17 aB	2.07 ± 0.04 abC	0.32 ± 0.05 bC	0.13 ± 0.01 aB	0.38 ± 0.15 aAB	4.38 ± 0.14 bB
21	100% NN	0.29 ± 0.03 aC	2.85 ± 0.15 bA	0.58 ± 0.05 bB	0.07 ± 0.02 aC	0.36 ± 0.02 bB	7.88 ± 0.81 bA
	75% NN:25% AN	0.30 ± 0.04 aC	2.72 ± 0.69 bA	0.54 ± 0.11 bA	0.04 ± 0.01 aC	0.36 ± 0.04 bB	9.28 ± 1.37 abA
	100% AN	0.25 ± 0.01 aC	4.55 ± 0.13 aA	0.73 ± 0.00 aA	0.05 ± 0.00 aC	0.44 ± 0.02 aA	10.27 ± 0.63 aA
28	100% NN	0.15 ± 0.02 aD	2.07 ± 0.42 aB	0.34 ± 0.07 aD	0.04 ± 0.01 aD	0.44 ± 0.01 aA	4.74 ± 1.53 bC
	75% NN:25% AN	0.20 ± 0.03 aCD	2.54 ± 0.53 aA	0.17 ± 0.01 bB	0.03 ± 0.00 bD	0.42 ± 0.04 aA	6.11 ± 2.01 bB
	100% AN	0.05 ± 0.04 bCD	2.68 ± 0.37 aB	0.33 ± 0.08 aC	0.02 ± 0.00 bD	0.25 ± 0.00 bB	10.68 ± 1.42 aA
35	100% NN	0.08 ± 0.05abDE	2.26 ± 0.07 bB	0.41 ± 0.05 bCD	0.03 ± 0.00 aD	0.37 ± 0.04 aB	6.23 ± 0.50 bB
	75% NN:25% AN	0.05 ± 0.04 bD	2.23 ± 0.15 bAB	0.22 ± 0.08 cB	0.02 ± 0.00 aD	0.34 ± 0.01 aB	6.62 ± 0.47 bB
	100% AN	0.16 ± 0.05 aD	3.01 ± 0.15 aB	0.57 ± 0.04 aB	0.02 ± 0.00 aD	0.25 ± 0.02 bB	12.14 ± 1.57 aA
42	100% NN	0.05 ± 0.02 bE	2.36 ± 0.09 aB	0.46 ± 0.07 aC	0.02 ± 0.00 aD	0.32 ± 0.01 aCD	7.27 ± 0.22 aAB
	75% NN:25% AN	0.17 ± 0.02 aE	2.08 ± 0.14 bAB	0.25 ± 0.05 bB	0.02 ± 0.00 aD	0.34 ± 0.01 aB	6.14 ± 0.30 bB
	100% AN						

注(Note)：DAF-Days after flowering; TSS-Total soluble sugar; AA-Amino acid; TTA-Total titratable acid; S/A ratio—Sugar/Acid ratio, the ratio of total soluble sugar content to the total titratable acid content. 数值后不同大、小写字母分别表示同一氮素处理在不同生育时期之间和同一生育时期不同氮素处理之间差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters indicate among different growth stages in the same N form and among the different N forms at the same growth stage significant at 5% level, respectively.

不同氮素处理下果实中 Vc 含量的变化趋势基本一致。花后 28 d 内,随着果实的发育,Vc 含量均显著下降,28 d 时达到整个生育期的最低值,随后直到果实成熟,Vc 含量无显著变化。与花后 7 d 相比,14 d 时全硝和铵硝配施处理下果实 Vc 含量急剧下降,下降幅度达 45% 和 60%;全铵处理则相反,14 d 时仅降低至 7 d 时的 82%。花后 7 d 时,全硝和铵硝配施处理中果实 Vc 含量显著高于全铵处理,分别是全铵处理的 1.23 倍和 1.4 倍,但随着果实的发育,二者急剧下降,于花后 14 d 时显著低于全铵处理,分别是全铵处理的 83% 和 69%(表 1)。

