

调亏灌溉对膜下滴灌辣椒生长及水分利用的影响

王世杰¹,张恒嘉¹,巴玉春²,王玉才¹,黄彩霞¹,薛道信¹,李福强¹

(1.甘肃农业大学工学院,甘肃 兰州 730070;2.民乐县洪水河管理处,甘肃 民乐 734500)

摘要:通过大田试验研究了调亏灌溉[苗期:SRD1(轻度)、SRD2(中度)、SRD3(重度);开花坐果期:BRD1(轻度)、BRD2(中度)、BRD3(重度);盛果期:FRD1(轻度)、FRD2(中度);后期:LRD1(轻度)、LRD2(中度);CK为对照]对膜下滴灌辣椒生长、耗水规律、产量和水分利用效率的影响。结果表明:苗期轻度水分调亏和后期轻度水分调亏对辣椒株高、茎粗和叶面积指数均无显著影响($P>0.05$),而开花坐果期重度水分调亏使辣椒株高、茎粗和叶面积指数分别比对照显著($P<0.05$)小39.03%、32.94%和51.21%。同时,与对照处理相比,辣椒生物量随着水分调亏程度的增加而不断下降。其中,苗期中度水分调亏处理SRD2在苗期地上部分和根系干物质质量分别比对照处理显著小40.32%和24.99%,但辣椒总产量为35322.79 kg·hm⁻²,与对照处理无显著差异。不同水分处理辣椒各生育期耗水量和耗水强度均表现为盛果期>后期>开花坐果期>苗期,并且与对照处理相比,辣椒阶段耗水强度和耗水量均随着水分调亏程度的增加而显著下降。苗期中度水分调亏处理SRD2的辣椒水分利用效率和灌溉水利用效率分别比对照处理显著提高8.45%和9.20%,并且产量处于最高水平。因此,SRD2为本试验方案中的最优灌溉方式。

关键词:辣椒;膜下滴灌;水分调亏;生长指标;耗水规律;水分利用效率

中图分类号:S275.6;S641.3 **文献标志码:**A

Effect of regulated deficit irrigation on growth and water use of pepper with mulched drip irrigation

WANG Shi-jie¹, ZHANG Heng-jia¹, BA Yu-chun², WANG Yu-cai¹, HUANG Cai-xia¹,
XUE Dao-xin¹, LI Fu-qiang¹

(1.School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2.Hongshuihe Administration in Minle County, Minle, Gansu 734500, China)

Abstract: The effect of regulated deficit irrigation on pepper growth, water consuming regulation, yield and water use efficiency has been researched with mulched drip irrigation through field experiments. The results showed that: Different degrees of water deficit regulation (WDR) at seedling, blossom and fruiting stage and full fruit period will be all decreased the pepper plant height, stem diameter and leaf area index (LAI), and the bigger degree of WDR, the plant height, stem diameter and LAI were smaller. Meanwhile, compared with the control treatment, the pepper biomass will be decreased with increasing degree of WDR. In which, the treatment (SRD2) as moderate WDR at seedling stage, the pepper biomass of ground parts and amount of root dry matter were significantly ($P>0.05$) decreased 40.32% and 24.99%, respectively. But the total pepper yield was 35322.79 kg·hm⁻² which was the highest level with control treatment. Under different water treatment, the water consumption and water-consuming intensity in each pepper growth stage were total expressed as full fruit period > later fruit period > blossom and fruit stage > Seedling. Compared with the control treatment, the stage water consumption and consuming-intensity of pepper total will be notably decreased with increasing the degree of WDR. The moderate WRD treatment in seedling as (SRD2), the pepper water use efficiency and irrigation water use efficiency could be remarkably increased 8.45% and 9.20% respectively, also the pepper yield was at the highest level. Consequently, the SRD2 was the optimal irrigation mode in experiment scheme.

Keywords: pepper, mulched drip irrigation; water regulated deficit; growth indicators; water-consuming regulation; water use efficiency

辣椒在我国的种植面积居世界首位,约为 133 万 hm^2 ,占世界辣椒面积的 35%^[1],但由于我国水资源总量的不足和时空分布的不均,水分胁迫对农作物造成的损失在所有非生物胁迫中占首位,大力发展农业节水技术是我国农业发展的必经之路^[2-3]。膜下滴灌调亏灌溉是利用膜下滴灌方式对作物进行调亏灌溉的一种综合性节水灌溉方法,它有效结合了以色列滴灌方式、国内覆膜栽培方式和调亏灌溉理论,具有灌水少、肥料利用率高、增产效果明显和经济效益高等特点,同时能够增加作物对逆境,如干旱、盐渍化、低温等的适应能力^[4-6]。膜下滴灌调亏技术在果树、小麦、玉米、马铃薯等作物上研究和应用比较广泛,但对蔬菜作物的研究还相对比较少,而且大多研究在温室内进行,特别是对大田栽培辣椒的研究较为少见,还有待于进一步研究以指导辣椒节水高产栽培以及灌溉制度的优化^[7]。此外,作物大田栽培可以充分利用水、气、光、热等资源,但在大田进行调亏灌溉研究,容易受降雨的影响,而导致田间水分不易控制,影响研究结果的准确性,因此如何做好降雨期间田间排水,提高田间土壤水分的控制精度,成为大田调亏灌溉研究亟待解决的问题^[8-9]。因此,本研究以大田膜下滴灌为辣椒栽培模式,采用垄和垄沟全膜覆盖以及田间设置滴灌和排水系统,在辣椒不同生育期设置不同的水分亏缺水平,研究调亏灌溉对辣椒生长、田间土壤水分、辣椒耗水规律和产量的形成及辣椒对不同生育期水分胁迫的敏感性大小,为调亏灌溉在辣椒大田栽培中的应用和灌溉制度的优化提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该试验在甘肃省民乐县益民灌溉试验站进行。益民灌溉试验站位于民乐县三堡镇张连庄村,洪水河灌区中游。地处东经 $100^{\circ}43'$,北纬 $38^{\circ}39'$,海拔 1970 m。此区气候干燥,水源不足,属大陆性荒漠草原气候。年平均温度 6°C ,极端最高温度 37.8°C ,极端最低温度 -33.3°C ,年总降雨量 183~285 mm,无霜期 109~174 d,年日照时数 3000 h 左右。土壤属轻壤土,田间持水量为 24% (质量含水率),土壤容重 $1.4 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,地下水位低,无盐碱化影响。

