植物营养与肥料学报 2016, 22(5): 1374–1383
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15416
http://www.plantnutrifert.org

基于叶片数增长动态的营养液供给对番茄生长、产量和品质的影响

张 芳[1,2]，薛绪掌[2]，张建丰[1]*，李银坤[2]，王利春[2]，许高平[2]
（1 西安理工大学水利水电学院，陕西西安 710048；2 国家农业智能装备工程技术研究中心，北京 100097）

摘要:【**目的**】针对基质栽培番茄的营养液管理问题，研究了基于叶片数增长动态调控营养液供给对番茄生长、产量和品质的影响。【**方法**】温室基质栽培条件下，以番茄为试验材料，根据植株每增长 1、2 和 3 片叶时营养液浓度的提高幅度分别设置 TR0.1 (0.1 mS/cm)、TR0.2 (0.2 mS/cm)和 TR0.3 (0.3 mS/cm) 3 个处理，即叶片数增长动态处理；另设常规营养液管理模式作为对照（CK)，即番茄定植至开花前、开花至第一穗果坐果、第一穗果坐果至采收结束 3 个生育期内供给营养液浓度分别为 1.5、2.1 和 2.7 mS/cm。通过测定营养液总盐含量和番茄株高、茎粗、叶片数、产量、养分利用率和品质等指标对不同营养液管理方法进行评价。【**结果**】叶片数增长动态处理 (TR0.1、TR0.2和TR0.3) 营养液浓度提高频率是 CK 的 2.0～5.6 倍，且可利用的营养液总盐含量、大量元素和微量元素的总含量均表现为 CK > TR0.1 > TR0.2 > TR0.3。叶片数增长动态处理 (TR0.1、TR0.2和TR0.3) 和 CK 的茎粗和叶片数受营养液浓度提高幅度影响较小。TR0.1 处理的产量和营养液养分利用率比 CK 分别提高了 30.4% 和 37.7% ($P < 0.05$)。与 CK 相比，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理的果实中硝酸盐含量和可滴定酸含量分别降低了 19.4%～68.6%和16.7%～23.2% ($P < 0.05$)，总可溶性固形物和糖酸比分别增加了 0.8%～12.9% ($P < 0.05$，TR0.3 除外) 和 31.3%～34.7% ($P < 0.05$)，说明叶片数增长动态处理的果实品质优于 CK。基于叶片数增长动态调控营养液供给的方法中，与 TR0.3 处理相比，TR0.1 处理的株高增加 7.5 cm ($P < 0.05$)，产量和营养液养分利用率分别提高了 30.7% 和 29.4% ($P < 0.05$)；TR0.1 处理果实硝酸盐含量、总可溶性固形物、可滴定酸含量和糖酸比均最高，除糖酸比外，各处理呈显著性差异。【**结论**】基于叶片数增长动态调控营养液浓度供给的方法优于常规基质栽培营养液管理方法，可以实现基质栽培番茄的高产优质，提高营养液养分利用率，其中每增长 1 片叶营养液浓度增加 0.1 mS/cm 的供给方法 (TR0.1)，因营养液浓度变化速率快，浓度变化幅度小，对促进番茄生长、养分吸收及增加产量、改善品质的效果最好，为供试条件下最优的营养液调控方法。

关键词: 基质栽培；叶片数增长动态；营养液浓度；番茄；产量
中图分类号: S641.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)05–1374–10

Effects of nutrient solution supplying mode on growth, yield and quality of tomatoes using leaf number growth dynamic

ZHANG Fang[1,2], XUE Xu-zhang[2], ZHANG Jian-feng[1]*, LI Yin-kun[2], WANG Li-chun[2], XU Gao-ping[2]
(*1 Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China*)

Abstract:【**Objectives**】To optimize the nutrient solution management for substrate cultured tomato, we studied effects of regulating nutrient solution based on leaf number growth dynamic on growth, yield and quality of tomatoes.【**Methods**】In greenhouse, tomatoes were used as experimental material, and four nutrient solution supplying modes with different frequency of increasing the concentration of nutrient solution were conducted. The

收稿日期: 2015–10–12　　**接受日期:** 2016–01–08　　**网络出版日期:** 2016–04–05
基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(6142008)；北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20140415)；863计划项目(2012AA101903-1)资助。
作者简介: 张芳 (1984—)，女，河南开封人，博士研究生，主要从事农业灌溉决策研究。E-mail：zf200612915@126.com
* 通信作者 E-mail：1jfzhang@mail.xaut.edu.cn

nutrient solution concentrations were respectively increased by 0.1, 0.2 and 0.3 mS/cm in TR0.1, TR0.2 and TR0.3, while leaf number in the corresponding treatments increased by one, two, and three respectively. In the CK, the nutrient solution concentrations of 1.5, 2.1 and 2.7 mS/cm were respectively set at three growth stages of tomato, from the planting to before the flowering, flowering to the first cluster, and the first cluster until the end of the harvest. There were four treatments with four repetitions. The plant height, stem diameter, leaf number, yield and quality of tomatoes, as well as the total salt content and utilization efficiency of nutrient solution were measured to determine the effects. 【**Results**】The frequencies of increasing nutrient solution concentration in the TR0.1, TR0.2 and TR0.3 were 2.0–5.6 times of that of the treatment CK. The order of total salt contents of nutrient solution, total contents of macroelements and microelements all showed as CK > TR0.1 > TR0.2 > TR0.3. No significant differences were detected in the stem diameters and leaf numbers among all treatments. Compared with the CK, the yield and nutrient utilization efficiency of the TR0.1 increased by 30.4% and 37.7% ($P < 0.05$) respectively. Also, in comparison with the CK, the contents of nitrate and titratable acid in TR0.1, TR0.2 and TR0.3 respectively decreased by 19.4%–68.6% and 16.7%–23.2% ($P < 0.05$), while the total soluble solid and sugar-acid ratios respectively increased by 0.8%–12.9% ($P < 0.05$, except TR0.3) and 31.3%–34.7% ($P < 0.05$), which indicated that the quality of tomato in the TR0.1, TR0.2 and TR0.3 which were based on leaf number growth dynamic was better than that of the CK which was regarded as the conventional nutrient solution supplying mode for tomato. In addition, compared with the TR0.3, the plant height in TR0.1 increased by7.5 cm ($P < 0.05$), and the total yield and the nutrient utilization efficiency increased by 30.7% and 29.4% ($P < 0.05$) respectively. Moreover, the highest contents of nitrate, titratable acid and soluble solid as well as the sugar-acid ratio were all observed in the TR0.1, and there were significant differences among the treatments, except for the sugar-acid ratio. 【**Conclusions**】The controlling mode of tomato nutrient solution based on leaf number growth dynamic is better than the conventional management mode based on the three growth stages, resulting in higher yield and better quality of tomato, and high utilization efficiency of nutrient solution. Additionally, the TR0.1, whose nutrient solution concentration was increased by 0.1 mS/cm while leaf number increased by one, showed the best effects on the promotion of growth and nutrient absorption, as well as yield and quality of tomato. Therefore, TR0.1 was considered as the most optimal controlling method of tomato nutrient solution.