表 1 还看出,随着果实的发育,3 个处理中可溶性糖含量均呈先升高后下降的单峰曲线变化,于花后 21 d 达到整个生育期中最高值;增加幅度为全铵 > 铵硝配施 > 全硝,分别比 14 d 时增加了 120%、50% 和 25%。花后 7 d 和 21 d 时,全硝和铵硝配施处理下可溶性糖含量没有显著差异,但均显著低于全铵处理,其中 21 d 时比全铵处理平均低 63%。随着果实的发育,全硝及铵硝配施处理的可滴定酸度变化趋势相似,发育前期升高,至花后 28 d 达到最高值,之后下降直到成熟,在每个采样时期总酸含量无显著差异。全铵处理则相反,21 d 前果实可滴定酸度一直保持较高水平,比全硝和铵硝配施处理平均高 28 个百分点,随后显著下降,28 d 时可滴定酸度是 21 d 时的 57%。成熟期,果实全铵处理(35 d)可溶性糖含量显著高于全硝和铵硝配施处理(42 d),分别高出 28% 和 45%,而可滴定酸度则相反,分别降低 30 个百分点和 36 个百分点。果实糖酸比的变化情况决定于果实可溶性糖和可滴定酸度。表 1 表明,全硝和铵硝配施处理下糖酸比变化一致,花后 7 d 逐渐增加,至 21 d 时约增加了 69% 并达到整个采样时期的最高值,28 d 时下降了约 40%,果实成熟前又有升高。全铵处理下果实糖酸比呈持续增加趋势,花后 7 d 和 14 d 时低于全硝和铵硝配施处理,28 d 和 21 d 时果实糖酸比约是它们的 1.2 倍和 2 倍,成熟时期则比它们分别提高 67% 和 98%。

3 讨论

氮素形态及配比对植物营养生长的影响已有很多报道[7-8,10,25-26],但营养液中铵硝配施对果实生长和品质的增效机理还不清楚,对果实生长和发育过程影响的动态变化更缺乏深入的研究。营养液中适当的铵硝比例不仅有利于保持营养液中 pH 的稳定[27],也可以降低 NH_4^+ 对植物的毒害,从而有利于植株的生长[28]。本研究结果表明,不同形态氮素及配合施用从果实发育之初就显著影响了果实的微观结构和果实发育的速度,突出表现在表皮细胞的排列、角质层的厚度以及果实纵横径的动态变化上。与全硝和全铵处理相比较,铵硝配施处理下果实表皮细胞排列整齐,角质层厚薄均匀,而全铵处理下幼果期和绿熟期表皮细胞的不规则排列以及角质层厚薄不均匀,可能会降低表皮组织的保护作用。角质层的功能主要是起保护作用,它不仅可以限制植物体内的水分丧失,而且可以抵抗微生物的侵袭。不同形态氮素对果皮结构的影响不同,可能与果皮中的钙素含量有关。钙作为细胞壁的重要组成成分,其含量显著影响果皮细胞的分裂及细胞壁的结构。由于 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 具有拮抗作用,因此,NH_4^+ 作为唯一氮源时,显著抑制 Ca^{2+} 的吸收。对果肉细胞的显微结构初步的分析结果也表明,果肉细胞大小和多少在一定程度上受氮素形态的影响,但还需进一步深入研究。单果重及果径的变化动态结果表明,铵硝配施与全硝处理在整个生育期中生长速度变化动态相似,成熟期略高于全硝处理,但二者统计结果并无显著差异,这与 Heeb 等[29]研究结果一致。全铵处理则在开花 14 d 后生长缓慢,显著低于另两个处理,表明全铵处理对果实发育的影响在生育中后期尤为显著。Lugert 等[7]指出,随着果实的发育,全铵处理下番茄的根系活力降低,植株体内水分含量下降,产生水分胁迫。表皮细胞角质层的厚度受环境影响很大[30],成熟期全铵处理下果实表皮细胞角质层迅速增厚(图 2),在一定程度上提高了叶片的保水能力,这可能是植物适应全铵处理的机制之一。

果实的生长和发育依赖于叶片中光合同化产物向果实细胞的转移。作为一种环境因子,氮素很可能通过诱导代谢途径的转变从而导致最终代谢产物浓度的变化[1]。由于氧化还原电位不同,植物对硝态氮和铵态氮的吸收和同化机制截然不同,这导致硝态氮和铵态氮对植物的生长和代谢产生不同的生理效应。番茄从开花到果实成熟一般需 50~60 d,期间果实内进行着复杂的生理生化代谢活动,以往的研究主要集中在氮素形态(硝态氮、铵态氮及硝铵不同配比)对收获期果实的组成成分的影响上[9,13,18,25,29,31-32],而不同形态氮素对果实发育过程中代谢物质影响的动态变化研究较少。本研究结果看出,不同形态氮素及配施处理下番茄果实中可溶性蛋白质、氨基酸、Vc、可溶性糖和可滴定酸在果实发育过程中均呈现不同的变化规律。果实早期的迅速发育需要大量蛋白质和氨

