

# 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响

李 波<sup>1,2</sup>, 任树梅<sup>1\*</sup>, 杨培岭<sup>1</sup>, 孔清华<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市水文总站, 北京 100039)

**摘 要:** 通过田间试验, 分析了不同生育期供水条件对番茄灌水量、光合作用、根系分布、产量和水分利用效率的影响。结果表明: 番茄开花坐果期控制灌水下限为 60%  $f_c$  (田间持水量), 结果盛期控制灌水下限为 75%  $f_c$ , 控制灌水上限为 90%  $f_c$ , 番茄产量最高, 达到 91.7 t/hm<sup>2</sup>, 水分利用效率达到 27.51 kg/m<sup>3</sup>, 整根的根长、根表面积、根体积、根干重都明显增加。叶片净光和速率在 75%  $f_c$  条件下最高, 有利于光合产物的形成。随土层深度的增加, 根长密度呈指数下降。不同土壤水分条件对番茄根系生长影响主要体现在直径小于 1 mm 的根系上, 而且直径小于 1 mm 的根长和产量之间存在很好的相关关系。

**关键词:** 滴灌; 净光合速率; 根系; 产量; 水分利用效率

**中图分类号:** S152.7<sup>+</sup> 5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)9-0039-06

李 波, 任树梅, 杨培岭, 等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 39-44.

Li Bo, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Impacts of water supply on root distribution and yield of tomato in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 39-44. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

节水农业的发展要以作物的生理生态为依据, 必须从作物对水分的不同亏缺程度的生物学反应, 及其与土壤水分的关系入手, 探索有效的节水灌溉方案。作物的不同生理过程和不同生育时期对水分亏缺反应程度不同。由于温室作物栽培历史较短等原因, 有关温室作物需水规律及相应的灌水技术参数方面的研究很少, 已有的少数研究也主要集中于探讨作物整个生长期适宜的控制水分下限等内容<sup>[1-4]</sup>。目前, 区分不同生育时期探索作物不同生育阶段的需水特点及其对作物生长状况、产量和农产品品质的影响的研究尚处于起步阶段<sup>[5-7]</sup>。温室作物生产中水分管理存在着很大的盲目性, 灌水时间、灌水定额等技术参数的确定基本上靠经验做出判断。本文利用田间小区作物栽培试验的方法, 通过区分不同生育时期, 研究不同控制灌水下限对番茄光合作用、根系、产量和水分利用效率的影响, 以期对温室滴灌蔬菜栽培的水分合理调控提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试作物

本文试验地点选择在北京市通县永乐店北京市水利科学研究所节水试验站日光温室内进行, 灌溉方式为滴灌, 供试作物为番茄(中杂 101)。番茄于 6 月 12 日育苗, 7 月 5 日定植, 定植前选择长势良好均匀的幼苗, 三叶一心, 株高 20 cm, 10 月 16 日试验结束。番茄的行距 40 cm, 株距 30 cm, 种植密度为每公顷 6 万株。供试土壤为砂质黏壤土, 土壤干容重为 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量 28.6% (质量含水量)。每行作物布置一条滴灌毛管, 滴头流量是 2 L/h。试验小区面积 4 m×4.5 m, 每个处理 4 次重复, 灌水量由水表控制。另外, 各处理的施用肥料种类、数量相同: 定植前沟施磷酸二铵 374.81 kg/hm<sup>2</sup>, 尿素 149.93 kg/hm<sup>2</sup>, 硫酸钾 224.89 kg/hm<sup>2</sup>, 并于第一穗果实膨大期追施尿素 149.93 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 试验处理

