文章编号:1000-7601(2019)02-0025-07
doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.04

调亏灌溉对绿洲灌区膜下滴灌辣椒生长发育和产量的影响

高 佳[1],张恒嘉[1],巴玉春[2],王玉才[1],李福强[1],王泽义[1],张万恒[1],姜田亮[1]

(1.甘肃农业大学 水利水电工程学院,甘肃 兰州 730070;2.民乐县洪水河管理处,甘肃 民乐 734500)

摘 要:为探明不同调亏灌溉对绿洲灌区辣椒全生育期生长和产量形成的作用机理,于2017年采用大田试验研究了调亏灌溉对膜下滴灌辣椒生长发育、产量和水分利用效率的影响。以全生育期充分灌水(75%~85%田间持水量 θ_f)为对照,设置不同调亏灌溉处理:苗期轻度水分亏缺(65%~75% θ_f)WD1,苗期中度水分亏缺(55%~65% θ_f)WD2,苗期重度水分亏缺(45%~55% θ_f)WD3,苗期轻度水分亏缺-后果期轻度水分亏缺WD4,苗期中度水分亏缺-后果期轻度水分亏缺WD5,苗期重度水分亏缺-后果期轻度水分亏缺WD6,测定了各水分处理下的辣椒不同生育期生长指标(株高、叶面积指数和根冠比)及其产量和水分利用效率。结果表明:在辣椒苗期进行一定程度的水分胁迫均会抑制辣椒株高和叶面积的生长,其中WD2和WD3在后果期株高、叶面积指数分别比对照减小18.0%~37.4%和22.6%~54.6%,差异均显著($P<0.05$,下同);WD2的根冠比在后果期较对照处理显著增加14.97%;WD1对辣椒产量影响不显著,WD2和WD3与对照处理相比分别显著减产了4.3%和17.2%。全生育期辣椒耗水量受水分调亏程度影响较大,耗水量随调亏程度增大与对照处理相比减小0.7%~19.8%;WD5的水分利用效率最高,为139.47 kg·mm·hm^{-2},产量达34 746.12 kg·hm^{-2};后果期进行轻度调亏不影响辣椒株高和叶面积指数,且在不减产的情况下水分利用效率提高9.20%。因此,苗期施加中度水分调亏,后果期施加轻度水分调亏,其他阶段进行充分灌溉是实现绿洲灌区辣椒节水、高产高效栽培的一种较优灌溉方式。

关键词:调亏灌溉;膜下滴灌;辣椒;水分利用效率;产量;绿洲灌区

中图分类号:S641.3;S275.6 **文献标志码**:A

Effects of regulated deficit irrigation on pepper growth and yield under drip irrigation in oasis region

GAO Jia[1], ZHANG Heng-jia[1], BA Yu-chun[2], WANG Yu-cai[1], LI Fu-qiang[1], WANG Ze-yi[1], ZHANG Wan-heng[1], JIANG Tian-liang[1]

(1.*School of Water Resource and Hydropower*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*; 2. *Administration of Hongshuihe River*, *Minle*, *Gansu* 734500, *China*)

Abstract: To ascertain the mechanisms of the pepper production under regulated deficit irrigation (RDI) during the growth season, we conducted an experiment with full irrigation (75%~85% field water capacity of θ_f) as the contrast, irrigation at different reduced levels: mild water deficit in seedling stage (65%~75% of θ_f) as WD1, moderate water deficit in seedling stage (55%~65% of θ_f) as WD2, severe water deficit in seedling stage (45%~55% of θ_f) as WD3, mild water deficit in seedling stage-mild water deficit in later fruit period as WD4, moderate water deficit in seedling stage-mild water deficit in later fruit period as WD5, and severe water deficit in seedling stage-mild water deficit in later fruit period as WD6. The growth indexes (plant height, leaf area index, and root crown ratio) and the yield and water use efficiency of pepper were determined. The results showed that the growth of plant height and leaf area were inhibited by the different RDI treatments at seedling stage; The plant height reduced by 18.0%~37.4% and the leaf area index decreased by 22.6%~54.6% of WD2 and WD3 significantly com-

收稿日期:2018-02-02 **修回日期**:2018-12-23

基金项目:甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA073);国家自然科学基金项目(51669001)

作者简介:高佳(1993-),女,甘肃庆阳人,硕士,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:1915172214@qq.ocm

