

# 基于 AHP-EWM-TOPSIS 的温室辣椒 最佳调亏灌溉方案优化研究

张泽宇,曹红霞,何子建,裴书瑶,李曼宇

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**辣椒对土壤水分非常敏感,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,辣椒产量的提高往往伴随品质的下降。为选出能平衡产量和品质的最优调亏灌溉方案,本试验以辣椒为研究对象,以全生育期充分供水(75%~85% $\theta_f$ , $\theta_f$ 为田间持水量)作为对照(CK),在3个调亏时期(苗期M、花期H和果期G)分别设置2种调亏程度(轻度水分调亏LS:65%~75% $\theta_f$ ,重度水分调亏SS:55%~65% $\theta_f$ )和2种调亏历时(短期调亏:连续亏水4d,长期调亏:连续亏水8d),研究不同调亏处理对辣椒生长、产量和品质的影响。结果表明,在各生育期进行调亏灌溉均会减小辣椒株高、茎粗、叶面积及营养器官干物质。与花期和果期相比,苗期水分调亏对辣椒生长指标及营养器官干物质的抑制程度最大,尤其在苗期长期重度水分调亏(MSS-8)下,营养器官干物质最少,较CK下降27.85%。另外,苗期和花期适度的水分调亏有利于提高辣椒生殖器官干物质和产量,其中,苗期短期轻度(MLS-4)、苗期长期轻度(MLS-8)及花期短期轻度(HLS-4)水分调亏处理使辣椒生殖器官干物质和产量有不同程度的提高。在MLS-8处理下,生殖器官干物质和产量最大,分别较CK增加17.60%和17.01%。但果期不同强度的水分调亏均导致生殖器官干物质和产量显著降低,其中,在果期长期重度水分调亏(GSS-8)下,生殖器官干物质和产量最小,分别较CK下降43.88%和41.56%。此外,苗期亏水会显著降低果实品质,而花期和果期水分调亏对辣椒品质有促进作用。其中,GSS-8处理下VC含量、果色指数及辣椒红素增加的最多,分别较CK增加7.50%、5.71%和10.30%。为综合反映决策者偏好和客观试验结果,以更加科学、全面的方法选出最优调亏灌溉方案,应用AHP-EWM-TOPSIS多目标综合分析方法对各调亏灌溉方案进行打分,发现花期短期水分轻度调亏方案(HLS-4)得分最高,对温室辣椒产量及品质的改善效果最佳。因此,HLS-4方案是本试验中的最佳调亏方案。

**关键词:**调亏灌溉;辣椒;干旱;生长指标;品质

**中图分类号:**S641.3;S274.1 **文献标志码:**A

## Study on greenhouse pepper optimal regulated deficit irrigation scheme based on AHP-EWM-TOPSIS

ZHANG Zeyu, CAO Hongxia, HE Zijian, PEI Shuyao, LI Manning

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Peppers are very sensitive to soil moisture. Traditional irrigation methods only aim at high yield with a large amount of irrigation water on the crop which resulting in high yield and low quality in peppers. To select the optimal regulated deficit irrigation scheme balancing between yield and quality, this study took pepper as the research object, with adequate water supply (75%~85% $\theta_f$ ,  $\theta_f$  is filed capacity) for the whole growth period as control (CK). Two kinds of deficit degree (mild RDI: 65%~75% $\theta_f$  and severe RDI: 55%~65% $\theta_f$ ) and two kinds of deficit duration (short RDI: continuous deficit for four days and long RDI: continuous deficit for eight days) were set in three growth stages (seedling, flowering, and fruiting stage). The experimental results showed that, the plant height, stem diameter, leaf area and dry matter of vegetative organs of pepper were all reduced by regulated deficit irrigation at different growth stages. Compared with flowering and fruiting stage, water deficit at seedling stage in-

收稿日期:2022-03-20

修回日期:2022-05-31

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400204);陕西省水利厅科技计划项目(2020slkj-08)

作者简介:张泽宇(1996-),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangzeyu0606@163.com

通信作者:曹红霞(1971-),女,新疆五家渠人,博士生导师,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: nschx225@nwfau.edu.cn

hibited growth indexes and dry matter of vegetative organs the most. Especially under the long-term severe water deficit at seedling stage (MSS-8), the dry matter of vegetative organs was the least, which decreased by 27.85% compared with CK. In addition, moderate water deficit at seedling stage and flowering stage was beneficial to increase dry matter of reproductive organs and yield of pepper. Of which, short-term mild water deficit at seedling stage (MLS-4), long-term mild water deficit at seedling stage (MLS-8) and short-term mild water deficit at flowering stage (HLS-4) increased dry matter of reproductive organs and yield of pepper to different degrees. Especially under the treatment of MLS-8, the dry matter of reproductive organs and yield was the most, which increased by 17.60% and 17.01%, compared with CK. However, the dry matter of reproductive organs and yield were decreased in different intensity of water deficit at fruit stage. In the long-term severe water deficit at fruiting stage (GSS-8), the dry matter of reproductive organs and yield were the least, which were decreased by 43.88% and 41.56% compared with CK, respectively. In addition, water deficit at seedling stage can reduce fruit quality, while water deficit at flowering and fruiting stage can promote pepper quality. Among them, VC content, fruit color index and capsaicin increased the most under GSS-8 treatment, which increased by 7.50%, 5.71% and 10.30% compared with CK, respectively. Based on comprehensive reflection of the decision makers preference and objective test results and a more scientific and comprehensive method of selecting the optimal regulated deficit irrigation scheme, the AHP-EWM-TOPSIS multi-target comprehensive analysis method was used to score regulated deficit irrigation schemes. It found that the short-term mild water deficit scheme at flowering stage (HLS-4) possessed the highest score for improving the production and quality most. Therefore, HLS-4 scheme was the best deficit scheme in this experiment.

