渠丽娜,郭文忠,孙维拓,等.基于蒸发皿蒸发量的设施番茄灌溉优化研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):87-98.
Qu L N, Guo W Z, Sun W T,et al.Optimization study of greenhouse tomato irrigation based on pan evaporation[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(6):87-98.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202310050

基于蒸发皿蒸发量的设施番茄灌溉优化研究

渠丽娜[1,2],郭文忠[1,2],孙维拓[1],高轶楠[2],王利春[1],梁新书[3],黄媛[4],李友丽[1*]

(1.北京市农林科学院 智能装备技术研究中心,北京 100097;2.天津农学院 园艺园林学院,天津 300384;
3.天津市农业科学院 农业资源与环境研究所,天津 300192;4.石家庄市农林科学研究院,河北 石家庄 050041)

摘　要:[目的]针对日光温室番茄栽培的高效节水灌溉需求,进行基于蒸发皿水面蒸发量(E_p)的日光温室番茄灌溉量优化研究。[方法]根据直径为20 cm的标准蒸发皿水面蒸发量(E_p)设置3个灌溉量处理:1.0 E_p(CK)、0.8 E_p(T1)、0.6 E_p(T2),通过深入探讨番茄根系主要分布土壤层(0~40 cm)土壤含水量响应特征,结合对植株生长指标、果实产量和灌溉水利用效率的分析,进一步优化日光温室番茄栽培的灌溉量。[结果]灌溉量处理影响了土壤含水量的时空分布特征。CK、T1和T2处理0~40 cm土壤层平均土壤含水量为田间持水量的77.7%~103.4%、65.4%~98.9%、60.9%~91.1%,灌溉量越高土壤含水量越高;3个处理平均土壤含水量呈逐渐下降的趋势,且T1、T2处理下降幅度大于CK。随生育期推进,CK各土壤层土壤含水量的差异增加,T1和T2处理呈相反变化趋势。CK和T1处理0~10 cm土壤层土壤含水量波动幅度最大,T2处理为10~20 cm土壤层;整体上看,T1和T2处理处理各土壤层的土壤含水量波动幅度大于CK,但是转色期后T1处理30~40 cm和T2处理20~40 cm土壤层土壤含水变化不明显。番茄株高、茎粗、叶面积及地下、地上部鲜干重在不同处理之间的差异不显著($P>0.05$)。与CK相比,T1和T2处理单果重和总产量分别降低了3.41%、4.07%和3.25%、3.97%,但番茄总产量的差异未达到显著水平($P>0.05$)。3个处理灌溉水利用效率分别为30.1 kg•m^{-3}、35.1 kg•m^{-3}和43.9 kg•m^{-3},T1和T2处理相比CK分别提高了16.77%和46.15%。[结论]灌溉量为0.6 E_p的T2处理,0~40 cm土壤层平均土壤含水量维持在田间持水量60%以上,植株生长和果实总产量未受影响,灌溉水利用效率明显高于其它2个处理。因此,认为水面蒸发皿灌溉系数K_p 0.6时为日光温室番茄提供了适宜灌溉量,有利于实现日光温室番茄节水高效栽培。

关键词:灌溉制度; 标准蒸发皿; 灌溉系数; 土壤含水量; 灌溉水利用效率
中图分类号:S641.2　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1671-8151(2024)06-0087-12

番茄作为我国设施栽培的主栽作物,近年来设施栽培面积稳定在约100万公顷,2021年产量突破6700万吨,在设施蔬菜生产与需求供应中的地位非常重要[1]。番茄生长发育需水量较大,对水分供应有较高的敏感性[2]。在日光温室生产中,灌溉是作物获取所需水分的主要途径,也是最频繁的农事操作之一,对番茄的生长发育、果实产量和品质形成有至关重要的作用[3-7]。当前,设施番茄栽培中已普遍使用滴灌、渗灌等节水灌溉技术,然而什么时候灌溉与灌溉多少仍主要依赖生产者经验,且普遍认为"大水大肥"是促高产的关键,从而导致水资源浪费严重、灌溉水利用效率偏低等问题凸显,使节水高效生产难以真正实现[8-10]。因此,开展日光温室番茄栽培的灌溉量优化研究,对实现设施番茄的节水、绿色、优质、高效生产,保障设施农业可持续发展具有重要意义。前人基于参考作物需水量法、土壤含水量法、土壤水势等方法进行灌溉决策[11],针对温室作物的灌溉量优化进行了大量研究,有力地推进了节水灌溉技术的发展,促进了作物生长、产量形成和水分利用效率提

收稿日期:2023-10-31　　**修回日期:**2024-03-28
基金项目:石家庄市科技计划项目(221490072A);河北省重点研发计划项目城郊设施蔬菜节水增效技术集成与示范(21326904D);宁夏农林科学院对外科技合作专项(DW-X-2023001);农业物联网技术北京市工程实验室(PT2023-29)
作者简介:渠丽娜(OCRID: 0009-0000-8920-7240),硕士,研究方向:设施环境调控与蔬菜高效栽培
* **通信作者:**李友丽(OCRID: 0009-0007-3743-9841),高级农艺师,研究方向:设施蔬菜水肥一体化技术, E-mail:liyl@nercita.org.cn

高[12-15]。然而,这些方法的应用受限仪器精度要求高、成本高、操作繁琐以及参数项繁多等。蒸发皿法是一种估算作物蒸发蒸腾量的经验公式法,它以蒸发皿累积水面蒸发量(E_p)作为灌水依据,具有简单实用易操作的特点,目前在国内外设施农业生产中广泛应用[16-17]。在温室番茄的灌溉研究中,许多学者通过分析不同灌溉量处理下番茄生长发育的差异,确定适宜的蒸发皿灌溉系数(K_p),建立了基于E_p的灌溉制度。朱艳等[18]研究发现灌溉系数增大对株高、茎粗、叶面积及根干重均产生了极显著的积极影响,1.0 K_p处理可达到较高的节水高产效果。Liu等[19]根据E_p设置了3个K_p,结果显示0.9K_p处理的番茄产量和水分利用效率最高。Zhang等[20]分析了3个不同灌溉量处理(0.5E_p、0.7E_p和0.9E_p)对温室番茄产量与灌溉水利用效率的影响,结果表明砂壤土下0.7 E_p处理番茄产量显著高于其它处理,砂壤土、壤土和粘土栽培下的平均灌溉水利用效率较0.5E_p和0.9E_p提高了17.1%、9.6%。然而,上述基于蒸发皿水面蒸发量确定灌溉量的研究,重点主要聚焦在灌溉量对植株生长发育和果实产量、品质及水分利用效率的影响上,缺乏结合作物根系分布土壤层土壤含水分响应特征分析的深入探讨,使日光温室番茄栽培灌溉制度优化空间存在局限。因此,本研究基于标准水面蒸发皿的累积水面蒸发量(E_p)设定了3个灌溉量,分别为1.0 E_p、0.8 E_p和0.6 E_p(灌溉系数K_p依次是1.0、0.8和0.6),探究灌溉量处理下番茄根系主要分布土壤层(0~40 cm)土壤含水量的时空分布特征,及对番茄生长、产量和灌溉水利用效率的影响,进一步优化日光温室番茄灌溉量,旨在为日光温室番茄的节水高效栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2022年3月22日-7月6日在北京市房山区石楼镇北京弘科农场(39.62 °N,115.97 °E)日光温室中进行,东西长85 m,南北宽7.2 m。土壤质地为砂壤土,土壤速效氮、磷、钾含量分别为0.10、0.50、0.46 g·kg^{-1},容重为1.37 g·cm^{-3},田间持水量为0.35 cm^3·cm^{-3}(体积含水量)。供试番茄品种为'丰收74-560 RZ F1'(荷兰瑞克斯旺公司),3月22日番茄幼苗长至四叶一心时,选择长势均匀一致的健壮苗,定植在覆膜栽培畦上,双行定植,行距140 cm,株距35 cm,密度为3株·m^{-2}。5月19日番茄第四穗果座住时去除生长点。采用滴灌灌溉,每畦布置2根滴灌带,滴头间距30 cm,滴头流量为1.38 L·h^{-1},采用精度0.001 m^{3}的水表控制灌水定额。定期观察并记录番茄生育期(表1)。