本次试验将番茄生育期划分为三个阶段: 苗期: 定植到开花之前; 开花坐果期: 开花至第一穗果快速膨大期; 盛果期: 第一穗果实膨大期至收获结束。试验因素与处理见表 1。根据番茄栽培经验, 定植初期土壤含水率应保持在 100%  $f_c$ , 以保证番茄幼苗的成活率。由于苗期株体尚小, 需水强度也很小, 苗期不再灌水。水分处理从开花坐果期开始。当计划湿润层内平均土壤含水率达到灌水下限制值时, 开始灌溉<sup>[8]</sup>。灌水上限相同, 均为田间持水量的 90%  $f_c$ <sup>[9]</sup>。番茄开花坐果期计划湿润层深度取 40 cm, 盛果期取 60 cm<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2006-12-04 修订日期: 2007-05-29

基金项目: 教育部科技司农业科技成果转化基金 (05EFN217100425)

作者简介: 李波(1983-), 男, 辽宁省凌源市人, 主要从事灌溉排水理论与新技术的研究。北京 北京市水文总站, 100039。

Email: libo19830603@sohu.com

\*通讯作者: 任树梅, 北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: renshumei@126.com

表 1 不同生育期土壤含水率

Table 1 Soil moisture in different growth stages

处理	开花坐果期土壤含水率	结果盛期土壤含水率
T 1	75% f <sub>c</sub>	75% f <sub>c</sub>
T 2	60% f <sub>c</sub>	75% f <sub>c</sub>
T 3	45% f <sub>c</sub>	75% f <sub>c</sub>
T 4	75% f <sub>c</sub>	60% f <sub>c</sub>
T 5	60% f <sub>c</sub>	60% f <sub>c</sub>
T 6	45% f <sub>c</sub>	60% f <sub>c</sub>

1.3 参数测定

1) 净光和速率的测定

采用 LI-6400 便携式光合仪测定各处理奇数羽状复叶的顶部叶片的光合速率、气孔导度、蒸腾速率等指标,各处理选择 5 株进行测定。

2) 根系的测定

收获后取根样,取样用挖掘法。开挖的范围是供挖掘植株与四周相邻植株间距的中线形成的 30 cm×40 cm 矩形区域,取样间距为 10 cm,每处理随机取 3 次重复,取根深度取决于番茄最大根深。根样取出后先在水中浸泡,然后用水冲洗过 0.5 mm 筛使土壤与根分离,得到根的样品。用 EPSONEXPRESSION 1680 型扫描仪对根样进行扫描,扫描仪的分辨率设为 400 dpi。扫描时为使根样的分枝不互相缠绕,将根样放入一个透明的托盘内,并注入 3~5 mm 深的水。扫描出的图像用 WinRHIZO 根系分析软件进行分析得到根样的根长、根表面积、根体积和根的平均直径等各项特征参数值。将根洗净,放在 105℃ 的烘箱中杀青 1 h,之后置于 55℃ 恒温下烘 48 h,冷却后取出计算根系干重。

3) 产量的测定

成熟后各小区单独收获,均以 4 次重复产量的平均

值来代表该处理的实际产量。随机挑选 50 个番茄,称其单果质量,以平均值代表各处理的单果质量。

2 结果与分析

2.1 灌水量和灌水频率

温室作物耗水主要由植株体蒸腾、土面蒸发和包括深层渗漏在内的土壤水再分布等 3 部分构成(见表 2)。在番茄开花坐果期,灌水控制下限为 75% f<sub>c</sub>、60% f<sub>c</sub>、45% f<sub>c</sub> 的每一处理小区的灌水量平均值分别为 2029.14、1560.15 和 1141.18 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,即随着灌水控制下限值的下降而灌水量减少,究其原因此时植株体尚小,处理间植株体蒸腾强度相差不大,而灌水控制下限值越大,灌入的水量越多,土壤水分含量越高,水分再分布的过程时间越长、湿润的范围也越大。表层土壤越湿润,地面蒸发强度也越大,也就是说番茄开花坐果期灌水控制下限值越大灌水量越大,主要是由地面蒸发量大和湿润范围广、水分被储存于土壤剖面所造成的。而番茄盛果期灌水控制下限为 75% f<sub>c</sub>、60% f<sub>c</sub> 每一处理小区的灌水量平均值分别为 1786.31、1429.88 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,处理间的灌水量差异缩小,这一方面可能与生育后期开始时土壤水分含量多少有关,即后期处理相同但前期处理不同、储存于土层中的水量多少不同,更主要的是植株生长茂盛、覆被增加,水分消耗主要决定于作物植株蒸腾。而作物的长势不仅受作物生长后期土壤水分状况的影响,也受作物生长前期的影响;前期灌水控制下限值越大、灌水量最大的处理,植株长势不一定最旺盛<sup>[11]</sup>。因此,作物开花坐果期与盛果期共同决定着番茄全生育期的总灌水量,前期与后期的水分控制水平表现出明显的耦合与交互作用。