1.2 试验材料

供试辣椒品种为金椒 6 号,栽培方式为大田膜

下滴灌栽培。于 2016 年 3 月 20 日在温棚育苗,5 月 11 日移栽定植,试验采用人工起垄,起垄前施入足量的氮磷钾复合肥。从辣椒现蕾开始每隔 15d 喷施一定浓度的霜脲·锰锌、噻唑行、吡虫啉和高效氯氟氰菊酯以预防辣椒生长期间的各种常见病虫害的发生。7 月 11 日收获第 1 茬辣椒,8 月 5 日收获第 2 茬辣椒,最后 1 茬辣椒于 8 月 29 日收获。

1.3 试验设计

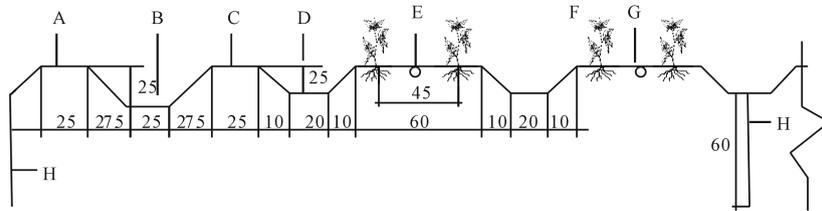
本试验为单因素试验,将辣椒生育期按其生长特点分为四个生育期:苗期(5 月 11 日至 6 月 9 日)、开花坐果期(6 月 10 日至 7 月 5 日)、盛果期(7 月 6 日至 8 月 5 日)和后果期(8 月 6 日至 8 月 29 日)。土壤水分设四个梯度,分别为充分灌水:(75%~85%) θ_{III} 、轻度水分调亏:(65%~75%) θ_{III} 、中度水分调亏:(55%~65%) θ_{III} 和重度水分调亏:(45%~55%) θ_{III} 。在盛果期和后果期只设轻度和中度水分调亏,在其余两个生育期施加三种不同程度的水分调亏。因此,本试验共设 11 个处理,每个处理设三次重复,共 33 个小区,小区面积为 $2.4 \times 6 \text{ m}^2$,采用随机区组设计,有效试验种植面积为 660 m^2 。当测得实验小区水分低于设计下限时,灌水到设计上限,灌水方法为膜下滴灌灌水,水表量水,计划湿润层为 30cm,试验设计方案见表 1。表中 SRD、BRD、FRD 和 LRD 分别代表苗期水分调亏、开花坐果期水分调亏、盛果期水分调亏和后果期水分调亏,CK 为对照处理,表示充分灌水,编号中数字 1、2 和 3 分别代表轻度、中度和重度 3 个调亏水平。

根据试验区历年气象资料,试验区 7、8 月雨水较多。为了尽快排出田间积水,减少雨水渗入土层影响田间含水量的控制,田间设置灌溉排水系统。小区内滴灌带、垄,辣椒植株及排水沟布置形式如图 1 所示,试验采用人工起垄,垄中间铺设一条滴灌带,滴头间距为 30cm,灌水时滴头平均流量为 $2.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。滴灌带铺设完成后,在滴灌带两侧,平行于滴灌带离滴灌带 5cm 处分别用小锄头开挖两条深为 8cm 左右的小沟,并均匀施入尿素 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,三元复合肥 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷酸二铵 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硫酸钾 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施肥总量为 $1350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,生育中期不再追肥。辣椒采取每垄双行定植,行距为 45 cm,株距为 35cm。每个小区之间沿垄方向以排水沟的形式隔开,垄底用宽为 60 cm,厚度为 0.08 mm 的薄膜在垂直方向隔开,沟底纵向坡度均约为

1:60,在垄沟和排水沟沟底用膜宽为120cm,厚度为0.08mm的塑料薄膜以搭接方式进行全膜覆盖并用约5cm厚土层压盖。

1.4 辣椒全生育期温度变化和降雨量分布

2016年试验区辣椒全生育期内的平均温度为16.4℃,最高气温33.8℃,出现在后果期;最低气温-0.5℃,出现在苗期。各生育期日平均温度表现为盛果期>开花坐果期>后果期>苗期,各生育期温度变化范围均在17.3~20.9℃。辣椒全生育期总降雨量为165.6mm,有效降雨量(大于5mm)为148.2mm。辣椒苗期降雨量为20.8mm,占生育期总量的13.77%;辣椒开花坐果期,降雨量最小,仅为6.1mm,占生育期降雨量的3.68%;辣椒盛果期降雨量60.9mm,占生育期总降雨量的36.78%;辣椒后果期降雨量最大,降雨量为75.8mm,占生育期总降雨量的45.77%。



A.排水干沟沟堤;B.排水干沟;C.田埂;D.垄沟;E.滴灌带;F.辣椒植株;G.垄;H.小区纵向防渗薄膜。

图中数字后单位均为cm。

A. the dyke of the field drainage ditch; B. the field drainage ditch; C. ridge; D. furrow; E. drip irrigation pipe; F. pepper plant;

G. furrow ridge; H. vertical anti-seepage plastic film around plots.

The unit of figure is centimeter (cm).