Key words: substrate culture; leaf number growth dynamic; nutrient solution concentration; tomato; yield

全球 90% 以上的无土栽培为基质栽培[1]，当基质中仅含有一定比例草炭 (无其它有机肥) 时，由营养液全程补充供给蔬菜生长所需的各种营养元素和水分的基质栽培中，营养液的供给时间、量和浓度是栽培技术的关键，直接影响作物生长、产量和品质[2–4]。实际生产中，营养液浓度的高低可通过营养液电导率 (electrical conductivity，简写为 EC) 表示，反映其盐类含量，是温室营养液管理的重要参数之一[5]。番茄在苗期的适宜电导率为 0.8～1.0 mS/cm，定植到第一穗花开放或第一穗结果时为 1.0～1.5 mS/cm，结果盛期为 1.5～2.2 mS/cm[6–7]。由于营养液浓度与温度、光照等有关，同种作物冬季低温期营养液浓度宜高，夏季稍低[8–10]，结果期在夏季时采用 2.0 ~ 2.5 mS/cm 为宜[6, 10]。

适时适当取值是营养液浓度供给的关键。虽然上述番茄营养液浓度供给范围已被给出，但各生育期持续时间较长且营养液浓度范围跨度较大 (最大可至 0.7～1.0 mS/cm)。若浓度取值较高，且在环境因素影响下，可能由于养分被植株吸收不充分而造成浪费。近几十年来，已有水稻叶龄诊断施肥法[11–12]，以叶龄跟踪为基础，通过对水稻生育过程的预测及主茎叶片长势的判断，进行科学施肥和合理灌水来提高水稻产量和品质。此法已成功应用于水稻[13–15]、玉米[16–17]和棉花[18]等植物的栽培技术中，利用叶龄模式可预知关键叶龄的伸展日期，有的放矢采取肥水促控措施，可达到事半功倍的效果[19–20]。众多研究表明，水稻叶龄诊断施肥法比常规施肥法可提高肥料利用率，改善稻米品质和增加产量[11, 21–23]。有研究表明，同一品种番茄叶片与花穗位置基本固定，所以叶龄在一定程度上可以反映其生育进

程[24-25]，且番茄叶龄可由其长出的完全叶片数来表示。因此，我们假设在上述番茄营养液浓度供给范围基础上，通过精准掌握植株生长动态并适当调控营养液浓度供给值，能够提高番茄产量和营养液养分利用率，改善果实品质。本试验通过研究基于叶片数增长动态调控营养液浓度供给对基质栽培下番茄生长、产量和品质的影响，以期为以叶龄调控营养液的基质栽培管理方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年 5～9 月在北京小汤山国家精准农业研究示范基地日光温室内进行。供试番茄品种为“菲腾”。营养液采用山崎番茄专用营养液配方和通用微量元素配方[26]按比例混合而成。基质配方是草炭、蛭石和珍珠岩，其体积比为 5 : 3 : 1，容重为 0.3 g/cm^3，基质持水量为 0.65 cm^3/cm^3。基质 pH 6.80、电导率 0.36 mS/cm、全氮 0.52%、全磷 0.07%、全钾 1.30%、有机质 301.79 g/kg。

1.2 试验设计

根据植株每增长 1、2 和 3 片叶时营养液浓度的提高幅度分别设 TR0.1 (0.1 mS/cm)、TR0.2 (0.2 mS/cm) 和 TR0.3 (0.3 mS/cm) 3 个处理，即叶片数增长动态处理，营养液浓度变化范围均为 1.5～2.7 mS/cm；另设常规营养液管理模式 (CK)，即番茄定植至开花前、开花至第一穗果坐果、第一穗果坐果至采收结束 3 个生育期内供给营养液浓度分别为 1.5、2.1 和 2.7 mS/cm。每个处理 4 重复，每个重复错开交叉排列，如图 1 所示。

试验用基质栽培槽 32 个，每 2 个槽竖向排列为 1 个重复。单个槽长 60 cm、宽 42 cm、高 18cm，槽内呈三角状栽培 3 株番茄，株距 30 cm，行距 80 cm。每个处理采用独立的营养液储液桶和供液管道，每个储液桶内放置 1 个潜水泵，潜水泵在供液管道上依次连接过滤器、压力表、电磁阀、流量计和滴灌管。设置 3 支滴灌管平行放于基质栽培槽上，基质槽底面中心设排液孔，孔径 2 cm，排液孔下放置排液收集容器。每个处理均在其第 2 重复的基质栽培槽内安插 1 支与控制器相连接的水分传感器。各处理营养液储液桶至滴灌管的供液管道长度均相等，并且控制器控制各处理电磁阀和潜水泵同时启闭。