表 2 不同处理不同生育期灌水周期、灌水量比较

Table 2 Comparison of irrigation interval and irrigation amount in different growth stages of tomato with different treatments

	开花坐果期			盛果期			全生育期	
	灌水次数	灌水量/m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	灌水周期/d	灌水次数	灌水量/m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	灌水周期/d	灌水次数	灌水量/m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>
T 1	10	2051.03	3.4	5	1657.08	6	15	3708.10
T 2	6	1600.80	5.7	5	1732.12	6	11	3332.92
T 3	3	1156.83	11.3	5	1969.73	6	8	3126.56
T 4	10	2007.25	3.4	3	1538.27	10	13	3545.52
T 5	6	1519.51	5.7	3	1331.92	10	9	2851.43
T 6	3	1125.56	11.3	3	1419.46	10	6	2545.02

2.2 土壤水分对净光合速率的影响

试验于 9 月 17 日、9 月 18 日、9 月 19 日连续 3 天 10:00~12:00 测定不同水分处理条件下番茄奇数羽状复叶的顶部叶片光合速率<sup>[12]</sup>,求其平均值如图 1 所示,开花坐果期控制灌水下限为 75% f<sub>c</sub>>60% f<sub>c</sub>>45%

f<sub>c</sub>,土壤水分的下降使得光合速率降低,严重影响光和产物的合成以及组织器官的生长发育,最终导致产量大幅度下降。究其生理原因:水分是光合作用的原料之一,缺水使叶片气孔关闭,影响 CO<sub>2</sub> 进入叶内;缺水使叶片淀粉水解,糖类累积,光和产物输出缓慢,这些都会使光

合速率下降。75%  $f_c$  的处理较 45%  $f_c$  的处理净光合速率平均增长 20.9%。盛果期控制灌水下限为 75%  $f_c$  均大于 60%  $f_c$ , 说明番茄生育后期的土壤水分升高可以促进番茄光合速率的增长, 有利于光合产物的形成。