通信作者:张恒嘉(1974-),男,甘肃天水人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:596088683@qq.ocm

pared to CK respectively in the later fruit stage ($P<0.05$, the same below). The treatment with moderate WD2 at seedling stage made the root-shoot ratio of pepper increase by 14.97% significiantly than CK at the whole pepper growing season. WD1 treatment had no significant influence on pepper yield; WD2 and WD3 treatments decreased 4.3% of yield and 17.2% of yield, respectively. The water consumption of pepper in different growing stages reduced by 0.7%~19.8% than CK during the whole growth period. The WUE of WD5 was the highest (139.47 kg · mm · hm^{-2}), and its yield was 34 746.12 kg · hm^{-2}. The plant height and leaf area index of pepper were not affected by the mild water deficit in later fruit stage, and the water use efficiency increased by 9.20% without yield reduction. Therefore, applying moderate water deficit (55%~65% of θ_f) during seedling period and applying mild water deficit (65%~75% of θ_f) during later fruit and full irrigation at other period was a better irrigation technique to achieve water-saving, high-yield and high-efficient pepper cultivation in oasis region.

Keywords: regulated deficit irrigation; drip irrigation; pepper; water use efficiency; yield; the oasis region

辣椒在我国种植历史有400 a左右,是我国人民喜食的蔬菜之一,种植面积约为133万 hm^2,占世界辣椒面积的35%[1]。辣椒(*Capsicum anmuum* L)属于茄科辣椒属,浅根性植物,根系较为细弱,吸收能力不强,既不耐涝也不耐旱。土壤过于干旱或灌水太多都易造成根系生长不良,植株生长受到抑制,产量降低,品质下降等问题[2]。

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非常严重,尤其是西北半干旱和干旱地区,降水稀少,气候干旱,大力发展农业节水技术是我国现在和未来农业发展的重中之重[3-4]。中国农业用水量约占全国水资源消耗总量的77%,其中农田灌溉用水约占农业用水的90%~95%,长期以来普遍存在用水粗放,利用率低和水资源浪费严重等问题[5]。西北干旱、半干旱地区,水资源严重短缺,农业节水是现在必须解决的难题之一[6]。

膜下滴灌具有改善农田小气候,增产、节水、省肥省工,减少病虫害等优点。膜下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,研究表明,膜下滴灌技术可节水40%~50%,增产20%左右[7]。调亏灌溉理论是20世纪70年代被提出,最早应用于果树栽培方面[8-9]。到20世纪80,90年代,国内外专家对小麦、玉米、马铃薯等旱作作物进行了大量的调亏灌溉实践并取得了丰硕成果[10-11]。王峰[12]研究了调亏灌溉对温室膜下滴灌辣椒的影响,发现不同生育期水分亏缺均能显著降低辣椒的耗水量,而在果实成熟期适度调亏可提高辣椒的可溶性固形物、辣椒素、维生素C的含量,降低辣椒果实的含水率,明显提高辣椒品质。黄海霞[13]对露天栽培辣椒的调亏灌溉表明,水分亏缺能显著降低叶片的光合速率、蒸腾速率、气孔导度,但叶片水分利用效率却明显上升。王世杰等[14]研究了调亏灌溉对大田栽培辣椒的影响,发现苗期和开花坐果期的水分胁迫均能提高辣椒根冠比和果实干物质分配指数,并减少辣椒全生育期的灌水量和耗水量。

河西走廊地区是甘肃省重要的农业产区之一。河西走廊灌区之一的张掖市位于干旱地区,光热充足,土地资源丰富,具有发展农业的天然优势,但水资源极其短缺,农业用水尤其紧张。研究表明,在河西走廊地区采用节水灌溉制度,甜菜生育期节水灌溉比传统灌溉每公顷节水17%,玉米每公顷节水20%,小麦每公顷节水高达30%,而且粮食产量平均提高500 kg · hm^{-2}以上,增产6.6%~16.6%[15]。因此,本试验将起垄覆膜、膜下滴灌和调亏灌溉节水技术措施相结合,重点研究膜下滴灌调亏对陇椒16号生长发育、产量和水分利用效率(WUE)等指标的影响,确定调亏灌溉的最佳时期和最佳亏缺程度,以期为河西绿洲灌区辣椒抗旱节水研究提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在典型的荒漠绿洲灌区——张掖市民乐县益民灌溉试验站进行。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°43′,北纬38°39′,海拔1 970 m。荒漠绿洲灌区气候干燥,水源不足,属大陆性荒漠草原气候。年平均温度6℃,极端最高温度37.8℃,极端最低温度-33.3℃,年总降雨量183~285 mm,无霜期109~174 d,年日照时数3 000 h左右。土壤属轻壤土,土壤容重1.4 t · m^{-3},田间持水量(θ_f)为24%,pH值7.22,地下水位为20 m左右,灌区基本不受盐碱化影响,土壤肥力中等,0~20 cm耕层土壤有机质含量为11.3 g · kg^{-1},碱解氮54.0 mg · kg^{-1},速效钾192.0

$mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 17.6 $mg \cdot kg^{-1}$。

1.2　材料与栽培

供试辣椒品种为陇椒 16 号,栽培方式为露地栽培。于 2017 年 3 月 20 日在温棚育苗,5 月 8 日移栽定植,试验采用人工起垄,垄宽 80 cm,在离垄中心 5 cm 处开 2 条小沟,施入足量的氮磷钾复合肥。为了尽快排出田间积水,减少雨水渗入土层对田间含水量控制的影响,垄两侧高设为 10 cm,中间高设为 13 cm,沟宽 40 cm,每个试验小区之间用宽为 60 cm 的薄膜隔开,小区之间沿垄方向以排水沟隔开,沟宽 40 cm,沟深 15 cm 左右,沟的纵向坡度均约为 1∶60,在垄沟和排水沟沟底用 60 cm 宽的塑料薄膜覆盖,垄上覆膜搭接,并覆盖约 5 cm 厚土层压盖,通向田间排水干沟,垄上所用膜的膜宽 120 cm。辣椒采取每垄双行定植,行距为 45 cm,株距为 35~38 cm。垄中间铺设一条滴灌带,滴头间距为 30 cm,灌水时滴头平均流量为 2.5 $L \cdot h^{-1}$。从辣椒现蕾开始,每隔 15 d 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 14 日收获第 1 茬辣椒,8 月 10 日收获第 2 茬辣椒,8 月 28 日收获最后一茬。

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 4 个生育期:苗期(5 月 8 日至 6 月 9 日)、开花坐果期(6 月 10 日至 7 月 8 日)、盛果期(7 月 9 日至 8 月 6 日)和后果期(8 月 7 日至 8 月 29 日)。土壤水分控制分为 4 个梯度,分别为充分灌水(75%~85%田间持水量 θ_f)、轻度水分调亏(65%~75% θ_f)、中度水分调亏(55%~65% θ_f)和重度水分调亏(45%~55% θ_f)。在苗期分别设置轻度、中度和重度水分调亏,在开花坐果期和盛果期不进行水分调亏,而在后果期只设置轻度水分调亏。因此,本试验共设 6 个处理:苗期轻度水分调亏 WD1、苗期中度水分调亏 WD2、苗期重度水分调亏 WD3、苗期轻度水分调亏-后果期轻度水分调亏 WD4、苗期中度水分调亏-后果期轻度水分调亏 WD5、苗期重度水分调亏-后果期轻度水分调亏 WD6,全生育期充分灌水为对照(CK),每一处理及对照均设 3 次重复,共 21 个小区,每个小区面积为 2.4 m×6 m, 采用随机区组设计,有效试验种植面积为 310 m^2。灌水方法为膜下滴灌,水表量水,计划湿润层为 30 cm。利用土钻取土,烘干法测量土壤水分,当测得试验小区计划湿润层土壤水分低于设计下限时,灌水到设计上限,具体试验设计方案见表 1。

表 1　试验设计及控水方案

Table 1　Experimental design and soil water control scheme

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	开花坐果期 Blossom and fruit-bearing period	盛果期 Full fruit period	后果期 Later fruit period
WD1	65%~75%	75%~85%	75%~85%	75%~85%
WD2	55%~65%	75%~85%	75%~85%	75%~85%
WD3	45%~55%	75%~85%	75%~85%	75%~85%
WD4	65%~75%	75%~85%	75%~85%	65%~75%
WD5	55%~65%	75%~85%	75%~85%	65%~75%
WD6	45%~55%	75%~85%	75%~85%	65%~75%
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 mark "~" in table represent upper and lower limits of soil water control (the percentage of field capacity), respectively.

1.4　测定项目与方法

1.4.1　土壤水分　2017 年 5 月 10 日控水开始后,每个小区随机选择一垄,在连续 2 株辣椒植株连线的中点处用土钻分别钻取小区土壤剖面内 0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm,30~40 cm,40~60 cm 土层土壤,用烘干法测定其含水率;因为辣椒的根系主要分布在 0~30 cm 内,最后取 0~30 cm 土层土壤水分的平均值作为计划湿润层土壤内的水分,而以 0~60 cm 土层内土壤水分的变化来计算作物水分消耗量。在辣椒移栽前(5 月 7 日)取土测量 1 次,以后每隔 7 d 左右取土 1 次,灌水后以及降雨前后各加测 1 次,每次取土深度均为 60 cm。当土壤水分低于表 1 所示设计下限时,立即灌到设计上限。