5 月 29 日选择 7 叶且长势一致的苗进行定植，基质槽表面覆黑白膜 (白膜向上) 防止基质水分蒸发，每个处理营养液初始供给浓度均为 1.5 mS/cm。

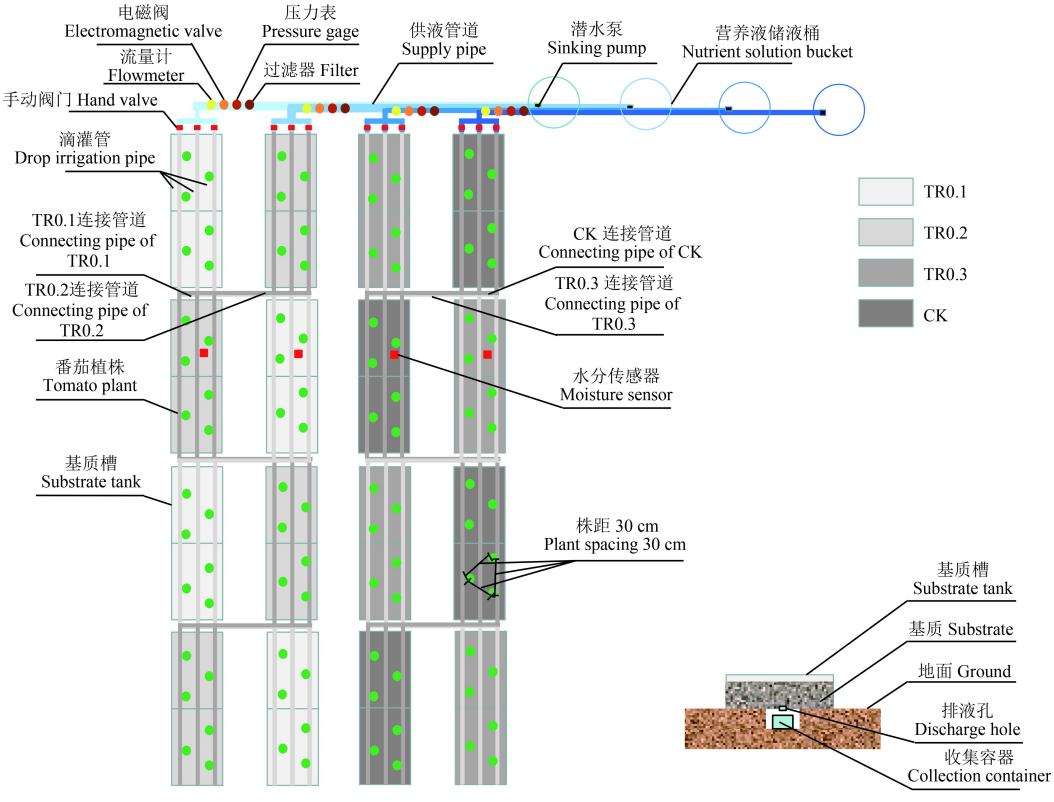

图 1 试验设计(俯视)及基质槽(侧视)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment design (overlook view) and substrate tank (side view)

缓苗一周，9 片叶时按照叶片数增长动态提高营养液浓度幅度进行处理。留四穗果，7 月 21 日摘去生长点，9 月 1 日停止供液，9 月 7 日结束试验，共 102 天。5 月 29 日～6 月 24 日，4 个处理每日 7：00～18：00 整点时刻供液量为 0.22 L/ (plant·h)，6 月 24 日后整点供液量按下式计算：

$$w = (\theta_{上限} - \theta_{下限}) \times v \times \alpha$$

式中：w 为整点时刻供液量 (L)；$\theta_{上限}$为供液上限 (cm^3/cm^3)，取基质持水量 0.65 cm^3/cm^3；$\theta_{下限}$为供液下限 (cm^3/cm^3)，即整点时刻所测得的基质含水量；v 为基质栽培槽内基质体积 (cm^3)；α为供液系数，假设每次供液后均有 30% 的液排出量，取 α = 1.3。

整个试验过程中各处理营养液排出液电导率与所供营养液电导率的差值在 1.0～1.2 mS/cm 范围内，pH 值维持于 5.5～6.5 范围内。

1.3　测定项目与方法

基质含水量由 4 个水分传感器每 10 min 所测基质含水量的平均值求得。每小时供液量由控制器统计 1 小时内流过流量计的液量。每小时排液量为 1 小时内基质栽培槽中多余营养液由排液孔流入收集槽的液量。营养液和排出液的电导率及 pH 分别采用雷磁 DDS-307 型电导率仪和 pH-HJ90B 酸度计测量。

营养液配制采用软化水，电导率为 0.026 mS/cm，酸碱度为 7.01。选用山崎番茄配方为 1 个剂量，即为基础浓度(S)，以 0.2 的浓度幅度差配制一系列不同浓度的营养液，测出每级浓度营养液所对应的电导率，得到营养液浓度(S)与电导率(EC)间关系为 EC = 1.0079S + 0.1165，R^2 = 0.9994。

番茄定植后，观测各处理植株生长状况。叶片是从第 1 片真叶到顶部的叶片数量，顶部叶片面积占其下一片叶面积 1/2 时即为一片叶，每 2 d 观测一次；株高是从植株茎基部到生长点的高度，用卷尺测量；茎粗是茎基部以上 1 cm 处的直径，用游标卡尺测量。每个处理以重复为单位，在定植后第 65 d、70 d、75 d、80 d、85 d、90 d、96 d、102 d 分别按果穗位置采收成熟果实，由电子天平 (精度 0.1 g) 称重并记录鲜重，即为日采收量，共采收 8 次；分别累积各果穗位置的果实重量，即为各果穗采收量；8 次采收果实的总重量为每个重复的产量。

第二穗果成熟时，选取大小一致的果实测定总可溶性固形物和可滴定总酸含量。总可溶性固形物含量采用折射仪法 (日本数字手持折射仪 PR-32) 测定，总酸含量采用指示剂滴定法 (GB/T 12293-90) 测定。

1.4　数据计算与处理

营养液累积使用量 (L/m^2) = 累积供液量 (L/m^2) – 累积排液量 (L/m^2)

营养液电导率(EC)对应的浓度(剂量) = (EC –0.1165)/1.0079

营养液可利用总盐含量 (kg/m^2) = 营养液累积使用量 (L/m^2) × 营养液电导率(EC)对应的浓度 (剂量) × 1 个剂量的总盐含量 (kg/L)

营养液各大量元素可利用总含量 (mol/m^2) = 营养液累积使用量 (L/m^2) × 营养液电导率 (EC) 对应的浓度 (剂量) × 1 个剂量时每升营养液含各大量元素摩尔数 (mol/L)

