

DOI: 10.5846/stxb201403310606

杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 陈艳秋, 谭文. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响. 生态学报, 2016, 36(3): - .

Yang Z Q, Qiu Y X, Liu Z X, Chen Y Q, Tan W. The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响

杨再强^{1,2,*}, 邱译萱¹, 刘朝霞¹, 陈艳秋³, 谭文¹

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

3 沈阳中心气象台, 沈阳 110016

摘要:为了研究土壤水分胁迫对番茄生长的影响,本研究以番茄‘金粉2号’(Jingfen 2)品种为试材,于2013年5—8月间在南京信息工程大学可控试验温室设计正常灌溉(T1)、轻度胁迫(T2)、中度胁迫(T3)、重度胁迫(T4)四个土壤水分处理,观测不同处理番茄植株根系及地上部分的生长状况。结果表明:不同处理的番茄根系生长指标(根系总长度、总表面积、总平均直径、根尖数)的最大值均表现为:T2>T3>T1>T4,比较峰值发现,T2、T3和T4的根系总长度分别为T1的1.8、1.0和0.4倍,总表面积分别为T1的2.3、1.1和0.4倍,总平均直径分别为T1的1.3、1.1和0.6倍,根尖数分别为T1的1.1、1.0和0.5倍;T1、T2和T3处理的番茄根系均集中分布在5—10 cm土层内,而在T4处理下根系集中分布在15—25 cm土层内;番茄的株高、茎粗和叶面积指数大小表现为:T1>T2>T3>T4,T2、T3和T4的番茄株高分别比T1下降11.49%、28.6%和43.98%,茎粗以T4处理最低,为T1的73.57%,T2、T3和T4的叶面积指数分别为T1的81.33%、64.62%和43.37%,各处理间叶面积指数在5%水平下呈现显著性差异。相关分析表明,番茄地上部分和地下部分各项生长指标与土壤体积含水率呈正相关。研究认为轻度土壤水分胁迫对番茄植株地上部分的生长影响不显著,利于根系生长,中、重度土壤水分胁迫明显抑制了番茄植株地上部分的生长,降低根系在土壤中的分布层,该研究为设施番茄水分管理提供科学依据。

关键词:番茄; 土壤水分胁迫; 根系; 生长

The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops

YANG Zaiqiang^{1,2,*}, QIU Yixuan¹, LIU Zhaoxia¹, CHEN Yanqiu³, TAN Wen¹

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China

3 Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110016, China

Abstract: Soil moisture plays a key role in determining tomato growth, yield, and quality. Soil moisture directly or indirectly affects the growth and distribution of the root system. Under soil moisture stress, plant water and nutrient uptake depend on root size, morphology, and competition. It is important to study tomato root growth under different soil moisture treatments to optimize water and nutrient utilization efficiency. Previous studies have mostly investigated the physiological and biological effects of soil moisture on tomato fruit, and many studies have discussed certain aspects of individual mechanisms. In this study, the growth of both roots and all above-ground parts of tomato plants under each moisture

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41275117,41475107);公益(气象)行业科研专项(GYHY201206024);十二五国家科技支撑计划(2014BAD10B07)

收稿日期:2014-03-31; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yzq@nuist.edu.cn

treatment was observed. Soil moisture data were combined with whole plant growth status to reveal dynamic changes in tomato roots and above-ground part in response to soil moisture stress. We used the tomato (*Lycopersicon esculentum*) cultivar 'Jingfen 2' in our experiment, which was performed in a controlled environment greenhouse at the Nanjing University of Information Science and Technology from May to August of 2013. Four soil moisture treatments were applied: normal water supply (T1), mild water stress (T2), moderate water stress (T3), and severe water stress (T4). The growth of roots and above-ground parts of tomato plants were observed. Among the four soil moisture treatments, measurements of four root growth parameters (total root length, total root surface area, average root diameter, and number of root tips) were in the following descending order: T2>T3>T1>T4. Maximum total root length in T2, T3, and T4 was 1.8-, 1.0-, and 0.4-fold that of T1, respectively. Total root surface area in T2, T3, and T4 was 2.3-, 1.1-, and 0.4-fold that of T1, respectively. Average root diameter in T2, T3, and T4 was 1.3-, 1.1-, and 0.6-fold that of T1, respectively. Root tip number in T2, T3, and T4 was 1.1-, 1.0-, and 0.5-fold that of T1, respectively. In T1, T2, and T3, tomato roots were distributed mainly in the 5—10 cm soil layer, but in T4 most roots were in the 15—25 cm layer. Plant height, stem diameter, and leaf area index (LAI) of tomato plants decreased with increasing soil moisture stress. Compared with T1, plant height in T2, T3, and T4 was reduced by 11.49%, 28.60%, and 43.98%, respectively. The minimum stem diameter was found in T4, which was 73.57% of the tomato stem diameter in T1. LAI differed significantly ($P < 0.05$) among soil moisture treatments; LAI in T2, T3, and T4 was 81.33%, 64.62%, and 43.37%, respectively, of that in T1. Soil moisture was positively correlated with growth indices of root and above-ground parts, and soil moisture content in the 20-cm layer had the highest correlation with root growth indices. The mild water stress treatment (T2) did not significantly affect the growth of above-ground parts, while it benefited root growth. The moderate and severe water stress treatments (T3 and T4) significantly inhibited the growth of above-ground parts and decreased the extent of root distribution in the soil. The results of this study may provide a scientific basis for water management in greenhouse tomato production.