1.4.2　株高和叶面积指数 LAI　从辣椒幼苗移栽之日测定 1 次,以后每个生育期末分别测定 1 次,每次从每个小区选取 5 株长势有代表性的植株分别进行测量,用分度值为 1 mm 的软尺进行株高的测量,叶面积的测量选用系数法[16~18]。

1.4.3　根冠比　地上部重量、地下部重量均为风干重, 即在阴凉处自然风干 21 d 后用电子天平测定。测定根重采用冲根法,以辣椒主茎底部为圆心,挖取半径为 15 cm,深 20 cm,将整株植株和土壤一起移入盆中,用水浸泡 2 h 以上放入尼龙网袋,用水管冲洗,弃去泥土,收集完整根系。

1.4.4　产量测定　果实成熟初期,在每小区选择 5 株长势有代表性的植株进行标记,每次采摘时将这 5 株辣椒产量的平均值作为小区辣椒单株产量,最后换算成每公顷产量,总产量为 3 次采摘产量之和。

1.4.5　水分利用效率和灌溉水利用效率

$$WUE = Y/ET$$

$$IWUE = Y/I$$

式中,WUE 为辣椒全生育期水分利用效率(kg · mm · hm^{-2});$IWUE$ 为辣椒全生育期灌溉水利用效率(kg · mm · hm^{-2});Y 为辣椒单位面积产量(kg · hm^{-2});ET 为辣椒全生育期单位面积耗水深度(mm);I 为辣椒全生育期单位面积灌水深度(mm)。

1.5 数据分析

采用软件 Excel 2010 和 SPSS 19.0 对采集数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对辣椒株高的影响

株高是指植株基部至主茎顶部即主茎生长点之间的距离,其变化可以反映作物生长情况。从表 2 可以看出,各水分处理下辣椒株高从苗期到后果期递增,不同生育期 6 个水分调亏处理下株高均低于充分灌溉的对照组(CK),苗期轻度水分调亏(WD1),苗期中度水分调亏(WD2)和苗期重度水分调亏(WD3)相比较为:WD1>WD2>WD3;这说明苗期不同程度水分调亏处理与对照组(CK)相比均显著(P<0.05)抑制辣椒株高的增长,且水分调亏程度越大,辣椒株高越小,与充分灌溉(CK)相比苗期各处理下的株高在后果期时分别显著降低6.1%、18.0%和 37.4%。WD4、WD5 和 WD6 处理与 WD1、WD2 和 WD3 处理相比各生育期的株高无显著性差异,这说明在后果期进行轻度水分调亏对辣椒株高无显著性影响(P>0.05)。在后果期 WD1 处理和 WD4 处理的株高与对照组处于同一水平,这说明辣椒苗期轻度水分调亏后期复水产生了补偿性生长效应。

表 2 不同调亏灌溉处理辣椒株高变化/cm

Table 2 Plant height of peper under different RDI treatments

处理 Treatment	苗期 Seedling	开花坐果期 Blossom and fruit-bearing period	盛果期 Full fruit period	后果期 Later fruit period
WD1	19.52b	40.17ab	48.34ab	51.38a
WD2	17.11bc	34.67c	42.08b	44.87b
WD3	16.23c	28.02d	32.63c	34.24c
WD4	19.91b	41.03a	47.78ab	50.28a
WD5	17.46bc	33.19c	43.12b	43.21b
WD6	16.42c	27.96d	33.29c	33.68c
CK	25.11a	44.24a	51.36a	54.72a

注:同列不同小写字母表示各处理间在 P<0.05 水平上差异显著。下同。

Note: The different lowercase letters within one column mean significant difference among treatments at P<0.05. The same below.

2.2 调亏灌溉对辣椒叶面积指数(LAI)的影响

叶面积指数是指单位土地面积上辣椒叶片总面积占土地面积的倍数。辣椒移栽定植时,各试验小区辣椒平均叶面积指数为 0.05,随着生育期的推进,各水分处理辣椒叶面积指数不断增大,如表 3 所示。开花坐果期和盛果期是辣椒生理和生殖生长的旺盛时期,叶面积指数增长量较大,苗期和后果期相对较小。从表 3 可以看出,各时期叶面积指数均表现为:CK 处理>WD1 处理>WD2 处理>WD3 处理。WD1、WD2 和 WD3 处理的苗期和开花坐果期的 LAI 与对照组相比差异均达显著水平(P<0.05),各水分调亏处理苗期分别降低 18.2%、19.6% 和 33.9%,开花坐果期分别降低 25.3%、40. 5% 和 29.6%。盛果期和后果期 WD1 和 WD4 处理与对照的叶面积指数处于同一水平(P>0.05),说明苗期轻度水分调亏复水后辣椒叶面积发生了恢复性生长。但苗期中度和重度水分调亏处理在后来的生长发育过程中叶面积生长不能得到完全补偿,致使后期复水辣椒叶面积指数仍显著低于对照,说明辣椒在苗期经历中度、重度调亏后叶面积生长受到明显抑制,即使复水也不能产生补偿效应。WD4、WD5 和 WD6 处理与 WD1、WD2 和 WD3 处理相比在各生育期无显著性差异(P>0.05),说明在后果期对辣椒进行轻度水分调亏不影响辣椒叶面积的增长。