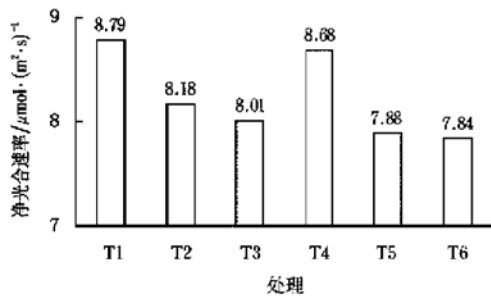


图 1 不同处理净光合速率比较

Fig. 1 Comparison of net photosynthetic rates with different treatments

2.2 土壤水分对番茄根系的影响

2.2.1 整根特征参数

表 3 对比了不同水分处理条件下的整根特征参数, 可以看出, 整根各项参数随着各处理控制灌水下限的不同而差异显著。从整体上看, 随着控制灌水下限的降低, 番茄根系各项特征参数都呈下降趋势, T6 的单株总根长为 14650.173 cm, 而最大的 T2 单株根长为 36025.492 cm, 增幅为 T6 的 2.46 倍。各处理直径小于 1 mm 的根长占总根长的 96% 以上, 这说明不同水分处理对根长的影响表现在直径小于 1 mm 的根上。T1 在番茄开花坐果期和结果盛期控制灌水下限均为 75%  $f_c$ , 灌水次数最多, 灌水量最大, 但是整根各项参数都整体低于 T2, 这说明充分的土壤水分并不利于根系的分生, 因为植株不停分生更多的根系来加大水分的吸收。另外, 这也说明 75%  $f_c$ ~ 90%  $f_c$  的水分环境充分保证番茄需水, 加速蒸腾, 造成所谓的“奢侈”耗水。由此可见, 番茄花期土壤水分的变化对根系特征参数的影响存在一个阈值反应, 此值约为 60%  $f_c$ 。这也可以被称为是番茄高效高产控制灌水下限的临界点, 对番茄灌溉有重要的指导意义。

表 3 整根特征参数

Table 3 Characteristic parameters for the whole roots					
处理	总根长 /cm	直径小于 1 mm 的根长/cm	总根表面积 /cm <sup>2</sup>	总根体积 /cm <sup>3</sup>	总根干重 /g
T1	32092.827	30956.882	3908.547	42.518	2.381
T2	36025.492	35044.646	4127.892	44.999	3.035
T3	21991.858	21149.656	2747.276	34.167	2.852
T4	22374.605	21789.838	1640.317	17.778	2.361
T5	20370.924	19795.698	2443.264	30.030	1.923
T6	14650.173	14152.405	1678.545	17.267	1.803

2.2.2 土壤水分对根长密度垂直分布的影响

根长密度是衡量作物根系的重要指标, 通常以每  $\text{cm}^3$  土壤内根长的厘米数表示。表 4 反应了番茄整个根系的根长密度沿深度的变化。从表中可以看出, 番茄根系主要集中在 0~ 60 cm 土层, 且随着深度的增加根长密度快速递减, 这与相关研究结果一致<sup>[13, 15]</sup>。在不同灌水条件下, 根长密度的变化存在显著差异。以单株根长密度为例: T1 和 T2 各层总根长密度远高于其他处理。T3 虽然在盛果期控制灌水下限为 75%  $f_c$ , 但是由于开花坐果期控制灌水下限比较低, 仅为 45%  $f_c$ , 表层根系下降尤为明显, 从 2.640  $\text{cm}/\text{cm}^3$  和 2.322  $\text{cm}/\text{cm}^3$  下降到 1.048  $\text{cm}/\text{cm}^3$ 。因此各层根长密度发育远低于 T1 和 T2。在盛果期控制灌水下限为 60%  $f_c$  的处理根系发育远比 75%  $f_c$  差。对于根系发育旺盛时期, 任何一个时期过分的水分胁迫都会产生抑制, 但两个时期根系对水分的敏感程度有所不同。花期的水分控制在 60%  $f_c$ , 但是盛果期控制在 75%  $f_c$ , 为我们调控灌溉和提高水分利用效率提供科学依据。

表 4 整个根系根长密度

Table 4 Root length density of the whole roots						
$\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$						
深度/cm	T1	T2	T3	T4	T5	T6
10	2.640	2.322	1.048	0.913	0.838	0.864
20	0.996	1.019	0.596	0.665	0.556	0.442
30	0.731	0.974	0.361	0.541	0.616	0.305
40	0.593	0.821	0.409	0.589	0.615	0.196
50	0.191	0.643	0.405	0.600	0.390	0.394
60	0.150	0.143	0.461	0.279	0.249	0.122
70	0.048	0.083	0.385	0.141	0.132	0.119

