

水分亏缺条件下毛管埋深对番茄生长、产量及品质的影响

牛文全^{1,2} 古 君¹ 梁博惠² 郭丽丽² 吕 望² 李 元¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过番茄滴灌试验,研究不同水分亏缺条件下毛管埋深对番茄植株生长、果实形态、产量与品质的影响。结果表明:毛管埋深对日光温室番茄产量、灌水量有显著影响($p < 0.05$),对灌溉水利用效率和品质无显著影响($p > 0.05$);毛管埋深为 20 cm 时,番茄植株生长速度较快,果实横茎较大。轻度与中轻度水分亏缺灌水条件下,毛管埋深为 20 cm 可显著减小 C 级(番茄直径 $D < 6.5$ cm)果实比例 29.2%,分别提高 A 级($D \geq 7.5$ cm)与 B 级($6.5 \text{ cm} \leq D < 7.5$ cm)果实比例 16.6%、2.0%。番茄产量、灌水量随毛管埋深增加呈先增后减趋势,毛管埋深为 20 cm 时,番茄产量最高,达到 66.44 t/hm²。番茄产量和灌溉水利用效率随灌水下限增加而显著降低($p < 0.01$),可通过不同毛管埋深与灌水下限组合,显著降低番茄灌水量,提高产量和水分利用效率。综合考虑,毛管埋深 20 cm,灌水下限为田间持水量的 60% 处理组合为关中地区日光温室适宜的滴灌灌溉方式。

关键词: 番茄; 毛管埋深; 灌水下限; 产量; 品质; 水分利用效率; 温室

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0279-09

Effects of Lateral Depths on Growth, Yield and Quality of Tomato under Water Deficit Condition

NIU Wenquan^{1,2} GU Jun¹ LIANG Bohui² GUO Lili² LÜ Wang² LI Yuan¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the effective way to improve the water use efficiency of tomato in the sunlight greenhouse, the effects of lateral depths on growth, fruit shape and quality of tomato under different water deficit were studied through drip irrigation experiment in 2014 and 2015. Results showed that lateral depth had a significant influence on yield, irrigation amount ($p < 0.05$), and had no significant impact on irrigation water use efficiency and quality ($p > 0.05$). The growth rate of tomato was faster and fruit diameter was bigger when lateral was buried at 20 cm depth. Under moderate and moderate-mild water deficit, lateral buried at 20 cm depth could significantly decrease the fruit ratio of C grade (fruit diameter $D < 6.5$ cm) by 29.2%, and increase the fruit ratio of A grade ($D \geq 7.5$ cm) and B grade ($6.5 \text{ cm} \leq D < 7.5$ cm) by 16.6% and 2.0%, respectively. The changing trend of yield and irrigation amount of tomato showed a first increase and then decrease trend with the increase of lateral depth, the value of yield for lateral depth buried at 20 cm was the highest (66.44 t/hm²). Yield and irrigation water use efficiency of tomato were decreased significantly with the increase of irrigation threshold ($p < 0.01$), so irrigation amount can be reduced while the yield and water use efficiency of tomato can be increased by adopting different combinations of lateral depth and irrigation threshold. Therefore, lateral depth of 20 cm and irrigation threshold of 60% of field capacity would be the most appropriate treatment combination for tomato cultivation in the sunlight greenhouse in Guanzhong region of Shaanxi Province. For the observed responses, the information on how the tomato adapted to different lateral depths under water deficit condition would provide guidance for field production practices as well as indications of possible mechanisms.

Key words: tomato; lateral depth; irrigation threshold; yield; quality; water use efficiency; greenhouse

引言

番茄是一种富含碳水化合物、多种维生素及有机酸的蔬菜,在日光温室种植发展迅速。然而,日光温室长期处于半封闭状态,超额灌溉现象普遍,不仅造成水资源浪费,还不利于蔬菜产量和品质的提高。滴灌作为一种精细灌溉技术,较传统灌溉节水 30% 以上,表层土壤温度提高 1.5 ~ 2.0℃,空气相对湿度降低 10% ~ 15%,还能改善土壤理化性质,减轻病害发生,促进蔬菜早熟和增产增收,利于蔬菜的稳产高产^[1],逐年被应用在温室蔬菜种植中。灌溉水是日光温室蔬菜所需水分的主要来源,合理的灌水技术与精确的技术参数能形成适宜的水、肥、气、热条件,增加蔬菜对土壤水分和养分的吸收能力,有效提高水分利用效率,进一步获取更高的产量与经济效益^[2]。因此,进行精确灌溉技术参数研究对设施蔬菜生产具有重要意义。

亏缺灌溉是根据作物对于干旱产生适应性反应,通过人为施加一定程度的水分胁迫,影响作物的生理生化过程,提高作物的抗旱能力,是一种有效的节水方式^[3]。适度水分亏缺能刺激作物根系生长,增加根系土壤分布层,加大对土壤水分、养分的吸收,促进作物地上部分生长,改善植株叶片特性^[4-5],同时利于植株生长与干物质的合理分配,促进光合产物向产量转移^[6]。前人对番茄、甜瓜等作物实施水分亏缺灌溉进行了研究,多数结果表明一定程度的水分亏缺能在提高产量或减产不显著的前提下,明显提高作物水分利用效率,改善果实品质^[7-8]。番茄生长对水分调控十分敏感,不同的水分亏缺实施时间及程度都会影响地上部分与地下部分、营养生长与生殖生长平衡,最终对番茄产量与效益产生影响^[9-10]。因此有必要研究日光温室不同水分亏缺灌溉下对番茄生长、产量及水分利用效率的影响。

作物对水分的有效利用不仅取决于适时适量的供给,还在于有效的灌水深度。地下滴灌可以将适时适量的水分精准送至根区,具有提高水分利用效率的优点^[11]。适宜的毛管理深能形成较为理想的湿润体,其合理有效的水分分布状况匹配于根系的生长以及有利于根系对水分养分的吸收利用^[12]。前人研究表明,不同毛管理深影响水分分布会导致根系生长产生差异,适宜的埋深能优化根系分布,较地表滴灌能使同化物合理分配于根冠,促进地上部分生长^[13],同时能增加对土壤养分的吸收能力,提高作物产量^[14],而埋深过深与过浅均会造成作物减产,降低水分利用效率^[15]。在农业生产中,毛管理深往往取决于土壤类型与作物种类,而实际中土壤

分布的复杂性与作物根系的多样性难以给出统一的毛管理深,故毛管理深对作物生长发育、产量及水分利用效率的影响一直是研究的热点问题^[16-17]。因此有必要在不同埋深下对作物的水分利用效率进行研究。

