

## 土壤基质势调控对温室滴灌番茄土壤水分分布和产量的影响

万书勤<sup>2</sup>, 闫振坤<sup>4</sup>, 康跃虎<sup>2,3</sup>, 原保忠<sup>4\*</sup>, 焦艳平<sup>1</sup>, 宋嘉<sup>5</sup>

(1. 河北省农业节水工程技术研究中心河北省水利科学研究院, 石家庄 050051;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070;

5. 天津市静海区团泊镇农业办公室, 天津 301636)

**摘要:**【目的】指导设施蔬菜生产中科学合理地利用滴灌技术进行灌溉。【方法】采用小区试验的方法,以冬春茬番茄为研究对象,布置了7个不同土壤基质势阈值的试验,在番茄开花坐果期和结果期分别控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势在-15和-15 kPa(S1)、-15和-30 kPa(S2)、-15和-45 kPa(S3)、-25和-25 kPa(S4)、-30和-15 kPa(S5)、-30和-30 kPa(S6)以及-30和-45 kPa(S7),研究了日光温室滴灌土壤基质势调控下土壤水分随时间变化及空间分布的规律,以及番茄产量、畸形果率和灌溉水利用效率等。【结果】①控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势可以明显影响0~100 cm深度土壤水分状况。②在番茄开花坐果期,当土壤基质势阈值控制在-30 kPa或更高时,番茄根系主要吸收利用0~60 cm深度以上范围的土壤水分,70 cm深度以下土壤水分基本不变,0~60 cm深度土壤体积含水率平均为28.6%,为田间持水率的84%,60~100 cm土壤体积含水率平均为36.2%,为田间持水率的90%。③番茄进入结果期后,当土壤基质势阈值控制在-25~-15 kPa时,整个土体土壤含水率基本保持在田间持水率的77%~91%,根系主要吸收利用0~60 cm深度以上范围的土壤水分,70 cm深度以下土壤水分消耗缓慢;当土壤基质势阈值降低到-45~-30 kPa时,根系吸收利用到80~100 cm深度的土壤水分,整个土体土壤含水率不断降低,降低到田间持水率的60%~66%。④不同处理番茄产量、畸形果率和灌溉水利用效率有明显差异,其中S3和S7处理番茄产量高,S5处理产量低;S1、S3和S4处理的畸形果率大,S6和S7处理的畸形果率低;S1处理的灌溉水利用效率最低,S7处理的灌溉水利用效率最高。【结论】日光温室少量高频滴灌条件下,当滴头正下方20 cm深度土壤基质势阈值开花坐果期控制在-30 kPa、结果期控制在-45 kPa时,整个土体土壤水分状况基本良好,番茄的产量高,畸形果率低,灌溉水利用效率高。

**关键词:**日光温室;水分;土壤基质势;灌溉;番茄;产量

中图分类号:S275.6;S274.1

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180360

万书勤,闫振坤,康跃虎,等. 土壤基质势调控对温室滴灌番茄土壤水分分布和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(5):1-11.

### 0 引言

设施蔬菜生产对我国尤其是北方蔬菜周年均衡供应、农民收入增加发挥了巨大作用。我国北方地区设施蔬菜栽培主要以日光温室为主,由于处于覆盖物保护之下,基本无法利用降雨,蔬菜整个生育期都需要灌溉来保证生产,灌溉水的供给方式、供给量、供给时期等都会对蔬菜的产量及品质产生影响。

目前我国大部分地区设施蔬菜生产中仍以传统大水漫灌和沟灌方式为主,灌水量多是依据经验进行,过量灌溉现象非常普遍。据调查,我国设施蔬菜一季灌溉量一般在825~900 mm,有的甚至高达1 200 mm,灌溉水量浪费严重<sup>[1-2]</sup>,灌溉水利用率低,同时设施内湿度的增加,导致病害加重,影响蔬菜正常生长和种植

收稿日期:2018-06-29

基金项目:河北省农业节水工程技术研究中心开放课题与河北省水利科技成果推广项目(2015012);国家科技支撑计划课题(2014BAD12B05)

作者简介:万书勤(1978-),女,副研究员,主要从事农田水循环与节水灌溉研究。E-mail: wansq@igsrr.ac.cn

通信作者:原保忠(1968-),男,副教授,主要从事作物水分高效利用与农业生态。E-mail: yuanbz@mail.hzau.edu.cn

效益。

滴灌作为现代节水灌溉技术,可以根据蔬菜的需水需肥规律,将水和可溶性肥料以较小流量均匀直接输送到蔬菜根系附近,明显降低温室大棚内的湿度,达到节水、节肥、省工的效果,并能明显提高蔬菜的产量和品质,在设施蔬菜生产中得到了应用<sup>[3]</sup>。然而由于缺乏针对我国设施农业特点和管理者管理水平的滴灌灌溉管理技术,往往存在经济效益不明显甚至减产等问题,影响了用户使用滴灌技术的积极性<sup>[4]</sup>。

康跃虎等<sup>[5]</sup>在华北地区大田的研究发现,在非盐碱地、非微咸水/咸水灌溉条件下,控制滴头正下方 20 cm 深度土壤基质势能明显影响到 50 cm 深度以上整个土体的土壤基质势,20 cm 深度处土壤基质势越高,50 cm 深度范围内的平均土壤基质势越高;土壤基质势越低,以滴头为中心形成的干燥范围越大。在日光温室、塑料大棚和小块农田经济作物滴灌灌溉条件下,控制滴头正下方 20 cm 处土壤基质势阈值,能够很好地控制作物根系分布层的水分状况;当该阈值在-35~-25 kPa 范围内,大部分作物可以获得高产和高水分利用效率<sup>[6]</sup>。目前控制特征点(滴头正下方 20 cm 深度)土壤水势(土壤基质势)阈值已经成为滴灌灌溉管理常用的方法之一<sup>[7-9]</sup>。

不同于大田试验,设施生产中灌溉基本是土壤水分的唯一来源,明确滴灌条件下控制特征点土壤基质势条件下土壤水分时空分布规律,对科学合理地制定设施蔬菜滴灌灌溉制度具有重要意义。目前滴灌条件下土壤水分时空分布规律的研究多是采用室内模拟或者田间实测资料进行经验公式推导,研究不同土壤质地、滴头流量、土壤初始含水率、灌水量、单双管滴灌模式、原状土与扰动土等条件下,湿润锋和湿润体变化特征、土壤水分运动规律以及停止灌水后土壤水分再分布规律等,多是为了给滴灌系统规划设计提供参考<sup>[12-18]</sup>;而通过小区实测资料确定日光温室滴灌条件下土壤水分时空分布规律、为滴灌灌溉管理提供支持的研究较少。本文以番茄为研究对象,通过控制番茄不同生育阶段滴头正下方 20 cm 深度处土壤基质势阈值,研究土壤水分在时间变化及空间分布上的规律,以及番茄产量、畸形果率等,为设施蔬菜生产中科学合理地进行滴灌灌溉管理提供一定依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2015—2016 年番茄冬春茬生长季在河北省廊坊市永清县海泽田现代农业园区(北纬 39°19',东经 116°27')的日光温室中开展。该地属于暖温带大陆性季风气候,年平均降雨 540 mm,年平均气温 11.5 ℃,年平均日照时间 183 d。日光温室为钢架结构,长 56 m、宽 10 m、顶高 4.5 m,后墙为厚度 5 m 的土墙,最外层为砖墙,覆盖材料为聚乙烯膜。