**Keywords:** regulated deficit irrigation; pepper; drought; growth index; quality

辣椒在世界各地广泛种植,其全球栽培面积达 198.71 万  $\text{hm}^2$ ,年产量超过 4 000 万 t,产量和种植面积居蔬菜作物前列<sup>[1]</sup>。辣椒富含多种营养成分,其中维生素 C 含量居蔬菜之首。辣椒素类物质是辣椒果实合成的重要次生代谢物,也是辣椒中辣味的主要来源,能促进人体新陈代谢。果色指数是衡量辣椒外观品质的重要参数,色泽鲜艳的辣椒往往具有更大的销售潜力<sup>[2]</sup>。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。但辣椒属于浅根系植物,根细而弱,木栓化程度高,对水分变化非常敏感,大量灌水不但没有大幅提高产量,还往往引起品质的下降<sup>[3-4]</sup>。因此,如何进行合理灌溉以在提高辣椒产量的同时又保证其品质,进而提高经济效益已成为人们关注的重点。

调亏灌溉(RDI)是在作物生长发育的某些时期施加一定的水分胁迫,有目的地使其生育阶段有一定程度的亏水,影响作物的代谢运转和光合产物在营养器官与生殖器官之间的分配,控制营养生长,促进生殖生长,改善内部同化物运输和分配,从而提高果实产量和品质<sup>[5-6]</sup>。但由于作物在不同生育阶段对水分的需求不同,各生育期不同程度的水分调亏往往对作物产生不同的影响。为确定合适的亏水时期和亏水程度,大量学者对此进行研究。高佳等<sup>[7]</sup>研究发现,结果盛期轻度水分亏缺可提高辣

椒第二次收获的营养品质,苗期轻度水分亏缺下产量最高。马彦霞等<sup>[8]</sup>研究发现,在辣椒苗期和盛果期将基质含水率控制在饱和含水率的 70%~80%,在初花期和初果期分别将基质含水率控制在饱和含水率的 50%~60%和 60%~70%,能在节水和保证较高产量的同时,改善果实品质。Wu 等<sup>[9]</sup>研究发现,随灌水量增加,番茄产量逐渐增加,在 100% $E_t$ 水分处理时产量最大;但可溶性糖、VC 及可溶性固形物等品质指标在 100% $E_t$ 水分处理时最小。

对于调亏灌溉而言,调亏时期、调亏程度及调亏历时是决定调亏效果的主要因素。在以往的研究中,学者们多从调亏时期和调亏程度两方面进行分析,而对于调亏时期、程度及历时的交互作用对作物的影响机制考虑较少。另外,评价方案的优劣是一个多属性、多层次的决策问题,涉及到生长、产量和品质等多方面因素的分析 and 比较,既要反映农户、顾客的主观意见,又要反映数据的特点,而采用常规方差对比法很难做到客观、准确的分析。多目标综合评价分析方法(MCDM)可以有效地从主、客观角度评价各方案的优劣,得到的评价结果可靠合理<sup>[10]</sup>。很多学者将主、客观赋权法相结合建立多指标分析评价模型。例如,张智等<sup>[11]</sup>在探寻温室甜瓜最佳水肥组合方案时,利用灰色关联与 TOPSIS 耦合模型进行综合评价。杜娅丹等<sup>[12]</sup>在选择最适宜

番茄的营养液配比时,使用主观层次分析法(AHP)和熵权法(EWM)确定各生长、生理指标及全株干物质量的权重,并运用 TOPSIS 法进行综合评价。吴雪等<sup>[13]</sup>在选择温室番茄最佳水肥组合方案时,根据 AHP 与 EWM 和基于博弈论的组合赋权法确定番茄品质指标权重,并通过近似理想解法选出最佳组合方案。但在以往的研究中,应用多目标综合评价分析方法筛选温室辣椒最佳调亏灌溉方案的研究较少。

温室蔬菜栽培是一种常见的种植方式,与大田环境相比,能更好地为作物提供良好的水、光、气、热等生长条件。但由于温室环境相对密闭,室内温度、湿度较高,大量灌水不仅会增加无效蒸发,造成作物徒长,还极易产生病虫害,降低温室作物的产量和品质。如何对温室作物进行合理的亏缺灌溉,保证作物生长发育并提高其产量和品质,是温室栽培中亟待解决的问题。

因此,本研究通过分析各生育期不同强度和历时的水分调亏对温室辣椒生长、产量及品质的影响,并结合多目标综合评价分析法(AHP-EWM-TOPSIS)选出最佳调亏方案,以期为温室辣椒节水、高产、优质栽培提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验概况

试验于 2020 年 7—11 月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的日光温室 内进行(34°17'N, 108°01'E, 海拔 521 m)。该区属暖温带季风半湿润气候,多年平均降水量 632 mm,主要集中在 6—10 月,年均蒸发量 1 500 mm。多年平均气温 12.50℃,年均日照时数 2 163.80 h,无霜期 210 d。

供试材料为线辣椒,品种为‘世纪红’。依据辣椒生长发育特点将其整个生育期分为 3 个时期:定植至首朵花现蕾为苗期,首朵花现蕾至首朵花结果为花期,首个辣椒坐果至收获结束为果期。辣椒整个生育期共施 4 次肥,第 1 次在定植前基施:每盆 0.461 g 尿素(N:46.4%)、2.043 g 磷酸二铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:42%,N:15%)、2.625 g 硫酸钾(K<sub>2</sub>O:54%),其余 3 次分别在门椒期、对椒期和结果盛期追施:每盆每次追施 1.121 g 尿素。

采用盆栽方法,盆的上口直径×下底直径×高为 23.5 cm×18.0 cm×26.0 cm,每盆定植 1 株。试验土壤为重壤土,取自西北农林科技大学附近 0~20 cm 表土层。土壤容重 1.40 g·cm<sup>-3</sup>,田间持水率为

24%(质量含水率)。有机质含量 14.12 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 89.31 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 82.32 mg·kg<sup>-1</sup>,有效钾 244.39 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 为 7.91。土壤经自然风干后过 2 mm 筛,每盆装土 6.5 kg。每盆土壤表面铺一层珍珠岩,防止土壤板结。为保证作物根部透气,在每盆底部均打 5 个孔( $d=5$  mm),并铺设一层细砂(约 0.6 cm)。