就番茄根系垂直方向发育而言, 如图 2 所示, 随着根系向深层土壤的生长, 根长密度随土层深度的增加而成指数下降。经相关分析, 各处理相关系数  $R^2$  均达到 0.85 以上。由于 T1、T2 控制灌水下限较高, 灌水频率较短, 表层土壤经常保持湿润状态, 因此表层根系生长旺盛, 0~ 20 cm 根长密度占各层根长密度总和的 68% 和 55%, 0~ 40 cm 根长密度占各层根长密度总和的 92% 和 85%, 而 T3、T4、T5、T6 在 0~ 20 cm 分别为 44%、42%、41%、43%, 0~ 40 cm 根长密度占各层根长密度总和的 65%、72%、75%、73%。T3 花期控制灌水下限过低, 根系向深层土壤中发育, 吸取深层土壤水分, 因此 40~ 70 cm 处的根长密度仍然占各层根长密度总和的 35%。由于果期灌水下限较低, T4、T5、T6 较 T1、T2 在 40~ 70 cm 处的根长密度也有一定程度的增加。由此可见, 番茄花期和果期水分控制水平表现出明显的耦合与交互作用, 只有对各个生育期灌水下限区别控制, 才能保证根系的正常发育。

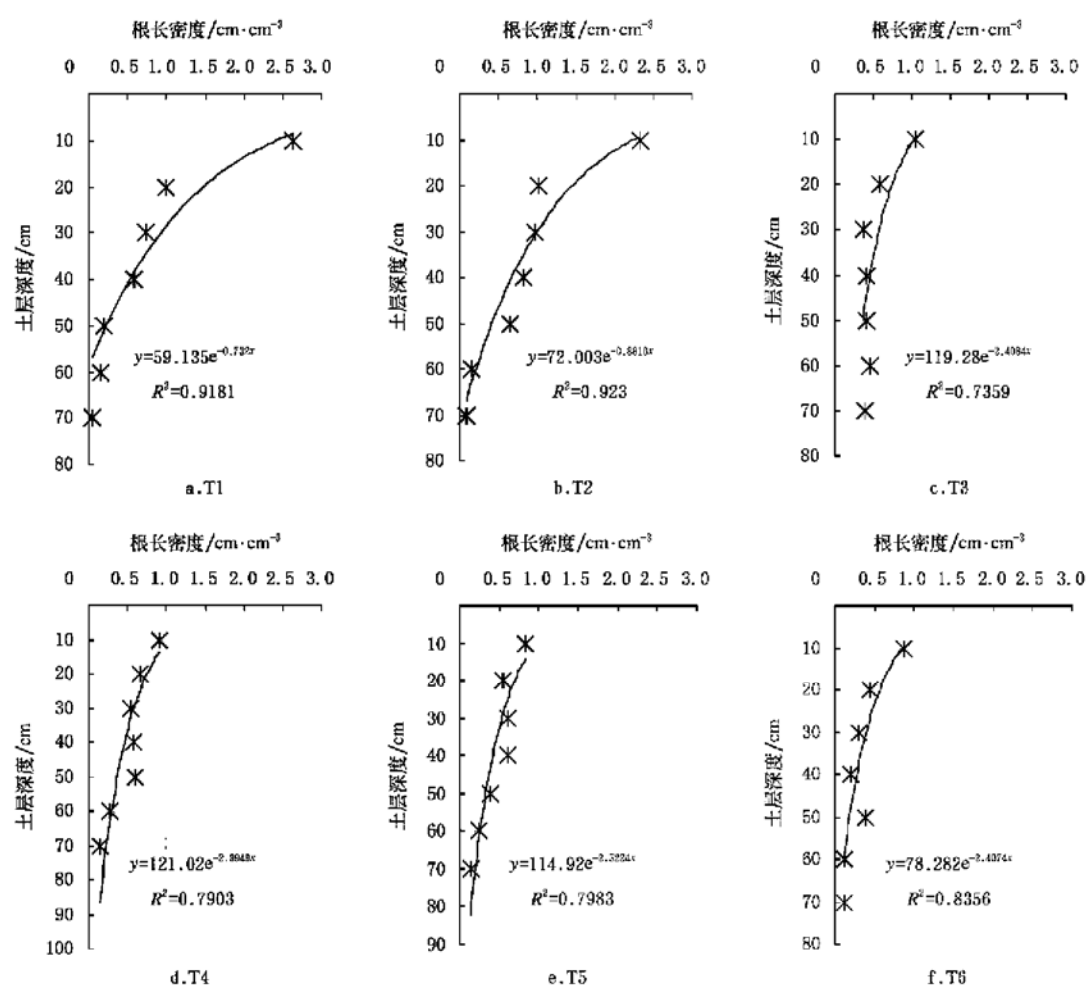


图2 番茄收获期根长密度垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of tomato root length density with different treatments in harvest stage