目前已探明,水分亏缺能够改善番茄口感风味,同时能显著提高水分利用效率以取得更好的节水效益^[18]。然而水分亏缺灌溉对番茄产量、水分利用效率的研究尚不够深入,不同水分亏缺灌溉参数对番茄产量及水分利用效率的影响尚不完全明确。为此,本文通过日光温室滴灌试验,研究水分亏缺条件下毛管理深对番茄生长、产量、品质以及水分利用效率的影响,探寻提高日光温室番茄水分利用效率的有效管理途径,提出适宜的水分亏缺处理与毛管理深组合参数,为关中地区设施番茄种植生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

滴灌灌溉试验于 2014 年 10 月 18 日—2015 年 5 月 20 日和 2015 年 10 月 8 日—2016 年 4 月 19 日在陕西杨凌大寨乡日光温室内进行,试验地位于 108°02'E、34°02'N,海拔高度 506 m,年平均温度约 16.1℃,年日照时数 2 164.8 h,无霜期 210 d,属暖温带半湿润大陆性季风气候。试验温室长 108 m,宽 8 m,覆盖半无滴聚乙烯棚膜。试验用土为壤土,土壤容重 1.39 g/cm³,田间持水量为 23.63% (质量含水率),孔隙度为 45.83%。土壤组成(质量分数):砂砾(0.02 ~ 2.00 mm)占 25.4%,粉粒(0.002 ~ 0.020 mm)占 44.1%,黏粒(0 ~ 0.002 mm)占 30.5%。

1.2 试验设计

2014 年试验供试番茄品种为粉玉阳岗,2015 年番茄品种为海地,2 年幼苗分别于 10 月 18 日和 10 月 8 日定植,南北向种植。种植小区起双垄,长 5.5 m、垄面宽 0.7 m、高 20 cm,两垄中心距 1.5 m,相邻小区被 50 cm 宽的操作行隔开,以保证小区之间无水分渗透。每小区定植 28 株,采用双行种植,番茄株距 0.4 m,行距 0.5 m,试验地两端均设保护行。在试验期间为保证番茄植株的正常生长,各小区铺设一张白色地膜,地膜宽度为 1.5 m。每个小区中间铺设一条滴灌带,滴头间距为 0.3 m,滴头流量 2.8 L/h,同时在小区中间距滴灌带 5 cm 处安装一根长度为 100 cm 的探管,采用 Field TDR 200 型探测仪测量小区的土壤含水率。为保证幼苗的成活率,2014 年与 2015 年番茄定植后各小区灌水 45 mm 和 30 mm。在番茄整个生育期内进行统一的农技管

理措施。

2014年试验设3个毛管埋深,分别为15 cm (D15)、20 cm (D20)和40 cm (D40),全生育期区内各小区统一灌水165 mm,灌水时间与灌水次数均一致。试验共3个处理,每个处理3个重复,共9个试验小区。2015年试验设3个灌水下限和4个毛管埋深,灌水下限分别设重度水分亏缺I50(田间持水率的50%)、中轻度水分亏缺I60(田间持水率的60%)、轻度水分亏缺灌溉I75(田间持水率的75%),整个生育期番茄灌水上限统一设定为I90,毛管埋深分别设0 cm (D0)、10 cm (D10)、20 cm (D20)和30 cm (D30)。试验采用完全组合设计,共12个处理,每个处理重复3次,共36个试验小区。当土壤含水率达到灌水下限时,按照计划湿润层深度40 cm补充水分,灌水量计算公式为

$$M = syh\theta_f(q_1 - q_2)/\eta \tag{1}$$

式中 M ——灌水量, m^3
 s ——计划湿润层面积,取 $5.5\ m^2$
 γ ——土壤容重,取 $1.39\ g/cm^3$
 h ——湿润层深度,取 $0.4\ m$
 θ_f ——田间持水率(质量含水率), %
 $q_1、q_2$ ——灌水上限、土壤实测含水率, %
 η ——水分利用效率,地下滴灌取 0.95

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标、果实级别及水分利用效率

定植开始直至打顶期间,每隔10 d用米尺测量番茄株高,电子游标卡尺测量茎粗。成熟采摘期用电子游标卡尺测定果实形态指标(果实纵、横径)。每小区随机选取30个果实,按果实直径 D 将番茄果实分3个级别: $D \geq 7.5\ cm$ 为大(A级)、 $6.5\ cm \leq D < 7.5\ cm$ 为中(B级)、 $D < 6.5\ cm$ 为小(C级),并计算各级别果实的比例。

灌溉水利用效率(IWUE)计算公式为

$$I_{WUE} = 100Y/I \tag{2}$$

式中 I_{WUE} ——灌溉水利用效率, kg/m^3
 Y ——番茄产量, t/hm^2
 I ——番茄灌水量, mm

1.3.2 番茄产量及品质

在成熟采摘期,每小区随机选取6株番茄植株,用电子秤(精度0.01 g)测量1~3果的单果质量及单株产量,并换算成单位面积产量。分别在小区的前、中、后3处选取大小和色泽一致的果实进行品质测定,果实可溶性固形物用RHBO-90型手持折射仪测定(Link, Co., Ltd., Taiwan, China);可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[19],有机酸含量用碱滴定法测定^[19],并计算糖酸比(可溶性糖含量与可滴定酸

含量之比)^[19];维生素C含量利用钼蓝比色法测定^[19]。

1.4 数据处理与分析

试验数据用Excel软件进行整理,用SPSS 22.0 Duncan新复极差法进行显著性检验和交互作用方差分析,用Origin 9.0作图。

2 结果与分析

2.1 水分亏缺条件下毛管埋深对番茄株高、茎粗的影响

图1为2014年毛管埋深对番茄株高、茎粗的影响。由图1可知,番茄株高和茎粗随毛管埋深增加呈先增加后减小趋势,20 cm埋深处理株高、茎粗最大,40 cm埋深处理株高、茎粗最小,20 cm埋深处理株高较15、40 cm埋深处理分别增加6.7%、7.9%,其茎粗较15、40 cm埋深处理显著增加8.2%、12.0%。方差分析表明,毛管埋深对番茄定植24 d后株高影响显著,对定植48、65 d后株高影响极显著,20 cm埋深处理株高显著高于15、40 cm埋深处理。毛管埋深对定植65、86 d后茎粗影响显著,40 cm埋深处理茎粗显著低于20 cm埋深处理。