表1 番茄生育期记录

Table 1 Records of tomato development stages

生育期 Development stages	日期 Date	天数/d Days
营养生长期	3月22日—4月10日	20
开花坐果期	4月11日—4月20日	10
果实膨大期	4月21日—5月31日	41
果实转色期	6月1日—6月7日	7
成熟采收期	6月8日—7月6日	29

1.2 试验设计

定植后灌溉定植水20 m^3,植株缓苗后于4月6日开始进行灌溉量处理。本试验采用中环天仪ADM7A型气象蒸发皿(直径20 cm,深11 cm)测定番茄植株冠层的水面蒸发量,以累积水面蒸发量(E_p)为标准确定灌溉量,依据相关文献[21-22],设置3个处理,即蒸发皿的灌溉系数(K_p)分别为1.0、0.8和0.6,对应的灌溉量依次为1.0 E_p(CK)、0.8 E_p(T1)和0.6 E_p(T2)。每处理设置3次重复,每个重复小区面积为5.9 m×7 m,随机排布。气象蒸发皿放置于温室中央,于3月22日起,每天上午8:00用精度为0.1 mm的配套量筒测量每日水面蒸发量,将每日水面蒸发量进行累加得到累积水面蒸发量,用于灌溉量计算(公式1)。每次测量水面蒸发量后清洗蒸发皿并加水至20 mm。

$$I = K_P \times E_p \times 10^{-3} \times A \quad (1)$$

式中I为灌溉量(m^3);K_p为蒸发皿的灌溉系数;E_p为累积水面蒸发量(mm);A为小区面积(m^2)。

第1次灌溉处理时,植株苗龄偏小,耗水量低,实际灌溉量为灌溉量计算值的3/5,第2次灌溉起,灌溉间隔天数为5~10 d。试验期间各处理日常生产管理一致。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　温室环境因子

温室中央,距地面2 m处布置辐射传感器(LI200X,LICOR,美国,测量范围:400～1100 nm,精度:±3%)监测太阳总辐射(R_s),连接数据采集仪(CR1000,Campbell,美国)记录数据,采集频率为每次5 min;距离地面1.5 m处布置温湿度记录仪(UX100-011A, HOBO, Onset Computer Corporation,美国,温度传感器测量范围:－20～70 ℃,精度:±0.21℃,湿度传感器测量范围:0%～95%,精度:±2%)监测室内空气温度(T)和相对湿度(RH),采集频率每次5 min。

1.3.2　土壤含水量

在各处理小区的中间位置,栽培畦上相邻两株番茄中间埋设土壤水分传感器(ECH2O EC-5 Moisture sensor, Decagon Devices Ltd, Pullman,美国,测量范围:0%～100%,精度:±3%),埋设深度分别为5、15、25、35 cm,用于监测0～10,10～20,20～30与30～40 cm这4个土壤层的土壤含水量(图1所示)。采用EM50数据采集器自动记录数据(每次5 min)。

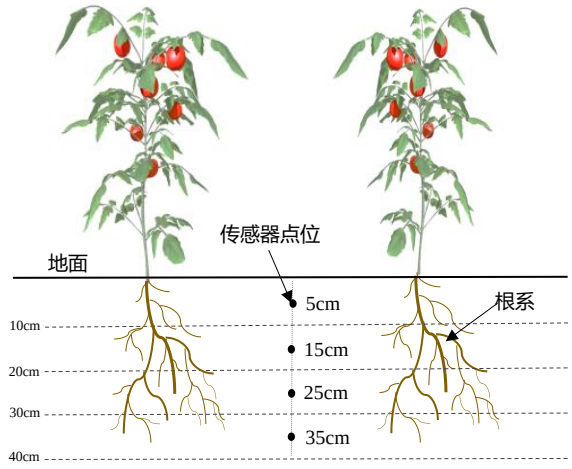


图1　土壤水分传感器布置示意图

Fig.1　Site layout of soil moisture sensors

1.3.3　番茄生长指标

每个处理小区随机选取5株番茄植株样本,测定株高、茎粗、叶面积,采集频率为每次7～10 d。株高采用卷尺(精度:0.1 cm)测量茎基部到生长点的长度;茎粗采用游标卡尺(精度:0.05 mm)测量茎基部茎秆直径;叶面积为整株单叶叶面积之和,单叶叶面积(LA)由叶长(叶柄基部到叶尖的距离)与叶宽(与主脉垂直的最大宽度)计算而来,计算公式[23]如下所示:

$$LA=\begin{cases}0.378\,2ab, 0\ \text{cm}<a<20\ \text{cm}\\ 0.318\,4ab, a\geqslant 20\ \text{cm}\end{cases}\qquad(2)$$

式中LA为单叶叶面积(cm^2);a为叶长(cm);b为叶宽(cm)。

1.3.4　番茄植株地下、地上部鲜干重

待番茄生长指标测定后,将番茄植株样品从茎基部断开,分成地下部(根系)和地上部(不含果实),用电子天平(精度:0.01 g)称鲜重;然后放入烘箱105 ℃杀青30 min,85 ℃烘干至恒重,再用分析天平(精度:0.000 1 g)称干重。

1.3.5　番茄产量

在成熟采收期前、中、后3个阶段取样监测果实单果重(电子天平,精度:0.01 g)共计3次,计算平均单果重;每次采收测量各处理重复小区的产量(电子秤,精度为0.05 kg),统计总产量。

1.3.6　灌溉水利用效率(IWUE)

$$IWUE=\frac{Y}{I}\qquad(3)$$

式中IWUE为灌溉水利用效率($kg\cdot m^{-3}$);Y为番茄总产量($kg\cdot hm^{-2}$);I为总灌溉量($m^3\cdot hm^{-2}$)。

1.4　数据分析

采用Microsoft Excel 2021进行数据计算与图表制作,SPSS 25.0统计软件进行差异显著性分析(Duncan新复极差法),显著性水平为$P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　日光温室气象因子动态变化

由图2可知,番茄全生育期日光温室内日均太阳辐射(R_s)变化范围为70.7～413.9 $W\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$,波动幅度较大,这与天气情况密切相关。温室内日均空气温度(T)的变化范围为14.5～30.5 ℃,日均相对湿度(RH)变化范围为38.0%～96.2%;整个监测期空气温度和相对湿度的平均值分别为24.2 ℃、72.6%,但日均空气温度和相对湿度整体呈现上升趋势,这与该茬口的室外气象环境有关