表 1 土壤物理性质

供试土壤为砂壤土,0~20 cm 表层土壤疏松,土壤容重平均为 1.29 g/cm<sup>3</sup>;随着土层深度的增加,土壤体积质量逐渐增大,20~50 cm 土壤体积质量平均为 1.42 g/cm<sup>3</sup>,50~100 cm 土壤体积质量增加到 1.52 g/cm<sup>3</sup>。0~20 cm 田间持水率平均为 0.29 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,20~50 cm 平均为 0.31 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,50~100 cm 平均为 0.42 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。0~100 cm 土层田间持水率对应的土壤基质势值为-9.0~-7.0 kPa。主要土壤物理性质见表 1。耕作层 0~30 cm 土壤速效磷和速效钾量丰富,分别平均为 46.2 mg/kg 和

土壤深度/cm	土壤质地	土壤体积质量/(g·m <sup>-3</sup> )	田间持水率/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	饱和含水率/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
0~10	砂壤土	1.28	0.34	0.58
10~20	砂壤土	1.31	0.30	0.51
20~30	砂壤土	1.42	0.37	0.61
30~40	砂壤土	1.43	0.33	0.44
40~50	砂壤土	1.40	0.34	0.47
50~60	砂壤土	1.56	0.37	0.45
60~70	砂壤土	1.51	0.40	0.49
70~80	砂壤土	1.57	0.41	0.61
80~90	砂壤土	1.56	0.42	0.50
90~100	砂壤土	1.47	0.37	0.44

280.0 mg/kg;30 cm 以下土壤养分迅速降低为缺乏水平,其中 40~100 cm 土层土壤速效磷和速效钾量分别平均为 4.5 mg/kg 和 56.1 mg/kg。采用深层地下水灌溉,灌溉水矿化度 0.5 g/L 左右。浅层地下水埋深大于 5 m。

### 1.2 试验设计

试验设计了 7 个土壤基质势阈值(灌水下限值)处理(S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7),在番茄开花坐果期和结果期分别控制滴头正下方 20 cm 深度土壤基质势在-15 kPa 和-15 kPa(S1)、-15 kPa 和-30 kPa(S2)、-15 kPa 和-45 kPa(S3)、-25 kPa 和-25 kPa(S4)、-30 kPa 和-15 kPa(S5)、-30 kPa 和-30 kPa(S6)以及-30 kPa 和-45 kPa(S7)。所有处理番茄缓苗阶段土壤基质势阈值均控制在-15 kPa,详见表 2。

表2 土壤基质势阈值

生育阶段	日期	土壤基质势阈值/kPa						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
缓苗期	2015年9月9—25日	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15
开花坐果期	2015年9月26日—2016年1月26日	-15	-15	-15	-25	-30	-30	-30
结果期	2016年1月27日—5月11日	-15	-30	-45	-25	-15	-30	-45

日光温室总面积560 m<sup>2</sup>,划分为7个试验小区。每个试验小区长8 m,宽7.2 m,面积57.6 m<sup>2</sup>,包括1套灌溉首部,6条垄,12条滴灌带,12行番茄。每个灌溉首部主要包括1个40 L压差式施肥罐(带流量计)、1个120目网式过滤器、3块压力表、1块水表、1个闸阀和1个球阀等。滴灌带滴头流量2.7 L/h(工作压力0.1 MPa),滴头间距30 cm。

供试作物为番茄,品种是河北当地日光温室常种品种“凯特1号”。采用起垄覆膜种植方式,垄高15 cm,垄面宽80 cm,垄沟宽10 cm,2垄中心距离为120 cm;垄上覆膜,膜宽120 cm;每条垄上布置2行滴灌带,种植2行番茄,番茄距离滴灌带2~3 cm;垄上番茄行距40 cm,株距33 cm,交错种植,种植密度为50 500株/hm<sup>2</sup>(图1)。参考园区番茄管理方法,留5层穗果,2016年3月1日进行打顶。第1穗果留果2~3个,第2穗果留果3~4个,第3穗果留果3~4个,第4穗果以上留果4~5个。

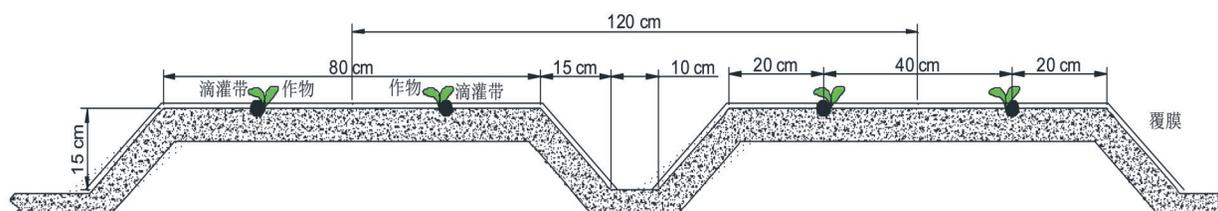


图1 垄作覆膜种植方式示意图

番茄苗移栽后立刻进行第1次灌溉,灌水量45 mm左右,造墒以使得计划根系分布范围内的土壤水库达到或接近最大贮水能力。之后在番茄缓苗阶段,当滴头正下方20 cm深度土壤基质势降低到-15 kPa时开始灌溉,每次灌水量6 mm左右。番茄定苗后,各处理当土壤基质势降低到设定的阈值时,进行施肥灌溉,每次灌水量6 mm左右;灌水结束后及时读负压计,如果该点土壤基质势升高到设定阈值以上,则结束这次灌溉,若土壤基质势仍低于设定阈值,再灌溉1次(灌水6 mm),直到土壤基质势升高到阈值以上,结束这次灌溉。

定植前底肥施用有机肥2 680 kg/hm<sup>2</sup>,尿素(纯N量46.4%)1 430 kg/hm<sup>2</sup>;番茄定苗后每次灌溉进行追肥,选择速溶性复合肥。将番茄各生育阶段施肥量按生育期天数分配到每天,每次施肥量为日施肥量与灌溉间隔天数之积,其中开花坐果期设计为120 d,每天灌溉追入复合肥(N、P、K质量比为18:18:18)2.5 kg/hm<sup>2</sup>,结果期设计为100 d,每天灌溉追入复合肥(N、P、K质量比为12:8:40)4.2 kg/hm<sup>2</sup>。所有处理开花坐果期追复合肥(N、P、K质量比为18:18:18)300 kg/hm<sup>2</sup>,结果期追复合肥(N、P、K质量比为12:8:40)415 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 试验观测与方法

#### 1.3.1 土壤基质势

所有处理在试验小区中间一条垄的滴头正下方20 cm深度埋设1支负压计,每天08:00和14:00读数,当其测定的土壤基质势降低到设定的阈值(灌水下限值)时进行灌溉。

为了研究日光温室滴灌条件下,控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势能影响到的深度范围,所有处理在滴头正下方、水平距离滴灌带30 cm远、垄沟正下方等3个位置的70 cm和90 cm土层深度各埋设1支负压计,每天08:00读数。

#### 1.3.2 土壤含水率

番茄生长期间每隔25~30 d,在所有试验小区中间1条垄的滴头正下方、水平距离滴灌带30 cm远、垄沟正下方等3个位置取土,采用烘干法测土壤质量含水率,乘以土壤体积质量换算成土壤体积含水率。取样深度分别为0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm。

#### 1.3.3 番茄产量及商品品质

产量:从始收期开始到末收期,每个试验小区番茄按行收获。按照(GB 8852—1988)国家标准中定义的商品果标准采收,统计每行番茄商品果数量和质量。按照每次采收的商品果实质量除以商品果数计算单果