2015年不同水分亏缺条件下毛管埋深对番茄株高、茎粗的影响见图2。由图2可知,番茄株高随灌水下限增加而增加,毛管埋深为10、20 cm时灌水下限I60与I75处理株高显著高于灌水下限I50处理,毛管埋深为0、30 cm时各水分处理间株高无显著性差异。灌水下限I60与I75时,10、20 cm埋深处理番茄株高高于0、30 cm埋深处理,但各埋深处理株高无显著性差异。10、30 cm埋深时番茄茎粗随灌水下限增加而增加,20 cm埋深时灌水下限I60处理茎粗高于其余灌水处理。方差分析表明,毛管埋深对番茄定植58、78 d后株高有显著影响,对定植58 d后茎粗影响显著。18 d时0 cm埋深处理与埋深为30 cm处理茎粗与株高差异较小,埋深间无显著性差异。38 d时毛管埋深在灌水下限I75处理对茎粗产生显著性影响,20 cm埋深处理茎粗显著高于其余埋深处理,而灌水下限I50、I60处理差异不明显。灌水下限I75处理,58 d时30 cm埋深处理株高与0 cm埋深处理差异显著,较0 cm埋深处理增加6.5%;78 d时各埋深处理株高差异进一步增加,达到极显著水平,各埋深株高差异显著,其中埋深为20 cm处理番茄株高较0、10、30 cm埋深处理显著提高10.5%、4.5%和3.6%,埋深为10 cm与30 cm处理番茄株高也显著高于埋深为0 cm处理。58 d时20 cm埋深处理茎粗在灌水下限I60与I75处理显著高于30 cm埋深处理,分别增加5.5%

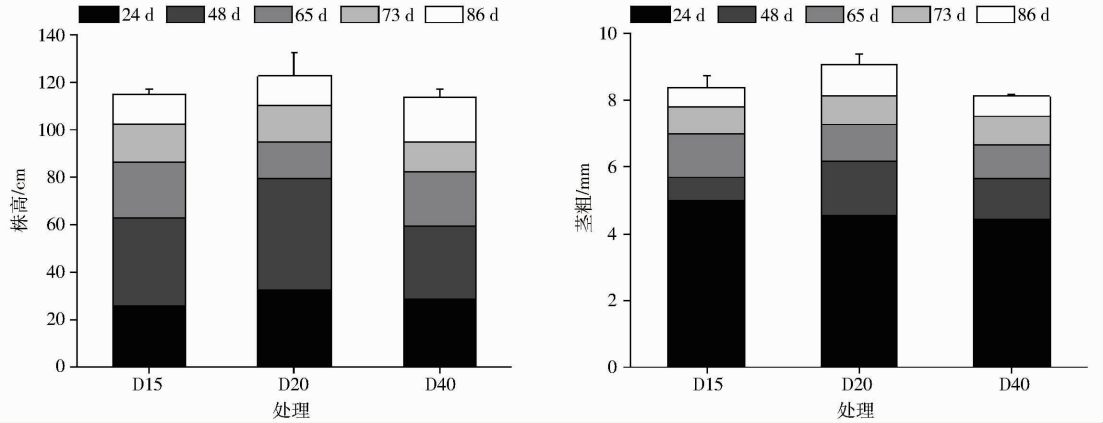


图 1 2014 年毛管埋深对番茄株高、茎粗的影响
Fig. 1 Effect of lateral depth on plant height and stem diameter in 2014

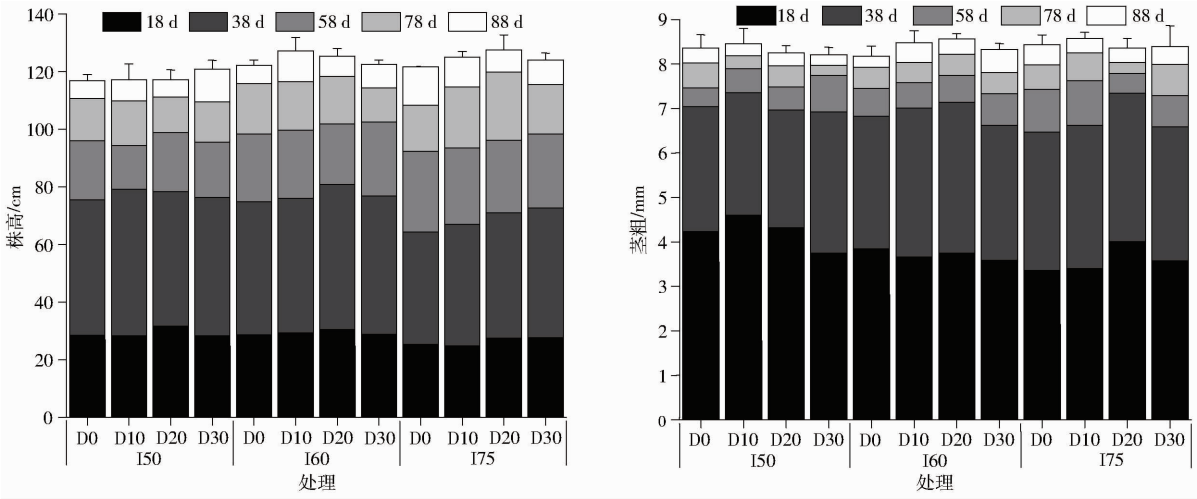


图 2 2015 年水分亏缺条件下毛管埋深对番茄株高、茎粗的影响
Fig. 2 Effect of lateral depth on plant height and stem diameter under water deficit in 2015

与 6.9%。88 d 时, I75D20 处理株高最高, I75D10 下茎粗最大,毛管埋深对番茄株高、茎粗均无显著性影响。由此可知,定植 58~78 d(开花坐果末期至盛果初期)后毛管埋深对番茄生长影响最大,20 cm 毛管埋深更有利于番茄株高与茎粗生长。

2.2 水分亏缺条件下毛管埋深对番茄产量与灌溉水利用效率的影响

水分亏缺下毛管埋深对番茄产量与灌溉水利用效率的影响见表 1。由表 1 可知,番茄产量与 2015 年灌水量随毛管埋深增加呈先增加后减小趋势,毛管埋深为 20 cm 处理产量与灌水量最高。2014 年毛管埋深对番茄产量和灌溉水利用效率有显著影响,20 cm 埋深处理产量较 15、40 cm 埋深处理增加 11.5%、26.3%,灌溉水利用效率较 15、40 cm 埋深处理提高 11.5%、26.7%。这表明埋深为 20 cm 有利于提高番茄产量与灌溉水利用效率。

灌水下限的上调有利于提高番茄产量和灌水量,但会降低番茄灌溉水利用效率。埋深为 0 cm 和 10 cm 时,灌水下限 I75 处理比灌水下限 I50 与 I60

处理时显著提高番茄产量,20 cm 埋深时灌水下限 I75 与 I60 处理产量与灌水下限 I50 处理差异显著而灌水下限 I75 产量与 I60 处理无显著性差异,30 cm 埋深时灌水处理对番茄产量无显著性影响;同一埋深下,灌水下限 I75 处理的灌水量比灌水下限 I50 和 I60 处理显著增加,灌水下限 I60 处理灌水量与灌水下限 I50 处理达到显著性差异;灌水下限 I50 处理较灌水下限 I60 与 I75 处理能显著提高番茄灌溉水利用效率,10 cm 与 20 cm 埋深时灌水下限 I60 处理灌溉水利用效率与灌水下限 I75 处理有显著性差异。