图1 垄和垄沟剖面示意图

Fig.1 The profile diagram of furrows and furrow ditches

1.5 测定项目及方法

1.5.1 株高、茎粗和叶面积指数 每个生育期末分别测定一次,每次测定时,从每个小区选取5株长势与小区其它辣椒植株长势一致的植株分别进行测量,用分度值为1mm的钢卷尺测量株高,主茎直径用分度值为0.02mm的游标卡尺测量,叶面积的测量选系数法^[10]。

1.5.2 产量的测定 到每次采摘时期,在每个小区选择5株长势与其它植株一致进行标记,每次采摘用这5株辣椒产量的平均值作为小区辣椒平均单株产量,最后换算成每公顷产量,三次采摘产量之和作为总产量。

1.5.3 土壤水分的测定 土壤水分的测定采用烘干法,在辣椒移栽前(5月9日)取土测量一次,以后充分供水、轻度、中度和重度调亏处理分别每隔5~7d取土一次,灌水后以及降雨前后各加测一次,每次测定各小区膜下0~10cm、10~20cm、20~30cm、30

表1 试验设计

Table 1 Experimental design/% $\theta_{田}$

| 处理 Treatment | 苗期 Seedling | 开花坐果期 Blossom and fruiting period | 盛果期 Full fruit stage | 后果期 Later fruit stage |
|-----------------|----------------|---|----------------------------|-----------------------------|
| SRD1 | 65~75 | 75~85 | 75~85 | 75~85 |
| SRD2 | 55~65 | 75~85 | 75~85 | 75~85 |
| SRD3 | 45~55 | 75~85 | 75~85 | 75~85 |
| BRD1 | 75~85 | 65~75 | 75~85 | 75~85 |
| BRD2 | 75~85 | 55~65 | 75~85 | 75~85 |
| BRD3 | 75~85 | 45~55 | 75~85 | 75~85 |
| FRD1 | 75~85 | 75~85 | 65~75 | 75~85 |
| FRD2 | 75~85 | 75~85 | 55~65 | 75~85 |
| LRD1 | 75~85 | 75~85 | 75~85 | 65~75 |
| LRD2 | 75~85 | 75~85 | 75~85 | 55~65 |
| CK | 75~85 | 75~85 | 75~85 | 75~85 |

注:表中“~”前后数字分别代表土壤水分控制上限和下限(占田间持水量的百分数)。

Note: The numbers in front and back of the mark “~” in table represent upper and lower limits of soil water control (the percentage of field capacity), respectively.

~40cm、40~50cm和50~60cm土壤剖面内土壤含水率,因为辣椒计划湿润层为30cm,以0~30cm土层的土壤水分变化作为灌水依据,而以0~60cm内土壤水分的变化作为作物对土壤水分消耗的计算依据。当土壤水分低于表1所示控制水分下限时,立即灌到控制上限,辣椒灌水计算公式如下:

$$M = 10\gamma H_p P (\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

式中, M 为灌水量,mm; γ 为计划湿润层土壤容积密度, $g \cdot cm^{-3}$; H_p 为计划湿润层深度,30cm; θ_i 为设计控制上限含水率(田间持水量乘以设计控制相对含水率上限),%; θ_j 为灌水前土壤质量含水率,%; P 为滴灌设计湿润比,65%。

1.5.4 干物质 干物质的测定采用烘干法。分别在辣椒苗期和开花坐果期末,从每个小区选取长势一致的5株辣椒植株,然后分别将根、茎、叶和果实用剪刀分离后,分别称取鲜重,并记录,然后分别装入纸袋,在105℃杀青1h后,将烘箱温度调为

85℃,烘 8 h 左右,烘干后分别称量干重并记录。

1.5.5 辣椒耗水量 采用水量平衡法计算:

$$E_r = 10 \sum_{i=1}^{i=n} r_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + aP - C + K \quad (2)$$

式中, E_r 为辣椒某生育阶段作物耗水量,mm; i 代表土层编号; H_i 为第 i 层土层厚度,cm; r_i 为第 i 层土壤容重, $g \cdot cm^{-3}$; W_{i1} 、 W_{i2} 分别为第 i 层土壤某时段始末土壤质量含水率,%; P 为某一时段内的降雨量,mm; a 为降雨入渗系数,即实际深入田间膜下土壤的雨水,0.12。 K 为深层水向 0 ~ 60cm 土层内的补给量,mm; C 为深层渗漏量,mm。