质量,以g表示。

畸形果率:从始收期开始到末收期,与测产同步,用目测及触摸法观察每个果实的外观,按照(GB 8852—1988)国家标准中定义的畸形果,统计畸形果数量和质量。按照畸形果质量占总果质量(商品果质量与畸形果质量之和)的百分数计算畸形果率,以%表示。

#### 1.3.4 灌水量与灌溉水利用效率

灌水量与灌溉水利用效率(*IWUE*):每次灌水后记录水表读数,计算出每个处理每次的灌水量(mm)。*IWUE*的计算式为:

$$IWUE = \frac{Y}{I},$$

式中:*Y*为番茄产量(kg/hm<sup>2</sup>);*I*为整个生育期总灌水量(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。

### 1.4 数据处理及分析

采用Excel 2010对数据进行处理与绘图,用SAS 9.1软件对数据进行差异显著性检验。由于取样在垂直方向上间隔距离不一样,在分析土壤含水率数据时采用加权平均值法,加权平均值= $\Sigma(\text{样品量} \times \text{取样深度} / \text{整个分析深度})$ ,文中平均值均指加权平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 滴灌土壤基质势调控下不同深度土壤基质势时间变化规律

#### 2.1.1 20 cm 深度土壤基质势随时间变化情况

图2表示番茄生育期内不同处理08:00滴头正下方20 cm深度土壤基质势随时间的变化情况。由图2可知,所有处理的土壤基质势大部分时间基本都保持在设计的土壤基质势阈值范围内。其中番茄开花坐果阶段(2015年10月4日—2016年1月26日),S1—S7处理的土壤基质势平均分别为-12.6、-14.6、-12.6、-21.2、-23.5、-22.9、-24.7 kPa;番茄结果期(2016年1月26日—5月11日),S1—S7处理的土壤基质势分别平均为-17.3、-21.8、-34.4、-23.1、-15.2、-25.4、-33.2 kPa。当植株进入果实迅速膨大期,番茄茎叶和果实同时达到最旺盛的生长时期,也进入植株需水最多的时期。S1处理,灌溉较频繁,灌溉频率为2~3 d/次,但该时期土壤基质势平均为-17.3 kPa,略低于设定的阈值;S5处理,在番茄结果后期(3月10日之后)也出现类似的情况,土壤基质势平均为-18.1 kPa,低于设定的阈值。这主要是由于负压计读数采用人工定时观测,有时14:00的土壤基质势值未达到阈值而未灌溉,但经过一个下午和晚上的水分消耗,导致第2天08:00出现土壤基质势值低于阈值的现象。因此,在作物生长旺盛阶段,需要根据实际情况增加负压计读数次数。

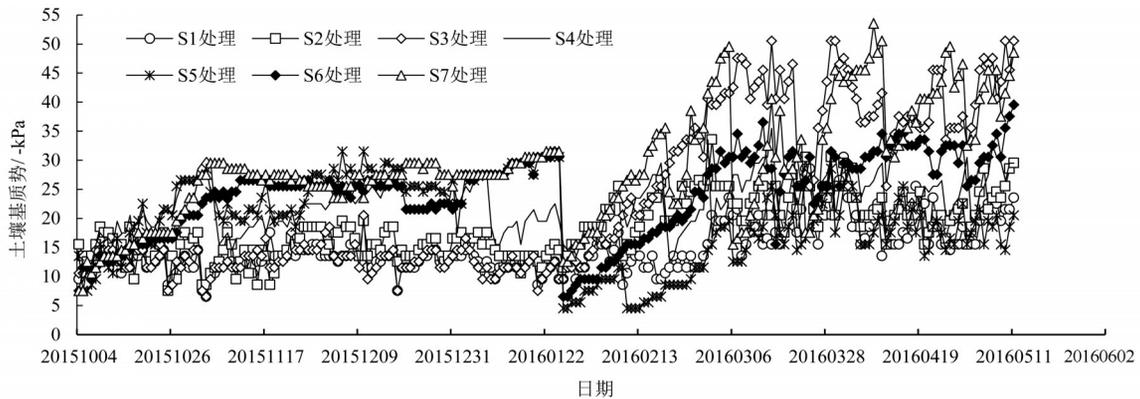


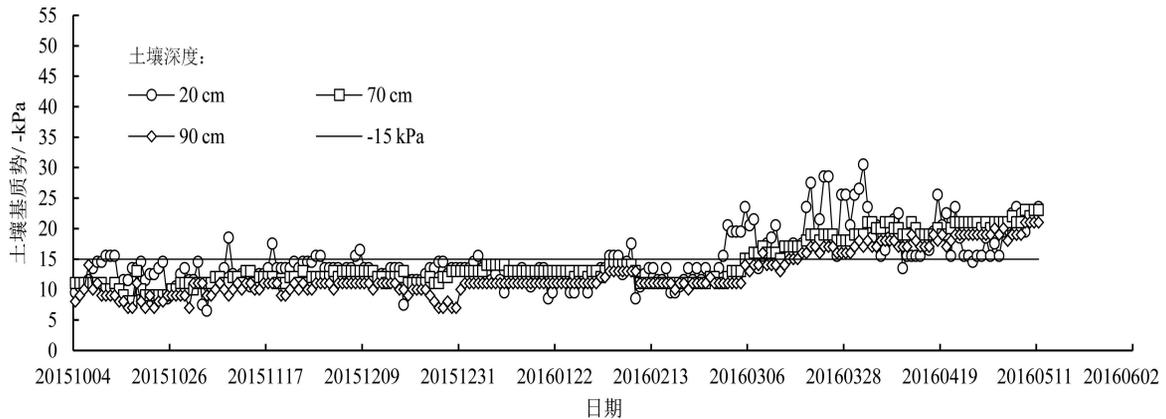
图2 各处理08:00滴头正下方20 cm深度土壤基质势

#### 2.1.2 70 cm和90 cm深度土壤基质势随时间的变化规律

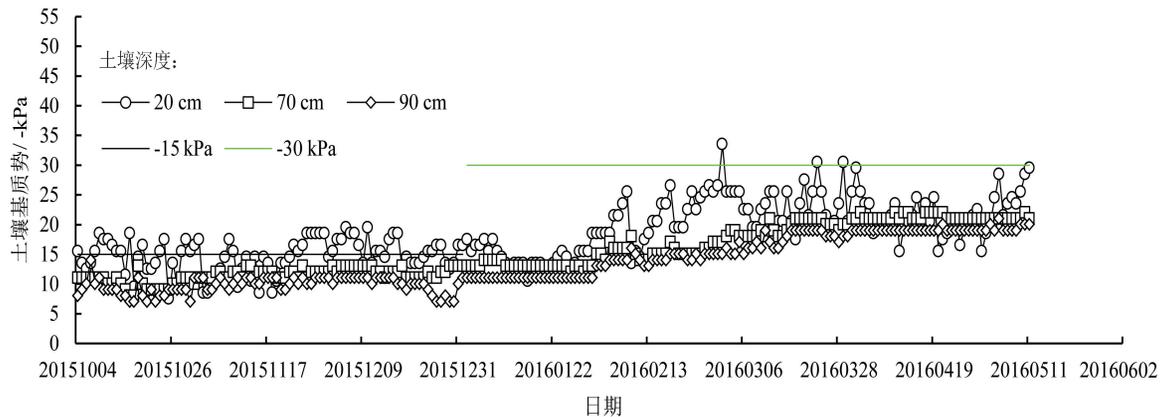
图3表示番茄生育期内不同处理08:00滴头正下方20、70、90 cm深度的土壤基质势随时间变化情况。在番茄开花坐果初期,各处理70 cm和90 cm深度的土壤基质势都很高,在-13.0~-7.0 kPa(图3),土壤水分状况接近或者达到田间持水率(-9.0~-7.0 kPa)。由于研究区浅层地下水埋深大于5 m,可以推测各处理深层土壤基质势高、土壤水分状况好,主要是因为第1次45 mm左右的大水量造墒灌溉和缓苗阶段高土壤基质势阈值(-15 kPa)控制的高频灌溉(每次灌水量6 mm左右),使得各处理0~90 cm的土体土壤水库都接近或达到最大贮水能力。