方差分析表明,2015 年毛管埋深对番茄产量、灌水量有显著性影响,对灌溉水利用效率影响不显著。灌水下限为 I75 时,20 cm 埋深处理比 0、30 cm 埋深时产量显著提高 21.9%、18.9%,灌水量显著增加 5.8%、8.0%。灌水下限为 I60 时,20 cm 埋深处理产量与埋深 0 cm 埋深处理差异显著,毛管埋深对番茄灌水量、灌溉水利用效率的影响均不显著,但 10、20 cm 埋深处理产量高于 0、30 cm 埋深处理。灌

表 1 水分亏缺条件下毛管埋深对番茄产量及灌溉水利用效率的影响

Tab.1 Effects of lateral depth on fruit yield and IWUE of tomato under water deficit

年份	处理	产量/(t·hm ⁻²)	灌水量/mm	灌溉水利用效率/(kg·m ⁻³)
2014 年	D15	25.49 ± 1.86 ^{ab}	165	15.45 ± 1.69 ^{ab}
	D20	28.41 ± 1.24 ^a	165	17.22 ± 1.29 ^a
	D40	22.43 ± 2.47 ^b	165	13.59 ± 0.90 ^b
	方差分析	毛管埋深	5.55 [*]	5.56 [*]
2015 年	I50D0	43.95 ± 5.57 ^d	111.85 ± 4.58 ^d	39.29 ± 5.08 ^a
	I50D10	46.85 ± 5.18 ^{cd}	117.91 ± 3.64 ^d	39.73 ± 1.34 ^a
	I50D20	47.73 ± 3.35 ^{cd}	123.36 ± 3.64 ^d	38.69 ± 3.18 ^a
	I50D30	46.21 ± 6.00 ^{cd}	114.27 ± 7.92 ^d	40.44 ± 2.52 ^a
	I60D0	47.80 ± 6.85 ^{cd}	193.02 ± 12.41 ^c	24.76 ± 2.69 ^{bcd}
	I60D10	54.34 ± 2.30 ^{bcd}	198.05 ± 11.89 ^c	27.44 ± 1.42 ^b
	I60D20	57.68 ± 0.57 ^{ab}	204.42 ± 7.35 ^c	28.36 ± 1.43 ^b
	I60D30	51.12 ± 2.22 ^{bcd}	191.93 ± 2.49 ^c	26.64 ± 1.44 ^{bc}
	I75D0	54.49 ± 7.93 ^{bc}	255.84 ± 6.74 ^b	21.30 ± 3.68 ^d
	I75D10	58.68 ± 7.84 ^{ab}	261.65 ± 5.45 ^{ab}	22.43 ± 2.57 ^{cd}
	I75D20	66.44 ± 5.05 ^a	270.59 ± 9.51 ^a	24.55 ± 2.13 ^{cd}
	I75D30	55.88 ± 5.42 ^{bc}	250.64 ± 1.48 ^b	22.30 ± 2.13 ^{cd}
	方差分析	灌水下限	18.65 ^{**}	48.03 ^{**}
		毛管埋深	4.69 [*]	0.95 ^{NS}

注:同列数据后不同小写字母表示差异达到显著水平($p < 0.05$), * 和 ** 分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上差异显著,NS 表示无显著性差异($p > 0.05$),下同。

水下限 I50 时,番茄产量、灌水量随毛管埋深增加呈先增加后减小趋势,均在 20 cm 埋深处最大。综合考虑,产量与灌溉水利用效率的最优组合为 I60D20。

2.3 水分亏缺条件下毛管埋深对果实形态的影响

各水分处理下,毛管埋深对番茄果实形态的影响见表 2。2014 年毛管埋深为 20 cm 能显著提高番茄单果质量,15、40 cm 埋深处理单果质量比 20 cm 埋深处理减少 4.3%、6.4%。毛管埋深对横径、纵茎均无显著性影响,番茄果实横径随毛管埋深增加呈先增加后减小趋势,40 cm 埋深处理果实纵径最大。毛管埋深对 B 级果实比例的影响显著,对 A、C 级果实比例的影响不显著,20 cm 埋深处理 B 级果实比例比 15、40 cm 埋深处理显著提高 19.0%、62.3%,C 级果实比例比 15、40 cm 埋深处理降低 20.4%、31.4%。由此可知,适宜的埋深可促进大、中果径果实发育,减少果径较小的果实比例。

2015 年灌水下限对番茄单果质量、果实横径及 A 级果实比例的影响显著。与灌水下限 I50 处理相比,灌水下限 I60 和 I75 处理能增加番茄单果质量与横径,埋深为 10、20 cm 时灌水下限 I60 处理单果质量最大但与灌水下限 I75 处理并无显著性差异,20 cm 时灌水下限 I60 和 I75 处理果实横径比灌水下限 I50 处理显著增加 5.6%、7.3%。灌水下限 I75 处理 A 级果实比例显著增加,C 级果实比例减小,灌水下限 I60 处理 B 级果实比例增加,而灌水下限 I50

处理 C 级果实比例增加,表明过度水分亏缺会导致小果实比例增加。

2014 年与 2015 年试验得出的毛管埋深对番茄单果质量、纵茎、横径及各级别果实比例的影响相同。除灌水下限 I75 处理外,灌水下限 I50 和 I60 处理的番茄单果质量随毛管埋深增加呈先增加后减小趋势,埋深为 10、20 cm 处理较 0、30 cm 埋深处理番茄单果质量增加。果实横径随毛管埋深增加也呈先增加后减小趋势,在埋深为 20 cm 时达到最大值。灌水下限 I75 和 I60 处理下,毛管埋深为 20 cm 处理的 C 级果实比例减小,A 级与 B 级果实比例增加,而毛管埋深 30 cm 处理 A 级果实比例较小,B 级与 C 级果实比例较大。综合考虑,I60D20 处理可提高单果质量,增大 A、B 级比例,为最优处理组合。

2.4 水分亏缺条件下毛管埋深对番茄品质的影响

表 3 为各处理的番茄品质。2014 年 20 cm 埋深处理的可溶性固形物、维生素 C、可溶性糖含量最低,40 cm 埋深处理均为最高。番茄糖酸比随毛管埋深增加而减小,15 cm 埋深处理糖酸比最大,40 cm 埋深糖酸比最小。毛管埋深对番茄中可溶性固形物、有机酸含量和糖酸比影响极显著,毛管埋深为 20 cm 处理比埋深为 15、40 cm 时可溶性固形物含量降低,40 cm 埋深处理较 15、20 cm 埋深时有机酸含量增加,而 15 cm 埋深处理的糖酸比显著高于其余埋深处理。毛管埋深对番茄中维生素 C、可溶性糖含量无显著性影响。