营养液各微量元素可利用总含量 (g/m^2) = 营养液累积使用量 (L/m^2) × 营养液电导率 (EC) 对应的浓度 (剂量) × 1 个剂量时每升营养液含各微量元素克数 (g/L)

营养液养分利用率 (kg/kg) = 产量 (kg/m^2)/营养液可利用总盐含量 (kg/m^2)。

数据采用 Microsoft Excel 处理，用 SPSS16.0 软件中 Duncan 比较法进行差异显著性分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理营养液浓度供给过程及营养液元素供给量

供给过程中不同处理营养液浓度变化范围均为 1.5～2.7 mS/cm，但各处理营养液浓度提高幅度不同，营养液浓度变化的天数呈现差异。由图 2 可知，定植 15～51 d 内，TR0.1、TR0.2、TR0.3 和 CK 的营养液浓度变化较大，提高浓度幅度的平均天数分别为 3.3、7.3、9.1 和 18.5 d，可得 TR0.1、TR0.2

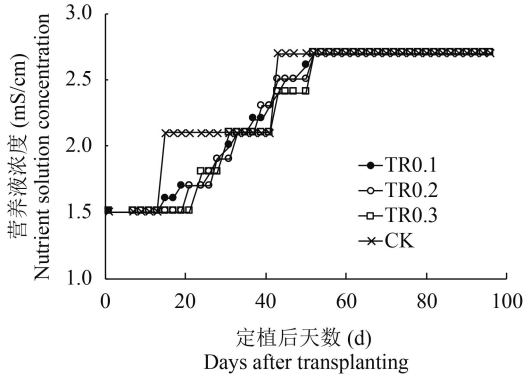

图 2　不同处理营养液浓度供给过程

Fig. 2　Supplying process of nutrient solution concentration of different treaments

和 TR0.3 营养液浓度提高频率是 CK 处理的 5.6 倍、2.5 倍和 2.0 倍。

由表 1 可知，不同处理累积供液量、累积排液量和累积使用量均随定植时间增加呈上升趋势，各处理间均无显著性差异。表 1 和表 2 显示，定植 96 天时，与 CK 相比，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理营养液可利用总盐含量分别降低了 5.3%、5.6% 和 6.2% ($P<0.05$)，营养液大量元素 (N、P、K、Ca、Mg 和 S) 和微量元素 (Fe、B、Mn、Zn、Cu 和 Mo) 可利用总含量均分别降低了 4.8%、5.3% 和 5.8% ($P<0.05$)，说明同等液量条件下，与 CK 处理相比，叶片数增长动态处理 (TR0.1、TR0.2 和 TR0.3) 可显著减少营养液养分使用量。叶片数增长动态处理中，TR0.1处理定植 96 d 时营养液可利用总盐含量、大量元素与微量元素可利用总含量最高，比 TR0.3 处理均高 1.0% ($P<0.05$)，与 TR0.2 处理相比均无显著性差异。

表 1 不同处理累积供液量、累积排出液量、营养液累积使用量和可利用总盐含量

Table 1 Accumulation amounts of nutrient solution for supplying, discharge and using and total salt contents in different treatments

指标 Index	处理 Treatment	定植后天数 Days after transplanting (d)					
		15	24	31	45	54	96
累积供液量 (L/m^2) Accumulation of nutrient solution for supplying	TR0.1	471.43	754.29	906.61	1198.67	1366.23	3119.56
	TR0.2	471.41	754.32	906.64	1198.66	1366.22	3119.58
	TR0.3	471.42	754.30	906.68	1198.74	1366.29	3119.63
	CK	471.45	754.32	906.67	1198.73	1366.28	3119.62
累积排液量 (L/m^2) Accumulation of nutrient solution for discharge	TR0.1	239.21	382.76	452.07	560.02	621.95	1269.98
	TR0.2	239.27	382.76	452.17	560.22	622.10	1270.07
	TR0.3	239.26	382.68	452.20	560.25	622.17	1270.08
	CK	239.21	382.76	452.07	560.22	622.15	1270.18
营养液累积使用量 (L/m^2) Accumulation use of nutrient solution for using	TR0.1	232.21	371.52	454.54	638.65	744.28	1849.58
	TR0.2	232.15	371.56	454.47	638.44	744.12	1849.51
	TR0.3	232.15	371.62	454.48	638.48	744.13	1849.55
	CK	232.23	371.56	454.60	638.51	744.14	1849.44
可利用总盐含量 (kg/m^2) Total salt contents in nutrient solution for using	TR0.1	0.35 a	0.58 b	0.73 b	1.14 b	1.43 b	3.05 b
	TR0.2	0.34 a	0.56 b	0.71 b	1.12 c	1.41 c	3.04 b
	TR0.3	0.34 a	0.56 b	0.71 b	1.11 c	1.38 d	3.02 c
	CK	0.35 a	0.65 a	0.85 a	1.36 a	1.65 a	3.22 a

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within the same column are significant among treatments at the 5% level.

表 2 定植 96 天时不同处理营养液大量元素和微量元素可利用总含量

Table 2 Total contents of macroelements and microelements in nutrient solution for using in different treatments in 96th day after the transplanting

处理 Treatment	大量元素 Macroelements (mol)							微量元素 Microelements (g)					
	NH_4^+-N	NO_3^--N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	B	Mn	Zn	Cu	Mo
TR0.1	2.78 b	29.07 b	2.78 b	16.61 b	6.23 b	4.15 b	4.15 b	17.44 b	2.08 b	2.08 b	0.2076 b	0.0831 b	0.0415 b
TR0.2	2.77 c	28.93 c	2.77 c	16.53 c	6.20 c	4.13 c	4.13 c	17.36 c	2.07 c	2.07 c	0.2067 c	0.0827 c	0.0413 c
TR0.3	2.75 d	28.78 d	2.75 d	16.44 d	6.17 d	4.11 d	4.11 d	17.27 d	2.06 d	2.06 d	0.2055 d	0.0822 d	0.0411 d
CK	2.92 a	30.54 a	2.92 a	17.45 a	6.54 a	4.36 a	4.36 a	18.32 a	2.18 a	2.18 a	0.2181 a	0.0873 a	0.0436 a

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within the same column are significant among treatments at the 5% level.