基酸，因此在幼果期含量较高。除花后 21 d 外，铵硝配施处理下果实中氨基酸含量均显著低于全硝处理，表明营养液中铵的加入可能影响了果实中的氮素代谢。汪建飞等[7]的试验结果表明，氮素形态配比显著影响了菠菜茎叶中氨基酸的总量和种类，以及氮素代谢关键酶硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)的活性。我们进一步的研究也证实，不同形态氮素及配施显著影响了发育过程中果实中的 NR、GS 活性(结果未列出)。与全硝和铵硝配施相比较，全铵处理下氨基酸总量在生育中后期(21～28 d)达到了最高值(表 1)。铵对植物功能有毒害作用，因此必须被快速同化为无毒的有机物质，这使氨基酸的去氨基作用在组织衰老过程中显得尤其重要[33]。果实 Vc 含量随果实发育呈下降趋势，可能由于 Vc 在果实发育前期积累较慢，绝对含量变化小；随着果实的逐渐膨大及成熟期间气温升高，抑制了 Vc 合成，因此 Vc 相对含量呈下降趋势[34]。糖和酸是决定果实品质的重要因子，本研究中铵硝配施处理下果实的糖、酸变化基本上与全硝处理一致，仅在花后 14 d 时果实的可溶性糖含量显著低于全硝处理，而全铵处理下果实的可溶性总糖含量在开花 14 d 后的生育时期均高于另外两个处理，表明氮素形态显著影响果实的糖代谢。这可能是由于 NH_4^+ 的吸收导致根际酸化，以及生育中后期气温较高，根系活力下降而产生水分胁迫，植物本身为了维持果实在发育过程中的膨压稳定而进行的主动渗透调节，这与张明生等[35]和张荣萍等[36]的研究结果一致。与糖的变化趋势不同，全铵处理的可滴定酸含量在花后 21 d 前高于另两个处理，随后则降为最低(表 1)，表明不同形态氮素也显著影响了果实发育过程中有机酸代谢。

Guerrero 等[37]很早就提出铵态氮的存在可能会影响到硝态氮的还原。硝酸盐同化所引起的根际 pH 升高会导致铁、锰、锌等矿质元素的缺乏[38]；而铵态氮的适量加入则会减缓这种情况，同时增强对硝态氮的吸收[27]。另外，适当的铵硝配施能够有效控制溶液的 pH[27]，并在一定程度上降低由于土壤中硝态氮流失所造成的 N 素损失[38]。尽管在营养液中需要的铵态氮浓度很低，但是两种形态氮素的共存很可能会更有利于氮素代谢及其他生理代谢，从而促进植物最优化的生长，其具体的调控机制尚不清楚。因此，很有必要进一步研究不同形态氮素及配施对果实发育过程中氮素代谢酶、糖和有机酸代谢酶活性的影响，最终为番茄生产中合理施用氮肥提供理论依据。

参 考 文 献：

[1] Mounet F, Lemaire-Chamley M, Maucourt M *et al*. Quantitative metabolic profiles of tomato flesh and seeds during fruit development: complementary analysis with ANN and PCA [J]. Metabolomics, 2007, 3(3): 273-288.

[2] Oh K, Kato T, Xu H L. Transport of nitrogen assimilation in xylem vessels of green tea plants fed with NH_4^+-N and NO_3^--N [J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 222-226.

[3] 李彩凤，马凤鸣，赵越，李文华. 氮素形态对甜菜氮糖代谢关键酶活性及相关产物的影响 [J]. 作物学报，2003，29(1)：128-132.
Li C F, Ma F M, Zhao Y, Li W H. Effects of nitrogen form s on key enzyme activities and related products in sugar and nitrogen metabol ism of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) [J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(1): 128-132.

[4] Below F E, Gentry L E. Maize productivity as influenced by mixed nitrogen supplied before or after anthesis [J]. Crop Sci. Soc. Am., 1992, 32: 163-168.

[5] 曹翠玲，李生秀. 氮素形态对小麦中后期的生理效应 [J]. 作物学报，2003，29(2)：258-262.
Cao C L, Li S X. Effect of N form on some physiological characteristics and yield of wheat during the vegetative and reproductive growth stage [J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(2): 258-262.