表 2 水分亏缺条件下毛管理深对番茄果实形态的影响

Tab.2 Effects of lateral depth on fruit shape of tomato under water deficit

年份	处理	单果质量/g	纵茎/mm	横径/mm	各级别占比/%			
					A 级	B 级	C 级	
2014 年	D15	150.08 ± 8.08 ^{ab}	57.73 ± 1.80 ^a	65.85 ± 0.70 ^a	12.77 ± 0.64 ^a	40.43 ± 3.87 ^b	46.80 ± 2.05 ^{ab}	
	D20	156.80 ± 5.69 ^a	58.12 ± 0.96 ^a	67.12 ± 0.27 ^a	14.66 ± 1.02 ^a	48.09 ± 2.25 ^a	37.25 ± 3.50 ^b	
	D40	146.85 ± 8.50 ^b	58.93 ± 3.83 ^a	65.30 ± 2.57 ^a	15.91 ± 2.35 ^a	29.55 ± 3.35 ^c	54.54 ± 4.58 ^a	
	方差 分析	毛管 埋深	4.60 ^{NS}	1.09 ^{NS}	0.18 ^{NS}	0.92 ^{NS}	2.35 ^{**}	1.46 ^{NS}
2015 年	I50D0	129.27 ± 8.00 ^c	55.12 ± 1.82 ^a	69.25 ± 2.14 ^{bc}	22.22 ± 3.05 ^{abc}	37.04 ± 6.42 ^b	40.74 ± 6.42 ^a	
	I50D10	143.52 ± 9.32 ^{bede}	55.88 ± 3.49 ^a	68.09 ± 2.55 ^c	16.00 ± 4.49 ^{bc}	44.00 ± 5.01 ^{ab}	40.00 ± 5.59 ^{ab}	
	I50D20	138.81 ± 12.26 ^{cde}	54.73 ± 1.44 ^a	68.62 ± 1.73 ^{bc}	15.38 ± 5.13 ^c	46.16 ± 5.59 ^{ab}	38.46 ± 8.01 ^{ab}	
	I50D30	129.84 ± 7.53 ^e	54.57 ± 2.69 ^a	68.34 ± 1.90 ^{bc}	20.00 ± 5.88 ^{abc}	56.00 ± 4.40 ^a	24.00 ± 4.00 ^{bc}	
	I60D0	141.52 ± 4.46 ^{bcde}	55.44 ± 1.22 ^a	71.00 ± 1.81 ^{abc}	21.74 ± 6.05 ^{abc}	56.52 ± 3.56 ^a	21.74 ± 3.64 ^c	
	I60D10	160.95 ± 7.45 ^{ab}	56.39 ± 0.73 ^a	71.19 ± 1.34 ^{abc}	24.14 ± 5.61 ^{abc}	48.27 ± 5.56 ^{ab}	27.59 ± 7.90 ^{abc}	
	I60D20	157.75 ± 7.89 ^{abc}	56.31 ± 0.60 ^a	71.90 ± 0.62 ^{ab}	29.63 ± 6.56 ^a	51.85 ± 9.25 ^{ab}	18.52 ± 2.80 ^c	
	I60D30	133.77 ± 19.63 ^{de}	56.85 ± 1.65 ^a	71.21 ± 2.92 ^{abc}	23.33 ± 6.56 ^{abc}	46.67 ± 3.42 ^{ab}	30.00 ± 3.49 ^{abc}	
	I75D0	167.66 ± 7.13 ^a	56.89 ± 1.49 ^a	72.25 ± 0.41 ^{ab}	32.14 ± 6.29 ^a	42.86 ± 1.44 ^{ab}	25.00 ± 6.29 ^c	
	I75D10	153.26 ± 16.30 ^{abcd}	55.45 ± 0.21 ^a	71.20 ± 1.10 ^{abc}	29.03 ± 6.24 ^{ab}	45.16 ± 6.61 ^{ab}	25.81 ± 2.89 ^{bc}	
	I75D20	150.50 ± 7.83 ^{abcde}	57.66 ± 0.21 ^a	73.03 ± 1.02 ^a	30.30 ± 2.89 ^a	57.58 ± 5.77 ^a	12.12 ± 2.89 ^c	
	I75D30	150.52 ± 14.30 ^{abcde}	54.89 ± 1.04 ^a	71.47 ± 1.67 ^{abc}	23.33 ± 5.00 ^{abc}	50.00 ± 6.00 ^{ab}	26.67 ± 5.00 ^{bc}	
	方差 分析	灌水下限 毛管理深	10.27 ^{**} 2.82 ^{NS}	0.87 ^{NS} 0.08 ^{NS}	8.20 ^{**} 1.50 ^{NS}	6.98 ^{**} 0.53 ^{NS}	1.20 ^{NS} 1.61 ^{NS}	8.40 ^{NS} 0.66 ^{NS}