Key Words: tomato; soil moisture stress; root; growth

番茄(*Lycopersicon esculentum*)是世界和中国主要设施作物之一^[1],2012年中国设施番茄面积达到680万亩。土壤水分是显著影响番茄生长,产量及品质的主要因子^[2-3]。根系是作物吸收土壤中水分及养分的重要器官,同时起着固着和支撑植株的作用。根系在土壤中的分布形态和生长状况直接关系到地上部分的生长发育和植株对水分和养分的利用效率^[4],根系功能的发挥与根系形态特征和生理特征密切相关^[5],而土壤水分状况经常直接或间接地影响根系的生长发育及分布^[6]。在水分胁迫的环境下,植株对于水分及养分的可利用程度决定于根系的大小、形态以及根系竞争能力^[7]。在干旱条件下,植物根系最先感知,并迅速向地上部传递化学信号,促使气孔关闭以减少水分散失,并通过自身形态和生理生化特性的调整以适应变化后的土壤水分环境^[8]。因此,研究不同土壤水分条件下番茄根系生长状况对于提高番茄养分和水分利用效率及水分管理具有重要意义。

国内外关于土壤水分对作物根系及地上部生长影响的研究有一定报道,前人研究认为在土壤水分胁迫条件下,植株根系会发生形态分布或生理特征上的变化以适应水分胁迫^[8-10]。Pedro等人的研究表明,中、轻度水分胁迫可以提高松树幼苗根系的生长能力,而重度水分胁迫会明显降低其根系数目^[11]。Bredan等人认为水分胁迫会加速大豆叶片的衰老并降低产量及果实品质^[12]。Irene Hummel等认为,水分亏缺条件会使拟南芥幼苗的生物量降低,并减少叶片的扩张,但会促进根系的生长^[13]。国内学者研究表明干旱胁迫使得紫花苜蓿根系形态特征在年季间、茬次间和品种间发生显著变化,主要表现为主根直径变细、侧根和根系总长度伸长被促进等^[8],花生也表现出相似规律^[14]。国外学者在该领域的研究多集中在土壤盐分、灌溉水质及气象因子等对番茄根系生长的影响^[15-17],关于水分胁迫对设施番茄根系影响的研究并不多见;而国内学者对作物根系的研究较多,包括水稻^{[5][18-19]}、小麦^[20-22]、玉米^[4,23]、棉花^[24]和番茄^[25-29]等作物,前人对于番茄的研究主要

偏重于鲜食番茄的生理生态效应,且多是针对某方面的单项机理进行研究,少有进行水分影响番茄根系分布及地上部分的连续变化研究。本研究通过分析番茄根系及地上部生长对不同水分处理的响应,从整体上将土壤水分与番茄根系、地上部分结合起来,揭示土壤水分胁迫条件下番茄植株根系及地上部分的动态变化,旨在讨论番茄对土壤水分的生态适应性机理,为温室番茄的水分管理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年 5 月—8 月在南京信息工程大学 Venlo 可控试验温室内进行。试验温室顶高 5.0 m,肩高 4.5 m,宽 9.6 m,长 30.0 m。以番茄品种“金粉 2 号”为试材,于 2013 年 5 月 21 日定植。供试土壤为中壤土,土壤肥力均一,田间持水量为 32.45%(体积含水量,占土体),凋萎系数为 11.35%(体积含水量,占土体),其基本理化性质见表 1。定植时选取长势茁壮且一致的番茄幼苗,将不同处理的幼苗定植于不同的水泥池苗床(长 8 m,宽 1 m,深 45 cm,苗床中土壤深度约为 40 cm)中,每个苗床栽种两行,行距 30 cm,株距 50 cm。水分胁迫试验于番茄苗期—坐果期内进行,设置四个水分处理:正常灌溉 T1(田间持水量的 80%—90%)、轻度水分胁迫 T2(田间持水量的 60%—70%)、中度水分胁迫 T3(田间持水量的 50%—60%)、重度水分胁迫 T4(田间持水量的 35%—45%)。每个处理 12 株,设置三个重复。试验苗床已提前进行土壤控水处理,前茬试验作物为黄瓜。番茄幼苗移栽后适量浇水以确保成活,计划苗床湿润层深度为 40 cm,灌溉方式为滴灌,滴头间距与株距相同,每条滴灌带控制一行作物。滴灌量根据设计方案和土壤水分监测数据确定,T1 灌水量为 8—10 mm/次,灌水间隔为 1—2 d,总灌水量为 373.28 mm;T2 灌水量为 8—10 mm/次,灌水间隔 2—4 d,总灌水量为 280.65 mm;T3 灌水量为 5—10 mm/次,灌水间隔为 3—5 d,总灌水量为 161.44 mm;T4 灌水量为 5—8 mm/次,灌水间隔为 6—7 d,总灌水量为 86.50 mm。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of tested soil

pH	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	有机质含量 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	有效钾 Available K/ (mg/kg)
7.4	1.32	18.4	0.99	0.97	281

1.2 测定项目

(1) 根系生长指标测定:利用根系检测系统(XLRHIZO Tron, Canada),在番茄生长的苗期(5月29日及6月5日)、花期(6月19日、6月25日及7月4日)及坐果期(7月17日及8月2日)对番茄根系进行拍照,拍照环绕番茄根系的三个方位进行,每一方位均埋有扁状透明薄塑料管,塑料管口径约 10 cm,长约 40 cm,拍照时拍摄仪器置于塑料管内,从土壤表面开始,逐次深入拍摄根系照片,仪器自动设置为每次伸长 1 cm。将拍摄得到的根系照片按方位及深度进行整理,用根系分析软件(WinRHIZO Tron 2012b, Canada)对根系总长、根系总表面积、根系总平均直径、根尖数进行定量分析。

(2) 地上部形态指标测定:在番茄生长的苗期(5月29日及6月5日)、花期(6月21日及6月30日)及坐果期(7月15日及7月23日)对番茄植株的株高、茎粗和叶面积指数进行测定。

株高:由植株基部至主茎生长点的自然高度。

茎粗:为距离培养土表面 3 cm 处的横茎。

叶面积指数 LAI:利用描叶法计算得到单株叶面积 LA, LAI = LA/(PLD×ROWD),式中 PLD 为株距, ROWD 为行距。

(3) 土壤水分测定:选用 ECH₂O-TE 传感器和土壤水分数据采集器 EM50(Decagon Devices, USA)监测土壤含水率,将 EM50 的探头埋在土壤不同深度(10 cm, 20 cm 和 40 cm),每 1 h 自动测定一次。