### 1.2 试验设计

试验设置水分调亏时期、调亏程度和调亏历时 3 个因素,其中调亏时期包括 3 个时期:苗期(M)、花期(H)及果期(G),每个时期设置 2 种调亏程度:轻度调亏 LS(65%~75% $\theta_f$ )及重度调亏 SS(55%~65% $\theta_f$ ),每种调亏程度对应 2 种调亏历时:亏水 4 天(4 d)及亏水 8 天(8 d),以全生育期充分供水作为对照处理 CK(75%~85% $\theta_f$ ),共 13 个处理,每个处理 15 株(3 次重复×5 株/重复),共种 195 株。具体试验设计见表 1。

采用育苗移栽的方式种植,定植后各处理灌水至田间持水量,缓苗 2 周后自然干旱至各水分调亏处理。每天 18:00 采用精度为 0.01 kg 的电子秤进行称重补水,使土壤含水率维持在设定范围内,在非亏水时期,土壤含水率均保持在 CK 水平。

表 1 试验设计

Table 1 Designs of experimental

处理代号 Treatment	调亏时期(S) RDI period	调亏程度(C) RDI degree	调亏历时(L) RDI duration/d
MLS-4		LS	4
MSS-4	苗期(M)	SS	4
MLS-8	Seedling stage	LS	8
MSS-8		SS	8
HLS-4		LS	4
HSS-4	开花坐果期(H)	SS	4
HLS-8	Flowering stage	LS	8
HSS-8		SS	8
GLS-4		LS	4
GSS-4	结果期(G)	SS	4
GLS-8	Fruiting stage	LS	8
GSS-8		SS	8
CK	维持在田间持水率的 75%~85% Maintain 75%~85% field capacity		

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标 各处理随机选取 3 株辣椒在最后一次采摘期用钢尺和游标卡尺测定辣椒的株高(茎基部至生长点高度)、茎粗(第一花序下节点处直径),应用植物表型成像系统测定叶面积。

#### 1.3.2 产量

(1)经济产量。在果实成熟阶段,各处理随机标注 3 株辣椒以四母斗时期的果实为采样对象,第 1 次采样在花后 12 d 左右,之后每隔 6 d 采摘 1 次成熟度



一致的辣椒,用精度 0.01 g 的电子秤称量并记录,将各次果实重量累加得各处理的单株果实产量。

(2)生物学产量。在最后 1 次采摘期,每个处理随机选 3 株进行破坏性取样。将植株根、茎、叶及果实分别装袋放入烘箱,在 105℃ 下杀青 0.5 h,80℃ 下烘干至恒重,称量各组织的干重。其中,果实干重为各采摘期辣椒干重的总和。

1.3.3 品质 在各采摘期,每个处理随机选取 3 个果实进行品质测定,取平均值作为最后的品质指标值。测定项目包括辣椒果色指数<sup>[14]</sup>、维生素 C 含量<sup>[15]</sup>、辣椒红素(色价)<sup>[16]</sup>。

## 1.4 基于 AHP-EWM-TOPSIS 法的调亏灌溉方案评价

### 1.4.1 建立 AHP-EWM 组合权重模型

(1)通过层次分析法(AHP)确定指标主观权重。首先,构建综合评价系统。综合评价系统共包括 4 层,从上至下分别为目标层、准则层、指标层及方案层(图 1),根据 1~9 标度法对同一层次各评价指标重要性进行两两比较,以构建判断矩阵;之后,将判断矩阵进行标准化并计算准则层权重;最后,对矩阵的一致性进行评估,并验证其可接受性。一般认为,当  $CR$ (一致性系数) $\leq 0.1$ ,认为判断矩阵基本符合随机一致性指标;当  $CR > 0.1$ ,认为判断矩阵不符合随机一致性指标,必须进行调整和修正<sup>[17]</sup>

(具体计算方法参见文献<sup>[18]</sup>)。

(2)通过熵权法(EWM)确定指标客观权重。首先,根据二级指标的属性,将正向指标和负向指标转化为规范化值,并将评价指标归一化;之后,计算指标信息熵、差异系数及指标权重(具体计算方法参见文献<sup>[19]</sup>)。

(3)计算混合权重。应用乘数合成归一法计算混合权重<sup>[20]</sup>。

$$\omega_i = \frac{\omega_{li}\omega_{2i}}{\sum_{i=1}^n \omega_{li}\omega_{2i}} \quad (1)$$

式中, $\omega_i$  为第  $i$  个二级指标的综合权重; $\omega_{li}$  为第  $i$  个二级指标的主观权重; $\omega_{2i}$  为第  $i$  个二级指标的客观权重。

1.4.2 应用 TOPSIS 法进行排序 首先,运用极值标准化法来对评价指标进行标准化处理,用以确定具体指标实际值在该指标权重中所处的状况;其次,将标准化矩阵的每一行与混合权重相乘得到加权后规范化决策矩阵;最后,寻求正理想解和负理想解,并计算不同评价向量到正理想解和负理想解的距离及不同方案与最优方案的贴程度。贴程度越大,表示该项方案越接近于最优水平。依据综合评价指数的大小对目标进行排序,形成决策的依据(具体计算方法参见文献<sup>[18]</sup>)。

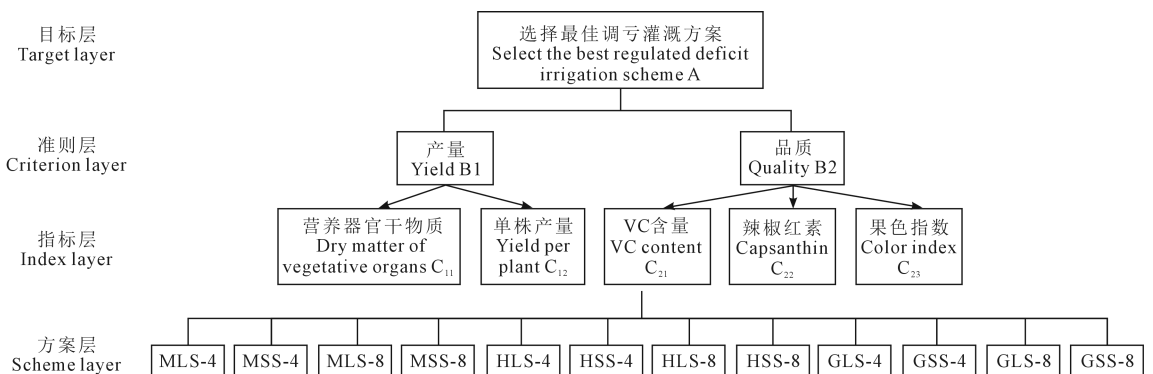


图 1 基于辣椒产量及品质指标的调亏灌溉方案综合评价系统

Fig.1 Comprehensive evaluation system of regulated deficit irrigation schemes based on yield and quality of pepper