表 3 各处理的番茄品质

Tab.3 Tomato quality for each treatment

年份	处理	可溶性固形物 含量/%	维生素 C 含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	可溶性糖含量/%	有机酸含量/%	糖酸比
2014 年	D15	5.50 ± 0.10 ^a	20.61 ± 1.13 ^a	2.84 ± 0.23 ^{ab}	0.29 ± 0.05 ^b	9.79 ^a
	D20	5.13 ± 0.06 ^b	20.12 ± 0.09 ^a	2.52 ± 0.49 ^b	0.31 ± 0.01 ^b	8.13 ^b
	D40	5.77 ± 0.23 ^a	20.96 ± 1.86 ^a	3.85 ± 0.68 ^a	0.51 ± 0.01 ^a	7.55 ^c
	方差分析	毛管埋深	13.65 ^{**}	0.34 ^{NS}	3.54 ^{NS}	43.33 ^{**}
2015 年	I50D0	7.30 ± 0.35 ^a	17.25 ± 0.99 ^{ab}	2.70 ± 0.26 ^a	0.43 ± 0.00 ^a	6.25 ^{ab}
	I50D10	6.95 ± 0.15 ^b	18.11 ± 0.80 ^a	2.99 ± 0.17 ^a	0.41 ± 0.42 ^a	7.32 ^a
	I50D20	6.63 ± 0.55 ^{abc}	16.32 ± 1.48 ^{bc}	2.82 ± 0.26 ^a	0.40 ± 0.06 ^a	7.11 ^{ab}
	I50D30	6.71 ± 0.61 ^{abc}	18.71 ± 0.97 ^a	2.85 ± 0.12 ^a	0.41 ± 0.06 ^a	6.93 ^{ab}
	I60D0	6.30 ± 0.61 ^{cd}	15.23 ± 0.54 ^{cd}	2.17 ± 0.07 ^b	0.38 ± 0.04 ^a	5.71 ^{ab}
	I60D10	6.33 ± 0.22 ^{cd}	15.65 ± 0.28 ^{cd}	1.97 ± 0.12 ^b	0.36 ± 0.02 ^a	5.51 ^{ab}
	I60D20	6.20 ± 0.02 ^{cd}	14.51 ± 1.53 ^{de}	1.93 ± 0.03 ^b	0.36 ± 0.02 ^a	5.31 ^{ab}
	I60D30	6.30 ± 0.10 ^{cd}	14.23 ± 0.91 ^{def}	2.05 ± 0.16 ^b	0.40 ± 0.01 ^a	5.18 ^b
	I75D0	6.17 ± 0.21 ^{cd}	12.77 ± 0.71 ^{efg}	1.97 ± 0.47 ^b	0.38 ± 0.05 ^a	5.25 ^{ab}
	I75D10	6.11 ± 0.10 ^{cd}	11.32 ± 1.02 ^g	1.79 ± 0.14 ^b	0.38 ± 0.02 ^a	4.76 ^b
	I75D20	5.89 ± 0.29 ^d	13.49 ± 0.82 ^{ef}	1.90 ± 0.36 ^b	0.33 ± 0.07 ^a	5.72 ^{ab}
	I75D30	6.10 ± 0.11 ^c	12.71 ± 0.38 ^{fg}	2.04 ± 0.32 ^b	0.38 ± 0.03 ^a	5.34 ^{ab}
	方差分析	灌水下限	19.22 ^{**}	84.81 ^{**}	2.15 ^{NS}	1.59 ^{NS}
毛管埋深		1.68 ^{NS}	0.38 ^{NS}	0.29 ^{NS}	0.50 ^{NS}	0.13 ^{NS}

2015 年 I50D0 处理可溶性固形物、有机酸含量最高,I50D10 处理维生素 C、可溶性糖含量、糖酸比最大。灌水下限对果实中可溶性固形物、维生素 C 含量和糖酸比影响显著,埋深为 0 cm 和 10 cm 时灌水下限 I50 处理可溶性固形物含量较灌水下限 I60、I75 处理下显著提高,各灌水下限处理间维生素 C

含量差异显著,埋深为 10 cm 时,灌水下限 I50 处理显著增加果实中的糖酸比。埋深为 20 cm 时,灌水下限 I75 处理的可溶性固形物含量显著降低,灌水下限 I50 处理的维生素 C 含量与灌水下限 I60 和 I75 处理形成显著性差异,而糖酸比则无差异。30 cm 埋深时,灌水下限 I50 处理显著提高维生素 C

含量,灌水下限对可溶性固形物和糖酸比无显著影响。灌水下限 I50 处理下毛管埋深对可溶性固形物、维生素 C 含量有显著性影响,在灌水下限 I75 处理下毛管埋深对维生素 C 含量有显著性差异,对可溶性糖、有机酸与糖酸比影响不显著。灌水下限 I50 处理下,各埋深处理果实可溶性固形物含量与 I75D20 处理有显著差异,当埋深超过 20 cm 时,除 I75D20 处理外,与灌水下限 I60 和 I75 处理各埋深下的可溶性固形物含量并无差异。在灌水下限 I50 与 I75 处理下,埋深为 10 cm 与 20 cm 处理间维生素 C 含量差异显著,与 0、30 cm 埋深处理则无差异性。综合考虑,选择最优处理组合 I60D10。

3 讨论

埋深适宜的地下滴灌可以适时适量地将水分直接输送至根区,满足作物生长需求。本试验发现,在轻度与中轻度水分亏缺灌溉时,毛管埋深为 10 ~ 20 cm 番茄植株生长较好。这是由于番茄根系多分布于地表以下 20 cm 范围内。毛管埋深 0 cm 时,水分多集中在地表,根系呈“浅宽型”分布,不利于向下深扎,减弱抵抗干旱胁迫的能力。而 30 cm 埋深位于主根之下,水分运移至表层土壤较少,苗期根系发展浅,早期胁迫使根系生长受阻,从而在一定程度上影响后期番茄植株生长。虽然作物能根据土壤水分状况及时做出适应性反应^[20],但这种适应能力在严重水分亏缺时非常有限,影响地上部分生长^[21]。本试验也发现重度水分亏缺条件下,所有毛管埋深处理的番茄株高均最低,与高方胜等^[22]和李晶晶等^[23]研究结论一致。番茄苗期主要以营养生长为主,需水量小,水分亏缺对番茄生长的影响较小,毛管埋深对番茄生长的影响也较小。随着番茄逐渐生长,生殖生长比重增大,需水量也逐渐增加,不同毛管埋深处理将形成不同的土壤水分分布差异,进而造成番茄生长的差异。因此,本试验毛管埋深对番

茄定植 58 d (开花坐果期)、78 d (果实膨大期) 后株高有显著影响,对定植 58 d 后茎粗影响显著。

本研究发现轻度与中轻度水分亏缺下,适宜的埋深有利于果实横向发育,可显著减小 C 级果实比例,增加 A 级与 B 级果实比例,而在重度水分亏缺灌溉下,毛管埋深为 10、20 cm 处理增加 B 级果实比例,减小 A 级果实比例。这是由于适宜的埋深可以使番茄根系在较长的时间内处于含水率适宜的土壤中,保证番茄的水分供给,促进光合作用,增加植株干物质积累,增大干物质在果实中的分配,提高干物质向番茄果实的转化率、转化量和对番茄产量的贡献率^[22],从而促进番茄单果发育并提高中大果径的果实比例。而在重度水分亏缺灌溉时,各埋深处理土壤含水率长时间较低,难以满足番茄生殖生长需求,干物质积累与分配主要消耗于根系生长,导致果实偏小比例增大。

根系受到水分胁迫时,将诱导细根由“宽浅型”向“深根型”分布状况发展^[24],番茄根系向下深扎,表层土壤根系减少,深层土壤根系增加^[25],根系耗水深度增大。地表滴灌处理灌水 24 h 后,表层土壤含水率大,深层小,埋深 30 cm 时,恰好相反(图 3)。下一次灌水前,轻、中度水分亏缺灌溉时,毛管埋深为 0 cm 处理主要耗水深度分别在 0 ~ 40 cm 和 0 ~ 50 cm 范围内,30 cm 埋深处理分别在 0 ~ 50 cm 与 0 ~ 60 cm,重度水分亏缺处理的 0 cm 和 30 cm 埋深耗水范围均为 0 ~ 60 cm (图 4)。不同水分亏缺处理下有利于增加根系耗水范围,毛管埋深增加促使主要耗水深度向下移动,扩大水分吸收范围以满足果实生长。此时,不同毛管埋深主要影响番茄根系的生长,而对番茄品质影响不显著。本试验还发现,番茄可溶性固形物、可溶性糖、有机酸含量总体随毛管埋深增加呈先减小后增加的趋势。这可能是重度水分亏缺处理下共灌水 2 次,各埋深处理灌水量相同,但 20 cm 埋深耗水量最大,水分稀释作用明显。而