2.3 调亏灌溉对辣椒根冠比的影响

根冠比是辣椒根系干物质量与地上部分干物质量之比。辣椒根冠比越大,其吸收水分和养分的能力就越强,后期抗旱能力也就越强[19]。从表 4 可以看出,辣椒根冠比在苗期最大,均在 0.22 以上,苗期水分调亏对根冠比均影响显著(P<0.05),后期随着辣椒枝叶和果实的大量生长而变小。WD1、WD2 和 WD3 处理与 CK 相比分别提高了 16.0%、29.8% 和 26.0%。后期复水后,苗期中度水分调亏(WD2)和

表 3 不同调亏灌溉处理辣椒叶面积指数(LAI)变化

Table 3 Leaf area index of peper under different RDI treatments

处理 Treatment	苗期 Seedling	开花坐果期 Blossom and fruit-bearing period	盛果期 Full fruit period	后果期 Later fruit period
WD1	0.099b	0.471b	0.979a	1.211a
WD2	0.080bc	0.389c	0.855b	0.989b
WD3	0.072c	0.367c	0.753b	0.880b
WD4	0.101a	0.475b	0.971a	1.207a
WD5	0.083bc	0.392c	0.860b	0.981b
WD6	0.069c	0.363c	0.749b	0.874c
CK	0.121a	0.521a	1.139a	1.278a

苗期中度-后果期轻度调亏(WD5)的根冠比在开花坐果期和盛果期始终显著大于 CK,而其他水分调亏在后期复水后根冠比虽略大于 CK,但无显著差异(P>0.05),这说明在苗期水分调亏有利于辣椒根冠比的提高,特别是苗期中度水分胁迫对辣椒根冠比的提高作用显著,且后期复水后辣椒根冠比在开花坐果期及后果期仍保持较高值,这将有利于辣椒后期抗旱能力和养分吸收能力的提高。WD4、WD5 和 WD6 处理分别与 WD1、WD2 和 WD3 处理相比,后果期的根冠比处于同一水平,分别提高了 1.47%、1.14%和 1.22%,说明后果期对辣椒进行轻度水分调亏对根冠比无显著影响。

2.4　调亏灌溉对辣椒产量和水分利用效率的影响

从表 5 可以看出,全生育期充分供水的对照处理辣椒产量最高,为 36 167.27 kg · hm^{-2},在苗期轻度和中度水分调亏处理下,辣椒总产量均与 CK 无显著差异(P>0.05),而苗期重度调亏导致辣椒总产量比 CK 显著减少 17.18%(P<0.05)。在第一茬收获时,WD1 和 WD4 处理与对照组 CK 处于最高水平,而在其余处理下有小幅度的降低,这说明苗期中度和重度水分调亏对辣椒第一茬的产量具有显著影响,WD2、WD3、WD5 和 WD6 处理下的产量与 CK 相比分别显著降低了 12.41%、20.83%、12.16%和 20.64%(P < 0.05)。在第二茬收获时,WD1、WD2、WD4 和 WD5 处理与 CK 处理的产量在同一水平,说明苗期轻度和中度水分调亏对辣椒第二茬产量影响不大。WD3 和 WD6 处理在第二茬和第三茬收获时与 CK 处理存在显著差异,与 CK 处理相比 WD3 减产 11. 97% 和 23. 15%, WD6 减产 11.97% 和 24.05%,表明在苗期进行重度水分调亏,严重影响了辣椒产量。在第三茬辣椒收获时,WD1、WD2、WD4 和 WD5 处理与对照处理处于同一水平,说明苗期轻度、中度调亏和后果期轻度调亏不影响辣椒产量。