1.3 番茄植株地上部分生长指标的 Logistic 生长曲线方程

应用生物统计方法拟合番茄株高、茎粗和叶面积指数的 Logistic 生长曲线方程。Logistic 生长曲线呈拉长的 S 型曲线,对动植物生长过程的描述具有广泛的适应性。Logistic 方程为:

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bx}} \quad (1)$$

式中, y 为各项指标生长量的估计值, x 为植株发育时间(本试验中取定植后发育天数), K 为植株可能达到的最大生长量, a 、 b 为参数, e 为自然对数的底数。对方程(1)求一阶导数,可求得生长速率 GR (Growth Rate):

$$GR = \frac{Kabe^{-bx}}{(1 + ae^{-bx})^2} \quad (2)$$

当 $x = \ln a/b$, $y = K/2$ 时, GR 值达到最大值 MGR (Maximum Growth Rate):

$$MGR = \frac{Kb}{4} \quad (3)$$

采用 Microsoft Excel 2007 及 SPSS 18.0 软件对试验数据进行统计分析 with 图表绘制。用 Duncan 检验 ($\alpha = 0.05$) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤水分动态

图 1 为观测期间 10 cm、20 cm 及 40 cm 土层深度土壤水分变化过程。从图中可以看出,10 cm、20 cm 土层的土壤水分含量波动较明显,40 cm 土层的土壤水分含量变化较为平缓。各处理在 10 cm、20 cm 土层的土壤水分含量均能维持在设置水平内,且均高于凋萎含水量,能够维持番茄植株的正常生长;40 cm 土层的土壤含水率下降幅度较大,重度水分胁迫处理下仅在 10% 左右。

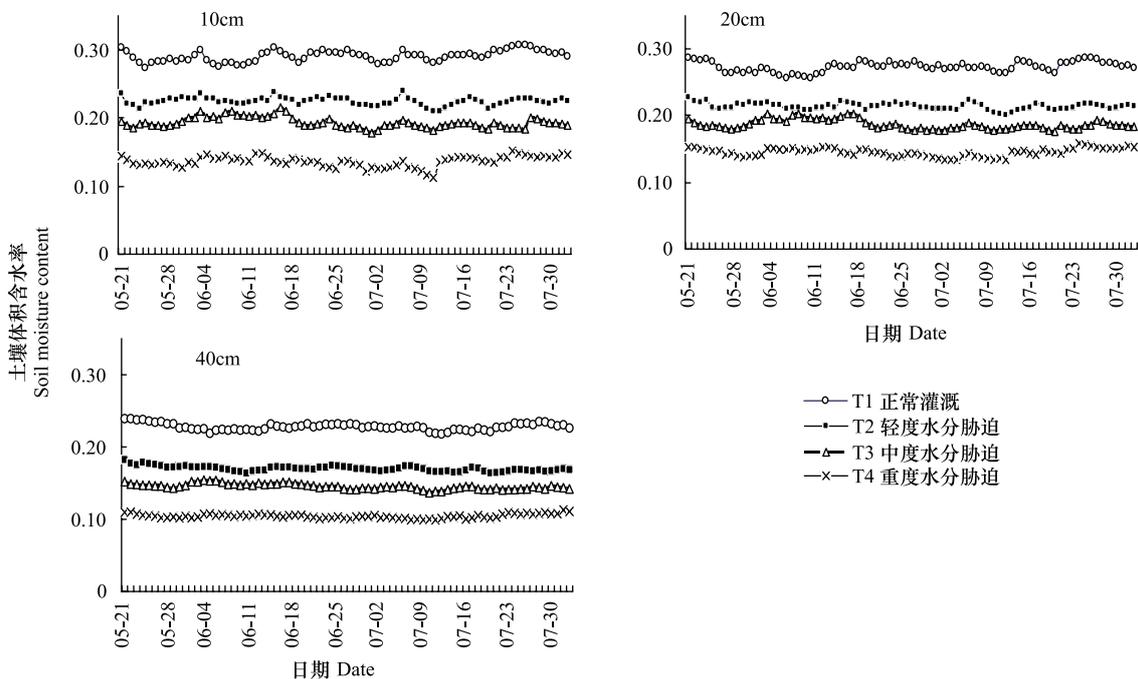


图 1 不同处理 10 cm (a)、20 cm (b) 及 40 cm (c) 土层土壤水分变化过程

Fig. 1 Change curve of soil moisture in the 10 cm (a)、20 cm (b) and 40 cm (c) layer under different soil moisture treatments

T1: 正常灌溉; T2: 轻度水分胁迫; T3: 中度水分胁迫; T4: 重度水分胁迫

2.2 土壤水分胁迫对番茄根系生长的影响

根系总长度、总表面积、总平均直径及根尖数是衡量根系生长特征的重要指标。不同土壤水分处理的根系生长指标随生育期的变化见图 2。由图可见,在不同土壤水分处理下,番茄单株整株的各项根系生长指标变化均呈现出比较明显且相似的规律性。不同土壤水分处理下番茄各项根系生长指标的峰值为:轻度胁迫(T2)>中度胁迫(T3)>正常灌溉(T1)>重度胁迫(T4)。T1 处理的单株根系总长度最大值达到 1461.45 cm, T2、T3 处理分别为 2653.01 cm、1503.23 cm,分别为 T1 的 1.8 倍和 1.0 倍, T4 最高仅可达到 594.44 cm,仅为 T1 的 40.7%。T1 根系总表面积最大值为 4389.79 cm², T2、T3 分别可达 10011.54 cm²、4965.63 cm²,分别为 T1 的 2.3 倍和 1.1 倍, T4 仅可达到 1957.27 cm²,为 T1 的 44.6%。同时, T2、T3 处理的根系总平均直径分别可达 T1 的 1.3 倍和 1.1 倍, T4 仅为 T1 的 64.0%; T2、T3 根尖数分别可达 T1 的 1.8 倍和 1.0 倍, T4 仅为 T1 的 45.0%。这说明土壤水分含量明显影响番茄根系的生长,在水分轻度胁迫条件下,番茄生长状况最佳;而水分重度胁迫下,番茄根系生长受到了很大的抑制。