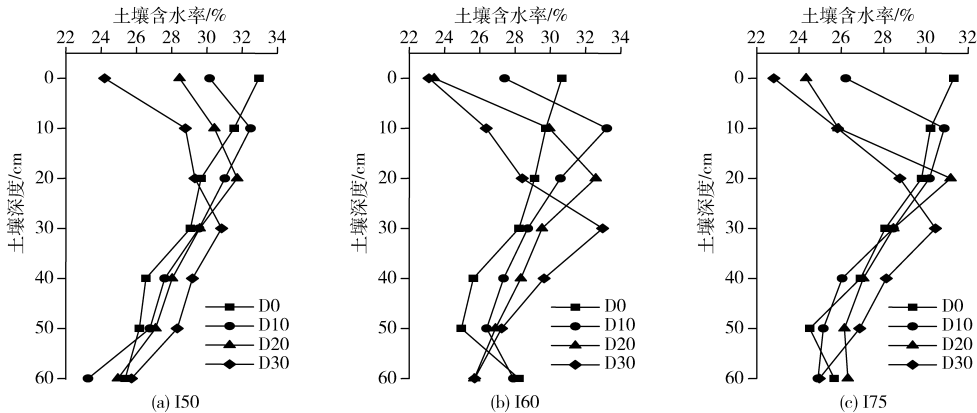


图3 灌水 24 h 后不同深度的土壤含水率

Fig. 3 Soil water content of different soil depths after 24 h of irrigation

在中轻度水分亏缺下,20 cm 埋深处理灌水间隔为 30 d,10 cm 埋深处理为 45 d,轻度水分亏缺下毛管埋深 20 cm 处理的灌水间隔为 12 d,0 cm 埋深处理灌水间隔为 15 d,且 20 cm 埋深处理番茄耗水量与

灌水量最大并显著高于其他埋深处理(表 2),这时适当的毛管埋深能增加番茄耗水量,减少水分亏缺时间,从而导致番茄品质下降,这也与刘明池等^[26]和 CUI 等^[27]的研究结果类似。

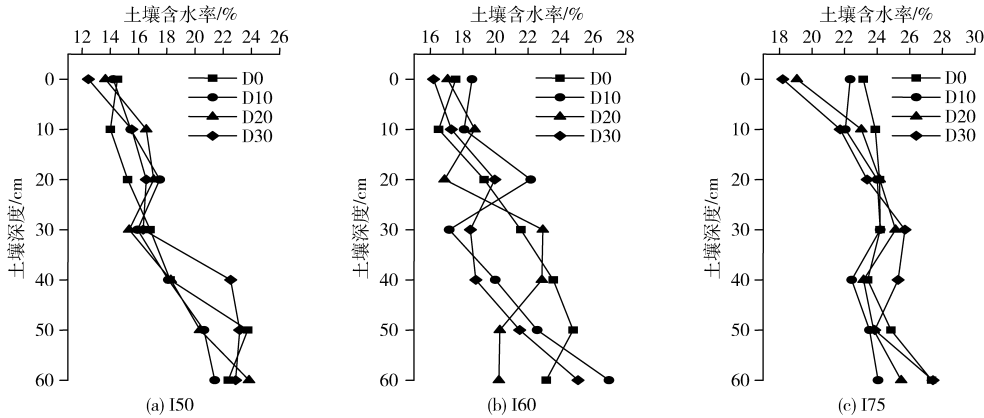


图 4 灌水前不同深度的土壤含水率

Fig.4 Soil water content of different soil depths before irrigation

埋深为 20 cm 时,水分运移至表层土壤较少而形成相对干燥的保护层,会减少土壤水分蒸发,增加了土壤通透性,从而提高根系活力,有利于作物增产及提高水分利用效率^[18]。本试验轻度、中轻度水分亏缺灌溉时,毛管埋深为 20 cm 处理产量最高,灌溉水利用效率较大。重度水分胁迫时,番茄产量显著下降,毛管埋深对番茄产量无显著性影响。这是因为番茄植株经受水分亏缺程度过大与亏缺时间过长,严重阻碍叶片光合作用^[28],加速叶片功能的衰老^[29],果实细胞壁变得比较坚固,复水无法扩张^[3],从而引起严重减产。

4 结论

(1)毛管埋深对开花坐果末期至盛果初期(定植后 58~78 d)的番茄株高和茎粗有显著性影响,

20 cm 毛管埋深更有利于番茄株高与茎粗的生长;毛管埋深对番茄产量影响显著,适宜的埋深可以显著提高番茄产量。

(2)轻度、中轻度水分亏缺灌溉条件下,毛管埋深 20 cm 可增加 A 级与 B 级果实比例。

(3)毛管埋深对番茄果实可溶性糖、维生素 C 含量无显著性影响。

(4)番茄产量、灌水量随毛管埋深增加呈先增加后减小趋势,毛管埋深为 20 cm 时,番茄产量较高,灌水量也较大。番茄灌溉水利用效率随灌水下限增加显著降低,毛管埋深对灌溉水利用效率无显著性影响。综合考虑番茄株高、产量及灌溉水利用效率,可选择毛管埋深 20 cm,灌水下限为田间持水率的 60% 处理组合为关中地区日光温室适宜的滴灌方式。

参 考 文 献

1 乔立文,陈友,齐红岩,等. 温室大棚蔬菜生产中滴灌带灌溉应用效果分析[J]. 农业工程学报,1996,12(2):38-43.
QIAO Liwen, CHEN You, QI Hongyan, et al. Effect of drip tape irrigation on vegetable production in Greenhouse[J]. Transaction of the CSAE,1996,12(2):38-43. (in Chinese)

2 杨丽娟,张玉龙,须晖. 棚室蔬菜生产中灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2003,19(6):264-267.
YANG Lijuan, ZHANG Yulong, XU Hui. Advance of study on irrigation techniques in greenhouse[J]. Transaction of the CSAE, 2003,19(6):264-267. (in Chinese)

3 庞秀明,康绍忠,王密侠. 作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(6):141-146.
PANG Xiuming, KANG Shaozhong, WANG Mixia. Theory and technology development and prospect of regulated deficit irrigation on crops[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2005,33(6): 141-146. (in Chinese)