随着番茄进入营养生长及生殖生长旺盛期,各处理 70 cm 和 90 cm 深度的土壤基质势逐渐降低,并且其降低幅度明显受 20 cm 深度土壤基质势阈值的影响。土壤基质势阈值在番茄生育期内无论是保持不变还是变化,对于整个生育期土壤基质势阈值控制较高的处理,例如 S1、S2、S4 和 S5 处理(图 3(a)、图 3(b)、图 3(d) 和图 3(e)),在番茄大部分生育期内 20 cm 深度土壤基质势基本保持在 -20 kPa 以上,其 70 cm 和 90 cm 深度的土壤基质势降低缓慢,且降低幅度基本一致,4 个处理 70 cm 深度的土壤基质势由 -10.0~-8.0 kPa 逐渐降低到 -23.0~-22.0 kPa,90 cm 深度的由 -10.0~-7.0 kPa 逐渐降低到 -21.0~-20.0 kPa。

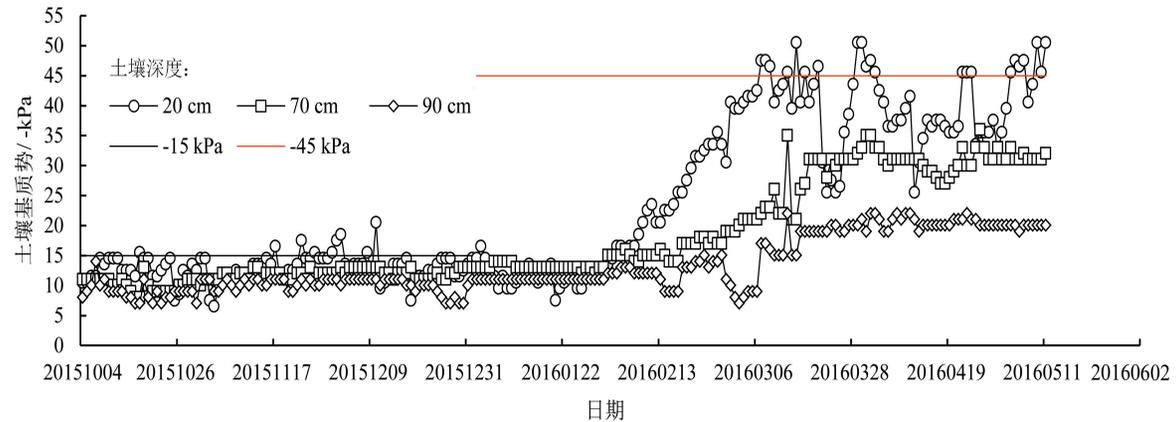
番茄结果期土壤基质势阈值控制较低的处理,如 S3、S6 和 S7 处理(图 3(c)、图 3(f)和图 3(g)),结果期 20 cm 深度土壤基质势基本维持在 -25 kPa 以下甚至更低,同期 70 cm 和 90 cm 深度的土壤基质势显著降低,且 70 cm 深度的土壤基质势降低幅度尤为明显,例如 S3 和 S7 处理,70 cm 深度的土壤基质势由 -10.0~-8.0 kPa 逐渐降低到 -41.0~-36.0 kPa,90 cm 深度的由 -10.0~-7.0 kPa 降低到 -29.0~-22.0 kPa。