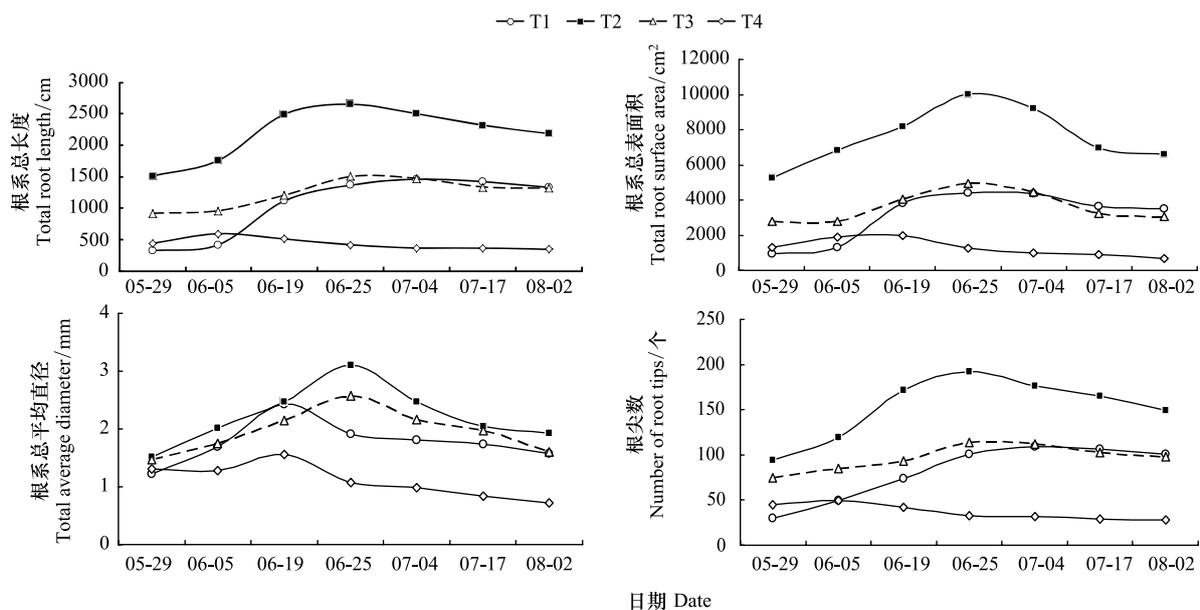


图 2 不同水分处理下番茄整株根系总长度(a)、根系总表面积(b)、根系总平均直径(c)和根尖数(d)的变化过程

Fig. 2 Change curve of total root length (a)、root surface area (b)、average diameter (c) and number of root tips (d) of tomato under different soil moisture treatments

2.3 土壤水分胁迫对番茄根系的垂直分布的影响

图 3、4 分别表示不同土壤水分处理下番茄整株根系的总长度和总表面积垂直分布。本试验中番茄整体根系垂直分布层较浅,这与试验材料的品种、灌溉方式、灌水频率及苗床性质等有关,本试验中苗床土壤深度仅 40 cm,采用滴灌方式灌溉,且灌水频率较高,这些都导致番茄根系扎根较浅。从图中可以看出,不同水分处理下番茄根系在土层中的垂直分布有明显差别,同时各处理下番茄根系总表面积的垂直分布与总长度的分布基本一致。T1、T2 及 T3 处理的番茄根系生长范围在 0—15 cm 土壤深度以内,在 5—10 cm 土层内根系分布最为密集。在 5—10 cm 土层内, T1 的番茄根系总长度和总表面积分别占总体的 40.6%—56.6%, 50.9%—58.2%。T3 分别占 49.7%—53.5%, 47.3%—52.4%。T2 的根系总长度和总表面积所占比例最高,分别为 63.8%—71.2%, 63.0%—74.7%。而 T4 的番茄根系可伸长至 25 cm 土层深度,并且集中分布在在 15—25 cm 土层内,其间番茄根系总长度占总体的 49.6%—59.6%,总表面积占总体的 55.1%—66.6%。同时 T4 的 0—5 cm 土层内根系极为稀少,番茄根系总长度仅占总体的 1.9%—10.0%,总表面积仅占总体的 0.5%—11.5%。由此可知,土壤水分含量的增加会导致番茄植株根系生长浅表化,土壤干旱会使番茄不同生育期总根长和表土层根长比例明显降低,同时显著增加了较深土层根长所占比例。