## 1.5 数据处理

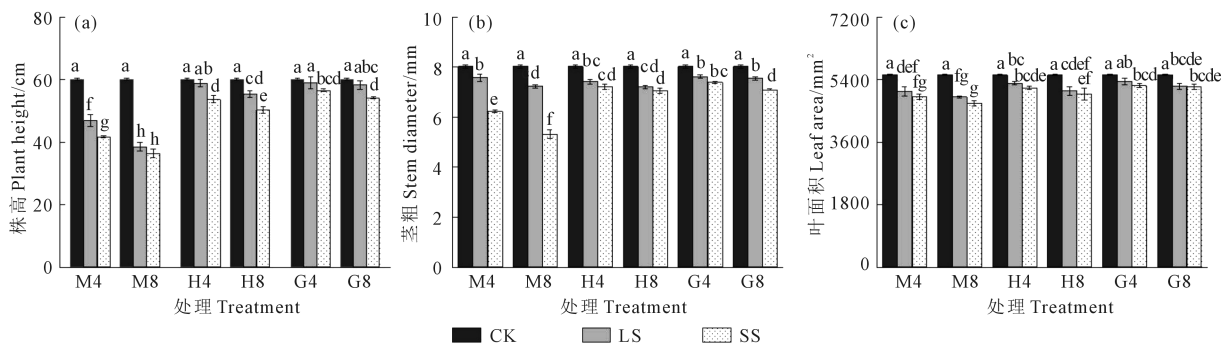
采用 Microsoft Excel 2019 处理试验数据并进行 TOPSIS 法评价, DPS 进行方差分析,使用 Tukey 检验进行多重比较;并用 OriginPro 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 调亏灌溉对辣椒生长的影响

图 2a、b、c 分别为不同调亏处理对辣椒株高、茎粗和叶面积的影响。调亏时期(S)和调亏程度(C)

对株高、叶面积有显著影响(表 2)。从整个生育期来看,苗期水分调亏对辣椒株高和叶面积影响最大。尤其在苗期长期重度调亏处理(MSS-8)下株高和叶面积最小,分别较 CK 降低 39.38% 和 14.70%。花期与果期的水分调亏对辣椒株高和叶面积的影响相似,同一历时、同一程度的调亏处理间未产生显著差异(除 HSS-8 处理下的株高显著小于 GSS-8)。茎粗仅受调亏程度(C)影响显著。在各生育期相同历时的水分调亏下,随亏水程度增加,



注: M4、M8、H4、H8、G4 和 G8 分别表示苗期短期调亏、苗期长期调亏、花期短期调亏、花期长期调亏、果期短期调亏和果期长期调亏。图中不同小写字母表示不同生育期、不同调亏程度及不同历时水分处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: M4, M8, H4, H8, G4 and G8 respectively represent short-term regulated deficit in seedling stage, long-term regulated deficit in seedling stage, short-term regulated deficit in flowering stage, long-term regulated deficit in flowering stage, short-term regulated deficit in fruit stage and long-term regulated deficit in fruit stage. Different lowercase letters in the figure indicated that there were significant differences among different growth periods, different regulated deficit irrigation levels and different duration water treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 2 调亏灌溉对辣椒生长的影响

Fig.2 Effects of regulated deficit irrigation on pepper growth

表 2 调亏时期、调亏程度、调亏历时及其交互作用对辣椒生长影响的显著性

Table 2 Significant of effects of regulated deficit irrigation period, degree, duration and interaction between them on pepper growth

生长指标 Growth index	调亏时期 S	调亏程度 C	调亏历时 L	时期×程度 S×C	时期×历时 S×L	程度×历时 C×L	时期×程度×历时 S×C×L
株高 Plant height	**	*	ns	**	**	**	**
茎粗 Stem diameter	ns	**	ns	**	**	**	**
叶面积 Leaf area	*	*	ns	**	**	**	**

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关; ns 表示不相关。下同。

Note: \*\* indicates a significant correlation at the 0.01 level (bilateral); \* indicates a significant correlation at the 0.05 level (bilateral); ns indicates no correlation. The same as below.

茎粗逐渐减小。与株高和叶面积相似,茎粗也受苗期水分调亏影响最大;其中,MLS-4 和 MSS-4 处理的茎粗分别较 CK 下降 5.61% 和 22.20%,MLS-8、MSS-8 处理的茎粗分别较 CK 下降 9.90% 和 33.72%。调亏历时(L)对各生长指标无显著影响。但调亏时期、程度及历时的交互作用对株高、茎粗、叶面积均产生极显著影响。

### 2.2 调亏灌溉对辣椒干物质积累和根冠比的影响

作物产量的形成是由干物质积累及分配所决定的,干物质是产量形成的物质基础<sup>[21]</sup>。由表 3 可知,调亏时期及调亏程度对辣椒营养生长和生殖生长影响显著,但调亏历时未对营养生长和生殖生长产生显著影响。由图 3 可知,在各生育期同一调亏历时下,随亏水程度增加,营养器官干物质逐渐降低(除果期长期重度调亏(GSS-8)处理下的干物质较果期长期轻度调亏(GLS-8)增加外)。其中,在