试验区地下水位为 20m,无深层水补给,故 K 取 0;最高水量为田间持水量的 85%,计划湿润层为 30cm,所以无深层渗漏量,故 C 取 0。

1.5.6 水分利用效率 辣椒水分利用效率的计算如下:

$$WUE = Y/ET_a \quad (3)$$

$$IWUE = Y/I \quad (4)$$

式中, WUE 为辣椒全生育期水分利用效率, $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$; Y 为辣椒单位面积产量, $kg \cdot hm^{-2}$; ET_a 为辣椒全生育期单位面积耗水量,mm; I 为辣椒全生育期单位面积灌水量,mm。

1.6 数据分析

采用软件 Excel 2010 和 SPSS 19.0 对数据进行统计分析,并用 Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对辣椒生长的影响

2.1.1 株高 由表 2 可知,苗期轻度调亏处理辣椒株高也与对照处于同一水平,到后果期辣椒营养生长基本完成,后果期水分调亏对辣椒株高无显著($P > 0.05$)影响,而其余水分调亏处理的辣椒株高均显著小于对照,其中开花坐果期重度水分调亏处理的辣椒株高比对照显著小 39.03%,这说明开花坐果期重度水分调亏会显著降低辣椒株高。

2.1.2 茎粗 辣椒移栽定植时,平均茎粗为 4.02mm。苗期轻度水分调亏处理和后果期水分调亏处理辣椒的茎粗均与对照无显著($P > 0.05$)差异外,其余水分调亏处理辣椒茎粗均显著($P < 0.05$)小于对照(表 2),其中开花坐果期重度水分调亏处理的辣椒茎粗比对照显著小 32.94%,这说明苗期、开花坐果期和盛果期水分调亏对辣椒茎粗影响较大。

2.1.3 叶面积指数 辣椒移栽定植时,各试验小区辣椒平均叶面积指数为 0.054。苗期轻度调亏处理和后果期轻度调亏处理 LAI 均与对照无显著($P > 0.05$)差异,且与对照处于最高水平(表 2)。开花坐果期重度调亏处理和盛果期中度调亏处理 LAI 处于最低水平,其中开花坐果期重度水分调亏处理的 LAI 比对照显著($P < 0.06$)小 51.21%。其余处理 LAI 均处于同一水平,各处理之间均无显著差异。这说明不同生育阶段水分调亏均能抑制辣椒叶片的生长。

表 2 辣椒生育期末株高、茎粗和叶面积指数

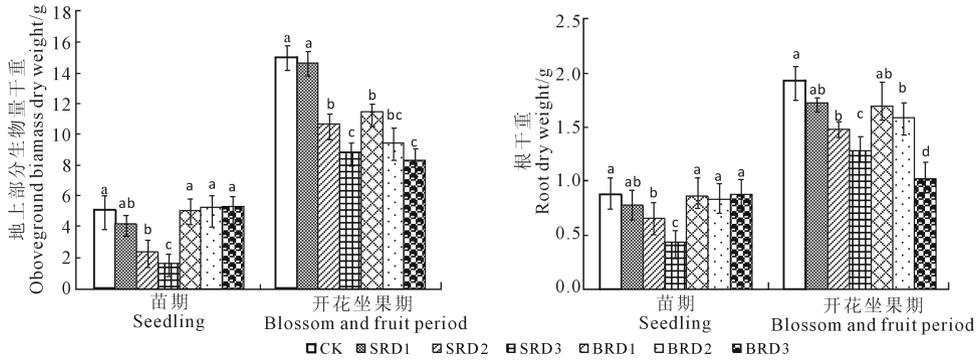
Table 2 The plant height, stem diameter and leaf area index in the end of pepper growth period

| 处理 Treatment | 株高/cm Plant height | 茎粗/mm Stem diameter | 叶面积指数 Leaf area index (LAI) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|
| SRD1 | 51.37a | 15.25ab | 1.203a |
| SRD2 | 44.90b | 14.60b | 0.986b |
| SRD3 | 33.80c | 12.59c | 0.897b |
| FRD1 | 48.10b | 13.24bc | 0.864b |
| FRD2 | 44.37b | 12.62c | 0.855b |
| FRD3 | 33.37c | 10.77d | 0.623c |
| ERD1 | 50.23a | 15.67ab | 0.812b |
| ERD2 | 46.87b | 13.22b | 0.656c |
| LRD1 | 54.22a | 15.67a | 1.227a |
| LRD2 | 53.67a | 15.23ab | 1.056b |
| CK | 54.73a | 16.06a | 1.277a |

注:小写字母表示 $P < 0.05$ 的显著水平。下同。

Note: The small letters mean significant difference at $P < 0.05$. The same as below.

2.1.4 辣椒生物量 由于辣椒果实采摘时期干物质测定受到青果采摘的影响而不便测定,本研究只针对辣椒苗期和开花坐果期干物质积累情况进行研究。苗期和开花坐果期水分调亏均使辣椒地上部分和根系生物量下降,且随着水分调亏程度的增加,生物量下降幅度增加(图 2)。在苗期轻度、中度和重度水分调亏下,辣椒地上部分生物量较对照分别显著($P < 0.05$)减少 17.21%、40.32%和 56.42%,根干重分别显著减少了 10.88%、24.99%和 50.42%,这表明相同水分调亏程度,地上部分生物量下降幅度大于根系生物量。与对照处理相比,开花坐果期轻度、中度和重度水分调亏使辣椒地上部分生物量分别下降 23.47%、53.48%和 68.32%,使根干重分别显著下降 12.20%、35.70%和 57.23%,这表明相同水分调亏程度地上部分生物量下降幅度较根系生物量大,并且相同水分调亏水平下开花坐果期水分调亏引起的辣椒地上部分和根系生物量下降幅度大于苗期,因此,开花坐果期调亏对辣椒生物量影响较大。



注:图中小写字母表示 $P < 0.05$ 的显著水平。

Note: The different small letters in figure mean significant difference at $P < 0.05$.