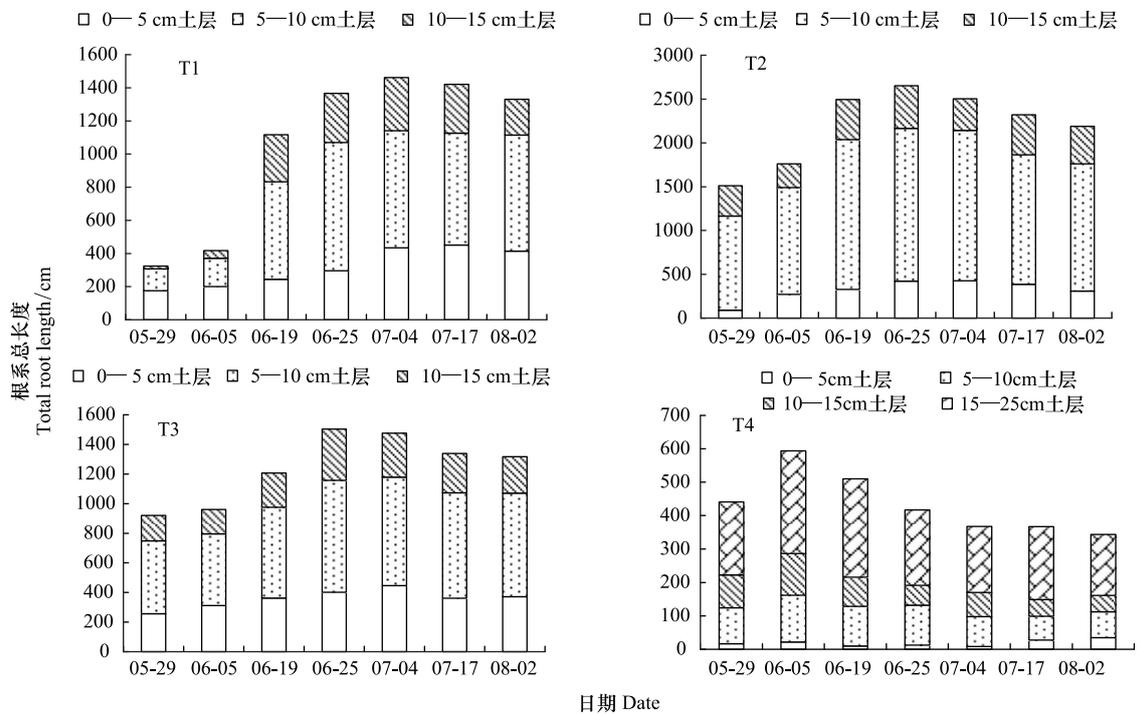


图3 不同水分处理下番茄整株根系总长度的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of root total length of tomato under different soil moisture treatments

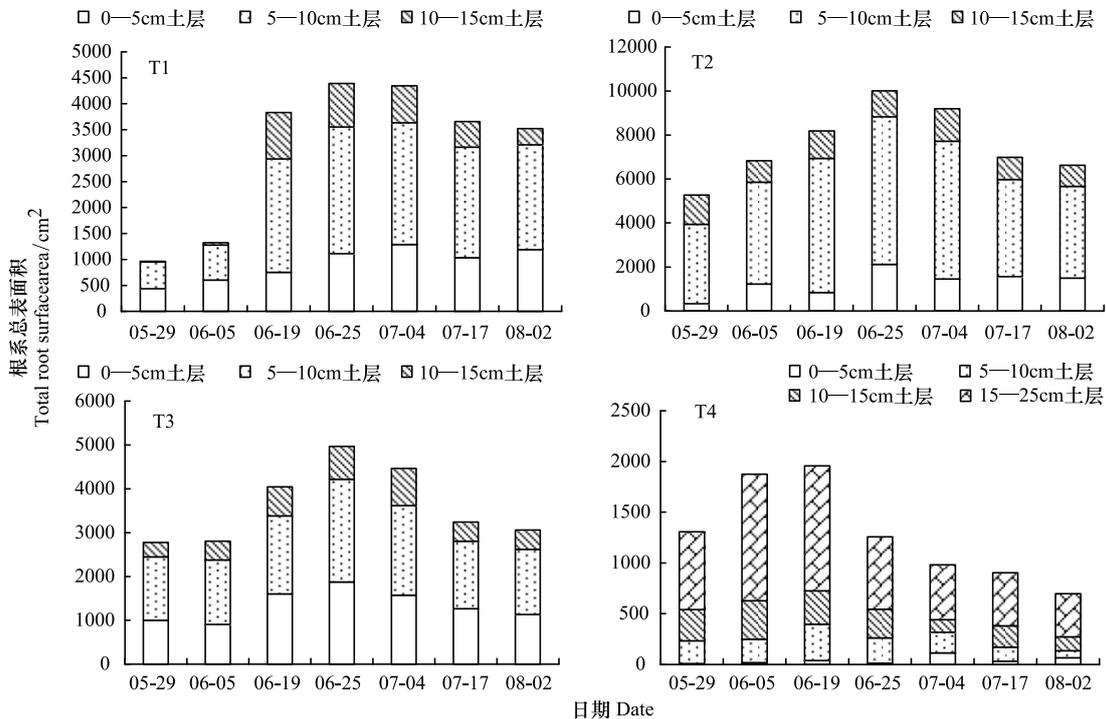


图4 不同水分处理下番茄整株根系总表面积的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of root surface area of tomato under different soil moisture treatments

2.4 土壤水分胁迫对番茄地上部生长的影响

番茄株高、茎粗和叶面积指数对土壤水分的响应规律基本一致,即随着土壤水分的减少有降低趋势(表2)。番茄植株的株高、茎粗和叶面积指数均随着植株的生长发育不断增加。不同土壤水分处理下番茄的株

高、茎粗和叶面积指数为:正常灌溉(T1)>轻度胁迫(T2)>中度胁迫(T3)>重度胁迫(T4)。在灌溉初期(5月29日),T2与T1的株高仅相差2.60 cm,T3和T4显著降低,分别与T1相差6.00 cm和10.47 cm。随着水分处理天数的增加,不同处理间的差异逐渐增大,至灌溉末期(7月23日),T1株高平均为90.87 cm,T2、T3和T4分别为81.20 cm、61.10 cm和49.80 cm,分别与T1相差9.67 cm、29.77 cm和41.07 cm,各处理间番茄株高均在5%水平下达到显著差异。灌溉初期,番茄茎粗整体较低,且T1至T4相差较小。至灌溉末期,T1为1.28 cm,T2为1.18 cm,T3和T4分别为1.06 cm和0.86 cm,各处理间差异增大,T2、T3和T4分别为T1的92.34%、82.6%和67.01%。叶面积指数在一定程度上是生理活动旺盛的标志。由表2可知,不同水分处理间番茄叶面积指数均呈现显著性差异($P<0.05$),T1的番茄叶面积指数最高,最高可达15.87,T2和T3最高可达12.46和9.48,分别为T1的78.51%和59.72%,T4降幅最大,仅为7.92,为T1的49.91%。试验结果表明,土壤水分胁迫抑制了番茄植株地上部分的生长,轻度土壤水分胁迫对番茄植株地上部分的生长影响不显著,中、重度土壤水分胁迫明显抑制了番茄植株地上部分的生长,并以重度土壤水分胁迫下的抑制作用最为严重。