2.2　不同处理对番茄植株生长的影响

由表 3 看出，定植后 54 d 时，TR0.1 处理的番茄株高比 CK 显著降低 2.75 cm ($P < 0.05$)，比 TR0.3 处理显著增加 7.50 cm ($P < 0.05$)，与 TR0.2 处理无显著差异。随定植时间增加，各处理茎粗和叶片数受营养液浓度提高幅度影响较小，无显著差异。

2.3　不同处理对番茄果实产量、养分利用率和品质的影响

2.3.1 不同处理对番茄产量、养分利用率的影响　由表 4 可知，4 个处理在番茄收获期间共采收 8 次，日采收量整体趋势为高→低→高→低。TR0.1 处理最高日采收量出现于定植后 90 d，高于其余 3 个处理 ($P < 0.05$)。TR0.1 处理产量比 CK 和 TR0.3 处理分别提高了 30.4% 和 30.7% ($P < 0.05$)，其余处理之间无显著性差异。

番茄收获期间，TR0.1 处理第 1 穗果实采收时间为定植后 65 ～96 d，其余 3 个处理的采收时间为定植后 65 ～102 d，说明 TR0.1 处理可促使番茄果实成熟期提前。据统计，TR0.1、TR0.2、TR0.3 和 CK 处理的第 1 穗果实采收量分别为 5.48、5.01、3.86 和 4.14 kg，可得出 TR0.1 处理的第 1 穗果实采收量比 CK 提高了 32.3%($P < 0.05$)，TR0.2处理 和 TR0.3 处理均与 CK 之间无显著差异。

表 3　不同处理对番茄株高、茎粗和叶片数的影响

Table 3　Effect of different treatments on tomato plant height, stem diameter and leaf number

指标 Index	定植后的天数(d) Days after transplanting	TR0.1	TR0.2	TR0.3	CK
株高(cm) Plant height	15	19.88 ± 0.95 b	18.63 ± 1.33 b	16.25 ± 0.87 c	23.50 ± 1.47 a
	24	34.13 ± 1.25 a	31.33 ± 1.04 b	28.38 ± 1.97 c	35.38 ± 2.56 a
	31	38.88 ± 1.44 ab	38.75 ± 1.32 ab	36.38 ± 2.06 b	41.13 ± 1.75 a
	45	52.45 ± 1.03 ab	51.95 ± 2.89 ab	51.05 ± 1.10 b	54.65 ± 1.60 a
	54	66.50 ± 1.29 b	65.00 ± 1.41 b	59.00 ± 1.83 c	69.25 ± 1.50 a
茎粗(mm) Stem diameter	15	5.84 ± 1.17 a	6.16 ± 0.96 a	6.41 ± 1.04 a	6.21 ± 0.89 a
	24	7.95 ± 1.30 a	7.34 ± 1.65 a	7.24 ± 1.03 a	7.18 ± 1.39 a
	31	9.89 ± 0.73 a	9.74 ± 0.64 a	9.12 ± 0.56 a	9.25 ± 0.56 a
	45	11.34 ± 1.18 a	11.08 ± 0.65 a	10.92 ± 1.31 a	11.74 ± 1.24 a
叶片数(No/plant) Leaf number	15	10.25 ± 0.50 ab	10.00 ± 0.50 ab	9.50 ± 0.58 b	10.50 ± 0.58 a
	24	11.75 ± 0.95 ab	12.75 ± 0.50 a	12.00 ± 0.82 ab	11.25 ± 0.50 b
	31	14.75 ± 0.58 a	15.50 ± 0.58 a	15.25 ± 0.82 a	15.25 ± 0.50 a
	45	19.25 ± 0.50 a	19.75 ± 0.96 a	19.25 ± 1.26 a	20.25 ± 1.60 a
	54	21.50 ± 0.58 a	22.25 ± 0.96 a	22.33 ± 0.58 a	22.00 ± 0.82 a

注（Note）：同行数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within the same row are significant among different treatments at the 5% level.

表 4　不同处理日采收量、产量和营养液养分利用率

Table 4　The daily recovery yields, total yield and nutrient utilization efficiencies of different treatments

处理 Treat.	日采收量 The daily recovery yield (kg)								产量 Yield		养分利用率 NUE (kg/kg)
	65 d	70 d	75 d	80 d	85 d	90 d	96 d	102 d	(kg)	(kg/m^2)	
TR0.1	2.58 a	2.25 ab	1.09 a	2.28 a	2.67 a	4.14 a	2.75 a	1.63 a	19.40 a	13.22 a	4.33 a
TR0.2	1.58 b	2.70 a	1.37 a	2.31 a	2.48 ab	1.75 b	2.75 a	1.95 a	16.89 ab	11.52 ab	3.78 ab
TR0.3	2.34 ab	1.81 b	1.53 a	1.31 b	1.68 b	1.73 b	2.82 a	1.61 a	14.84 b	10.12 b	3.35b
CK	2.08 ab	2.22 ab	1.60 a	1.36 b	1.70 b	0.65 c	3.18 a	2.07 a	14.87 b	10.14 b	3.15 b

注（Note）：NUE—Nutrients utilization efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within the same column are significant among treatments at the 5% level.

与 CK 和 TR0.3 处理相比，TR0.1 处理营养液养分利用率分别提高了 37.7% 和 29.4% ($P < 0.05$)，其余处理之间无显著性差异。

2.3.2 不同处理对番茄果实品质的影响　表 5 显示，与 CK 处理相比，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理果实硝酸盐含量和可滴定酸含量分别降低了 19.4%～68.6% 和 16.7%～23.2% ($P < 0.05$)，总可溶性固形物和糖酸比分别增加了 0.8%～12.9% (其中 TR0.3 与 CK处理间差异不显著) 和 31.3%～34.7% ($P < 0.05$)。其中，与 TR0.2 和 TR0.3 处理相比，TR0.1 处理果实硝酸盐含量、总可溶性固形物、可滴定酸含量和糖酸比均最高，并存在显著性差异 ($P < 0.05$，糖酸比除外)。

表 5　不同处理对番茄果实品质的影响

Table 5　Effect of different treatments on fruit quality of tomato

处理 Treatment	硝酸盐含量 (mg/kg) Nitrate content	总可溶性固形物 (%) Total soluble solid	可滴定酸含量 (%) Titratable acid content	糖酸比 (%) Sugar-acid ratio
TR0.1	66.48 ± 3.43 b	4.67 ± 0.06 a	0.55 ± 0.01 b	8.43 ± 0.10 a
TR0.2	39.86 ± 2.50 c	4.33 ± 0.06 b	0.52 ± 0.01 c	8.39 ± 0.21 a
TR0.3	25.91 ± 2.80 d	4.17 ± 0.06 c	0.51 ± 0.01 c	8.22 ± 0.02 a
CK	82.51 ± 5.97 a	4.13 ± 0.06 c	0.66 ± 0.01 a	6.26 ± 0.18 c

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within the same column are significant among treatments at the 5% level.