图 2 苗期和开花坐果期不同水分处理下辣椒地上部分和根系生物量

Fig.2 On ground biomass and root biomass of pepper in seedling stage and blossom and fruiting period under different water treatments

2.2 膜下滴灌调亏对辣椒耗水特性的影响

2.2.1 阶段耗水特性 从表 3 可知,各水分处理辣椒耗水量在盛果期最大,耗水量和耗水模数分别在 74.22mm 和 31.47% 以上,而在其它生育阶段耗水量均表现为:后果期>开花坐果期>苗期,耗水量大小分别在 61.61mm、51.82mm 和 35.28mm 以上,耗水模数分别在 22.34%、20.56% 和 14.76% 以上。辣椒各生育期耗水强度均表现为盛果期>后果期>开花坐果期>苗期。与 CK 相比,辣椒各生育期水分调亏均使辣椒耗水量或耗水强度下降,辣椒阶段耗水量

越大,水分调亏降低耗水量的效果越明显,辣椒在苗期耗水最小,为 45.32mm,苗期轻度和中度水分调亏使辣椒耗水量分别下降 2.65% 和 13.25%,而在耗水量最大的盛果期,耗水量为 75.82mm,轻度和中度水分调亏使辣椒耗水量分别下降 15.68% 和 24.26%,耗水量下降较大。SRD3、BRD2 和 BRD3 和 FRD1 和 FRD2 在后期复水后,耗水量始终显著 ($P < 0.05$) 小于 CK,其它调亏处理后期复水后耗水量均与 CK 无显著 ($P > 0.05$) 差异。

表 3 辣椒耗水量、耗水强度和耗水模数

Table 3 The water consumption (WC), water-consuming intensity (WCI) and water consumption modulus (WCM) of pepper

| 处理 Treatment | 苗期 Seedling | | | 开花坐果期 Blossom and fruiting stage | | | 盛果期 Full fruit period | | | 后果期 Later fruit stage | | |
|-----------------|------------------|---|-------------------|-------------------------------------|---|-------------------|--------------------------|---|-------------------|--------------------------|---|-------------------|
| | 耗水量 WC /mm | 耗水强度 WCI /(mm · d ⁻¹) | 耗水模数 WCM /% | 耗水量 WC /mm | 耗水强度 WCI /(mm · d ⁻¹) | 耗水模数 WCM /% | 耗水量 WC /mm | 耗水强度 WCI /(mm · d ⁻¹) | 耗水模数 WCM /% | 耗水量 WC /mm | 耗水强度 WCI /(mm · d ⁻¹) | 耗水模数 WCM /% |
| SRD1 | 43.90a | 1.47a | 15.71de | 62.16a | 2.39a | 21.77c | 103.78a | 3.34a | 36.34ab | 75.74a | 3.03a | 26.52ab |
| SRD2 | 39.37b | 1.31b | 16.86bc | 55.72bc | 2.14bc | 21.47cd | 94.41b | 3.04b | 36.37ab | 70.05ab | 2.80ab | 26.99a |
| SRD3 | 35.28c | 1.18c | 17.93b | 51.82c | 1.99c | 21.67c | 87.61b | 2.82b | 36.64ab | 64.39bc | 2.58bc | 26.93a |
| BRD1 | 41.99a | 1.4ab | 16.09cd | 55.06bc | 2.12bc | 21.18cd | 93.45b | 3.02b | 35.98bc | 69.42ab | 2.78ab | 26.74ab |
| BRD2 | 45.54a | 1.52a | 17.99b | 52.08c | 2.00c | 20.56de | 89.30b | 2.88b | 35.22bc | 66.53bc | 2.66bc | 26.22ab |
| BRD3 | 45.60a | 1.52a | 20.94a | 47.54d | 1.67d | 19.86e | 74.22c | 2.39c | 33.85c | 55.61d | 2.23d | 25.35d |
| FRD1 | 43.49a | 1.45ab | 16.05cd | 59.37ab | 2.28ab | 22.99b | 88.35b | 2.85b | 34.37cd | 66.53bc | 2.66bc | 25.78cd |
| FRD2 | 45.20a | 1.51a | 16.51cd | 63.16a | 2.43a | 25.05a | 79.40c | 2.56c | 31.47d | 64.41bc | 2.58bc | 25.55cd |
| LRD1 | 44.82a | 1.49a | 15.38d | 61.57a | 2.37a | 22.04c | 102.72a | 3.31a | 36.79ab | 70.13b | 2.80b | 25.12d |
| LRD2 | 45.54a | 1.52a | 15.17d | 63.41a | 2.44a | 22.99b | 105.22a | 3.40a | 38.16a | 61.61c | 2.47c | 22.34f |
| CK | 45.32a | 1.51a | 14.76d | 62.52a | 2.41a | 21.67c | 104.84a | 3.38a | 36.34ab | 75.82a | 3.03a | 26.28ab |

2.2.2 全生育期耗水量和灌溉水量 由于试验区地下水水位低,辣椒根区无深层渗漏,且辣椒生育期内降雨少以及田间薄膜的阻挡及排水作用,辣椒主要消耗的水分来自灌溉水,因此,各处理辣椒耗水量与灌溉水量相差不大。由表 4 可知,不同生育期