表2 不同土壤水分处理下番茄植株的株高、茎粗与叶面积指数

Table 2 Plant height, stem diameter and LAI of tomato plant under different soil moisture treatments

处理 Treatment		5月29日 May 29	6月5日 June 5	6月21日 June 21	6月30日 June 30	7月15日 July 15	7月23日 July 23
株高 Plant height (cm)	T1	22.87±2.28a	29.30±3.12a	47.30±2.91a	62.47±3.42a	83.53±3.75a	90.87±3.12a
	T2	20.27±1.35ab	26.33±1.39ab	41.73±0.90ab	55.17±1.94a	72.40±2.21b	81.20±2.55b
	T3	16.87±1.82bc	22.10±1.31bc	35.10±1.68b	44.17±2.43b	56.00±2.52c	61.10±2.27c
	T4	12.40±0.40c	17.00±1.48c	28.00±2.40c	34.97±0.91c	45.03±1.62d	49.80±1.17d
茎粗 Stem diameter (cm)	T1	0.56±0.04a	0.62±0.05a	0.82±0.04a	1.04±0.06a	1.21±0.11a	1.28±0.06a
	T2	0.55±0.03a	0.61±0.02a	0.78±0.02a	0.97±0.09a	1.12±0.11ab	1.18±0.05ab
	T3	0.51±0.01ab	0.57±0.01ab	0.72±0.03ab	0.90±0.06ab	1.01±0.10ab	1.06±0.05b
	T4	0.45±0.03b	0.50±0.01b	0.62±0.02b	0.74±0.05b	0.82±0.04b	0.86±0.05c
叶面积指数 LAI	T1	3.45±0.04a	4.28±0.09a	7.26±0.23a	10.93±0.20a	14.52±0.32a	15.87±0.54a
	T2	2.83±0.06b	3.65±0.12b	6.09±0.29b	8.78±0.08b	11.27±0.27b	12.46±0.49b
	T3	2.11±0.11c	2.89±0.07c	5.13±0.25c	7.33±0.19c	8.92±0.18c	9.48±0.30c
	T4	1.03±0.03d	1.55±0.08d	3.31±0.23d	5.13±0.05d	7.49±0.14d	7.92±0.50d

表中数据均为平均值±标准误,同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

利用表2中的数据进行番茄株高、茎粗、叶面积指数的logistic生长曲线拟合,得到曲线参数见表3。从不同水分处理下番茄株高、茎粗和叶面积指数生长量实测值与Logistic方程曲线拟合可知,四个处理下番茄株高、茎粗和叶面积指数生长符合Logistic曲线“慢—快—慢”的规律,拟合曲线方程与试验数据相关性均达到极显著水平($P<0.01$),拟合优度较高,拟合方程可用于分析各指标的生长特性。从表3可以看出,不同水分处理下番茄株高、茎粗和叶面积指数的生长量增长潜力及最大生长速率均表现为:正常灌溉(T1)>轻度胁迫(T2)>中度胁迫(T3)>重度胁迫(T4)。

2.5 土壤水分与地上部及地下部各生长指标的关系

土壤水分是植物生长和发育最必要的环境因素之一,其含量的多少常成为植物生存和生长的限制性因素。对土壤水分含量与番茄植株各项生长指标进行相关分析,结果见表4。结果显示,各处理下土壤体积含水率与番茄地上和地下部分各项生长指标均呈正相关,同时10 cm及20 cm土层中土壤含水率与番茄生长指标间的正相关性明显高于40 cm土层。20 cm土层中土壤含水率与番茄根系生长指标的相关性最高,由高到低依次为:根系总长度>根尖数>根系总表面积>根系总平均直径,相关系数分别为0.502、0.496和0.481,相关性达到极显著水平;而20 cm土层中土壤含水率与番茄地上部分生长指标的相关性稍低于10 cm土层,相关性均达到显著水平;40 cm土层中土壤含水率与番茄各项生长指标的相关性明显降低,仅与根系总平均直径和叶面积指数间的相关性达到显著水平。可以看出,上层土壤水分含量是影响试验植株正常生长的主要因

素,土壤水分含量对植株根系生长的正效应最为显著;对植株地上部分生长的显著正效应表现在株高与叶面积指数上,而植株茎粗与土壤水分含量的正相关性不显著。

表 3 不同土壤水分处理间番茄地上部指标生长量的 Logistic 模型拟合参数

Table 3 Logistic model parameters of tomato indexes growth in above-ground part under different soil moisture treatments

处理 Treatment		Logistic 方程参数 Parameters of Logistic			相关系数 R^2 Correlation coefficient	最大生长速率 MGR Maximum growth rate
		K	a	b		
株高	T1	120.6501	6.3709	0.0475	0.9986 **	1.433
Plant height	T2	112.3169	6.5019	0.0450	0.9991 **	1.264
	T3	75.3804	5.1014	0.0490	0.9997 **	0.923
	T4	61.3584	5.7678	0.0508	0.9997 **	0.779
	茎粗	T1	1.7436	2.8996	0.0337	0.9891 **
Stem diameter	T2	1.6410	2.6292	0.0309	0.9881 **	0.013
	T3	1.3216	2.1654	0.0350	0.9852 **	0.012
	T4	1.0468	1.8115	0.0341	0.9909 **	0.009
	叶面积指数	T1	23.3129	8.7105	0.0476	0.9916 **
LAI	T2	15.8371	7.2216	0.0523	0.9954 **	0.207
	T3	10.5653	7.0483	0.0659	0.9947 **	0.174
	T4	9.4977	14.6892	0.0701	0.9964 **	0.166

* 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

表 4 土壤体积含水率与番茄植株各项生长指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil moisture content and growth indexes of tomato plant