3　讨论与结论

3.1　不同处理对营养液养分含量的影响

本试验中，为便于数据对比，根据文献[6–10]将叶片数增长动态处理 (TR0.1、TR0.2 和 TR0.3) 和 CK 的营养液浓度变化范围设置相同，即 1.5～2.7 mS/cm。从试验过程来看，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理的营养液浓度提高频率分别是 CK 的 5.6 倍、2.5 倍和 2.0 倍，说明叶片数增长动态处理的营养液浓度呈缓慢升高趋势。随定植时间延长，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理营养液可利用总盐含量、营养液大量元素 (N、P、K、Ca、Mg 和 S) 和微量元素 (Fe、B、Mn、Zn、Cu 和 Mo) 可利用总含量均低于 CK ($P < 0.05$)，表明叶片数增长动态处理所利用的营养液养分含量显著少于 CK。对于叶片数增长动态处理 (TR0.1、TR0.2 和 TR0.3)，TR0.1 处理营养液可利用总盐含量、大量元素和微量元素可利用总含量最高，其次为 TR0.2 和 TR0.3处理，说明养分可吸收量随营养液浓度提高频率的增加而增加。已有研究表明，根据植株生长对养分吸收的需要，缓慢升高营养液浓度有助于提高植株养分吸收量[27]。由此可见，供试条件下 TR0.1 处理缓慢升高营养液浓度的供给方式可减少营养液养分使用量，提高养分吸收量，同时确保植株正常生长。

3.2　不同处理对番茄生长、产量和品质的影响

定植后 54 天时，CK 处理番茄株高显著高于 TR0.1、TR0.2 和 TR0.3处理。番茄植株生育过程中，各处理茎粗和叶片数受营养液浓度提高幅度影响较小，无显著性差异。

TR0.1 处理产量和营养液养分利用率比 CK 分别提高了 30.4% 和 37.7% ($P < 0.05$)，这与聂守军等[11]、高存启等[21]和王新海等[23]研究得出的水稻叶龄诊断施肥法比常规施肥法可增产 4%～15.6%，并提高肥料利用率的结论一致。叶片数增长动态处理的产量和营养液养分利用率均表现为 TR0.1 > TR0.2 > TR0.3，这与施入的营养液养分含量有关[26–27]，养分施入越多，越有利于植株生长和产量提高。而 TR0.3 和 CK 处理产量较低，可能与供给的营养液中含有氮素量有关，因为氮素供应较少或过多会导致植株长势较弱或茂盛而影响生殖生长[27]。本试验中，试验前期单株番茄供液量稍大，且一天供液 12 次偏多，造成营养液浪费，日后采用完善的水分传感器供液系统则有可能提高营养液养分利用率。

番茄硝酸盐含量是衡量果实品质的重要指标之一[28]。与 CK 相比，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理显著降低了果实硝酸盐含量 ($P < 0.05$)，其中 TR0.3 处理果实硝酸盐含量最低，最大降低幅度为 68.6%。本试验中，通过营养液施入的氮素量显著影响番茄硝酸盐含量，因为研究表明果实硝酸盐含量随氮素施入量的减少而减少[29–31]。番茄风味主要取决于糖酸含量及其配比关系[32]。与 CK 相比，TR0.1、TR0.2 和 TR0.3 处理可滴定酸含量降低了 16.7%～23.2% ($P <$

0.05)，总可溶性固形物和糖酸比分别增加了0.8%～12.9% 和 31.3%～34.7% ($P < 0.05$)。有研究表明，无土栽培中变化浓度的营养液比维持恒定浓度的营养液更有利于提高番茄果实品质[33–35]。与 TR0.2 和 TR0.3 处理相比，TR0.1 处理果实总可溶性固形物、可滴定酸含量和糖酸比均最高，除糖酸比外均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。TR0.1 处理硝酸盐含量虽高于 TR0.2 和 TR0.3处理，但远小于国家标准(GB 18406.1—2001) 对无公害蔬菜的安全要求(NO_3^- ≤ 438 mg/kg)。所以，TR0.1 处理品味最佳。本试验中，定植 15～51 d 内，由于 TR0.1 处理的营养液浓度提高速率快，则大多情况下其营养液浓度均高于 TR0.2 和 TR0.3 处理。研究表明，在一定程度上较高的营养液浓度提高营养液的渗透压，可适当抑制番茄根系吸收，提高果实总可溶性固形物和可滴定酸含量；同时，营养液电导率的变化会引起溶液化学稳定性、阳离子交换量和缓冲能力等因素的变化，也影响番茄对营养液中各种大量元素和微量元素的吸收，从而引起番茄品质的改变[33]。

综上所述，叶片数增长动态处理的营养液浓度调控方法比常规营养液供给方法更准确及时，可明显提高营养液利用率和番茄产量，改善品质，其中每增长 1 片叶营养液浓度增加 0.1 mS/cm 的供给方法(TR0.1)因营养液浓度变化速率快，浓度变化幅度小，对促进番茄生长、养分吸收以及增加产量与改善品质的效果最佳，为供试条件下最优的营养液调控方法。