2.3 产量和水分利用效率

不同灌水条件下,番茄产量如表5所示,可以看出,开花坐果期控制灌水下限为60%fc,结果盛期为75%fc,产量最高,达到了91.7 t/hm<sup>2</sup>,单果质量最大,达到295.2 g,在p = 0.05水平下,各处理呈显著差异。T1灌水量最大,灌水次数最多,产量为87.2 t/hm<sup>2</sup>,低于T2。这说明,整个生育期都保持较高的灌水下限,并不利于产量的形成。从水分利用效率来看,开花坐果期控制灌水下限为45%fc,盛果期为60%fc,水分利用效率最高。但是由于控制灌水下限最低,灌水最少,作物在需水关键期得不到充足的水分补充,因此产量最低,仅为74.0 t/hm<sup>2</sup>。考虑到产量过低而不为人们所期望,故产量最高,水分利用效率也相对较高的T2为最佳的灌水处理。

作为作物吸收水分和养分的主要器官,根系的变化

势必对产量的形成带来很大影响。为了分析不同灌溉水平下产量变异的原因,对产量和直径小于1 mm的根长之间的关系进行回归分析后得出:产量与直径小于1 mm根长之间存在很好的相关关系。可以认为,不同灌水条件引起细根的变化造成了产量差异原因之一。

表5 不同处理单果质量、产量和水分利用效率的比较  
Table 5 Compare of fruit weight, yield and water use efficiency with different treatment

处理	单果质量 /g	产量 /t · hm <sup>-2</sup>	水分利用效率 /kg · m <sup>-3</sup>
T1	254.1	87.2	23.52
T2	295.2	91.7	27.51
T3	258.3	84.3	26.96
T4	245.7	83.1	23.44
T5	223.3	76.0	26.65
T6	208.1	74.0	29.08

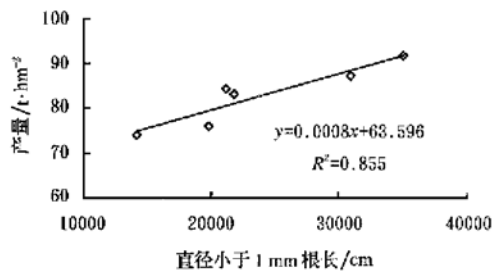


图3 产量与直径小于1 mm的根长之间相关关系

Fig. 3 Correlation between tomato yield and the root length with diameter of less than 1 mm

### 3 结论与讨论

本文在总结前人研究成果的基础上,分析了番茄不同生育期,控制不同土壤水分条件对番茄光合作用、根系生长、产量和水分利用效率的影响,结果表明:

1) 番茄开花坐果期控制灌水下限为 75%  $f_c$  的净光合速率最高, 60%  $f_c$  次之, 45%  $f_c$  最低。开花坐果期灌水下限相同的情况下, 盛果期灌水下限为 75%  $f_c$  均高于 60%  $f_c$ , 这说明盛果期保持土壤充足的水分对作物净光合速率有促进作用, 利于光合产物的形成。

2) 随着控制灌水下限的降低, 番茄整根根长、根表面积、根体积、根干重都表现出明显下降的趋势。番茄整根根长密度在垂直方向上呈指数递减(相关系数  $R^2$  在 0.85 以上), 各层根长密度也随灌水下限的不同而差异显著。根系发育的程度, 是花期和果期水分控制水平耦合和交互的结果。