	根系总长度 Total root length	根系总表面积 Root surface area	根系总平均直径 Root average diameter	根尖数 Number of root tips	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	叶面积指数 LAI
10 cm 土层土壤体积含水率 Soil moisture content in 10 cm layer	0.392 *	0.353	0.420 *	0.398 *	0.431 *	0.387	0.468 *
20 cm 土层土壤体积含水率 Soil moisture content in 20 cm layer	0.502 **	0.481 **	0.471 *	0.496 **	0.428 *	0.377	0.451 *
40 cm 土层土壤体积含水率 Soil moisture content in 40 cm layer	0.338	0.307	0.401 *	0.345	0.394	0.352	0.434 *

表 5 为番茄根系与地上部分生长指标间的相关分析,可以看出,番茄地下部分与地上部分生长指标间的相关性存在差异。根系总长度、根尖数与地上部分生长指标间的相关系数大小近似,且相关性均达到显著水平。而根系总表面积、根系总平均直径与地上部分生长指标间的相关性不显著。这说明了番茄植株地上部分与地下部分的生长不同步性。

3 结论与讨论

本研究显示,在试验生育期内,轻度土壤水分胁迫条件下,番茄根系生长状态最佳,重度土壤水分胁迫严重抑制番茄根系的生长。充分灌溉时,土壤通气状况下降,植物根际水分饱和,植物的水分状态差,根系可能出现渍水与缺氧,造成根系活力降低,同时影响了根系水分吸收速率,因而根系生长状况较差,这与 Lavado 等

人的研究结果相一致^[30]。植物根系可以根据土壤水分状况作出适应性反应^[6,31],但是这种适应能力存在限度^[8]。在水分亏缺时,土壤浅层根系减少,番茄根系深扎,但是随着水分亏缺的加剧,植物协调自身生长的能力遭到破坏,导致根长、根表面积和根尖数等降低,根系的生长显著受到抑制^[32-34],根系各项指标均处于一个较低的水平,薛丽华等^[20]对冬小麦根系分布的研究也得到相同结论。在本研究中,重度土壤水分胁迫条件下,生长初期番茄扎根深度明显增加,说明番茄根系对水分亏缺做出了非常迅速的适应性反应,为了维持生长,植株会自动调整应对干旱的策略,死亡与木质化的根系不断增多,主要依赖下层的根系吸收土壤的养分和水分,冠部则受到水分的限制,生长不旺。关于水分胁迫对植物根系生长的影响,不同研究得出的结论并不一致。有研究认为,水分胁迫下植物根系的生长受到抑制,比如冬小麦幼苗的总根数、根系总长、根系总体积和根系干重降低^[21],玉米根系吸收面积与活跃吸收面积减少^[9]。而在水稻、苜蓿及白三叶中却得到了相反结论^[8,18,35]。同时,同一作物不同品种在水分胁迫下的生长规律也不一致^[14]。本研究表明,高土壤水分有利于番茄地上部分的生长,土壤水分亏缺会引起番茄株高、茎粗和叶面积指数的降低,且水分亏缺越严重,其降幅越大,这与前人的研究结论相一致^[25-26],在小麦^[21-22]和玉米^[23]中也有相同的结论。

表 5 番茄植株根系与地上生长指标的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between root and above-ground part growth indexes of tomato plant

	根系总长度 Total root length	根系总表面积 Root surface area	根系总平均直径 Root average diameter	根尖数 Number of root tips	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	叶面积指数 LAI
根系总长度 Total root length	1						
根系总表面积 Root surface area	0.975 **	1					
根系总平均直径 Root average diameter	0.813 **	0.837 **	1				
根尖数 Number of root tips	0.992 **	0.962 **	0.836 **	1			
株高 Plant height	0.489 *	0.342	0.244	0.490 *	1		
茎粗 Stem diameter	0.511 *	0.363	0.287	0.515 *	0.990 **	1	
叶面积指数 LAI	0.457 *	0.313	0.227	0.456 *	0.994 **	0.987 **	1

从整体上看,土壤含水量对植株根系生长的正效应最为显著,即随着土壤水分胁迫的加剧,番茄的根系指标生长量随之下降。这是因为根系是植株直接接触土壤水分的器官,也是植株吸收土壤水分与养分的主要器官,因此对土壤水分的多少最为敏感。对于地上部指标而言,土壤水分含量与株高、叶面积指数之间存在显著正相关性,而对茎粗的影响不大,这与前人的研究结果不太一致^[27-28]。作物类型、品种,水分胁迫程度,试验环境及取样时期的差异等都可能是导致结论不同的原因,这有待于进一步研究。

水分胁迫下,番茄植株地上部分与根系的生长规律并不相同,可见根系对植株地上部分的生长调节只起到一定的作用,而不能完全控制地上部的生长。较多的学者研究认为,番茄的灌水下限为田间持水量的 68% 时,有利于番茄的生长发育和产量的提高^[29,36,37]。在本研究中,综合考虑番茄根系与地上部的生长发育,轻度胁迫(T2)处理为最适宜番茄生长的土壤水分条件。

本试验分三个方位环绕番茄根系将仪器深入土壤中拍摄根系照片,然后利用软件分析根系生长特征,与常见的洗根、扫描方式相比,不仅能够同一株番茄上连续观测其动态变化,降低了试验误差,还减少了对根系的损害,节约试验植株数目;但是这种方式也存在拍摄不全面等问题,这还有待解决。本试验仅对‘金粉 2 号’这一茎有限生长型的番茄品种进行了研究,研究结论对茎无限生长型的番茄品种是否适用有待进一步试验,同时,本研究仅对苗期、花期及坐果期内温室番茄根系及地上部形态特征进行了研究,今后可延长试验周期,进一步研究水分胁迫下番茄根系生长对果实产量、品质的影响。

参考文献 (References):