3.3　营养液型基质栽培番茄植株发育进程与养分需求的关系

营养液型基质栽培中，基质内养分缓慢释放，其含量逐渐减少，用于作物吸收的养分主要靠营养液供给，所以营养液中各营养元素的数量比例应符合作物生长发育要求，且各营养元素有效充分发挥和作物吸收应保持平衡[6]。陈双臣等[36]认为，春夏茬温室番茄营养生长期对养分的吸收比例为 $N : P_2O_5 : K_2O$ = 1 : 0.23～0.30 : 1.12～1.18，坐果采收期的养分吸收比例为 $N : P_2O_5 : K_2O$ = 1 : 0.30～0.39 : 1.7，表明番茄生长前期对氮素的吸收量较多，生长后半期对磷钾的吸收量较多。这与王振龙[6]的观点一致，其在日本山崎番茄营养液配方的基础上，建议番茄定植到开花前营养液加入 30 mg/L 硝酸铵以补充氮素；结果盛期分别增加 100 mg/L 的磷、钾含量，可提高番茄产量并改善果实品质。说明供给营养液时要考虑番茄不同生育阶段的养分比例。

3.4　番茄营养液型基质栽培下温室环境的影响

番茄营养液浓度的调整与温室温度有关。郭世荣[26]提到，适宜番茄生殖生长的营养液浓度范围是 2.5～3.5 mS/cm，但在不同温度条件下，施入的营养液浓度不同[8–10, 26]。高温季节，为防止番茄产生脐腐病应降低浓度，控制在 2.5 mS/cm 左右；低温季节，养分吸收浓度高于施入的营养液浓度，可提高至 3.5 mS/cm 以下，当浓度超过 4 mS/cm 时，对产量和品质产生不利影响。本试验番茄结果期处于高温期，为了便于数据对比，将各处理营养液的最高浓度控制在 2.7 mS/cm。同一品种番茄叶片位置基本固定，低温季节的营养液浓度高于本试验浓度，若按本试验的叶片数增长动态处理进行供液，可能造成番茄对养分的吸收不足，所以根据叶片数增长动态控制低温季节的营养液浓度还需进一步研究。试验过程中还需注意控制温室光照、湿度、CO_2 浓度等，使番茄处于适宜生长的环境。有研究表明[6]，适宜番茄生长的光照为 30000～35000 lx，空气相对湿度为 50%～65%，CO_2 浓度为 600～1 000 μmol/mol。

3.5　基于叶片数增长动态的营养液供给方法的前景

目前，侯加林等[24]和张智优等[25]分别建立了番茄叶龄发育动态模拟模型和设施番茄发育期与叶龄的动态模拟模型，均可预测番茄各生育阶段及各器官的生育进程，具有较好的适用性和可靠性，说明番茄为同一品种时，叶片和果穗之间的相对位置基本固定，可预知番茄的生育阶段，为基于叶片数增长动态调控营养液供给浓度的基质栽培管理方法提供了理论基础。叶片数量是实际生产过程中易于掌握的生长发育参数，所以基质栽培中，基于叶片数增长动态调控营养液供给的方法易于操作，且比常规法具有及时、科学、合理的优势，是一种值得推广的基质栽培营养液管理方法。

参 考 文 献：

[1] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 1–4.
Guo S R. Research progress, current exploitations and developing trends of solid cultivation medium[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(Supl.) : 1–4.

[2] Savvas D, Manos G. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems[J]. Agricultural Engineering Research, 1999, 73: 29–33.

[3] Klaring H P. Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops[J]. Agronomie, 2001, 21: 311–321.

[4] Banedjschafie S, Bastani S, Widmoser P, *et al*. Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat[J].

European Journal of Agronomy, 2008, 28(1): 1–7.

[5] 倪纪恒, 毛罕平. 电导率对温室黄瓜叶面积和干物质生产影响的动态模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 105–109.
Ni J H, Mao H P. Dynamic simulation of leaf area and dry matter production of greenhouse cucumber under different electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 105–109.

[6] 王振龙. 无土栽培教程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. 23–314.
Wang Z L. Soilless cultivation course[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008. 23–314

[7] 刘士哲. 现代实用无土栽培技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001. 129.
Liu S Z. Modern practical soilless cultivation techniques[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001. 129.

[8] 陈永华, 吴晓芙, 张冬林, 等.不同营养液浓度与配方对水培观赏植物的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(6): 34–37.
Chen Y H, Wu X F, Zhang D L, *et al*. Effects of different nutrition concentrations and formulas on the ornamental plants in water culture[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 27(6): 34–37.

[9] 范双喜. 不同营养液浓度对莴苣生长特性的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(2): 152–156.
Fan S X. Effects of nutrient solution of different concentrations on growth properties of Lactuca saliva var1ongifolia Lam[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(2): 152–156.

[10] 吕卫光, 赵京音, 姚政. 现代化温室无土栽培番茄营养液管理技术调查[J]. 中国蔬菜, 2002, (1): 18–19, 28.
Lü W G, Zhao J Y, Yao Z. Investigation of the nutrient solution management of tomato cultivation in modern greenhouse[J]. China Vegetables, 2002, (1): 18–19, 28.

[11] 聂守军, 史冬梅, 谢树鹏, 等. 叶龄诊断施肥法对水稻产量的影响[J]. 北方水稻, 2009, 39(1): 38–39, 70.
Nie S J, Shi D M , Xie S P, *et al*. Effect of leaf-age-diagnosis fertilization on yield of rice[J]. North Rice, 2009, 39(1): 38–39, 70.

[12] 凌启鸿, 蔡建中, 苏祖芳, 等.水稻叶龄模式--水稻高产栽培技术新体系[J]. 农业科技通讯, 1983, (12): 1–3.
Ling Q H, Cai J Z, Su Z F, *et al*. The rice leaf age model, the new system of high-yield rice cultivation technique[J].Agricultural Science and Technology Communication, 1983, (12): 1–3.

[13] 马景勇, 牟金明, 退力加, 等. 水稻叶片数增长动态的模拟及应用[J]. 吉林农业科学, 1998, (2): 15–18.
Ma J Y, Mou J M, Tui L J, *et al*. Imitation and application of tendencies of rice leaf age[J]. Jilin Agricultural Sciences, 1998, (2): 15–18.

[14] 刘桃菊, 唐建成. 水稻叶龄模型在形态建成模拟中的应用[J]. 江西农业大学学报, 1996, 18(2): 150–153.
Liu T J, Tang J C. Application of the leaf-age model in the simulation of rice morphogenesis[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1996, 18(2): 150–153.