4 杨再强,邱泽莹,刘朝霞,等. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报,2016,36(3):748-757.
YANG Zaiqiang, QIU Yixuan, LIU Zhaoxia, et al. Effects of water stress on stomatal characters of greenhouse tomato leaves[J]. Acta Ecological Sinica, 2016,36(3): 748-757. (in Chinese)

5 杨再强,谭文,刘朝霞,等. 土壤水分胁迫对设施番茄叶片气孔特性的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(5):1234-1240.
YANG Zaiqiang, TAN Wen, LIU Zhaoxia, et al. The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(5):1234-1240. (in Chinese)

6 刘浩,孙景生,段爱旺,等. 温室滴灌条件下水分亏缺对番茄生长及生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):53-57.
LIU Hao, SUN Jingsheng, DUAN Aiwang, et al. Effect of water stress on tomato growth and physiological characteristics under drip irrigation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3):53-57. (in Chinese)

7 时学双,李法虎,闫宝莹,等. 不同生育期水分亏缺灌溉对青春稈水分利用和产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,

- 46(10):144–151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151019&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.019.
- SHI Hueshuang, LI Fahu, YAN Baoying, et al. Effects of water deficit at different growth stages on water use and yield of spring highland barley[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(10):144–151. (in Chinese)
- 8 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 等. 水分调控对麦茬产量和水分利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(6):150–160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140623&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.023.
- SHEN Xiaojun, SUN Jingsheng, ZHANG Jiyang, et al. Different water treatment on yield and water use of transplanted cotton following wheat harvest[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):150–160. (in Chinese)
- 9 ZENG Chunzhi, BIE Zhilong, YUAN Baozhong. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(4):595–602.
- 10 武阳, 王伟, 黄兴法, 等. 亏缺灌溉对成龄库尔勒香梨产量与根系生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2012,43(9):78–84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120916&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.016.
- WU Yang, WANG Wei, HUANG Xingfa, et al. Yield and root growth of mature Korla fragrant pear tree under deficit irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):78–84. (in Chinese)
- 11 任杰, 温新明, 王振华, 等. 地下滴灌毛管适宜埋深及间距研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2007,18(6):48–51.
- REN Jie, WEN Xinming, WANG Zhenhua, et al. Research progress on appropriate depth and interval of lateral pipes in subsurface drip irrigation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007,18(6):48–51. (in Chinese)
- 12 刘玉春, 李久生. 毛管埋深和土壤层质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响[J]. 水利学报, 2009,40(7):782–790.
- LIU Yuchun, LI Jiusheng. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrate dynamics and root distribution for drip fertigated tomato[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(7):782–790. (in Chinese)
- 13 何华, 康绍忠, 曹红霞. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根冠生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001,17(6):31–33.
- HE Hua, KANG Shaozhong, CAO Hongxia. Effect of lateral depth on root and seedling growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Transaction of the CSAE, 2001,17(6):31–33. (in Chinese)
- 14 刘玉春, 李久生. 毛管埋深和层状质地对番茄滴灌水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009,25(6):7–12.
- LIU Yuchun, LI Jiusheng. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrogen use efficiency of drip irrigated tomato[J]. Transaction of the CSAE, 2009,25(6):7–12. (in Chinese)
- 15 LAMM F R, TROOEN T P. Dripline depth effects on corn production when crop establishment is nonlimiting[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005,21(5):835–840.
- 16 ENCISO J M, COLAIZZI P D, MULTER W L. Economic analysis of subsurface drip irrigation lateral spacing and installation depth for cotton[J]. Transactions of the ASAE, 2005,48(1):197–204.
- 17 NEELAM P, RAJPUT T B S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato[J]. Agricultural Water Management, 2007,88(1–3):209–223.
- 18 诸葛玉平, 张玉龙, 张旭东, 等. 塑料大棚渗灌灌水下限对番茄生长和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2004,15(5):767–771.
- ZHUGE Yuping, ZHANG Yulong, ZHANG Xudong, et al. Effect of lower limit of subsurface drip irrigation on tomato growth and its yield in plastic tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(5):767–771. (in Chinese)
- 19 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 20 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[J]. 生态农业研究, 1996,4(3):7–11.
- FENG Guanglong, LIU Changming, WANG Li. Roles of soil water in regulating root growth and distribution[J]. Eco-agricultural Research, 1996,4(3):7–11. (in Chinese)
- 21 李文尧, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010,30(19):5140–5150.
- LI Wenrao, ZHANG Suiqi, DING Shengyan, et al. Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(19):5140–5150. (in Chinese)
- 22 高方胜, 徐坤, 徐立功, 等. 土壤水分对番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 西北农业学报, 2005,14(4):69–72.
- GAO Fangsheng, XU Kun, XU Ligong, et al. Effect of soil water on the growth, development, yield and quality[J]. Acta Agronomica Boreali-occidentalis Sinica, 2005,14(4):69–72. (in Chinese)
- 23 李晶晶, 王铁良, 李波, 等. 日光温室滴灌条件下不同灌水下限对青椒生长的影响[J]. 节水灌溉, 2010(2):24–26.
- LI Jingjing, WANG Tieliang, LI Bo, et al. Effect of different lower limit of drip irrigation quantity on growth of green pepper in greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2010(2):24–26. (in Chinese)
- 24 孙三民, 安巧霞, 杨培岭, 等. 间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(8):81–90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160812&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.012.
- SUN Sanmin, AN Qiaoxia, YANG Peiling, et al. Effect of irrigation depth on root distribution and water use efficiency of jujube under indirect subsurface drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(8):81–90. (in Chinese)
- 25 齐广平, 张恩和. 膜下滴灌条件下不同灌溉量对番茄根系分布和产量的影响[J]. 中国沙漠, 2009,29(3):463–467.
- QI Guangping, ZHANG Enhe. Effect of drip irrigation quota on root distribution and yield of tomato under film mulch[J]. Journal of Desert Research, 2009,29(3):463–467. (in Chinese)
- 26 刘明池, 张慎好, 刘向莉. 亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2005,21(增刊2):92–95.
- LIU Mingchi, ZHANG Shenhao, LIU Xiangli. Effects of different deficit irrigation periods on yield and fruit quality of tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(Supp.2):92–95. (in Chinese)
- 27 CUI Ningbo, DU Taisheng, KANG Shaozhong, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(4):489–497.
- 28 王唯逍, 刘小军, 田永超, 等. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2012,32(22):7053–7060.
- WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(22):7053–7060. (in Chinese)
- 29 胡梦芸, 张正斌, 徐萍, 等. 亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究[J]. 作物学报, 2007,33(11):1884–1891.
- HU Mengyun, ZHANG Zhengbin, XU Ping, et al. Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport in wheat under deficit irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007,33(11):1884–1891. (in Chinese)