2.2　不同灌溉量处理的灌溉量

番茄植株冠层的累积水面蒸发量及全生育期灌溉次数、灌溉量结果如表2所示。从番茄定植(3月22日)至拉秧(7月6日),番茄植株冠层的累积

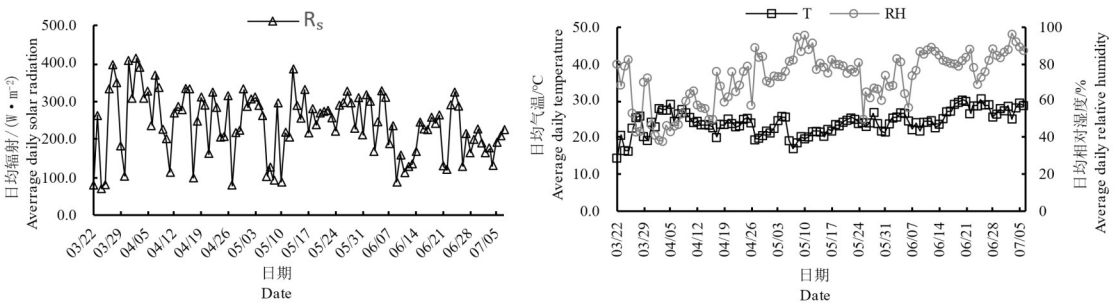


图2 日光温室内日均太阳辐射、空气温度及相对湿度

Fig.2 Average daily solar radiation, temperature, and relative humidity in solar greenhouse

水面蒸发量为240.5 mm,其中营养生长期、开花坐果期、果实膨大期、转色期和成熟采收期的日累积水面蒸发量依次是1.55、1.59、2.61、4.04和2.01 mm·d^{-1},转色期的日累积水面蒸发量最大。番茄各生育期灌溉次数分别为1、1、6、1、4次,全生育期共计14次(含定植水)。不同处理的总灌溉量依次为2 805.1、2 324.1、1 843.1 m^3·hm^{-2}。CK处理灌溉量最高,依次为T1、T2处理。与CK相比,T1、T2处理总灌溉量分别降低了17.15%、34.30%。

表2 累积水面蒸发量、灌溉次数和灌溉量

Table 2 The cumulative water surface evaporation, irrigation number, and irrigation amount of different treatments

生育期 Development stages	累积水面蒸发量/(mm·d^{-1}) Cumulative water surface evaporation	灌溉次数/次 Irrigation number	灌溉量/(m^3·hm^{-2}) Irrigation amount		
			CK(1.0 E_p)	T1(0.8 E_p)	T2(0.6 E_p)
营养生长期	1.55	1	309.6	247.6	185.7
开花坐果期	1.59	1	159.2	127.4	95.5
果实膨大期	2.61	6	1 070.1	856.1	642.0
果实转色期	4.04	1	283.4	226.8	170.1
成熟采收期	2.01	4	582.8	466.2	349.7
全生育期(含定植水)	/	14	2 805.1	2 324.1	1843.1

2.3 不同灌溉量处理下土壤含水量的时空分布特征

2.3.1 不同灌溉量处理0~40 cm土壤层的平均土壤含水量变化

由图3可看出,不同灌溉量处理对0~40 cm土壤层的土壤平均含水量存在影响。0~40 cm土壤层的平均土壤含水量从高到低依次为CK、T1和T2处理,即灌溉量越大土壤平均含水量越高。随生育期推进,各灌溉量处理的平均土壤含水量呈现逐渐下降的变化趋势。成熟采收期,CK和T1、T2处理0~40 cm土壤层的平均土壤含水量分别为0.272~0.362、0.229~0.346、0.213~0.319 cm^3·cm^{-3},土壤相对含水量保持在77.7%~103.4%、65.4%~98.9%、60.9%~91.1%。与对照CK相比,T1与T2处理0~40 cm土壤层的平均土壤含水量下降幅度更大,特别是采收中后期差异明显。

2.3.2 不同灌溉量处理各土壤层的土壤含水量变化

图4结果显示,不同处理各土壤层的土壤含水量存在差异。CK在果实膨大期前20~30 cm土壤层的土壤含水量较高,此后30~40 cm土壤层的土壤含水量逐渐高于其它土壤层,10~20 cm土壤层的土壤含水量始终最低。T1处理10~20 cm土壤层的土壤含水量较高,其次是0~10 cm、30~40 cm和20~30 cm土壤层。T2处理30~40 cm土壤层的土壤含水量在果实膨大后期前较高,进入转色期时已低于其它土壤层;20~30 cm土壤层的土壤含水量较低,与T1处理相似。此外,随着生育期推进,CK各土壤层的土壤含水量的差异增大,T1

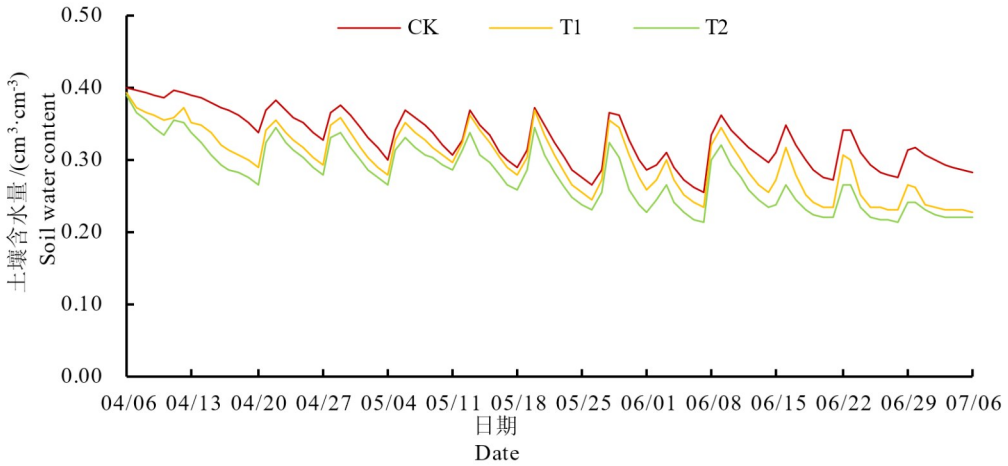


图3　0～40cm土壤层平均土壤含水量变化

Fig.3　Variation in average soil water content of 0～40 cm soil layer

和T2处理则呈现相反趋势。

由图4还可看出,不同土壤层的土壤含水量波动幅度存在差异,且与灌溉量有关。CK和T1处理0～10 cm土壤层的土壤含水量波动幅度最大,T2处理则是10～20 cm土壤层;3个处理30～40 cm土壤层的土壤含水量波动幅度均最小。整体上看,T1和T2处理各土壤层的土壤含水量变化幅度大于CK。但是,从转色期起T1和T2处理20～30 cm、30～40 cm土壤层的土壤含水量波动幅度逐渐减弱,其中30～40 cm土壤层较20～30 cm土壤层明显,T2处理较T1处理明显(图4-5);2个处理20～30、30～40 cm土壤层的土壤含水量也趋于最低值(0.219和0.217 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.218和0.195 $cm^3 \cdot cm^{-3}$),其明显低于CK该土壤层土壤含水量的最低值(0.244、0.275 $cm^3 \cdot cm^{-3}$)。

2.3.3　番茄各生育期不同灌溉量处理下的土壤含水量变化

对番茄各生育期中单个灌溉周期内土壤含水量对灌溉量处理的响应进一步分析,结果如图5所示。单个灌溉周期内整体呈现出土壤含水量随灌溉而升高,然后逐渐下降的变化趋势,这是灌溉水入渗根系分布土壤层和番茄根系吸收土壤水分共同作用的结果。对比同一周期灌溉起止时间点土壤含水量,发现CK的差异较小,其次是T1处理。从果实膨大期开始,CK土壤含水量对灌溉和根系吸收水分的响应增加,而T1和T2处理从开花坐果期开始响应明显,早于CK。这表明,随着生育期推进,植株对水分的需求增加;1.0 E_p灌溉量为番茄植株提供了更充足的水分,0.8 E_p和0.6 E_p灌溉量使番茄植株需要消耗土壤储存水。