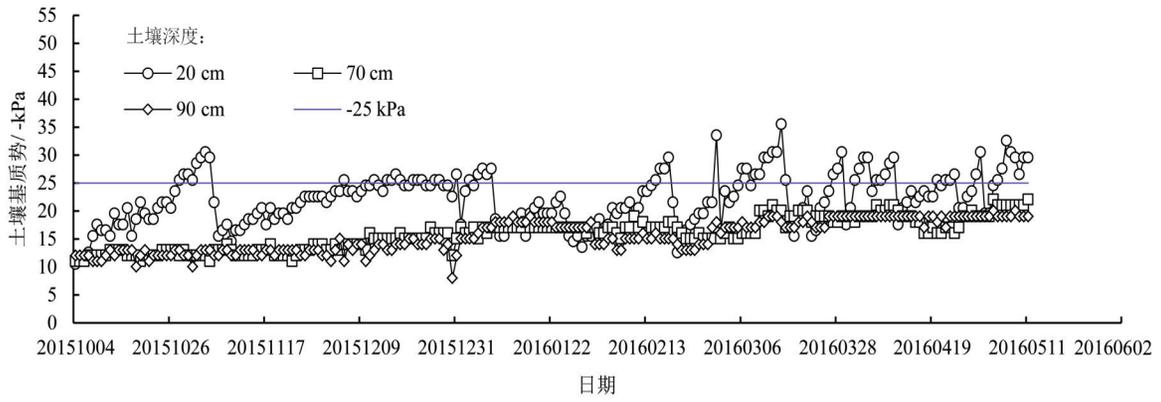
(a)S1 处理



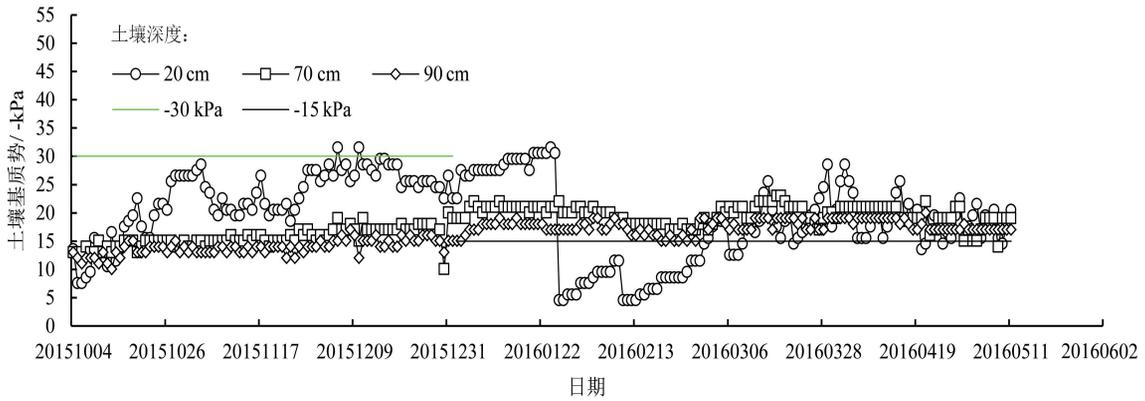
(b)S2 处理



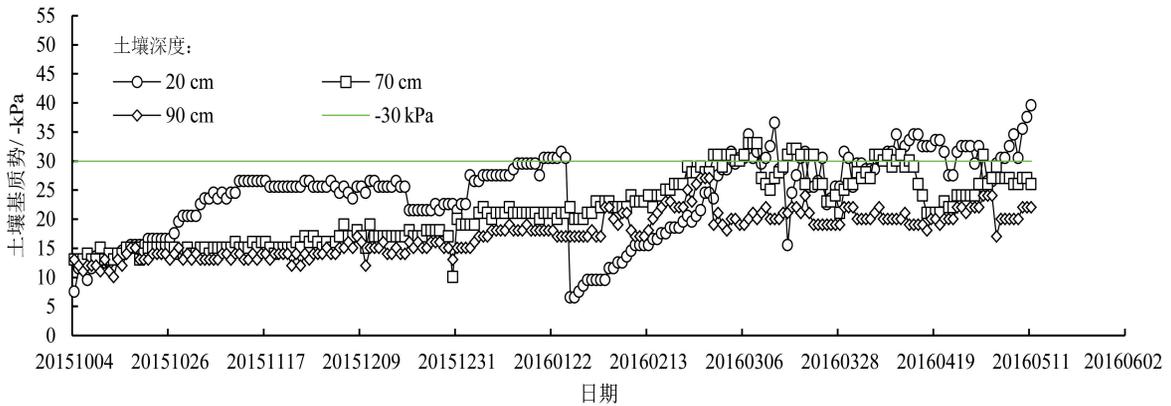
(c)S3 处理



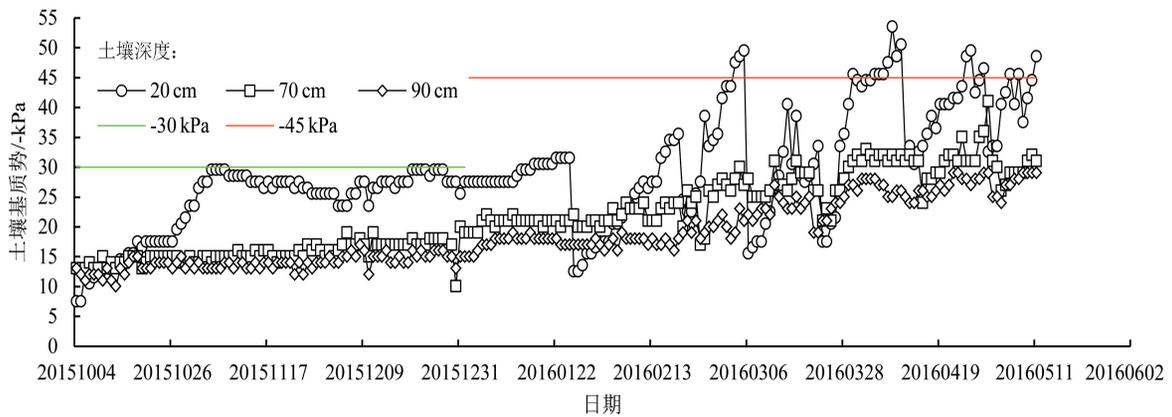
(d)S4 处理



(e)S5 处理



(f)S6 处理



(g)S7 处理

图3 各处理08:00滴头正下方不同深度土壤基质势

## 2.2 番茄不同生育期土壤含水率空间分布情况

图4表示番茄不同生育期内(试验开始灌溉前、定苗时、开花坐果初期、开花坐果后期、结果盛期)不同处理土壤体积含水率的空间分布情况。

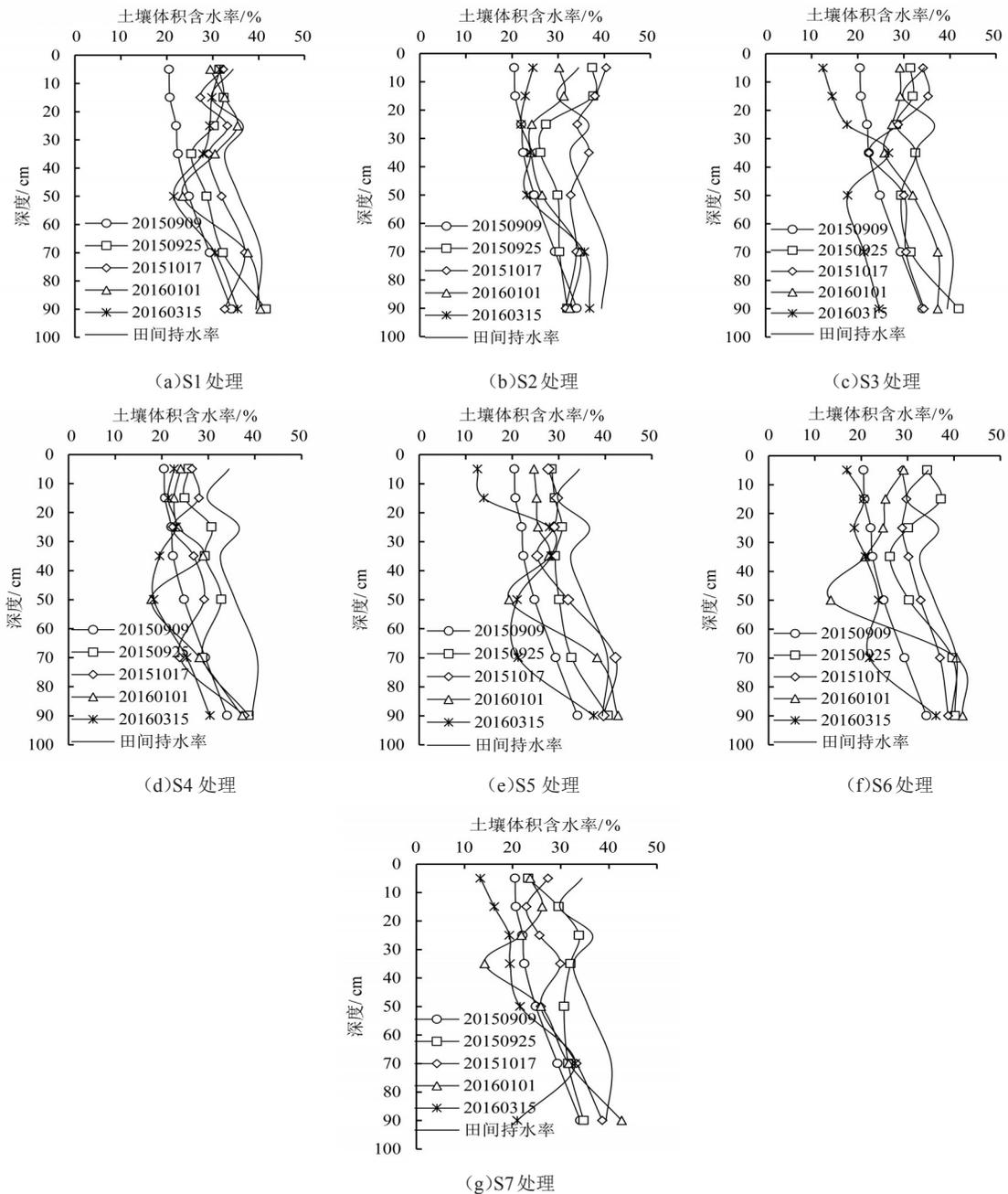


图4 番茄不同生育期内不同处理土壤体积含水量的空间分布情况

由图4可知,试验开始灌溉之前,所有处理不同深度土壤水分的分布情况基本一致,总体上随着土层深度的增加,土壤含水率逐渐增加,其中0~40、40~60、60~80、80~100 cm土层平均土壤含水率分别为21.4%、24.8%、29.3%和34.1%,分别为田间持水率的65%、69%、72%和86%。因为各处理第1次大水量造墒灌溉以及缓苗阶段20 cm深度土壤基质势都控制在-15 kPa,在定苗时各处理的土壤含水率都显著升高,0~40、40~60、60~100 cm土层平均土壤含水率分别为30.3%、31.7%和35.5%,分别达到田间持水率的91%、89%、89%。