苗期进行水分调亏,辣椒营养器官干物质减少的最多,尤其在苗期长期重度调亏(MSS-8)处理的营养器官干物质最少,较 CK 降低 27.85%。另外,苗期不同历时的水分调亏(M4、M8)及花期短期调亏(H4)处理,随亏缺程度增加,辣椒生殖器官干物质表现为 LS>CK>SS,MLS-4、MLS-8 及 HLS-4 处理其生殖器官干物质分别较 CK 增加 3.05%、17.60% 及 10.13%。果期同一历时的处理,随亏缺程度增加,生殖器官干物质逐渐减少,但轻度与重度调亏处理间未产生显著差异。GSS-8 处理的生殖器官干物质最少,较 CK 减少 43.88%。调亏时期、调亏程度、调亏历时及其交互作用均对根冠比有显著影响(表 3)。在各生育期同一调亏历时下,随调亏程度增加,根冠比逐渐增大(除苗期长期轻度(MLS-8)及花期短期轻度(HLS-4)调亏处理与 CK 无显著差异外),在果期长期重度水分调亏下(GSS-8)根冠比增幅最大,较 CK 增加 38.54%。

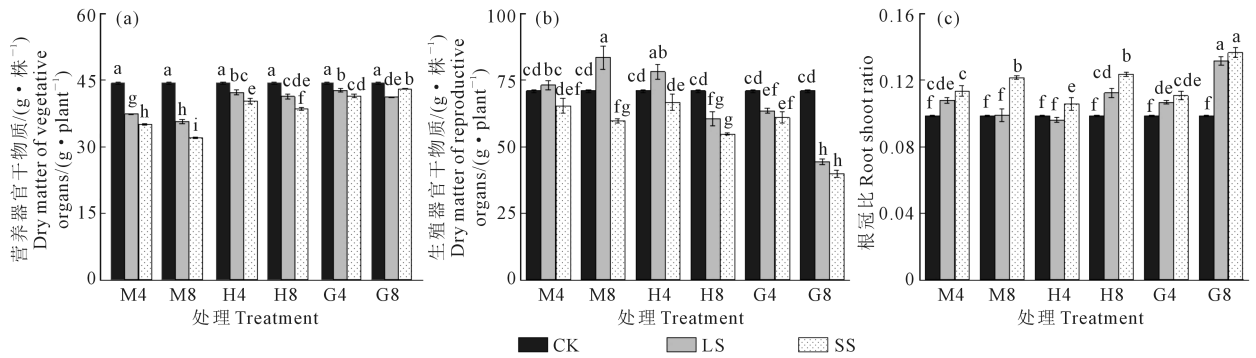


图 3 调亏灌溉对辣椒干物质及根冠比的影响

Fig.3 Effects of regulated deficit irrigation on dry matter and root-shoot ratio of pepper

表 3 调亏时期、调亏程度、调亏历时及其交互作用对辣椒干物质和根冠比影响的显著性

Table 3 Significant of effects of deficit period, degree, duration and interaction between them on dry matter and root-shoot ratio of pepper

指标 Index	调亏时期 S	调亏程度 C	调亏历时 L	时期×程度 S×C	时期×历时 S×L	程度×历时 C×L	时期×程度×历时 S×C×L
营养器官干物质 Dry matter of vegetative organs	*	*	ns	*	*	*	*
生殖器官干物质 Dry matter of vegetative organs	*	*	ns	*	*	*	*
根冠比 Root-shoot ratio	*	*	*	*	*	*	*

### 2.3 调亏灌溉对辣椒单株产量的影响

不同调亏处理对辣椒单株产量的影响见图 4。调亏时期、调亏程度、调亏历时及其交互作用对单株产量均有显著影响。从调亏时期来看,果期不同程度或历时的水分调亏均显著减少辣椒产量,果期长期重度水分调亏(GSS-8)处理产量最小,较 CK 下降 41.56%。而在苗期和花期,通过调亏亏水程度和历时可使产量得到不同程度的提高。其中,苗期不同历时的轻度调亏(MLS-4 及 MLS-8)、花期短期轻度调亏(HLS-4)显著提高辣椒产量,尤其在 MLS-8 处理下产量最高,较 CK 增加了 17.01%。

### 2.4 调亏灌溉对辣椒品质的影响

辣椒的品质包括外观品质和内部营养品质两部分。优质的辣椒色泽鲜艳、营养成分含量高,尤其是 VC 及辣椒红素等是评价辣椒品质的重要指标。不同调亏处理对辣椒品质(VC 含量、果色指数及辣椒红素)的影响见表 4。调亏时期、调亏程度、调亏历时及其交互作用均对辣椒品质影响显著。从整个生育期来看,苗期亏水会降低辣椒品质,而花期和果期的水分调亏对辣椒品质有促进作用,尤其在果期,随调亏程度或历时增加,辣椒品质逐渐提升。其中,GSS-8 处理下 VC 含量、果色指数及辣椒红素增加的最多,分别较 CK 增加了 7.50%、5.71%和 10.30%。

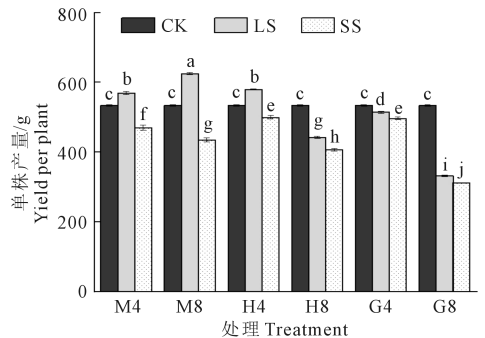


图 4 调亏灌溉对辣椒单株产量的影响

Fig.4 Effects of regulated deficit irrigation on yield per plant of pepper

### 2.5 综合评价不同调亏灌溉方案对辣椒生长、产量和品质的影响

在农业生产中,作物产量和品质是衡量灌溉方案优劣的最基本指标。其中,营养器官干物质的积累能评估作物的营养生长状况,单株产量能直观反映盆栽作物的经济产量。VC 及辣椒红素含量是辣椒重要的品质性状,果色指数是反映辣椒外观品质的重要指标,色泽鲜艳的辣椒更受顾客的喜爱。因此,该综合评价模型将 AHP、EWM 和 TOPSIS 进行整合,对各调亏灌溉方案中的产量及品质指标进行综合评价。通过 AHP 和 EWM 计算出的指标层权重见表 5,并应用乘数合成归一法计算出综合权重。