表 4　不同调亏灌溉处理辣椒根冠比

Table 4　Root-shoot ratio of peper under different RDI treatments

处理 Treatment	苗期 Seedling	开花坐果期 Blossom and fruit-bearing period	盛果期 Full fruit period	后果期 Later fruit period
WD1	0.25679b	0.10721ab	0.05410ab	0.09912a
WD2	0.28741a	0.11331a	0.06218a	0.10921a
WD3	0.27899ab	0.10521ab	0.05212b	0.09591a
WD4	0.25682b	0.10726ab	0.05398ab	0.10058a
WD5	0.28803a	0.11329a	0.06234a	0.11046a
WD6	0.27862b	0.10533ab	0.05209b	0.09708a
CK	0.22143c	0.09214b	0.05181b	0.09499a

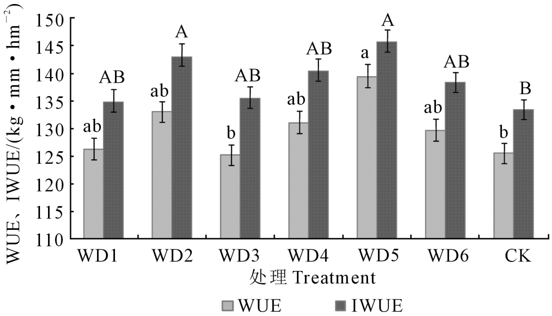
在充分灌水条件下辣椒全生育期耗水量和灌水量均最大,分别为 287.62 mm 和 271.06 mm。除苗期轻度水分调亏 WD1 和苗期轻度-后果期轻度水分调亏 WD4 处理的灌水量和耗水量与对照处理无显著差异外(P>0.05),其余水分调亏处理均显著降低了辣椒全生育期灌水量和耗水量(P<0.05),其中苗期重度-后果期轻度水分调亏处理 WD6 的耗水量和灌水量处于最低水平,分别为230.02 mm 和 215.68 mm。WD2 的耗水量和灌水量分别比 CK 显著减少 27.59 mm 和 29.04 mm;WD5 的耗水量和灌水量分别比 CK 显著减少 38.49 mm 和32.60 mm。

辣椒水分利用效率(WUE)反映每消耗单位水量所获得的辣椒产量。水分调亏灌溉对辣椒水分利用效率影响显著,从图 1 可以看出 WD5 处理的 WUE 最高,比 CK 处理显著提高 10.91%(P<0.05),WD2 处理的次之, CK 处理的最低。而在灌溉水利用效率(IWUE)中 WD5 处理最高,比 CK 显著提高 9.20%,CK 处理的最低。说明适度的水分调亏有利于提高辣椒的水分利用效率。WD4、WD5、WD6 处理与 WD1、WD2、WD3 处理相比,其 WUE 和 IWUE 基本处于同一水平,这说明在后果期进行轻度水分调亏处理对提高辣椒的 WUE 和 IWUE 的影响不显著。

表 5　不同调亏灌溉处理辣椒产量和水分利用状况

Table 5　Pepper fruit yield and water use under different RDI treatments

处理 Treatment	产量 Yield/(kg · hm^{-2}) 第一茬 First harvest	第二茬 Second harvest	第三茬 Third harvest	总产量 Total fruit yield	总耗水量/mm Total water consumption	灌水量/mm Irrigation amount
WD1	5869.33a	17856.26a	12382.02a	36107.61a	285.58a	267.80a
WD2	5301.02b	17148.99a	12124.41a	34624.42a	260.03b	242.02b
WD3	4791.12b	15901.03b	9262.82b	29954.97c	238.89c	220.99c
WD4	5870.89a	17819.89a	12367.15a	36057.93a	274.89a	256.69a
WD5	5316.03b	17169.03a	12261.06a	34746.12a	249.13b	238.46b
WD6	4803.01b	15899.97c	9153.98b	29856.96c	230.02d	215.68d
CK	6052.18a	18062.42a	12052.67a	36167.27a	287.62a	271.06a



注:不同小写字母表示各处理间 WUE 在 $P<0.05$ 水平差异显著;不同大写字母表示各处理间 IWUE 在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: The lowercase and uppercase letters in the figure indicate the WUE and IWUE differ significantly at the level of $P<0.05$ among the treatments, respectively.