进入转色期,各灌溉量处理20～40 cm土壤层含水量变化均小于0～20 cm土壤层,说明20～40 cm土壤层灌溉水的入渗量和根系吸水量均减少;特别是T1处理的30～40 cm土壤层和T2处理的20～40 cm土壤层土壤含水量变化不明显,认为灌溉水仅少量甚至未入渗到T1处理的30～40 cm土壤层和T2处理的20～40 cm土壤层,且对应土壤层根系可利用的水量偏低,相似情况从图4中亦可看出。

2.4　不同灌溉量处理的番茄株高、茎粗和叶面积

不同灌溉量处理下番茄植株株高、茎粗和叶面积变化如图6所示。随着定植天数增加,各处理番茄植株株高和叶面积均呈现出不断增大的趋势,植株茎粗先迅速增大再缓慢增加至平稳。从4月11日(第2次灌溉处理)开始,T2处理各生长指标均低于CK和T1处理,但差异不明显。总体来看,不同灌溉量处理对番茄植株株高、茎粗和叶面积没有产生显著影响。

2.5　不同灌溉量处理的番茄植株地下、地上部鲜干重

图7为不同灌溉量处理下番茄植株地下、地上部鲜干重的变化。番茄植株地下部根系与地上部营养生长体相互作用、相互影响。图7结果显示,各灌溉处理的番茄植株地下、地上部的鲜重和干重均呈现缓慢-快速-缓慢-平稳的变化趋势。根系经历快速增长阶段后早于地上部进入第2个缓

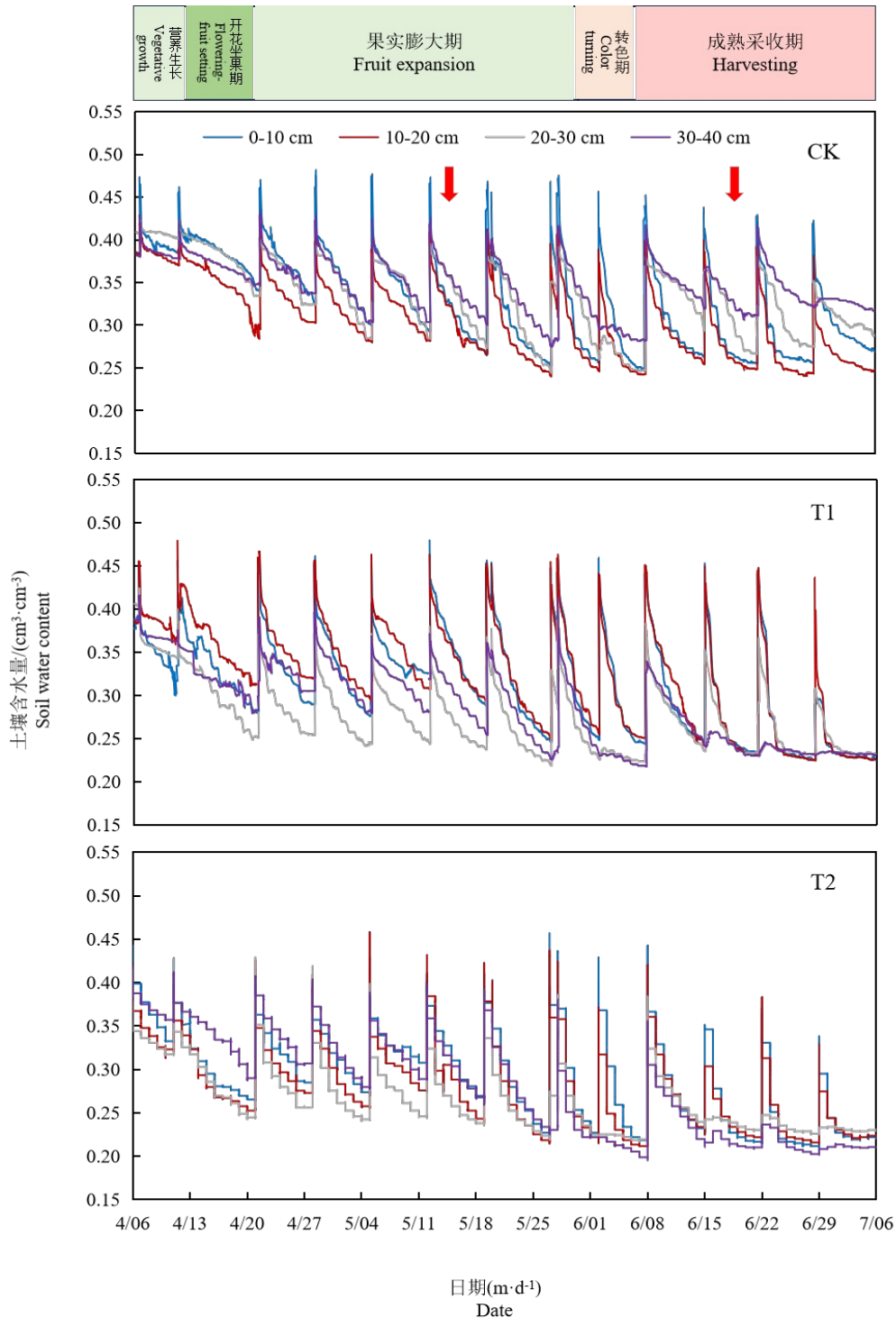


图4 不同处理0～10、10～20、20～30和30～40cm土壤层的土壤含水量变化

Fig.4 Variation of soil water content in 0～10, 10～20, 20～30 and 30～40 cm soil layer in different treatments

慢增长阶段,这可能与5月19日去除番茄植株生长点,控制地上部营养生长有关。

灌溉量处理对番茄植株根系鲜重的影响大于干重,但均未达到显著水平。在4月11日至6月15日,T1、T2处理根系鲜干重均低于CK,6月15日起差距逐渐缩小。植株利用根系吸收土壤中水分和养分,通过木质部导管向上运输,用于地上部生长发育,故灌溉量对地上部营养生长存在影响。从图7可以看出,灌溉量对地上部鲜、干重的影响滞后于地下部,且影响程度更小,这可能与灌溉量处理对植株根系影响不明显有关。