由表 5 看出,在 AHP 分析法中,单株产量的权重最大,营养生长的权重最小。在本研究中,最大特征值为 2,按文献公式<sup>[18]</sup>计算得到一致性系数(CR)为 0.00,CR<0.1,说明判断矩阵的一致性合理。另外,在 EWM 中,营养生长的权重最大,VC 含量的权重最小。产量及品质各指标的综合赋权结果显示,单株产量(0.52)>果色指数(0.18)>营养生长(0.12)>辣椒红素(0.10)>VC(0.08),表明对最优灌溉方案而言,首先要提高辣椒单株产量,其次是改善果实的果色指数,而 VC 含量对最优调亏方案的选择影响最小。依据自然断点法,可按权重 $\geq 0.3$ 为重要级指标、[0.1,0.3)为次要级指标、<0.1 为边缘级指标进行指标分级<sup>[19]</sup>,则评价灌溉方案的各指标中,单株产量为重要指标,果色指数、营养生长及辣椒红素为次要指标,VC 含量为边缘指标。表 6 展示了各方案的正理想解、负理想解的欧式距离及排名,得分越高的处理,越接近理想中的最优灌溉方案。TOPSIS 模型评价结果显示,MLS-8 距离负理想解的距离最远,达到 0.14,其次是 HLS-4,与负理想解的距离为 0.13;HLS-4 距离正理想解的距离最近,为 0.02,MLS-4 与正理想解的距离次之,为 0.04。最终,HLS-4 的综合得分最高,效果最好;GSS-8 距离负理想解的距离最近,仅为 0.04,与正理想解的距离最远,为 0.14,综合得分最低,效果最差。因此,建议

表 4 调亏灌溉对辣椒品质的影响

Table 4 Effects of regulated deficit irrigation on quality of pepper

处理 Treatment	VC /(mg·100g <sup>-1</sup> )	果色指数 Color index	辣椒红素 Capsanthin
CK	121.00d	114.82c	15.54c
MLS-4	116.67e	108.33d	12.65d
MSS-4	116.29e	105.46d	11.23e
MLS-8	112.23f	100.19e	10.38f
MSS-8	108.50g	97.63e	9.64g
HLS-4	125.90bc	118.23abc	16.23b
HSS-4	125.30c	117.44bc	16.48ab
HLS-8	127.46abc	119.37ab	16.55ab
HSS-8	125.76bc	119.50ab	16.65ab
GLS-4	127.30abc	118.40abc	16.52ab
GSS-4	128.47abc	120.51ab	17.07a
GLS-8	129.16ab	119.32ab	16.83ab
GSS-8	130.07a	121.38a	17.14a

Turkey 多重比较下显著性

Significant under multiple comparison of Tukey method

S	**	**	**
C	**	**	**
L	**	**	**
S×C	**	**	**
S×L	**	**	**
C×L	**	**	**
S×C×L	**	**	**

在花期进行短期轻度调亏以提升温室辣椒产量和品质。同时,要避免辣椒在果期受长期重度水分亏缺。

### 3 讨论

高产优质是蔬果生产的最终目标。但传统的灌溉方式为追求高产,对农作物进行大量灌溉,导致水资源的严重浪费<sup>[22]</sup>。且灌水较多时,蔬果的含水量通常较高,不仅不利于存储和保鲜,还会使蔬果口感较差,影响其风味品质<sup>[23]</sup>。适时适度的水分调亏能影响植株的生长,调整光合产物在营养器官与生殖器官之间的分配,从而改善蔬果品质<sup>[24-25]</sup>。

表 5 各调亏灌溉方案的权重

Table 5 Weight of each regulated deficit irrigation scheme

总目标 Aim	因素 Factor	亚因素 Sub-factor	$\omega_{\text{AHP}}$	$\omega_{\text{EWM}}$	$\omega_{\text{COMP}}$
最优调亏灌溉方案 Optimal regulated deficit irrigation scheme	产量 Yield	营养生长 Vegetative growth	0.08	0.30	0.12
		单株产量 Yield per plant	0.53	0.19	0.52
	品质 Quality	VC Vitamin C	0.10	0.16	0.08
		果色指数 Color index	0.20	0.17	0.18
		辣椒红素 Capsanthin	0.10	0.19	0.10

注: $\omega_{\text{AHP}}$ ,基于 AHP 方法计算的指标权重; $\omega_{\text{EWM}}$ ,基于 EWM 方法计算的指标权重; $\omega_{\text{COMP}}$ ,基于 AHP 与 EWM 计算的综合权重。

Note:  $\omega_{\text{AHP}}$ , index weight calculated based on AHP method;  $\omega_{\text{EWM}}$ , index weight calculated based on EWM method;  $\omega_{\text{COMP}}$ , comprehensive weight calculated based on AHP and EWM.

表 6 各调亏灌溉方案的综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of all regulated deficit irrigation schemes

处理 Treatment	$D^+$	$D^-$	得分 Evaluation value	排名 Ranking
MLS-4	0.04	0.12	0.74	3
MSS-4	0.08	0.08	0.49	8
MLS-8	0.05	0.14	0.76	2
MSS-8	0.10	0.06	0.37	11
HLS-4	0.02	0.13	0.86	1
HSS-4	0.06	0.09	0.62	6
HLS-8	0.08	0.07	0.47	9
HSS-8	0.10	0.06	0.37	10
GLS-4	0.05	0.10	0.64	5
GSS-4	0.06	0.09	0.60	7
GLS-8	0.13	0.04	0.23	12
GSS-8	0.14	0.04	0.23	13
CK	0.05	0.10	0.69	4