S1处理在番茄各生育阶段0~40 cm和60~100 cm深度土层平均土壤含水率变化不大,基本维持在30.5%和35.9%左右,分别为田间持水率的92%和90%左右,而40~60 cm深度土层的土壤含水率不断下降,平均土壤含水率从31.9%降低到21.5%,降低了32.6%(图4(a))。这说明S1处理番茄根系主要吸收利用60 cm土层以上的土壤水分;0~40 cm土层的土壤含水率基本保持不变,是由于灌溉水可以运动到40 cm深度,从而及时补充了0~40 cm土层的土壤水分消耗。

S2和S3处理在番茄开花坐果期的土壤水分空间分布情况同S1处理的基本一致,除40~60 cm深度土层土壤水分略有消耗外,整个土体土壤含水率基本保持不变,平均为田间持水率的89%左右。部分时间0~20 cm土层土壤含水率大于田间持水率是因为取土前1 d进行了灌溉。到番茄结果盛期,S2处理0~60 cm土体土壤含水率显著降低,由开花结果期的31.5%降低到结果期的23.3%,降低了25.9%(图4(b)),而S3处理0~100 cm整个土体土壤水分明显降低,由开花结果期的32.2%降低到结果期的19.9%,降低了38.1%(图4(c))。这说明在开花坐果期S2和S3处理番茄根系主要吸收利用60 cm土层以上土壤水分,结果期S2处理仍主要吸收利用60 cm土层以上的土壤水分,而S3处理番茄根系可吸收利用70 cm及更深土层的土壤水分。

S4处理番茄开花坐果期0~30 cm和60~100 cm深度土层平均土壤含水率变化不大,分别平均为25.4%和32.4%左右,保持在田间持水率的76%和81%左右,而40~60 cm深度土层的土壤含水率不断下降,平均降低了39.0%;番茄结果期30~100 cm土层土壤含水率明显降低,平均值为23.9%,为田间持水率的63%,较开花坐果期平均降低了17.3%(图4(d))。说明S4处理开花坐果期番茄根系主要吸收利用60 cm深度土层以上的土壤水分,结果期后番茄根系可以吸收利用到70 cm土层以下的土壤水分。

与S1—S4处理不同,S5、S6和S7处理番茄开花坐果期0~60 cm深度土层平均土壤含水率不断降低,平均土壤含水率由31.5%降低到22.6%,平均降低了28.0%;进入番茄结果期后,整个土体尤其是0~60 cm土层的土壤含水率持续降低,并且土壤基质势阈值控制越低处理,整个土体土壤含水率越低,S5、S6和S7处理0~60 cm深度土层平均土壤含水率分别降低到20.8%、20.7%和18.6%,降低到田间持水率的61%、61%和54%;0~100 cm深度土层平均土壤含水率分别降低到24.3%、24.0%和21.9%,降低到田间持水率的66%、66%和60%(图4(e)、图4(f)和图4(g))。这说明S5、S6和S7处理开花坐果期番茄根系主要吸收利用60 cm土层以上的土壤水分,结果期后番茄根系可以吸收利用到70~100 cm土层的土壤水分,每次的灌水不足以补充土壤水分的消耗,造成整个土体土壤含水率不断降低。

### 2.3 不同处理番茄的产量及相关商品果品质指标

各处理番茄单株商品果数、单果质量、产量和畸形果率情况见表3。各处理番茄单株商品果数不同。其中S1、S2、S3、S4和S7处理单株商品果数多,平均为14.8个/株;S5处理单株商品果数最少,为11.2个/株,比S1、S2、S3、S4和S7处理平均单株果数减少了24.7%(表3)。

表3 不同处理番茄单株商品果数、单果质量、产量和畸形果率

处理	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
果数/(个·株 <sup>-1</sup> )	14.0±4.0a	14.1±1.2a	15.4a±2.0	15.3±1.5a	11.2±1.3a	13.2±1.7a	15.3±3.2a
单果质量/g	164.0±50.4a	162.1±14.3a	173.1a±25.0	153.4±17.4a	184.5±23.0a	178.4±22.7a	168.4±36.5a
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	116 000±42 000b	115 000±1 5000b	135 000a±22 000	119 000±19 000ab	104 000±23 000b	118 000±36 000b	129 000±39 000ab
畸形果率/%	25.7±8.7a	16.3±5.2ab	26.6a±5.9	26.5±5.4a	9.6±5.6bc	7.7±5.2c	7.4±3.1c

注 同一行数据后不同小写字母表示在P<5%水平上差异显著,相同小写字母表示在P<5%水平上无显著差异。

不同处理商品果平均单果质量为169.1 g,其中S4处理单果质量最小为153.4 g,S5处理单果质量最大为184.5 g,但各处理单果质量没有显著差异(表3)。

不同处理番茄的产量不同。其中S3和S7处理番茄的产量高,平均达到132 000 kg/hm<sup>2</sup>,其次是S1、S2、S4和S6处理,平均产量117 000 kg/hm<sup>2</sup>,大约为S3和S7处理平均值的88.6%,S5处理番茄产量最低,为103 800 kg/hm<sup>2</sup>,为S3和S7处理平均值的78.6%(表3)。处理间番茄产量的差异,主要是由于单株商品果数的差异造成的。

不同处理番茄畸形果率有很大差异。其中S1、S3、S4的畸形果率最大,平均为26.3%;其次是S2处理,畸形果率为16.2%;S5处理的畸形果率为10.5%;S6和S7处理的畸形果率最低,平均为8.1%(表3)。

综上所述,S3处理番茄的产量高,但畸形果率也高,而S7处理番茄的产量高且畸形果率低。由此可知,对于番茄生长发育而言,在番茄开花坐果期土壤基质势阈值控制在-30 kPa、结果期土壤基质势阈值控制在-45 kPa,有利于番茄的高产和降低畸形果率。

### 2.4 不同处理灌溉次数、灌水量及累计灌水量和灌溉水利用效率

图5表示不同处理番茄整个生育期内累计灌水量。由图5可知,不同处理番茄的灌溉次数和灌水量明显受控制灌溉的土壤基质势阈值的影响。番茄定苗后,7个处理的累计灌水量开始分成2组,其中在番茄开花坐果期土壤基质势阈值控制在-15 kPa的S1—S3处理平均2~4 d灌溉1次,累计灌水量明显高于土壤基质

势阈值为-25 kPa(灌溉频率为3~7 d/次)和-30 kPa(灌溉频率为3~9 d/次)的S4—S7处理,并且随着番茄的生长发育,2组处理累计灌水量的差距不断增大。当番茄进入结果期后,S1和S2处理(灌溉频率仍为2~4 d/次)的累计灌水量持续增大,与S3处理(灌溉频率为2~5 d/次)累计灌水量的差异也逐渐增大;S4—S7处理中,土壤基质势阈值调升高到-15 kPa的S5处理(灌溉频率为2~5 d/次)累计灌水量逐渐大于其他3个处理,其中S4、S6和S7处理结果期的灌溉频率分别为3~8、3~8、4~9 d/次。