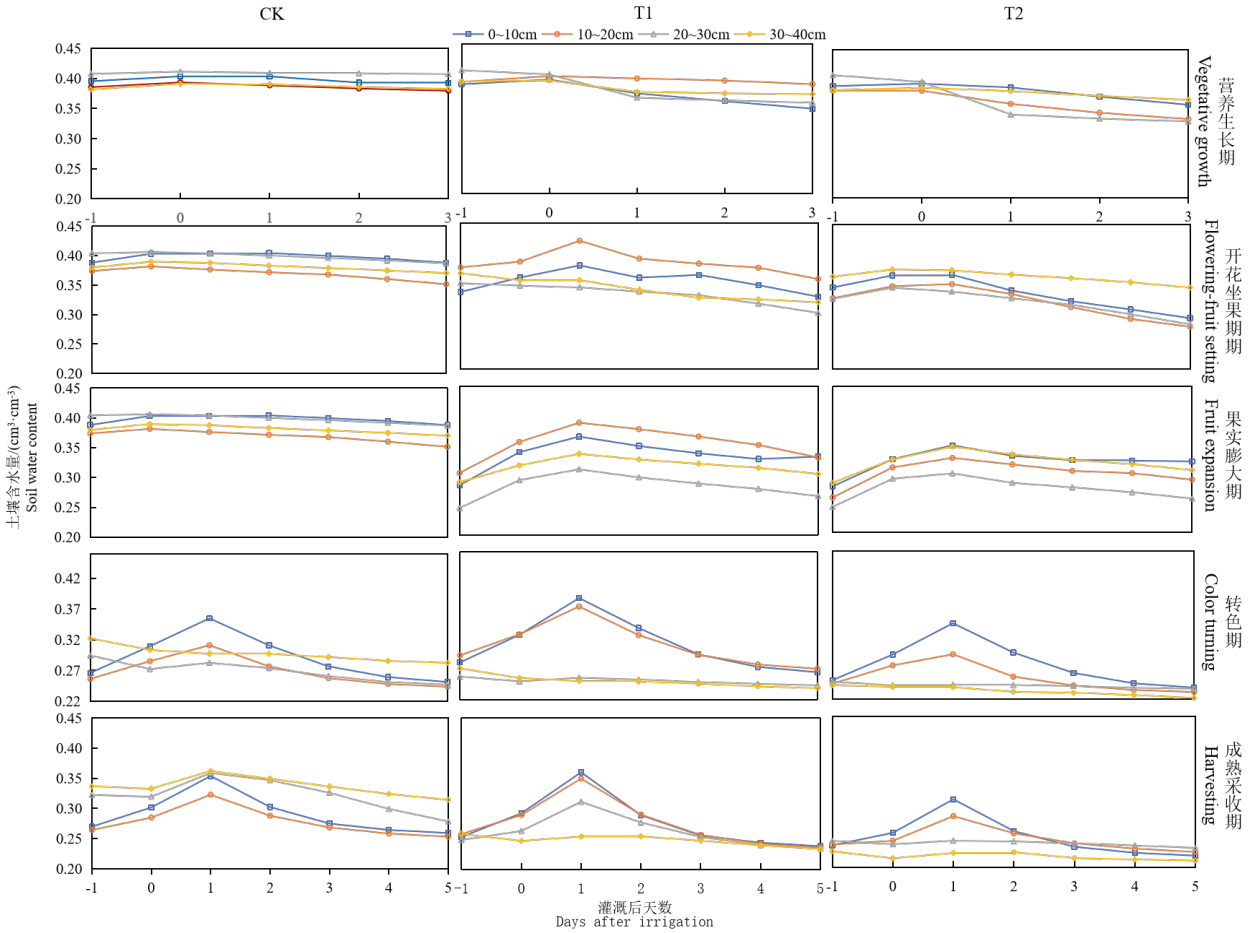


图5　番茄不同生育期各处理灌溉周期的土壤含水量变化

Fig.5　Changes of soil water content in irrigation cycle at different growth stages

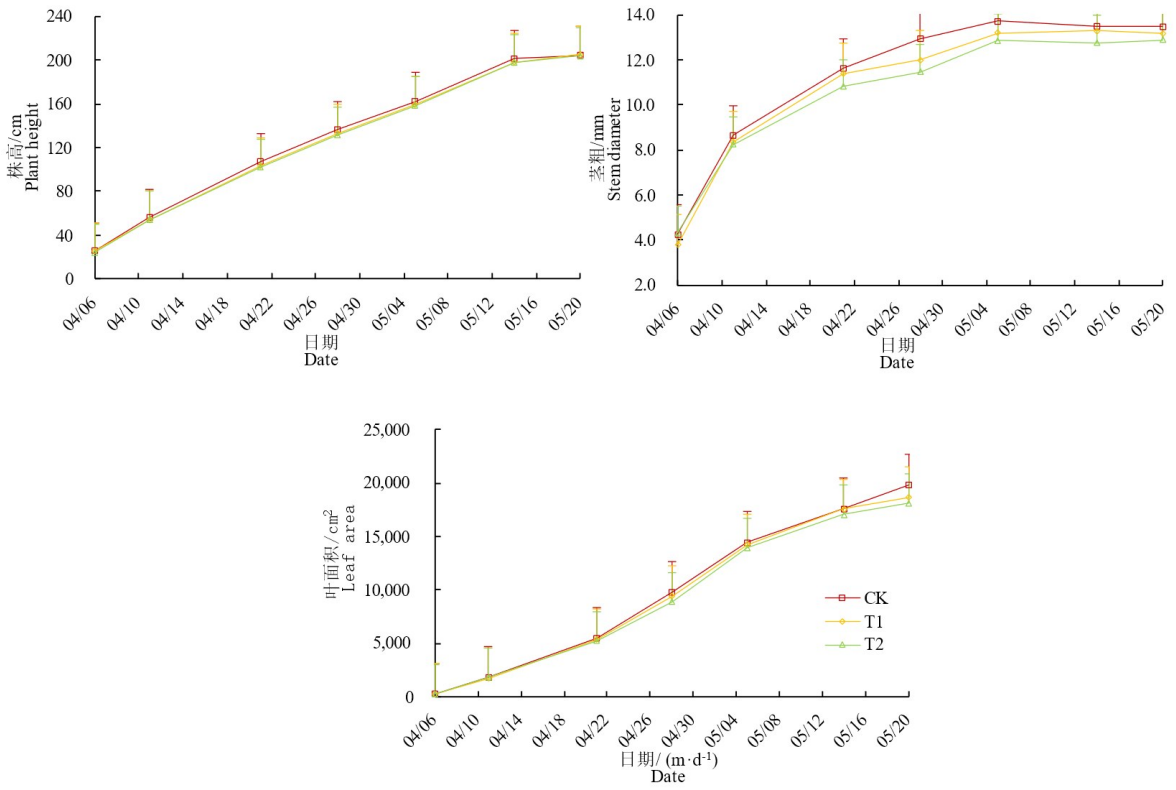
2.6　不同灌溉量处理的番茄产量和灌溉水利用效率

由表3结果可知,灌溉量对番茄单果重存在影响。与CK相比,T1和T2处理番茄果实单果重分别减少了3.41%和4.07%,且T2处理与CK之间差异显著($P<0.05$)。CK和T1、T2处理番茄果实总产量依次为84.35、81.61和81.00 t·hm^{-2},CK总产量最高、T2处理最低,T1、T2处理较CK分别减少了3.25%和3.97%,但不同灌溉量处理之间的差异未达到显著水平($P<0.05$)。

灌溉水利用效率是由果实产量和灌溉总量共同决定,且与果实产量成正比、与灌溉总量成反比。本试验各处理灌溉水利用效率如表3所示,CK、T1与T2处理的灌溉水利用效率分别为30.1、35.1与43.9 kg·m^{-3}。其中,T2处理灌溉水利用效率最高,相比CK提高了46.15%;T1处理次之,较CK提高了16.77%。