[6] 徐家林，别之龙，张盛林. 不同形态氮素配比对生菜生长、品质和保护酶活性的影响 [J]. 华中农业大学学报，2005，24(3)：290-294.
Xu J L, Bie Z L, Zhang S L. Effect of nitrogen form ratios on the lettuce growth and activity of protective enzymes [J]. J. Huazhong Agric. Univ., 2005, 24(3): 290-294.

[7] 汪建飞，董彩霞，沈其荣. 氮素不同形态配比对菠菜体内游离氨基酸含量和相关酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(4)：664-670.
Wang J F, Dong C X, Shen Q R. Effect of NH_4^+-N/NO_3^--N ratios on the free amino acids and three kinds of enzymes of nitrogen metabolism in spinach shoot [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4): 664-670.

[8] 汪建飞，沈其荣，周毅，董彩霞. 不同铵硝比对菠菜有机酸和淀粉含量的影响 [J]. 中国农业科学，2008，41(4)：1100-1107.
Wang J F, Shen Q R, Zhou Y, Dong C X. Effect of ratio of ammonium to nitrate on organic acid and starch content of spinach [J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(4): 1100-1107.

[9] Khamis M, Abbadi J, Sattelmacher B *et al*. Influence of N form and salinity on tomato yield and fruit composition [J]. Plant Nutr., 2001, 304-305.

[10] Lugert I, Gerendás J, Bruck H, Sattelmacher B. Influence of N form on growth and water status of tomato plants [J]. Plant Nutr., 2001, 92: 306-307.

[11] Gerendás J, Zhu J Z, Bendixen R *et al*. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 1997, 160(2): 239-251.

[12] Errebhi M, Wilcox G E. Plant species response to ammonium-nitrate concentration ratios [J]. Plant Nutr., 1990, 13: 1017-1029.

[13] Elamin O M, Wilcox G E. Nitrogen form ratio influence on muskmelon growth, composition, and manganese toxicity [J]. J. Am. Soc. Hor-

ticul. Sci., 1986, 111: 320-322.

[14] Claussen W, Lenz F. Effect of ammonium and nitrate on net photosynthesis, flower formation, growth and yield of eggplants (*Solanum melongena* L.) [J]. Plant Soil, 1995, 171: 267-274.

[15] Dong C X, Shen Q R, Wang G. Tomato growth and organic acid changes in response to partial replacement of NO_3^- by NH_4^+ [J]. Pedosphere, 2004, 14(2): 159-164.

[16] 马国瑞.园艺植物营养与施肥 [M].北京: 中国农业出版社, 1994. 75-83.

Ma G R. Horticultural plant nutrition and fertilization [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1994. 75-83.

[17] Lu Y L, Xu Y C, Shen Q R, Dong C X. Effects of different nitrogen forms on the growth and cytokinin content in xylem sap of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedling [J]. Plant Soil, 2008, 315(1-2): 67-77.

[18] 杨月英,张福墁,乔晓军.不同形态氮素对基质培番茄生育、产量及品质的影响 [J].华北农学报,2003,18(1): 86-89.

Yang Y Y, Zhang F M, Qiao X J. Effect of nitrogen forms on growth development, yield and fruit quality of tomato in media culture [J]. Acta Agric. Bor. Sin., 2003, 18(1): 86-89.

[19] 葛水莲,王有年,孟海玲, 等.桃果实发育解剖学与果核开裂研究 [J].北京农学院学报,2006,21(4): 1-4.

Ge S L, Wang Y N, Meng H L *et al*. Study on anatomy and pit-splitting during peach fruit development [J]. J. Beijing Agric. Coll., 2006, 21(4): 1-4.

[20] 王奎先,周启河,初庆刚.矮樱桃果实发育的解剖学研究 [J].西北植物学报,2000,20(3): 480-483.

Wang K X, Zhou Q H, Chu Q G. Anatomical studies on the fruit development of dwarf cherry [J]. Acta Bot. Boreali-Occid. Sin., 2000, 20(3): 480-483.

[21] 王庆亚,张守栋,孙建云,李扬汉.绞股蓝果实的发育解剖学研究 [J].广西植物,2003,23(4); 323-326.

Wang Q Y, Zhang S D, Sun J Y, Li Y H. Anatomical studies on the fruit development of *Gynostemma pentaphyllum* [J]. Guihaia, 2003, 23(4): 323-326.