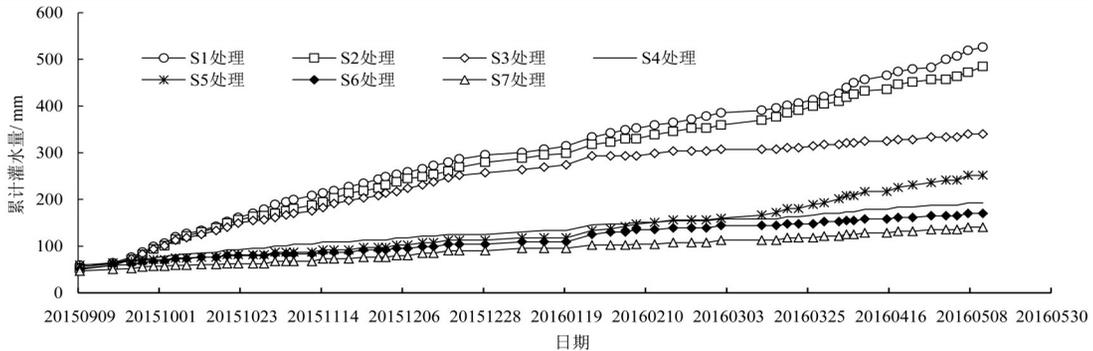


图5 番茄不同处理整个生育期内的累计灌水量

试验结束时,S1处理整个生育期灌溉61次,累计灌水量最大,达到526 mm;其次是S2处理,灌溉58次,累计灌水量为484 mm;之后分别为S3、S5、S4和S6处理,灌溉次数分别为46、34、35、27次,累计灌水量分别为340、252、193、170 mm;S7处理的灌溉次数为24次,累计灌水量仅为141 mm,分别为S1—S6处理累计灌水量的26.7%、29.0%、41.3%、73.0%、55.9%和82.7%。

土壤基质势阈值明显影响番茄灌溉水利用效率(图6),图6不同小写字母表示在 $P<5\%$ 水平上差异显著。番茄整个生育期土壤基质势阈值控制最高的S1处理,其灌溉水利用效率最低,仅为 $22.0 \text{ kg/m}^3$ ,其次是S2处理,灌溉水利用效率为 $23.7 \text{ kg/m}^3$ ;土壤基质势阈值控制最低的S7处理,其灌溉水利用效率最高,达到 $92.0 \text{ kg/m}^3$ ,是S1处理灌溉水利用效率的4.2倍。

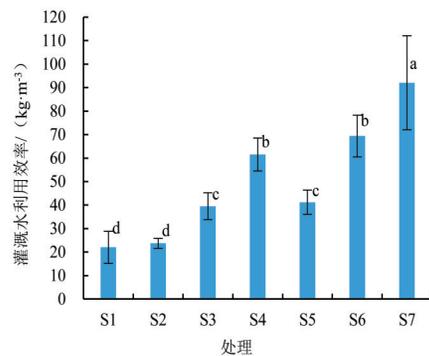


图6 番茄不同处理整个生育期内的灌溉水利用效率

番茄品种“凯特1号”是河北当地常见种植品种,适合温室大棚栽培,日光温室冬春茬生育期长达250 d左右,永清海泽田农业示范园现代管理水平下(灌溉方式为滴灌,但按照管理者的经验进行灌溉施肥)产量可达 $75\ 000 \text{ kg/hm}^2$ ,灌溉水量大约为450 mm。2015—2016年生产季,采用20 cm深度土壤基质势阈值指导滴灌灌溉之后,温室冬春茬番茄产量在 $103\ 800\sim 132\ 000 \text{ kg/hm}^2$ ,平均达到 $117\ 000 \text{ kg/hm}^2$ ,整个生育期灌水量 $141\sim 526 \text{ mm}$ ,平均为300 mm;其平均产量是当地高产节水管理水平下的1.6倍,平均灌水量是当地高产节水管理水平下的66.7%。因此,日光温室中采用20 cm深度土壤基质势阈值指导冬春茬番茄进行滴灌灌溉,可以达到明显的增产节水效果。

### 3 讨论

日光温室中当控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势指导灌溉时,可以明显影响不同深度土壤水分状况,并且土壤基质势阈值越低,可影响的土层深度越深,如当土壤基质势阈值在-45~-30 kPa时,番茄生长发育过程中0~100 cm整个土体土壤含水率不断降低,这与康跃虎等<sup>[5]</sup>的研究结果略有不同。康跃虎等<sup>[5]</sup>在华北地区马铃薯大田试验研究中发现,调控滴头正下方20 cm深度土壤基质势阈值,可以明显影响到作物根系分布层的土壤水分状况,土壤基质势阈值越高,50 cm深度范围内的土壤水分状况越高,土壤基质势阈值越低,以滴头为中心形成的干燥范围越大。这主要是因为康跃虎等的研究是在大田开展的,在马铃薯生长过程中有降雨的发生,降雨在一定程度上降低了灌溉(土壤基质势阈值)对作物根系分布的影响,而在日光温室中,灌溉是土壤水分的唯一来源,故土壤基质势阈值对番茄根系分布的影响更加显著。

土壤水分状况与番茄果实大小、坐果数、畸形果及产量等密切相关。番茄生育前期水分过多,植株营养生长过旺,使得大量的养分集中于茎叶生长部位,而较少的用于花、果,导致落花落果,降低坐果数,产生畸形果;但番茄生育期土壤水分过低,引起植株干旱胁迫,会造成大量落花落果,形成小果和畸形果,产量降低<sup>[12]</sup>。本研究除S5处理外,其他6个土壤基质势阈值处理番茄的商品果数和商品单果质量没有显著差异,说明番茄生育期土壤基质势控制在-45~-15 kPa范围时,其土壤水分状况不会引起番茄明显的落花落果。但土壤基质势阈值较高的S1、S2、S3和S4处理,番茄的畸形果率大,而土壤基质势阈值低的S6和S7处理,番茄畸形果率最低,即番茄生育期土壤基质势阈值控制较低有利于降低番茄的畸形果率,这很可能与不同处理小区内番茄冠层温湿度不同有关。上述研究结果与刘浩等<sup>[13]</sup>的结果基本一致。刘浩等<sup>[13]</sup>认为开花坐果期过度水分亏缺(田间持水率的65%以下)会降低坐果数、易形成小果和畸形果;结果期水分过高(田间持水率的80%以上)会降低番茄产量,而水分过低(田间持水率的65%以下)会使坐果数降低、畸形果率增加、产量降低。朱德权等<sup>[14]</sup>也指出果实成熟时,若土壤水分过多和干湿变化剧烈,易引起裂果;番茄要求比较干燥气候,空气相对湿度宜保持在45%~55%。

综合番茄的产量、畸形果率和灌溉水利用效率,发现番茄开花坐果期土壤基质势阈值控制在-30 kPa(0~60 cm深度以上范围土壤含水率保持在田间持水率的80%左右)、结果期土壤基质势阈值控制在-45 kPa(整个土体0~100 cm深度土壤含水率保持在田间持水率的60%),番茄产量高(129 500 kg/hm<sup>2</sup>)和畸形果率低(7.4%),并且灌水量少(141 mm),灌溉水利用效率高(92.0 kg/m<sup>3</sup>)。该结果同王贺辉等<sup>[15]</sup>、郭艳波等<sup>[16]</sup>、刘浩等<sup>[13,17]</sup>、张辉等<sup>[18]</sup>、张艳红等<sup>[19]</sup>的研究结果并不完全一致。例如张辉等<sup>[18]</sup>东北温室覆膜滴灌早春茬番茄的研究表明,番茄开花坐果期和结果期灌溉控制下限土壤基质势(30 cm深处)分别控制在-20和-60 kPa左右为宜;张艳红等<sup>[19]</sup>在河北日光温室覆膜滴灌的研究指出,滴头正下方20 cm深度土壤基质势下限在-10 kPa时,番茄产量最高,但是灌溉水利用效率最低,考虑到产量既高、灌溉水利用效率又高,推荐早春茬口番茄的滴头正下方20 cm深度土壤基质势下限控制在-30~-20 kPa最为适宜。这可能与研究地区、番茄茬口、品种、计划湿润层深度等的不同有关。