3　讨论

日光温室生产中,灌溉水通过滴灌系统输送至植株根系分布的土壤层,然后被植株根系吸收利用。由此可知,灌溉首先影响了土壤含水量的分布,并与植株耗水一并影响土壤含水量的时空变化。周博等[24]、张坤等[25]也发现土壤含水量随灌溉量增大呈现增加趋势。本研究也得到相似结果,灌溉量最大的CK($1.0E_p$)0~40 cm土壤层的平均土壤含水量高于T1($0.8E_p$)和T2($0.6E_p$)处理。同时,研究结果显示各处理土壤含水量随着番茄生育期的推进呈现波动递减趋势,这与已有相关研究结果一致[26-28]。这可能是由于前期作物蒸腾量相对较小,灌溉量基本满足植株的水分需求,植株根系吸收土壤水储水量少;随着生育期的推进和环境温度升高(图2),植株蒸腾增大,灌溉水量不能满足植株耗水需求,植株需要从土壤中吸收更多水分,进而导致土壤含水量逐渐下降(图



番茄株高、茎粗和叶面积在不同处理之间的差异均未达到显著水平($P<0.05$)

no significant differences in plant height, stem diameter and leaf area among different treatments($P<0.05$)

图6 不同灌溉量处理对番茄株高、茎粗与叶面积的影响

Fig.6 Effects of irrigation treatments on plant height, stem diameter and leaf area of tomato plants

3～图5)。T1和T2处理进行减量灌溉,植株从土壤中吸收的水分增加(图4和图5),故土壤含水量下降幅度较CK更明显。

适量灌溉是确保日光温室番茄产量和水分利用效率的关键,现已有大量研究通过探寻适宜水面蒸发皿灌溉系数(K_p)来优化灌溉量[21,29-31],认为日光温室条件下水面蒸发皿灌溉系数K_p为0.65～0.8,可以确保番茄产量和水分利用效率。此外,前人研究指出,温室番茄主要根系分布的土壤层(0～40 cm土壤层,根系比例达到94.63%～98.29%[32])土壤含水量在60%～80%田间持水量范围内,能够获得较高的果实品质和产量,且有利于节水增效[33-36]。王聪聪等[37]认为日光温室滴灌条件下,只要土壤相对含水率不低于60%,适度控制土壤水分对番茄产量影响较小。本研究中,T2处理灌溉量最低、灌溉水利用效率最高,相比对照CK分别减少了34.30%、提高了46.15%,但番茄株高、茎粗、叶面积、地上和地下部鲜干重等生长

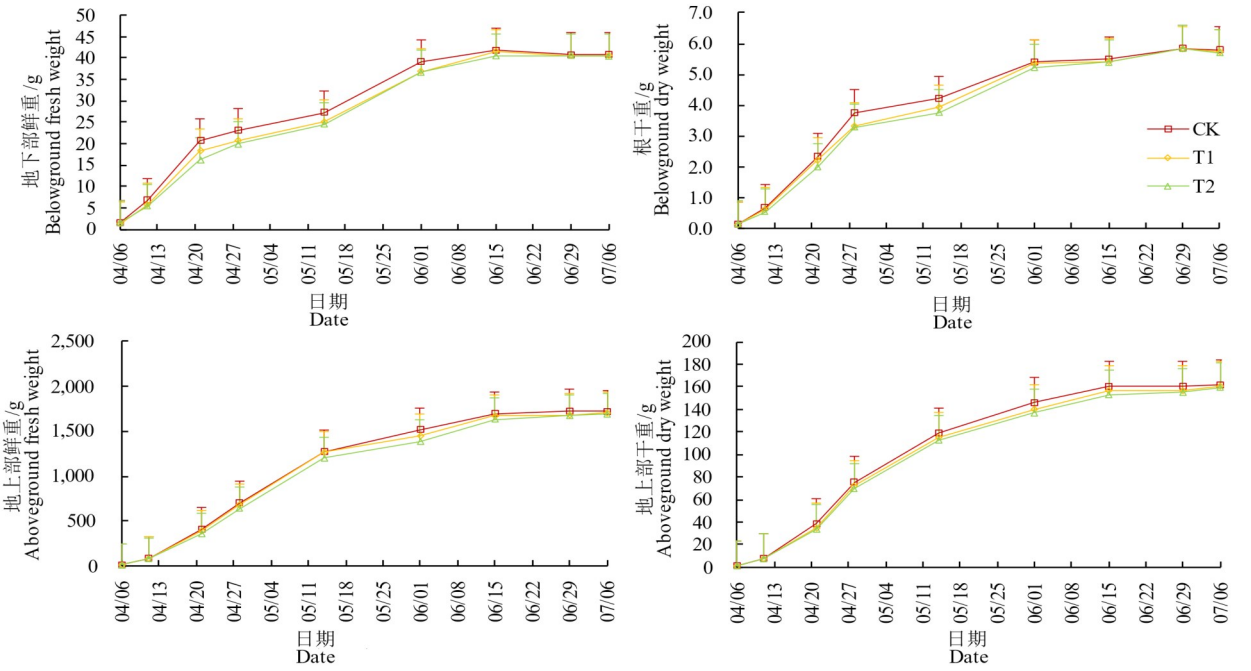
表3 不同灌溉量处理产量及灌溉水利用效率

Table 3 The yield and irrigation water utilization efficiency of different irrigation treatments

处理 Treatments	单果重/g Fruit weight	总产量/(t·hm^{-2}) Total yield	灌溉水利用效率/(kg·m^{-3}) Irrigation water use efficiency(IWUE)	灌溉水利用效率增长率/% Growth rate of IWUE
CK	184.5±2.37a	84.35±4.34a	30.1	/
T1	178.2±4.79ab	81.61±7.05a	35.1	16.77
T2	177.0±4.04b	81.00±5.78a	43.9	46.15

注:不同小写字母表示不同处理在0.05水平差异显著

Note:different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 significant level



番茄地下、地上部的鲜干重在不同处理之间的差异均未达到显著水平($P>0.05$)

No significant differences were observed in fresh and dry weights of underground and aboveground of tomato among different treatments($P>0.05$)

图7　不同灌溉量处理的番茄地下、地上部的鲜干重

Fig.7　Fresh and dry weights of underground and aboveground parts of tomato plants under different treatments

指标与果实总产量均未达到显著差异。同时,T2处理0～40 cm土壤层的平均土壤含水量维持在田间持水量的60.9%～91.1%,稍低于其它2个处理(77.7%～103.4%和65.4%～98.9%),但是土壤相对含水量的最低值(60.9%)仍高于60%(图3)。这与上述前人研究结果一致。因此,这可说明日光温室番茄栽培灌溉频率为每次5～7 d时,水面蒸发皿灌溉系数K_p为0.60的灌溉量可以使番茄根系主要分布层的土壤含水量维持在适宜范围,为番茄植株生长、果实产量形成提供所需水分,进一步优化了日光温室番茄栽培的灌溉,促进设施番茄节水增效生产。

4　结论

本研究中,CK(1.0 E_p)、T1(0.8 E_p)和T2(0.6 E_p)处理的总灌溉依次为2 805.1、2 324.1、1843.1 $m^3 \cdot hm^{-2}$,T1、T2处理相比CK分别降低了17.15%、34.30%。不同灌溉量处理下番茄根系主要分布土壤层(0～40 cm)土壤含水量时空分布存在差异。0～40 cm土壤层的平均土壤含水量从高到低为CK(0.272～0.362 $cm^3 \cdot cm^{-3}$)、T1(0.229～0.346 $cm^3 \cdot cm^{-3}$)和T2处理(0.213～0.319 $cm^3 \cdot cm^{-3}$),各处理土壤含水量随生育期的推进呈逐渐下降的趋势,且减量灌溉的T1和T2处理下降幅度大于CK。不同处理0～10、10～20、20～30、30～40 cm土壤层的土壤含水量存在差异。随着生育期推进对照CK各土壤层土壤含水量差异呈增大趋势,而T1和T2处理逐渐缩小;CK和T1处理0～10 cm土壤层土壤含水量波动幅度最大,T2处理10～20 cm土壤层土壤含水量波动幅度最大;整体上看T1和T2处理处理各土壤层的土壤含水量波动幅度大于CK,但是转色期后T1处理30～40 cm和T2处理20～40 cm土壤层土壤含水变化不明显。不同灌溉量处理对番茄植株生长影响不明显;T1和T2处理单果重和总产量相比CK仅分别降低了3.41%、4.07%和3.25%、3.97%,且总产量差异未达到显著水平。与CK相比,减量灌溉T1和T2处理的灌溉水利用效率分别提高了16.77%和46.15%。综上可知,灌溉量为0.6 E_p的T2处理进一步优化了日光温室番茄栽培的适宜灌溉量,有利于番茄节水高效栽培实现。