- [1] Nuruddin M M, Madramootoo C A, Dodds G T. Effects of water stress at different growth stages on greenhouse tomato yield and quality. *HortScience*, 2003, 38(7): 1389-1393.
- [2] 陈凯利, 李建明, 贺会强, 胡晓辉, 姚勇哲, 孙三杰. 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响. *生态学报*, 2013, 33(16): 4919-4929.
- [3] Salokhe V M, Babel M S, Tantau H J. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management*, 2005, 71(3): 225-242.
- [4] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 13-15.
- [5] 唐文帮, 邓化冰, 肖应辉, 张桂莲, 范科, 莫慧, 陈立云. 两系杂交水稻 C 两优系列组合的高产根系特征. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2859-2868.
- [6] 冯广龙, 刘昌明, 王立. 土壤水分对作物根系生长及分布的调控作用. *生态农业研究*, 1996, 4(3): 5-9.
- [7] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 2002, 90(3): 480-494.
- [8] 李文晓, 张岁岐, 丁圣彦, 山仑. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. *生态学报*, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [9] 韩希英, 宋凤斌. 干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影響. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 170-172.
- [10] Kato Y, Okami M. Root growth dynamics and stomatal behaviour of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions. *Field Crops Research*, 2010, 117(1): 9-17.
- [11] Villar-Salvador P, Ocaña L, Peñuelas J, Carrasco I. Effect of water stress conditioning on the water relations, root growth capacity, and the nitrogen and non-structural carbohydrate concentration of *Pinus halepensis* Mill. (Aleppo pine) seedlings. *Annals of Forest Science*, 1999, 56(6): 459-465.
- [12] Brevedan R E, Egli D B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*, 2003, 43(6): 2083-2088.
- [13] Hummel I, Pantin F, Sulpice R, Piques M, Rolland G, Dauzat M, Christophe A, Pervent M, Bouteillé M, Stitt M, Gibon Y, Muller B. Arabidopsis plants acclimate to water deficit at low cost through changes of carbon usage: an integrated perspective using growth, metabolite, enzyme, and gene expression analysis. *Plant Physiology*, 2010, 154(1): 357-372.
- [14] 丁红, 张智猛, 戴良香, 康涛, 慈敦伟, 宋文武. 干旱胁迫对花生根系生长发育和生理特性的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1586-1592.
- [15] Bolari M C, Estañ M T, Caro M, Romero-Aranda R, Cuartero J. Relationship between tomato fruit growth and fruit osmotic potential under salinity. *Plant Science*, 2001, 160(6): 1153-1159.
- [16] Lopez J, Tremblay N, Voogt W, Dubé S, Gosselin A. Effects of varying sulphate concentrations on growth, physiology and yield of the greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 1996, 67(3/4): 207-217.
- [17] Leonardi C, Guichard S, Bertin N. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae*, 2000, 84(3/4): 285-296.
- [18] 王秋菊, 李明贤, 赵宏亮, 迟力勇. 控水灌溉对水稻根系生长影响的试验研究. *中国农学通报*, 2008, 24(8): 206-208.
- [19] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 高产栽培条件下种植方式对超级稻根系形态生理特征的影响. *作物学报*, 2011, 37(12): 2208-2220.
- [20] 薛丽华, 段俊杰, 王志敏, 郭志伟, 鲁来清. 不同水分条件对冬小麦根系时空分布、土壤水利用和产量的影响. *生态学报*, 2010, 30(19): 5296-5305.
- [21] 单长卷, 梁宗锁. 土壤干旱对冬小麦幼苗根系生长及生理特性的影响. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 38-41.
- [22] 裴冬, 孙振山, 陈四龙, 张喜英, 陈素英, 王振华. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 68-72.
- [23] 姜鹏, 李曼华, 薛晓萍, 李鸿怡. 不同时期干旱对玉米生长发育及产量的影响. *中国农学通报*, 2013, 29(36): 232-235.
- [24] 张立楨, 曹卫星, 张思平, 周治国. 棉花根系生长和空间分布特征. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 266-273.
- [25] 王学文, 付秋实, 王玉珏, 张京红, 路河, 郭仰东. 水分胁迫对番茄生长及光合系统结构性能的影响. *中国农业大学学报*, 2010, 15(1): 7-13.
- [26] 牛云慧, 曹红霞, 石小虎, 王雪梅. 水分亏缺对温室番茄生长发育及生理特性的影响. *灌溉排水学报*, 2013, 32(4): 67-70.
- [27] 高方胜, 徐坤, 徐立功, 尚庆文. 土壤水分对番茄生长发育及产量品质的影响. *西北农业学报*, 2005, 14(4): 69-72.
- [28] 齐红岩, 李天来, 曲春秋, 张洁, 王磊. 亏缺灌溉对设施栽培番茄物质分配及果实品质的影响. *中国蔬菜*, 2004, (2): 10-12.
- [29] 吕剑, 颜建明, 郁继华, 李向文, 王勇, 王新右, 冯致. 灌水下限对基质栽培番茄生长、水分利用效率及果实品质的影响. *甘肃农业大学*

- 学报, 2013, 48(1): 37-41, 48-48.
- [30] Lavado M M, Moñino M J, García M I, et al. Root water absorption pattern in a processing tomato crop under different irrigation strategies. III International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 537. 1999: 839-845.
- [31] 魏飒, 任树梅, 杨培岭, 闫美俊. 围场地区紫花苜蓿土壤水分动态变化与根系分布状况研究. 中国农学通报, 2006, 22(5): 448-451.
- [32] Steudle E. Water uptake by roots: effects of water deficit. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(350): 1531-1542.
- [33] Lee S H, Chung G C, Steudle E. Gating of aquaporins by low temperature in roots of chilling-sensitive cucumber and chilling-tolerant figleaf gourd. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(413): 985-995.
- [34] Niinemets Ü, Díaz-Espejo A, Flexas J, Galmés J, Warren C R. Role of mesophyll diffusion conductance in constraining potential photosynthetic productivity in the field. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(8): 2249-2270.
- [35] 韩建秋, 王秀峰, 张志国. 土壤水分梯度对白三叶(*Trifolium repens*)光合作用和根系分布的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 493-499.
- [36] 李波, 任树梅, 杨培岭, 孔清华. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响. 农业工程学报, 2007, 23(9): 39-44.
- [37] Coolong T, Surendran S, Warner R. Evaluation of irrigation threshold and duration for tomato grown in a silt loam soil. HortTechnology, 2011, 21(4): 466-473.