图 1 不同调亏灌溉处理下的 WUE 和 IWUE

Fig.1 WUE and IWUE under different RDI treatments

3 讨 论

在西北干旱区,水分是农业生产中最主要的环境限制因素,农业生产最重要的目标是获取较高的产量和水分利用效率[20]。起垄覆膜与膜下滴灌相结合的灌水方式,可明显改善作物根系土壤水热环境,改善农田小气候,提高土壤温度[21~22],在实际生产过程中只有保证适宜的土壤含水量才能实现辣椒的节水、高产和优质。本研究表明,辣椒苗期调亏灌溉对株高、叶面积指数均有影响,苗期不同程度的调亏灌溉处理下株高、叶面积指数均表现为:轻度调亏>中度调亏>重度调亏处理,与丁端锋等[23]的研究结果一致。辣椒后果期轻度调亏灌溉对辣椒株高和叶面积指数无显著影响($P>0.05$)。这是因为辣椒在苗期主要进行生理生长,受到一定程度水分胁迫,生长受到抑制,导致株高、叶面积指数显著($P<0.05$)小于对照组,后期复水后,由于辣椒的补偿生长效应,苗期轻度和中度水分胁迫处理的辣椒株高和叶面积指数与对照处理无显著差异,这与付秋实[24]和张爱民等[25]研究结果一致。辣椒后果期主要进行生殖生长,因此,在后果期进行轻度调亏不影响辣椒株高和叶面积的生长。

根据根冠功能学说,作物受到逆境影响时能够自动地把获得的营养分配给最能缓解胁迫的器官,如种子和果实中,以防止物种的灭绝[26-27]。邵光成[28]、欧立军[29]和胡文海[30]等研究表明辣椒苗期水分胁迫能够刺激辣椒根系生长尤其是主根的生长,提高了根的吸收与合成能力。本研究结果显示,苗期不同水分调亏处理下辣椒根冠比均显著($P<0.05$)高于对照组,后期复水后,苗期轻度和重度调亏处理下辣椒根冠比均与对照组无显著差异($P>0.05$),而苗期中度水分胁迫处理辣椒根冠比在开花坐果期和盛果期仍保持较高值,有利于辣椒后期抗旱能力和养分吸收能力的提高,这与程明等[31]和刘晓建等[32]研究结果一致。后果期主要进行生殖生长,因此,后果期进行轻度调亏灌溉不影响辣椒根冠比。

大量研究表明,不同时期缺水对作物产量影响不同,作物产量与其生育期总耗水量变化基本上是一致的,即作物达到最大产量后再灌水是一种浪费,不仅不会增加产量,反而有可能引起作物减产和水分利用效率下降[33]。传统的灌溉方式以单一追求高产为目的,对农作物进行大量灌溉,最终导致水资源的浪费和部分作物品质的下降。而在当今水资源严重匮乏的情况下,农业生产不再以单一追求高产为目的,而是追求高产出和高效益的双赢[34]。WUE 通常被用来衡量农业生产的用水效率,一般被定义为单位耗水量的产量(生物量或经济产量)[35]。王峰[12]、张恒嘉[36]和郭相平[37]等分别对辣椒、马铃薯和玉米的研究表明,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。本试验结果显示,苗期轻度和中度水分调亏均能显著提高($P<0.05$)辣椒水分利用效率和灌溉水利用效率,其中苗期中度-后果期轻度水分调亏处理的水分利用效率和灌溉水利用效率均最高,分别比对照处理提高 10.91%和 9.20%,这是因为后果期进行轻度调亏在不减产的情况下,适当降低了辣椒耗水量,减少了水资源的浪费,从而有效提高了水分利用率,达到辣椒生产的高效益。

4 结 论

1)在膜下滴灌条件下,全生育期充分供水的对照组株高和叶面积指数始终处于最高水平,苗期不同程度的水分调亏均引起辣椒株高和叶面积指数显著($P<0.05$)下降,且随着水分调亏程度的增大,下降幅度也相应增大。而在后果期轻度水分调亏对辣椒株高和叶面积指数无显著影响($P>0.05$)。

2)在膜下滴灌条件下,苗期水分调亏灌溉均提高了调亏时段内辣椒根冠比,后期复水苗期中度水分处理的根冠比始终显著大于对照组($P<0.05$)。而其他处理在后期复水后根冠比与 CK 处于同一水平($P>0.05$)。

3)全生育期内充分供水的对照处理辣椒产量最大,为 36 167.27 kg·hm^{-2};苗期水分调亏灌溉对辣椒水分利用效率和灌溉水利用效率影响显著($P<$

0.05),与 CK 相比,苗期中度-后果期轻度水分调亏的水分利用效率和灌溉水利用效率分别显著提高 10.91%和 9.20%。

4)随着水资源短缺的加剧和全球人口的增长,在实现节约用水的同时,更加强调实现高产出。辣椒苗期中度-后果期轻度水分调亏处理,在不显著降低($P>0.05$)辣椒产量的情况下,显著($P<0.05$)降低了辣椒全生育期的灌水量和耗水量,且 WUE 和 IWUE 均最高。因此,膜下滴灌条件下,苗期进行中度水分调亏灌溉(55%~65%田间持水量),后果期进行轻度水分调亏灌溉(65%~75%田间持水量),其余时期充分供水(75%~85%田间持水量)是河西地区实现辣椒节水、高产和高效栽培的一种较优灌溉方式。

参 考 文 献:

[1] 张西露,毛亦卉,向拉蛟.国内外辣椒产业研究开发的现状分析[J].辣椒杂志,2008,(1):1-5.