水分亏缺均能降低辣椒全生育期耗水量和灌溉水量。对照处理(CK)辣椒全生育期耗水量和灌溉水量均最大,除处理 SRD1 的全生育期耗水量和灌溉水量与 CK 无显著差异外,其余调亏处理辣椒总耗水量和灌溉水量均显著小于 CK,其中处理 SRD2、BRD1、BRD2、

FRD1、FRD2 全生育期耗水量和灌水量处于同一水平,比 CK 显著小 9.90%~12.59%,而处理 SRD3 和处理 BRD3 的总耗水量和灌水量处于最低水平,分

别比 CK 小 17.12%~22.71%。这说明水分亏缺对辣椒总耗水量的影响大小与调亏时期和调亏程度有关。

表 4 不同水分处理下辣椒产量和水分利用情况

Table 4 The pepper fruit yield and water use under different water treatments

| 处理 Treatment | 产量 Yield/(kg·hm ⁻²) | | | | 总耗水量 Total water consumption/mm | 灌水量 Irrigation amount/mm |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| | 第一茬 First harvest | 第二茬 Second harvest | 第三茬 Third harvest | 总产量 Total fruit yield | | |
| SRD1 | 5872.43a | 17893.56a | 12365.49a | 36131.48a | 285.58a | 267.80a |
| SRD2 | 5228.88b | 17179.34a | 12114.57a | 35322.79a | 259.55b | 241.77b |
| SRD3 | 4786.24b | 15987.56b | 9153.79b | 29927.59c | 239.10d | 221.32d |
| BRD1 | 4827.16b | 16347.20b | 10798.79a | 31973.16c | 259.92c | 242.14c |
| BRD2 | 4525.49b | 15929.72b | 10924.55a | 31379.76c | 253.45c | 235.67c |
| BRD3 | 3922.18c | 14481.56b | 8547.68b | 26951.42d | 222.97d | 205.19d |
| FRD1 | 6055.54a | 14286.66b | 12077.44a | 32419.64b | 257.74c | 239.96c |
| FRD2 | 5855.31a | 13576.46c | 11994.17a | 31425.94c | 252.17c | 234.39c |
| LRD1 | 5890.22a | 18956.88a | 10050.65a | 34897.75a | 278.11b | 260.33b |
| LRD2 | 5820.09a | 19468.56a | 8387.01b | 33675.66b | 275.78b | 258.00b |
| CK | 6033.98a | 18101.95a | 12067.97a | 36203.90a | 288.50a | 270.72a |

2.3 膜下滴灌调亏对辣椒产量的影响

2.3.1 第一茬产量 辣椒青果产量分茬测定。如表 4 所示,第一茬青果在盛果期初采收,苗期轻度水分调亏处理 SRD1 的青果产量与未调亏处理处于最高水平,而开花坐果期重度调亏处理 BRD3 青果产量最低,比 CK 显著 ($P>0.05$) 小 35%,苗期调亏处理 SRD2 和 SRD3 和开花坐果期调亏处理 BRD1 和 BRD2 的青果产量处于同一水平,且均显著小于前期末调亏处理。

2.3.2 第二茬产量 第二茬辣椒青果在盛果期末采收,盛果期水分调亏处理 FRD1 和 FRD2 的辣椒青果产量分别比 CK 显著小 20.00% 和 25.00% (表 4),且 BRD2 显著小于 BRD1,而处理 SRD1 和 SRD2 的此茬产量与其余前期末调亏处理均处于最高水平。

2.3.3 第三茬产量 辣椒最后一茬青果在后果期采收,与 CK 相比,在此阶段受到轻度水分调亏的处理 LRD1 的青果产量与 CK 无显著差异 (表 4),而受到中度水分调亏处理的 LRD2 的青果产量比 CK 显著小 5.17%,且 BRD3 与 LRD2 处于同一水平,而其余调亏处理辣椒青果产量均与 CK 无显著差异。

2.3.4 总产量 处理 CK、SRD1、SRD2 和 LRD1 的青果总产量处于最高水平,处理 BRD1、FRD1 和 LRD1 的青果总产量处于同一水平 (表 4),比 CK 显著小 5.48%~6.98%。处理 BRD1、BRD2 和 FRD2 的青果总产量处于同一水平,比 CK 显著小 11.69%~

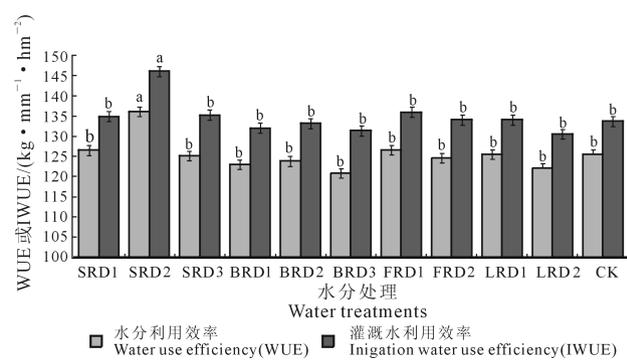
13.32%。而 SRD3 和 BRD3 的产量处于最低水平,分别比 CK 显著小 17.34% 和 25.56%。这说明不同生育阶段水分调亏对辣椒青果产量的影响,与调亏时期和调亏程度有关,而对于辣椒这样分批采收的蔬菜,水分调亏对不同批次的产量产生不同的影响。