植物营养生长与生殖生长是相互促进和相互制约的关系,营养生长是生殖生长的基础和前提<sup>[26]</sup>。水分调亏对辣椒营养生长的影响,一方面直观地表现在其生长形态上的差异,反映这种差异最具有代表性的指标就是株高、茎粗、叶面积;另一方面,可通过干物质积累差异来反映。李焯<sup>[27]</sup>认为,膜下调亏滴灌显著( $P < 0.05$ )降低了辣椒株高、茎粗、叶面积指数和干物质积累,且水分亏缺程度越大,各项营养指标值越小。本研究结果也表明,苗期水分调亏使辣椒株高、茎粗和叶面积下降程度最大(图 2)。这是由于辣椒在苗期主要进行营养生长,一定程度水分调亏破坏了辣椒体内生理生化反应,辣椒生长发育受到抑制,导致株高、茎粗和叶面积显著小于 CK;而辣椒在花期和果期主要进行生殖生长,水分调亏对其营养生长影响较小,因此,花期和果期的水分调亏对辣椒株高、茎粗和叶面积影响较小<sup>[7]</sup>。有研究认为,适度的亏缺灌溉能有效抑制作物的营养生长,促进光合同化物向生殖生长转移,从而提高作物产量<sup>[28]</sup>。本研究认为,苗期不同历时的轻度水分调亏显著减少辣椒营养器官干物质,可有效防止枝叶徒长,从而提高植株能量利用率,复水后产生显著的补偿生长效应,补偿时间充足,可提高产量,但在受重度调亏时,植株低矮瘦弱,营养生长严重不足,复水后也不能完全恢复,最终导致生殖器官干物质减少<sup>[26]</sup>;在花期,除短期轻度调亏下生殖器官干物质较 CK 增加外,不同历时的轻度及重度调亏均显著抑制营养器官和生殖器官干物质积累。这可能是由于花期正值营养生长阶段向生殖生长阶段过渡,适度的水分亏缺能促进生殖生长,有利于增产,而过量的亏水则会导致幼蕾掉落,不利于植株的生殖生长;在果期,不同强度及历时的水分调亏均会减少辣椒营养器官与生殖器官干物质,但对生殖器官干物质的抑制程度更大,可能因为果期属于生殖生长期,植物处于生长旺盛阶段,气温高,腾发量大,植株需水量较大,对水分特别敏感,水分亏缺影响果实发育,因而导致严重减产<sup>[29-30]</sup>(图 3、图 4)。

根系和冠层是作物的基本结构,在作物生长过程中,根系与冠层相互竞争。在水分亏缺时,土壤含水量降低会影响植物基因表达,从而调节各器官的发育,影响营养生长与生殖生长,改变根冠比。根冠比不仅反映了作物地下部与地上部的生长发育状况及协调性,也能反映植株在调亏灌溉下光合

产物的分配状况。李明达等<sup>[31]</sup>研究表明,水分胁迫导致根冠比增大,且随胁迫强度和胁迫历时增加根冠比逐渐增大;复水后,根系和冠层受到一定补偿,根冠比减小。本研究结果表明:除 MLS-8 和 HLS-4 处理根冠比与 CK 相比无显著差异外,其他调亏处理均使根冠比显著增加,表明根冠比过大不利于光合产物在营养器官与生殖器官间的合理分配,影响作物生殖器官干物质的积累(图 3)。

水分是蔬果品质形成的重要媒介物质,它不仅是各种营养物质的转载体,也直接参与到细胞分裂、糖分转化等一系列生理生化过程中,控制着植物细胞内的库压,能调节转化酶的合成和活性,从而影响光合同化物向果实的分配,影响果实品质<sup>[32]</sup>。黄海霞等<sup>[33]</sup>认为,在定植-坐果期进行中度和重度调亏可显著提高辣椒营养品质。本研究结果显示,在花期和果期进行水分调亏有助于提升果实品质,辣椒 VC 含量、果色指数及辣椒红素均较 CK 显著增加(表 4),说明辣椒果实品质对于花期和果期水分供应较敏感,因此,可通过调控花期、果期的水分供应以实现果实品质的改善。

评价辣椒产量、品质的指标众多且单个指标不能全面反映灌溉方案的优劣,应用多目标综合评价方法能更全面、科学地选择出最佳调亏方案。本文通过 AHP 和 EWM 得到的综合权重发现,单株产量的综合权重值最大,为 0.52,其次是果色指数,权重值为 0.18(表 5)。若仅从产量角度考虑,MLS-4、MLS-8 和 HLS-4 调亏方案均能显著提升辣椒产量,且 MLS-8 方案使产量增幅最大。可综合考虑品质指标权重后,HLS-4 得分最高,其次是 MLS-8 和 MLS-4,对照组 CK 仅排第 4 位,GSS-4 的得分最低(表 6)。由此可知,全生育期充分供水并非最利于作物生长的最优方案,适时适度的水分亏缺更能提升辣椒产量和品质。因此,建议在花期进行短期轻度水分调亏,以促进温室辣椒产量和品质的提高。另外,要避免辣椒在果期受长期重度水分亏缺。