参　考　文　献

[1]田永强,高丽红. 设施番茄高品质栽培理论与技术[J]. 中国

蔬菜,2021(2):30-40.
Tian Y Q, Gao L H. Theory and technology for facility cultivation of high-quality tomato.[J] China Vegetables . 2021(2):30-40.

[2]李银坤,郭文忠,薛绪掌,等. 不同灌溉施肥模式对温室番茄产量、品质及水肥利用的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(19):3757-3765.
Li Y K,Guo W Z,Xue X Z,et al. Effects of different fertigation modes on tomato yield, fruit quality, and water and fertilizer utilization in greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica,2017,50(19):3757-3765.

[3]Zhong F L, Hou M M, He B Z, et al. Assessment on the coupling effects of drip irrigation and organic fertilization based on entropy weight coefficient model[J]. Peer J,2017,5:1-18.

[4]Jo W J, Shin J H. Development of a transpiration model for precise tomato (*Solanum lycopersicum L.*) irrigation control under various environmental conditions in greenhouse[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2021,162:388-394.

[5]祁娟霞,刘馨,赵小兵,等. 不同灌水量和灌水频率对番茄植株生长、光合与荧光特性的影响[J]. 节水灌溉,2017(4):50-56.
Qi J X, Liu X, Zhao X B, et al. Effects of different irrigation amount and irrigation frequency on the growth, photosynthesis and fluorescence characteristics of tomato [J]. Water Saving Irrigation, 2017(4):50-56.

[6]龚一丹,王卫华,管能翰,等. 灌溉对番茄生长发育、产量和品质影响的研究进展[J]. 中国瓜菜,2020,33(7):7-13.
Gong Y D,Wang W H,Guan N H,et al. Research progress on the effect of irrigation on tomato growth, yield and quality [J] . China Cucurbits and Vegetables,2020,33(7): 7-13.

[7]张军,范兴科. 番茄根系层土壤水分变化规律及标定方法研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(1):53-58.
Zhang J, Fan X K. Research on transformation laws and calibration method of soil water in tomato roots soil layer[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2015,34(1):53-58.

[8]Nangare D D, Singh Y, Kumar P S, et al. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum Mill.*) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis[J] . Agricultural Water Management,2016,171:73-79.

[9]朱嘉伟,赵聪佳,郭蕊蕊,等. 水资源约束条件下的县域冬小麦节水灌溉制度[J]. 农业工程学报,2021,37(1):92-100.
Zhu J W, Zhao C J, Guo R R, et al. Water-saving irrigation regime for winter wheat in county areas under water resource-constraint [J] . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(1):92-100.

[10]王西琴,吴若然,李兆捷,等. 我国农业用水安全的分区及发展对策[J]. 中国生态农业学报,2016,24(10):1428-1434.
Wang X Q, Wu R R, Li Z J, et al. Agricultural water security zoning and developmental countermeasures in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(10):1428-1434.

[11]吴宣毅,曹红霞,郝舒雪,等. 种植行距与灌水量对西北日光温室番茄生育和产量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(24):81-89.
Wu X Y, Cao H X, Hao S X, et al. Effect of planting row spacing and irrigation amount on tomato growth and yield in solar greenhouse in Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 81-89.

[12]哈丽代·阿卜力米提,丁剑,张喜春. 不同灌溉量对番茄营养品质的影响[J]. 北京农学院学报,2021,36(1):49-52.
Halida A, Ding J, Zhang X C. Effect of different irrigation amount on nutrient quality of tomato[J] . Journal of Beijing University of Agriculture,2021,36(1):49-52.

[13]王刚,于进步,姜继元,等. 灌溉量对塔城地区设施草莓生长的影响[J]. 北方果树,2021,No.224(4):18-19.
Wang G, Yu J B, Jiang J Y, et al. Effects of irrigation on growth of strawberry in protected cultivation in Tacheng[J] . Northern Fruits, 2021,No. 224(4):18-19.

[14]郭新勇 . 日光温室秋冬茬茄子适宜灌溉量的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
Guo X Y. Study on the appropriate irrigation amounts of eggplants in autumn-winter crop in solar greenhouse [D] . Tai'an:Shandong Agricultural University,2020.

[15]王鑫,刘晶晶,张小帅 . 不同水肥处理对冀西北高原日光温室架豆产量及品质的影响[J]. 农业工程,2021,11(11):67-71.
Wang X, Liu J J, Zhang X S. Effects of different water and fertilizer treatments on yield and quality of pole bean in solar greenhouse in northwest plateau of Hebei province [J] . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,11(11):67-71.

[16]李红峥,曹红霞,郭莉杰,等. 沟灌方式和灌水量对温室番茄综合品质与产量的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(21):4179-4191.
Li H Z, Cao H X, Guo L J, et al. Effect of furrow irrigation pattern and irrigation amount on comprehensive quality and yield of greenhouse tomato[J] . Scientia Agricultura Sinica, 2016,49(21):4179-4191.

[17]Zeng C Z, Bie Z L, Yuan B Z. 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.

[18]朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 基于温室番茄产量和果实品质对加气灌溉处理的综合评价[J] . 中国农业科学,2020,53(11):2241-2252.
Zhu Y, Cai H J, Song L B, et al. Comprehensive evaluation of different oxygation treatments based on fruit yield and quality of greenhouse tomato[J] . Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(11):2241-2252.

[19]Liu H, Duan A W, Li F S, et al. Drip irrigation scheduling for tomato grown in solar greenhouse based on pan evaporation in North China Plain [J] . Journal of Integrative Agriculture, 2013,12(03):520-531.

[20]Zhang J W, Xiang L X, Zhu C X, et al. Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation [J] . Agricultural Water Management,2023,283.

[21]焦艳平,赵勇,张艳红,等. 基于蒸发皿蒸发量的日光温室番

茄滴灌灌水量研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(5):133-138.
Jiao Y P, Zhao Y, Zhang Y H, et al. Study on tomato drip irrigation scheduling in solar greenhouse based on water surface evaporation of a 20 cm standard pan [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(5):133-138.

[22]姜展博,王丽学,李明阳,等. 基于蒸发皿蒸发量的日光温室番茄适宜水-炭管理模式[J]. 生态学杂志,2020,39(10):3521-3530.
Jiang Z B, Wang L X, Li M Y, et al. Suitable water-biochar management mode of tomato based on pan evaporation in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3521-3530.

[23]王淼,罗新兰,尹佳琪,等. 基于温室内气象数据的适用于冬季日光温室番茄蒸腾量各子模型对比研究[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(1):182-190.
Wang M, Luo X L, Yin J Q, et al. Comparative study on sub models of tomato transpiration based on the weather data in solar greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021,39(1):182-190.