[15] 吴元华, 蒲选昌, 杨昌元, 等. 黔东禾稻类型分类及叶龄栽培模式研究[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(1): 49–52.
Wu Y H, Pu X C, Yang C Y, *et al*. Classification of special rice varieties and its leaf-age cultivation model in southeast Guizhou[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, 38(1): 49–52.

[16] 郑国清, 段韶芬, 阎书波, 等. 玉米叶龄与器官发育模拟模型[J]. 玉米科学, 2003, 11(4): 63–66.
Zheng G Q, Duan S F, Yan S B, *et al*. Simulation models of the development of leaf age and organs in maize[J].Journal of Maize Science, 2003, 11(4): 63–66.

[17] 闫大明, 杨克军. 玉米生长发育进程与叶龄模式研究[J]. 现代化农业, 2015, (2): 7–9.
Yan D M, Yang K J. The model of the development of growth process and leaf age[J]. Modernizing Agriculture, 2015, (2): 7–9.

[18] 李秉柏, 方娟. 棉花的叶龄模式及其应用[J]. 作物学报, 1993, 19(6): 481–488.
Li B B, Fang J. Cotton leaf age model and its application[J]. Acta Agronomica Sinica, 1993, 19(6): 481–488.

[19] 吴桂成, 张洪程, 吴文革. 不同叶龄期追施穗肥对粳型超级稻产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(18): 9440–9441, 9528.
Wu G C, Zhang H C, Wu W G, *et al*. Effects of dressing ear fertilizer in different leaf age on the yield and quality of japonica super rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(18): 9440–9441, 9528.

[20] 范志杰, 聂安全, 王秋叶, 等. 地膜覆盖栽培棉花叶龄模式及其调控技术[J]. 山西农业科学, 1988, (4): 1–5.
Fan Z J, Nie A Q, Wang Q Y, *et al*. The model and control technology of cotton leaf age in plastic mulching cultivation[J]. Shanxi Agricultural Science, 1988, (4): 1–5.

[21] 高存启. 叶龄诊断技术施肥法和常规施肥法的不同施肥量研究[J]. 黑龙江农业科学, 2008, (1): 58–60.
Gao C Q. Study on different fertilizing amount between leaf age diagnose method and conventional method[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2008, (1): 58–60.

[22] 周岚, 崔坤, 张喜田, 等. 水稻叶龄诊断施肥在生产上的应用研究[J]. 吉林农业科学, 2001, 26(5): 37–39.
Zhou L, Cui K, Zhang X T et al. Research on the rice leaf age diagnose fertilizer in the production[J]. Jilin Agricultural Sciences, 2001, 26(5): 37–39.

[23] 王新海, 王成志. 水稻叶龄诊断施肥试验研究[J]. 现代农业科技, 2011, (11): 86–87.
Wang X H, Wang C Z. Research on the rice leaf age diagnose fertilizer[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011, (11): 86–87.

[24] 侯加林, 王一鸣, 丛晓燕, 等.番茄叶龄发育动态模拟模型[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 102–103.
Hou J L, Wang Y M, Cong X Y, *et al*. A simulation model study of the development of leaf serial in tomato[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 102–103.

[25] 张智优, 曹宏鑫, 陈兵林, 等. 设施番茄发育期与叶片数增长动态模拟模型研究[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4) : 550–557.
Zhang Z Y, Cao H X, Chen B L, *et al*. Research on the simulation models of phenophase and leaf number of controlled tomato[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(4) : 550–557.

[26] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
Guo S R. Soilless cultivation[M]. Beijing: China Agricultural

University Press, 2008.

[27] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 91–104.
Wu W H. Plant physiology[M]. Beijing: Science Press, 2003. 91–104.

[28] 牛晓丽, 胡田田, 周振江, 等. 水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 82–88.
Niu X L, Hu T T, Zhou Z J, *et al*. Effects of water and fertilizer supply on nitrate content in tomato fruit[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 82–88.

[29] 王朝辉, 李生秀, 田霄鸿. 不同氮肥用量对蔬菜硝态氮积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 22–28.
Wang Z H, Li S X, Tian X H. Influence of nitrogen rates on nitrate accumulation in vegetables[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 22–28.

[30] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚. 不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2338–2345.
Jiang H M, Zhang J F, Yang J C. Effects of different treatments of nitrogen fertilizer on yield, quality of tomato and soil NO_3^--N accumulation in vegetable-greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2338–2345.

[31] 马跃, 田建全, 尹晓丽. 氮磷钾配比对温室番茄品质的影响[J]. 北方园艺, 2011, (18): 57–60.
Ma Y, Tian J Q, Yin X L. Effects of the different proportion of nitrogen, phosphate and potassium on the quality of greenhouse tomatoes[J]. Northern Horticulture, 2011, (18): 57–60.

[32] 李宝江, 林桂荣, 崔宽, 等. 苹果糖酸含量与果实品质的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 1994, 25(3): 279–283.
Li B J, Lin G R, Cui K, *et al*. Studies on relationship between sugar and acid content and fruit quality of apples[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1994, 25(3): 279–283.

[33] 樊怀福,杜长霞,朱祝军. 调节营养液电导率对卡罗番茄果实品质和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(4): 102–105, 193.
Fan H F, Du C X, Zhu Z J. Effect of nutrient solution conductivity regulation on quality and yield of Kaluo tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(4): 102–105, 193.

[34] 林多, 黄丹枫, 杨延杰, 等. 营养液浓度对基质栽培网纹甜瓜生长和品质的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(2): 184–186.
Lin D, Huang D F, Yang Y J, *et al*. Effects of nutrient levels on plant growth and fruit quality of muskmelon in soilless medium culture[J]. Acta Agriculturae Boreali Sinica, 2007, 22(2): 184–186.

[35] Cuartero J, Fermamdez M R. Tomato and salinity[J]. Scientia Horticulturae, 1999, 78: 83–125.

[36] 陈双臣, 贺超兴, 邹志荣, 等. 温室有机土栽培番茄营养吸收特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 369–374.
Chen S C, He C X, Zou Z R, *et al*. Nutrients absorption characteristics of tomato cultivated with organic substrate in greenhouse[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 369–374.