## 4 结 论

1) 在本试验条件下,与花期和果期相比,苗期水分调亏对辣椒株高、茎粗、叶面积及营养器官干物质的抑制程度最大。

2) 苗期短期轻度(MLS-4)、苗期长期轻度(MLS-8)及花期短期轻度(HLS-4)调亏灌溉处理使辣椒生殖器官干物质和产量不同程度提高。此



外,苗期亏水会降低辣椒品质,而花期和果期水分调亏对品质有促进作用。

3) 花期短期轻度水分调亏方案(HLS-4)的综合得分为0.86,排名第一,对温室辣椒产量、品质的改善效果最佳。

#### 参考文献:

- [1] 王思宇. 中国辣椒贸易的国际竞争力研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- WANG S Y. Research on the international competitiveness of Chinese pepper trade[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2019.
- [2] 余高, 陈芬, 谢英荷, 等. 化肥减施、有机肥施肥对辣椒产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2020, (4): 47-53.
- YU G, CHEN F, XIE Y H, et al. Effects of reduced chemical fertilizer and combined with organic fertilizer application on pepper yield and quality[J]. Northern Horticulture, 2020, (4): 47-53.
- [3] 高佳, 张宏斌, 张恒嘉, 等. 绿洲灌区膜下滴灌调亏对辣椒品质及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(4): 404-409.
- GAO J, ZHANG H B, ZHANG H J, et al. Effects of water deficit on quality and yield of pepper under mulched drip irrigation in cold oasis region[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(4): 404-409.
- [4] HULUGALLE N R, WILLATT S T. Patterns of water uptake and root distribution of chilli peppers grown in soil columns[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1987, 67(2): 531-535.
- [5] 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.
- PENG Q. Effects of shading and soil water content on physiology characters of fruit and leaf of pepper during fruiting stage[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [6] 张卿亚, 原保忠. 调亏灌溉技术在甜瓜栽培中应用综述[J]. 农学报, 2014, 4(2): 85-90.
- ZHANG Q Y, YUAN B Z. Review of regulated deficit irrigation application on muskmelon cultivation[J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(2): 85-90.
- [7] 高佳, 张恒嘉, 巴玉春, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 25-31.
- GAO J, ZHANG H J, BA Y C, et al. Effects of regulated deficit irrigation on pepper growth and yield under drip irrigation in oasis region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 25-31.
- [8] 马彦霞, 王晓巍, 张玉鑫, 等. 戈壁荒漠区基质槽辣椒耗水特征及产量品质对水分调控的响应[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(11): 1-8.
- MA Y X, WANG X W, ZHANG Y X, et al. The impacts of controlled irrigation on water consumption, yield and fruit quality of substrate-cultivated pepper (*Capsicum annuum*) in Gobi Desert[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(11): 1-8.
- [9] WU Y, YAN S C, FAN J L, et al. Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 275: 109710.
- [10] WANG H D, WANG X K, BI L F, et al. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of northern China based on TOPSIS[J]. Field Crops Research, 2019, 240: 55-68.
- [11] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- ZHANG Z, YANG Z, LI J L, et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- [12] 杜娅丹, 曹红霞, 柳美玉, 等. 基于层次分析法和熵权法的 TOPSIS 模型在番茄生长综合评价中的应用[J]. 西北农业学报, 2015, 24(6): 90-96.
- DU Y D, CAO H X, LIU M Y, et al. Comprehensive evaluation of tomato growing with application of TOPSIS model based on AHP and entropy method[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(6): 90-96.
- [13] 吴雪, 王坤元, 牛晓丽, 等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 119-127.
- WU X, WANG K Y, NIU X L, et al. Construction of comprehensive nutritional quality index for tomato and its response to water and fertilizer supply[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 119-127.
- [14] WANG F, KANG S Z, DU T S, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1228-1238.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法: GB/T 21266-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of total capsaicinoid content and representation of pungency degree in capsicum and its products: GB/T 21266-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] XIAO C, ZOU H Y, FAN J L, et al. Optimizing irrigation amount and fertilization rate of drip-fertigated spring maize in northwest China based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Agricultural Water Management, 2021, 257: 107157.
- [18] BHADRA D, DHAR N R, SALAM M A. Sensitivity analysis of the integrated AHP-TOPSIS and CRITIC-TOPSIS method for selection of the natural fiber[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56 Part 5: 2618-2629.
- [19] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 238-249.
- XIN G X, YANG C X, YANG Q Y, et al. Post-evaluation of well-fa-

- cilitied capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 238-249.
- [20] DU Y B, ZHENG Y S, WU G A, et al. Decision-making method of heavy-duty machine tool remanufacturing based on AHP-entropy weight and extension theory[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119607.
- [21] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 119-126.
- SONG M D, LI Z P, FENG H. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 119-126.
- [22] 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.
- WU P T, FENG H. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(6): 152-157.
- [23] 高子星, 马雪强, 王君正, 等. 水肥耦合对越冬基质栽培辣椒产量、品质和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(1): 96-108.
- GAO Z X, MA X Q, WANG J Z, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield, quality and water use efficiency of overwintering pepper in substrate cultivation[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(1): 96-108.
- [24] NIKANOROVA A D, MILANOVA E V, DRONIN N M, et al. Estimation of water deficit under climate change and irrigation conditions in the Fergana Valley of central Asia[J]. Arid Ecosystems, 2016, 6(4): 260-267.
- [25] DINGRE S K, GORANTIWAR S D. Soil moisture-based deficit irrigation management for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in semi-arid environment [J]. Agricultural Water Management, 2020, 245: 106549.
- [26] 李彦连, 张爱民. 植物营养生长与生殖生长辩证关系解析[J]. 中国园艺文摘, 2012, 28(2): 36-37.
- LI Y L, ZHANG A M. Analysis of the relationship between vegetative growth and reproductive growth[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2012, 28(2): 36-37.
- [27] 李焯. 膜下滴灌调亏对河西绿洲辣椒生长特性及产量的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- LI X. Effect of mulched drip irrigation under regulated deficit irrigation on pepper's growth and yield in Hexi oasis region [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [28] 杨北方, 杨国正, 冯璐, 等. 亏缺灌溉对棉花生长和水分利用效率的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1112-1118.
- YANG B F, YANG G Z, FENG L, et al. Effects of deficit irrigation on cotton growth and water use efficiency: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1112-1118.
- [29] 吴泳辰, 韩国君, 陈年来. 调亏灌溉对加工番茄产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 104-107.
- WU Y C, HAN G J, CHEN N L. Effects of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of processed tomato [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 104-107.
- [30] 刘宇. 不同生育期控水对番茄产量品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- LIU Y. Effects of water control at different growth stages on yield and quality of tomato [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [31] 李明达, 张红萍. 水分胁迫及复水对豌豆干物质积累、根冠比及产量的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1034-1040.
- LI M D, ZHANG H P. Effects of water stress and rewating on the dry matter accumulation, root shoot ratio and yield of pea [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1034-1040.
- [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]//现代节水高效农业与生态灌区建设(上), 昆明: 中国农业工程学会农业水土工程专业委员会, 2010: 466-474.
- WANG F, DU T S, QIU R J, et al. Effects of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of solar greenhouse hot pepper [C]//Modern Water-saving and High-efficiency Agriculture and Construction of Ecological Irrigation Area (Part I), [s.l.]: Agricultural Water and Soil Engineering Committee of China Agricultural Engineering Society, 2010: 466-474.
- [33] 黄海霞, 韩国君, 陈年来, 等. 辣椒植株生长和果实生产对调亏灌溉的响应 [C]//水与区域可持续发展——第九届中国水论坛论文集, 兰州: 中国水利水电出版社, 2011: 429-434.
- HUANG H X, HAN G J, CHEN N L, et al. Response of growth and fruit production of *Capsicum annum* to regulated deficit irrigation (RDI) [C]//Water and Regional Sustainable Development--Proceedings of the 9th China Water Forum, Lanzhou: China Water & Power Press, 2011: 427-432.