[24]周博,周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科学大学学报(自然科学版),2009,37(1):211-216.
Zhou B, Zhou J B. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2009,37(1):211-216.

[25]张坤,刁明,景博,等. 不同灌水量与灌水频率对加工番茄根系生长和产量的影响[J]. 灌溉机械工程学报,2020,38(1):83-89.
Zhang K, Diao M, Jing B, et al. Influence of irrigation quota and frequency on root growth and yield of processing tomato [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020,38(1):83-89.

[26]王克全,郑国玉,马军勇,等. 不同滴灌量对新疆温室土壤水分、番茄产量及品质的影响[J]. 河南农业科学,2015,44(10):113-116.
Wang K, Zheng G Y, Ma J Y, et al. Effects of drip irrigation amount on soil moisture, yield and quality of tomato in greenhouse in Xinjiang [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2015,44(10):113-116.

[27]尹志荣,柯英,蔡进军. 水肥耦合对设施番茄土壤水分、养分运移及产量和水分利用效率影响[J]. 灌溉排水学报,2023,42(6):33-44.
Yin Z R, Ke Y, Cai J J. The combined effect of irrigation and fertilization on soil water, nutrient transport, yield and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(6):33-44.

[28]孔德杰,郑国保,张源沛,等. 不同灌水量对日光温室辣椒土壤水分动态变化的影响[J]. 北方园艺,2011(4):73-75.
Kong D J, Zheng G B, Zhang Y P, et al. Different irrigation on solar greenhouse pepper dynamic changes of soil moisture[J]. Northern Horticulture,2011(4):73-75.

[29]刘聪,宫彬彬,高洪波,等. 基于蒸发皿蒸发量的椰糠盆栽番茄适宜灌溉量估算与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(11):117-124.
Liu C, Gong B B, Gao H B, et al. Estimation and experiment of the suitable irrigation amount of potted tomatoes with coconut bran using pan evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 117-124.

[30]李欢欢,宋嘉雯,孙景生,等. 不同水氮供应对温室番茄各穗层果实养分和产量构成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023,42(6):1-9.
Li H H, Song J W, Sun J S, et al. Effects of water and nitrogen applications on yield components and nutritional composition of greenhouse tomatoes in different trusses[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(6):1-9.

[31]罗勤,水肥减量对土壤水分、养分和作物产量的影响及合理灌溉制度[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
Luo Q. Effects of reducing water and fertilizer on soil moisture and nutrient, crop yield and reasonable irrigation schedule of greenhouse[D]. Yangling:Northwest A&F University,2014.

[32]范凤翠, 张立峰, 李志宏,等. 日光温室番茄控制土壤深层渗漏的灌水量指标[J]. 农业工程学报,2010,26(10):83-89.
Fan F C, Zhang L F, Li Z H, et al. Tomato irrigation index for soil water leakage control in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(10):83-89.

[33]杨文杰,王振华,任作利,等. 微咸水膜下滴灌对土壤水盐分布及加工番茄产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(6):117-123,131.
Yang W J, Wang Z H, Ren Z L, et al. Effects of drip irrigation under brackish water mulch on soil water and salt distribution and processing tomato yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2019,37(6):117-123,131.

[34]李耀霞,郁继华,张国斌,等. 灌水上限和施肥量对温室番茄生长发育的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(2):42-51.
Li Y X, Yu J H, Zhang G B, et al. Effects of irrigation upper limit and fertilizer application on growth and development of tomato in greenhouse [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2020,48(2):42-51.

[35]郭彬,莫彦,吴忠东,等. 覆膜与水分控制对宁夏设施滴灌番茄产量与品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(3):48-55.
Guo B, Mo Y, Wu Z D, et al. Combined effects of film mulching and water-controlled drip irrigation on yield and quality of facility-cultivated tomato in Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(3):48-55.

[36]黄媛,于景鑫,杜亚茹,等. 基于土壤含水量的灌溉制度对番茄生理、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国瓜菜,2023,36(3):64-68.
Huang Y, Yu J X, Du Y R, et al. Effects of irrigation system based on soil water content on tomato physiology, yield and water use efficiency [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023,36(3):64-68.

[37]王聪聪,孙磊,郭凤台,等. 土壤水分状况对温室滴灌番茄水分利用效率及果实品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2011,30(2):86-89.
Wang C C, Sun L, Guo F T, et al. Response of tomato yield quality and water use efficiency to soil water status under drip irrigation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011,30(2):86-89.

Optimization study of greenhouse tomato irrigation based on pan evaporation

Qu Li'na[1,2], Guo Wenzhong[1,2], Sun Weituo[1], Gao Yi'nan[2], Wang Lichun[1], Liang Xinshu[3], Huang Yuan[4], Li Youli[1*]

(*1. Intelligent Equipment Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin Academy of Agriculture Sciences, Tianjin 300192, China; 4Shijiazhuang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050041, China.*)

Abstract: [Objective] In order to meet the high-efficiency water-saving irrigation needs for greenhouse tomato cultivation, this study focused on optimizing irrigation amount for greenhouse tomatoes based on pan surface evaporation (Ep). [Methods] Using a standard evaporation pan with a diameter of 20 cm, three irrigation treatments were established: 1.0 Ep(CK), 0.8 Ep (T1), and 0.6 Ep(T2). The study explored the soil moisture response in the primary root zone (0~40 cm), and analyzed plant growth indicators, fruit yield, and irrigation water use efficiency to further refine irrigation amount. [Results] The irrigation amount affected the temporal and spatial distribution of soil moisture. The average soil moisture in the 0~40 cm layer for CK, T1, and T2 treatments ranged from 77.7% to 103.4%, 65.4% to 98.9%, and 60.9% to 91.1% of the field water holding capacity, respectively with higher irrigation amounts resulting in higher soil moisture. All treatments showed a gradual decline in soil moisture over time, with T1 and T2 treatments decreasing more than CK. As the growth season progressed, the differences in soil moisture among different soil layers increased for CK, while the trends reversed for T1 and T2. In CK and T1, the soil moisture fluctuations were greatest in the 0~10 cm soil layer, while in T2, the fluctuation peaked in the 10~20 cm soil layer. Overall, the soil moisture variation was greater for T1 and T2 than CK, but post-ripening, the soil moisture at the 30~40 cm soil layer in T1 and the 20~40 cm soil layer in T2 showed minimal changes. There were no significant differences among treatments in tomato plant height, stem thickness, leaf area, and fresh/dry weights of both underground and overground parts. Compared to CK, the single fruit weight and total yield decreased by 3.41% and 4.07% for T1, and by 3.25% and 3.97% for T2, but these differences were not statistically significant ($P<0.05$). The irrigation water use efficiency (IWUE) for CK, T1, and T2 was 30.1 kg·m^{-3}, 35.1 kg·m^{-3}, and 43.9 kg·m^{-3}, respectively, with T1 and T2 improving IWUE by 16.77% and 46.15% over CK. [Conclusion] The T2 treatment maintained the average soil moisture in the 0~40cm soil layer above 60% of field capacity without affecting plant growth and total yield, while achieving significantly higher irrigation water use efficiency. Therefore, an irrigation coefficient (Kp) of 0.6 based on pan evaporation provides an optimal irrigation amount for greenhouse tomatoes, supporting efficient water-saving cultivation.

Keywords: Irrigation schedule, Standard pan evaporation, Irrigation coefficient, Soil moisture content, Irrigation water use efficiency

(编辑:韩志强)