2.4 辣椒水分利用效率和灌溉水利用效率

水分利用效率可以反映作物栽培过程中水所产生的经济效益^[11]。辣椒水分利用效率 (WUE) 反映每消耗单位水量所能获得辣椒青果产量,而辣椒灌溉水利用效率 (IWUE) 则反映每单位灌溉水所能获得辣椒青果产量。如图 3 可知,苗期中度调亏处理的 WUE 和 IWUE 均最大,分别为 131.08 kg·mm⁻¹·hm⁻² 和 146.10 kg·mm⁻¹·hm⁻²,分别比 CK 显著大 8.45% 和 9.20%,而其余调亏处理 WUE 和 IWUE 均与 CK 无显著差异。因此,在本研究条件下,与全生育期充分供水的对照处理相比,苗期中度水分调亏处理能显著提高辣椒 WUE 和 IWUE,其余水分调亏对辣椒水分利用影响不明显。

3 讨论与结论

付秋实^[12]和张爱民^[13]等研究结果表明,辣椒在生长过程中随着干旱胁迫的加剧,株高、茎粗、叶面积、生物量都呈现下降趋势,苗期和开花坐果期受到干旱胁迫复水后,由于辣椒的补偿生长效应,辣椒株高和茎粗等营养指标迅速接近对照处理。胡文海^[14]和刘晓建^[15]等研究表明,辣椒苗期水分



注:图中小写字母表示 $P < 0.05$ 的显著水平。

Note: The different small letters in figure mean significant difference at $P < 0.05$.

图3 不同水分处理辣椒水分利用效率和灌溉水利用效率
Fig.3 The WUE and IWUE of pepper under different water treatments

能够刺激辣椒根系生长尤其是主根的生长,增加了根的吸收能力和合成能力。本研究表明,辣椒株高、茎粗和叶面积指数始终处于最高水平,苗期、开花坐果期和盛果期不同程度水分调亏均引起辣椒株高、茎粗和叶面积指数显著下降,且水分调亏程度越大,株高、茎粗和叶面积指数就越小。而在后期水分调亏对辣椒株高和茎粗无显著影响。苗期和开花坐果期水分调亏均使辣椒地上部分和根系生物量显著下降,且相同水分亏缺度下地上部分生物量下降幅度大于根系,这说明辣椒地上部分对水分亏缺较根系敏感。

作物需水量的大小及其变化规律,决定于气象条件、作物的特性、土壤性质和农业技术措施等,但又有其大致的耗水量范围和一定的规律^[16-21]。辣椒全生育期耗水量主要集中在果实大量生长的盛果期,开花坐果期和苗期相对较小^[22-25]。霍海霞^[26]等研究表明,随着灌水上限的降低,辣椒生育阶段耗水量、日耗水量减少,但耗水规律相似,结果盛期>定植-开花坐果期>结果末期。黄海霞^[37]研究表明,调亏灌溉有效降低了各调亏时期的耗水模数和耗水强度。本研究结果表明,辣椒在盛果期内耗水量最大,耗水量和耗水模数分别在74.22mm和31.47%以上。各生育期水分调亏均可引起辣椒在该调亏时段耗水强度、耗水量和耗水模数的下降,并且水分调亏程度越大,下降幅度越大。

黄兴学^[28]等认为辣椒在开花坐果期,较高的灌溉上限,有利于提高辣椒坐果率、前期产量和水分利用率。孙华银,康绍忠^[29]等研究结果表明,较低的灌水下限会导致辣椒开花坐果期严重落花落果,最终产量明显小于对照处理。本研究结果表明,辣椒青果总产量以全生育期充分灌水的对照处理最大,

产量为36203.90kg·hm⁻²,在苗期轻度水分调亏、后期轻度水分调亏处理下,辣椒产量均与对照处理无显著差异,而在开花坐果期轻度、中度和重度水分亏缺分别使辣椒青果产量下降11.69%、13.32%和25.56%,因此,开花坐果期水分调亏对辣椒青果产量影响较大,这可能是因为开花授粉时花粉的产量和活力受到缺水影响而严重下降的原因^[30]。

产量水平上的水分利用效率(WUE),可定义为单位耗水量的产量,耗水量应考虑到土壤表面的无效蒸发,对节水更有实际意义^[31]。王峰^[32]、张恒嘉^[33]和郭相平^[34]等,分别对辣椒、马铃薯和玉米研究表明,膜下滴灌调亏可减少作物生育期耗水量,促进作物WUE的提高。本研究结果表明,苗期中度水分调亏处理在不显著降低辣椒青果产量的同时能显著提高辣椒水分利用效率,而其余水分调亏对辣椒水分利用效率影响不明显。

本试验研究结果表明,苗期中度水分调亏处理SRD2能显著减少辣椒营养生长,降低辣椒耗水量(或灌水量,但辣椒青果产量和对照无显著差异,处于最高水平,且WUE和IWUE在所有处理中最高,分别为136.09kg·mm⁻¹·hm⁻²和146.10kg·mm⁻¹·hm⁻²,均显著大于其它处理。因此,苗期中度水分调亏处理SRD2为本试验条件下的最优灌溉方案。