3) 开花坐果期控制灌水下限为 60%  $f_c$ , 结果盛期为 75%  $f_c$ , 产量最高, 达到了 91.7 t/hm<sup>2</sup>, 单果质量最大, 达到 295.2 g, 水分利用效率达到 27.51 kg/m<sup>3</sup>。番茄产量和直径小于 1 mm 的根长存在很好的相关关系,  $R^2$  达到 0.8574。综合考虑节水、高产和水分对作物根系生长的影响, 番茄花期和果期理想的控制灌水下限应当分别选择为 60%  $f_c$  和 75%  $f_c$ 。

#### [参 考 文 献]

- [1] 曾向辉, 王慧峰, 戴建平, 等. 温室西红柿滴灌灌水制度试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(4): 23- 26.
- [2] Brevedan R E, Egli D B. Short period of water stress during seed filling, leaf senescence and yield of soybean [J]. Crop Science, 2003, 43: 2083- 2088.

- [3] 何 华, 杜社妮, 梁银丽, 等. 土壤水分条件对温室黄瓜需水规律和水分利用的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23: 1372- 1376.
- [4] Al-omrana A M, Shetaa A S, Falatah A M, et al. Effect of drip irrigation on squash (Cucurbita pepo) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits[J]. Agricultural Water Management, 2005, 73(1): 43- 55.
- [5] 王淑红, 张玉龙, 虞娜, 等. 保护地渗灌管的埋深对土壤盐动态及番茄生长的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36: 1508- 1514.
- [6] 诸葛玉平, 张玉龙, 李爱峰, 等. 保护地番茄栽培渗灌灌水指标的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 53- 57.
- [7] Yuan B Z, Nishiyama S, Kang Y H. Effect of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato[J]. Agricultural Water Management, 2003, 63: 153 - 167.
- [8] 水利部农村水利司, 中国灌溉排水发展中心. 节水灌溉工程实用手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [9] 李建明, 邹志荣. 灌溉土壤水分上限对温室番茄开花坐果期生理指标的影响[J]. 西北农业学报, 2000, 9(4): 71- 74.
- [10] Georges T Dodds, Leif Trenholm, Ali Rajabipour, et al. Yield and quality of tomato fruit under water-table management [J]. American Society for Horticultural Science, 1997, 122(4): 491- 498.
- [11] 张 辉, 张玉龙, 虞 娜, 等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 425- 432.
- [12] 王磊, 有机栽培条件下水肥环境对盆栽番茄生长影响的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [13] Bar-yosel B, Stammers C. Growth of trickle irrigated tomato as related to rooting volume and uptake of N and water[J]. Agronomy Journal, 1980, 72: 815- 822.
- [14] Oliveira M R G, Calado A M. Tomato root distribution under drip irrigation[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1996, 121(4): 644- 648.
- [15] 栗岩峰, 李久生, 饶敏杰. 滴灌施肥时水肥顺序对番茄根系分布和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 7(7): 205- 207.

## Impacts of different water supply on tomato root distribution and yield in greenhouse

Li Bo<sup>1,2</sup>, Ren Shumei<sup>1\*</sup>, Yang Peiling<sup>1</sup>, Kong Qinghua<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Hydrologic Center, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The impacts of different water supply conditions in different growth stages on tomato irrigation amount, net photosynthetic rates, root distribution, yield and water use efficiency were analyzed through field experiment. Results show that the yield can attain 91.7 t/hm<sup>2</sup> and the water use efficiency reaches 27.51 kg/m<sup>3</sup> when the lower limit are 60% and 75% of the field capacity at the flowering and fruit bearing stage, fruit stage, respectively. The total root length, surface area, volume, net weight and root length density significantly increases under this lower limit treatment. The highest net photosynthetic rates occurs under 75%fc. The density of root length declines exponentially with the increase of the soil layer depth. Different water conditions influence the growth of tomato root obviously. A good correlation between tomato yield and the ratio of the root length with diameter of less than 1 mm is better.

**Key words:** drip irrigation; net photosynthetic rates; root system; yield; water use efficiency