## 4 结论

1)日光温室中控制滴头正下方20 cm深度土壤基质势可以明显影响0~100 cm深度土壤水分状况。在番茄开花坐果期,当土壤基质势阈值在-30 kPa甚至更高时,番茄主要吸收利用60 cm深度以上范围的土壤水分,整个土体土壤含水率基本保持在田间持水率的87%左右。进入番茄结果期后,当土壤基质势阈值控制在-25~-15 kPa时,番茄仍主要吸收利用0~60 cm深度以上范围的土壤水分,整个土体土壤含水率基本保持在田间持水率的77%左右;当土壤基质势阈值降低到-45~-30 kPa时,整个土体土壤水分不断被消耗,但是滴灌高频灌溉条件下土壤含水率基本仍保持在田间持水率的60%以上。

2)番茄生育期内土壤水分变化剧烈不利于番茄的坐果和高产。番茄的产量随着结果期土壤基质势阈值的降低而升高,结果期土壤基质势阈值最低的S3和S7处理(-45 kPa)产量最高。

3)番茄生育期内土壤基质势控制在-25 kPa以上或者结果期土壤基质势阈值降低到-30 kPa,畸形果率高,灌溉水利用效率低;生育期内土壤基质势控制在-30 kPa或者结果期土壤基质势阈值降低到-45 kPa,畸形果率低,灌溉水利用效率高。

4)日光温室中采用20 cm深度土壤基质势阈值指导冬春茬番茄进行灌溉,在开花坐果期土壤基质势阈值控制在-30 kPa、结果期土壤基质势阈值控制在-45 kPa,有利于番茄的高产和降低畸形果率,并且灌水量少,灌溉水利用效率高,可以获得明显的增产节水效益。

**致谢:**对河北省廊坊市永清县海泽田农业示范园区在试验研究过程中给予的支持表示感谢!

### 参考文献:

- [1] 范凤翠. 设施蔬菜控漏灌水机理与技术研究[D]. 保定:河北农业大学, 2010.
- [2] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京:中国农业大学, 2016.
- [3] 喻景权. “十一五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2011, 1(2):11-23.
- [4] 康跃虎. 加快微灌技术推广应用和健康发展的对策和建议[J]. 科技促进发展, 2012(1):31-39.
- [5] 康跃虎, 王凤新, 刘士平, 等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2):66-72.
- [6] 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. 节水灌溉, 2004(3):11-12,15.

- [ 7 ] 张超,康跃虎,万书勤,等. 滴灌条件下土壤基质势对豇豆产量和灌溉水利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4):30-33.
- [ 8 ] 姚素梅,杨雪芹,吴大付. 滴灌条件下土壤基质势对马铃薯光合特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(7):73-77.
- [ 9 ] KANG Yaohu, WAN Shuqin. Effect of soil water potential on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use under drip irrigation[J]. Scientia Horticultura, 2005, 106(3):275-292.
- [10] 刘雪芹,范兴科,马甜. 滴灌条件下砂壤土水分运动规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3):56-59.
- [11] 董丽艳,王卫华. 滴灌条件下原状土与扰动土水分运动特性[J]. 水土保持学报, 2017, 18(1):28-31.
- [12] 程智慧. 蔬菜栽培学各论[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [13] 刘浩,段爱旺,孙景生,等. 温室滴灌条件下土壤水分亏缺对番茄产量及其形成过程的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2 699-2 704.
- [14] 朱德权,朱德波. 日光温室番茄产生畸形果的主要原因及防治措施[J]. 新农村:黑龙江, 2013(12):176.
- [15] 王贺辉,赵恒,高强,等. 温室番茄滴灌灌水指标试验研究[J]. 节水灌溉, 2005(4):22-23, 25.
- [16] 郭艳波,冯浩,吴普特. 西北地区不同土壤水分处理对温室大棚番茄产量和耗水的影响[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1):50-57.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张艳红,焦艳平,赵勇,等. 日光温室滴灌条件下土壤基质势对番茄生长的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011(7):5-7, 11.

## Using Soil Matrix Potential Underneath the Drip Emitter to Regulate Soil Moisture Distribution and Improve Greenhouse Tomato Production

WAN Shuqin<sup>2</sup>, YAN Zhenkun<sup>4</sup>, KANG Yuehu<sup>2,3</sup>, YUAN Baozhong<sup>4\*</sup>, JIAO Yanping<sup>1</sup>, SONG Jia<sup>5</sup>

(1. Hebei Engineering Research Center for Agricultural Water Saving\Hebei Provincial Academy of Water Resources, Shijiazhuang 050057, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 5. Agricultural Office of Tuanbo Town, Jinghai County, Tianjin 301636, China)

**Abstract:**【Objective】 Soil moisture controls crop growth. In this paper, we investigated how to regulate soil moisture distribution by drip irrigation using the matrix potential measured underneath the drip emitter in attempts to improve greenhouse tomato production.【Method】The experiment was for winter-spring season tomato grown in a solar greenhouse. The treatments were to maintain soil matrix potential 20cm underneath the drip emitter at seven levels: -15 kPa (S1), between -15 kPa and -30 kPa (S2), between -15 kPa and -45 kPa (S3), between -25 kPa and -25 kPa (S4), between -30 kPa and -15 kPa (S5), between -30 kPa and -30 kPa (S6), and between -30 kPa and -45 kPa (S7), during flowering-fruit setting and fruiting stage. In each treatment, we measured spatiotemporal soil moisture distribution, yield and visual defects of the fruits, as well as use efficiency of the irrigation water.【Result】The matrix potentials had a significant impact on moisture distribution in 0~100 cm soil. ① When the matrix potential was controlled at -30 kPa or above during flowering -fruit setting stage, most water in 0~60 cm soil was taken up by roots while the water in soil below 70 cm remained almost unchanged; the average volumetric water content in 0~60 cm soil was 28.6%, approximately 84% of the field water capacity. In 60~100 cm, the average soil moisture was 36.2%, about 90% of the field water capacity. ② When soil matrix potential was controlled between -15 kPa and -25 kPa during the fruiting stage, the soil water content was approximately 77% to 91% of the field water capacity, and most water in 0~60 cm was used by the crop, compared to water below 70 cm. ③ When the soil matrix potential was between -30 kPa and -45 kPa, crop could take water from 80~100 cm soil and the soil water content reduced to 66% of the field water capacity. There was a significant difference in tomato yield, fruit defects, and use efficiency of irrigation water between the treatments. The yield was comparatively high in S3 and S7, and low in S5 treatment; visual fruit defect rate was high in S1, S3 and S4, and low in S6 and S7; the irrigation water use was least efficient in S1 and most efficient in S7.【Conclusion】Controlling soil matrix potential at 20 cm below the emitter at -30 kPa during the flowering-fruit setting stage, -45 kPa during fruiting stage, improved tomato yield and irrigation water use efficiency; it also reduced visual fruit defects.

**Key words:** solar greenhouse; moisture; soil matrix potential; irrigation; tomato; yield

责任编辑:白芳芳