本试验以大田膜下滴灌为辣椒灌溉模式,为了避免辣椒生育后期雨水对辣椒产生不利影响以及较为有效的控制降雨期间田间土壤水分,采用垄沟全膜覆盖并设置田间排水系统,从而有效减小了雨水向垄上膜下土壤的大量入渗,实现了后期田间土壤水分的有效控制。此外,通过在辣椒各生育期设置多个水分调亏水平,比较充分地说明了调亏灌溉对辣椒耗水特征、产量和水分利用效率的影响,为今后辣椒大面积栽培以及灌溉制度的优化提供了一定理论依据。由于大田试验研究结果具有明显的地域局限性,因此,有必要对调亏灌溉在不同年份、地区、自然条件、作物栽培方式及营养元素的配方施肥等方面展开充分、广泛的研究,然后统计比较、归纳总结,提高结论可信度,以加强该项节水技术的实践性与有效性。另外,调亏灌溉的最终目标是提高和改善作物的产量和品质,本研究仅以产量为研究目标,针对调亏灌溉对辣椒品质的影响没有研究,这应成为今后深入研究的一个方向。

参考文献:

- [1] 马艳青. 我国辣椒产业形势分析[J]. 辣椒杂志, 2011, (1):1-5.
- [2] 山仑. 我国节水农业发展中的科技问题[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1):1-5.

- [3] 刘愿英,代世伟,范永贵,等.我国灌区农业水资源可持续利用问题探讨[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):157-162.
- [4] 苏荟.新疆农业高效节水灌溉技术选择研究[D].石河子:石河子大学,2013.
- [5] 李世英.对我国节水灌溉技术发展的几点思考[J].排灌机械工程学报,2000,18(1):6-8.
- [6] 黄玉祥,韩文霆,周龙,等.农户节水灌溉技术认知及其影响因素分析[J].农业工程学报,2012,28(18):113-120.
- [7] 寇丹,苏德荣,吴迪,等.地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(2):116-123.
- [8] J. Miguel Costa, Maria F. Ortuño, M. Manuela Chaves. Deficit Irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture [J]. Journal of Integrative Plant Biology. 2007, 49 (10): 1421-1434.
- [9] Fereres, E., & Soriano, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58 (2), 147-59.
- [10] 王家保,林秋金,叶水德,等.5种测量热带果树单叶面积的方法研究[J].热带农业科学,2003,23(1):11-14.
- [11] 张正斌,徐萍,周晓果,等.作物水分利用效率的遗传改良研究进展[J].中国农业科学,2006,39(2):289-294.
- [12] 付秋实,李红岭,崔健,等.水分胁迫对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J].中国农业科学,2009,42(5):1859-1866.
- [13] 张爱民,杨红,耿广东,等.干旱胁迫对辣椒幼苗形态指标的影响[J].贵州农业科学,2011,39(10):54-56.
- [14] 胡文海,曹玉林,曾建军,等.高温干旱对不同品种辣椒生长及呼吸作用的影响[J].植物研究,2008,28(2):199-204.
- [15] 刘晓建,谢小玉,薛兰兰,等.辣椒开花结果期对干旱胁迫响应机制的研究[J].西北农业学报,2009,18(5):246-249.
- [16] 尹海霞,张勃,王亚敏,等.黑河流域中游地区近43年来农作物需水量的变化趋势分析[J].资源科学,2012,34(3):409-417.
- [17] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(12):6-12.
- [18] 刘晓英,李玉中,郝卫平.华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因[J].农业工程学报,2005,21(10):155-159.
- [19] 刘晓英,林而达.气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J].水利学报,2004,35(2):0077-0082.
- [20] 王鹤龄,王润元,张强,等.气候变暖对甘肃省不同气候类型区主要作物需水量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(4):866-871.
- [21] 马鹏里,杨兴国,陈端生,等.农作物需水量随气候变化的响应研究[J].西北植物学报,2006,26(2):348-353.
- [22] 邵光成,刘娜,陈磊,等.温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验[J].农业机械学报,2008,39(4):117-121.
- [23] 张娟.辣椒时空亏缺灌溉最优模式试验研究[D].南京:河海大学,2007.
- [24] 彭强.遮阴与土壤水分对结果期辣椒果实及叶片生理特性的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [25] 李自辉.不同滴灌处理温室辣椒耗水与根系分布规律的研究[D].郑州:华北水利水电大学,2015.
- [26] 霍海霞.灌水控制上限对辣椒耗水及产量的试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [27] 黄海霞.干旱荒漠区辣椒耗水规律及对调亏灌溉的响应[D].兰州:甘肃农业大学,2012.
- [28] 黄兴学,邹志荣.温室辣椒节水灌溉指标的研究[J].陕西农业科学(自然科学版),2002,(3):8-10.
- [29] 孙华银,康绍忠,胡笑涛,等.根系分区交替灌溉对温室甜椒不同灌水下限的响应[J].农业工程学报,2008,24(6):78-84.
- [30] 房玉林,孙伟,万力,等.调亏灌溉对酿酒葡萄生长及果实品质的影响[J].中国农业科学,2013,46(13):2730-2738.
- [31] 王会肖,刘昌明.作物水分利用效率内涵及研究进展[J].水科学进展,2000,11(1):99-104.
- [32] 王峰,杜太生,邱让建,等.调亏灌溉对温室辣椒产量、品质及水分利用效率的影响[C]//全国农业水土工程第六届学术研讨会论文集,2010:454-462.
- [33] 张恒嘉,李晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
- [34] 郭相平,刘才良,邵孝侯,等.调亏灌溉对玉米需水规律和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,1999,17(3):92.