[2] 康绍忠,蔡焕杰.作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2002:152-158.

[3] 山仑,徐萌.节水农业及其生理生态基础[J].应用生态学报,1991,2(1):70-76.

[4] 肖亮.浅谈膜下滴灌技术的应用现状及优点[J].农业科技与信息,2015,(7):66-67.

[5] 刘佳,张玲丽,颉建明,等.干旱气候条件下灌溉方式与灌水定额对辣椒生长的影响[J].中国沙漠,2013,33(2):373-381.

[6] 张世彪,李松,牛珂平,等.甘肃秦王川灌区农业节水途径探讨[J].中国沙漠,2012,32(1):270-275.

[7] Chalmers D J, Mitchell P D, Vanheek L. Control of peach-tree growth and productivity by regulated water-supply, tree density, and summer pruning[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1981,106(3):307-312.

[8] Mitchel P D,Chalmers D J, Jerie P H, et al. The use of initial with holding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation on pear trees[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science,1986,111(6):858-861.

[9] Marshell J, Girona J. Regulationship between leaf water potential and gas exchange activity at different phonological periods and fruitloads in peach trees[J]. Journal of the American Society Horticultural Science, 1997,122(3):415-421.

[10] 郭松年,丁林,王福霞.作物调亏灌溉理论与技术研究进展及发展趋势[J].中国农村水利水电,2009,(8):12-16.

[11] 卢育华,蔬菜栽培学各论(北方本)[M].北京:中国农业出版社,2000:85-88.

[12] 王峰,杜太生,邱让建.调亏灌溉对温室辣椒产量、品质及水分利用效率的影响[C]//中国农业工程学会.现代节水高效农业与生态灌区建设(上).昆明:云南大学出版社,2010:454-462.

[13] 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.

[14] 王世杰,张恒嘉,杨晓婷,等.水分胁迫及复水对绿洲膜下滴灌辣椒动态生长、产量及水分利用的影响[J].华北农学报,2017,32(4):215-224.

[15] 尉元明,朱丽霞,周跃武,等.河西走廊水资源利用现状与节水灌溉工程分析[J].中国沙漠,2004,24(4):22-26.

[16] 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):11-14,23.

[17] 卢美英,潘介春.枇杷叶面积测定方法的研究[J].福建果树,2003,(1):1-3.

[18] 柏军华,王克如,初振东,等.叶面积测定方法的比较研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2005,23(2):216-218.

[19] 方锋,黄占斌,俞满源.保水剂与水分控制对辣椒生长及水分利用效率的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(2):78-81.

[20] Ledoigt G,Griffaut B,Debiton E,et al. Analysis of secreted protease inhibitors after water stress in potato tubers[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2006,38(3-5):0-271.

[21] 王秀康,李占斌,邢英英.覆膜和施肥对玉米产量和土壤温度、硝态氮分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):884-897.

[22] 雷舜,王抄抄,黄炎,等,分蘖期控制灌溉对土温及水稻干物质积累等的影响[J].华北农学报,2016,31(2):153-158.

[23] 丁端锋,蔡焕杰,王健,等.玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):64-67.

[24] 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.

[25] 张爱民,杨红,耿广东.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.

[26] Boland A M, Mitchell P D, Jerie P H. The effect of regulated deficit irrigation on water use and growth of peach [J]. Journal of Horticultural Science,1993,68(2):261-264.

[27] 王树声,李春俭,梁晓芳,等.施氮水平对烤烟根冠平衡及氮素积累与分配的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):935-939.

[28] 邵光成,刘娜,陈磊.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.

[29] 欧立军,陈波,邹学校.干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J].生态学报,2012,32(8):2612-2619.

[30] 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.

[31] 程明,周继华,安顺伟,等.不同灌溉方式对辣椒生长、产量和水分生产效率的影响[J].中国蔬菜,2011,(Z1):92-95.

[32] 刘晓建,谢小玉,薛兰兰.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.

[33] 樊廷录,杨珍,王建华,等.灌水时期和灌水量对甘肃河西玉米制种产量和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):1-6.

[34] 吴普特,冯浩.中国节水农业发展战略初探[J].农业工程学报,2005,21(6):152-157.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 郭相平,刘才良,邵孝侯,等.调亏灌溉对玉米需水规律和水分生产效率的影响[J].干旱地区农业研究,1999,17(3):92-96.