[22] 苏艳丽,赵思东,袁德义,等.新高梨果实的生长发育特性 [J].经济林研究,2006,24(1): 45-48.

Su Y L, Zhao S D, Yuan D Y *et al*. Growth and development characteristics of fruit in Niitaka pear [J]. Nonwood For. Res., 2006, 24(1): 45-48.

[23] 李正理.植物组织制片技术 [M].北京: 科学出版社,1991. 18-91.

Li Z L. Production techniques of plant tissue [M]. Beijing: Science Press, 1991. 18-91.

[24] 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. 125-128.

Li H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 125-128.

[25] Heeb A, Lundegårdh B, Ericsson T, Savage G P. Nitrogen form affects yield and taste of tomatoes [J]. J. Sci. Food Agric., 2005a, 85: 1405-1414.

[26] 李霞,阎秀峰,刘剑锋. 氮素形态对黄檗生长及氮代谢相关酶类的影响 [J]. 植物学通报,2006,23(3): 255-261.

Li X, Yan X F, Liu J F. Effects of nitrogen forms on nitrogen metabolism-related enzymes and growth of Phellodendron amurense seedlings [J]. Chin. Bull. Bot., 2006, 23(3): 255-261.

[27] Benton J, Jones J B. Hydroponics: a practical guide for the soilless grower [M]. Britain: Lucie Press, 1997. 10-13.

[28] Thomas D M, Paparozzi E T. Effect of chelates vs. ionic salts of microelements and nitrogen form on hydroponic solution pH [J]. J. Plant Nutr., 2004, 27(6): 1029-1041.

[29] Heeb A, Lundegårdh B, Ericsson T, Savage G P. Effects of nitrate-, ammonium-, and organic-nitrogen-based fertilizers on growth and yield of tomatoes [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168(1): 123-129.

[30] 陈绍莉,郭修武.葡萄砧木抗旱性的叶片解剖学研究 [J].北方果树,2008,(5): 5-7.

Chen S L, Guo X W. The study of leave anatomy on grape rootstock drought-tolerance [J]. Northern Fruits, 2008, (5): 5-7.

[31] Sandoval-villa M, Wood C W, Guertal E A. Effect of nitrogen form, nighttime nutrient solution strength, and cultivar on greenhouse tomato production [J]. J. Plant Nutr., 1999, 22(2): 1931-1945.

[32] Ben-Oliel G, Kant S, Michael N *et al*. Effects of ammonium to nitrate ratio and salinity on yield and fruit quality of large and small tomato fruit hybrids [J]. J. Plant Nutr., 2004, 27(10): 1795-1812.

[33] Givan C V. Metabolic detoxification of ammonia in tissues of higher plants [J]. Phytochem., 1979, 18: 375-382.

[34] 赵树堂,关军锋,孟庆瑞, 等.李果实发育过程中糖、酸、维生素C含量的变化 [J].果树学报,2004,21(6): 612-614.

Zhao S T, Guan J F, Meng Q R *et al*. Changes in contents of sugar, acid, vitamin C during fruit development of four plum cultivars [J]. J. Fruit Sci., 2004, 21(6): 612-614.

[35] 张明生,彭忠华,谢波,等.甘薯离体叶片失水速率及渗透调节物质与品种抗旱性的关系 [J].中国农业科学,2004,37(1): 152-156.

Zhang M S, Peng Z H, Xie B *et al*. Relationship between water loss rate of cutting leaves and osmotic regulators under water stress and drought resistance in sweet potato [J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(1): 152-156.

[36] 张荣萍,马均,王贺正,等.不同灌水方式对水稻结实期一些生理形状和产量的影响 [J].作物学报,2008,34(3): 486-495.

Zhang R P, Ma J, Wang H Z *et al*. Effects of different irrigation regimes on some physiology characteristics and grain yield in paddy rice during grain filling [J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(3): 486-495.

[37] Guerrero M G, Vega J M, Losada M. The assimilatory nitrate reductase system and its regulation [J]. Ann. Rev. Plant Physiol., 1981, 32: 169-204.

[38] Hahne K S, Schuch U K. Response of nitrate and ammonium on growth of *Prosopis Velutina* and *Simmondsia Chinensis* seedlings [M]. Tucson, US: University of Aarizona Extension Publisher, 2004. AZ1359-2F.