

# 非耕地日光温室番茄基质栽培灌溉制度研究

张玉鑫, 蒯佳琳, 马彦霞, 王晓巍, 康恩祥, 张俊峰

(甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**通过日光温室试验,以两次灌水间隔期 $\Phi 20$  cm标准蒸发皿的累积蒸发量(E)为基数,设置0.4E、0.6E、0.8E、1.0E、1.2E等5个灌水处理,灌水周期为2 d,采用CRITIC法对番茄生长和品质进行综合评价,以CRITIC法评价综合得分量化番茄的生长和品质指标,利用变异系数法对生长、品质、产量、IWUE等4个指标赋权,通过TOPSIS法对各处理下番茄的综合效益进行评价。结果表明:番茄株高、植株干质量、叶干质量、果实干质量随灌水量的增加而增大,1.2E处理分别较0.4E处理增加了32.3%、41.8%、66.5%、39.6%;根干质量和根冠比随灌水量增加呈先减小后增加趋势,1.0E处理分别较0.4E处理减小了28.2%和71.6%;CRITIC法对番茄生长综合评价得分排名为1.2E>1.0E>0.8E>0.6E>0.4E,1.2E处理生长最优。番茄单果质量、果实含水量随灌水量的增加而增大,1.2E处理分别较0.4E处理增加了58.8%和5.3%;可溶性固形物含量和糖酸比随灌水量的增加而减少,1.2E处理分别较0.4E处理减少了82.7%和50.7%;可溶性糖、有机酸、Vc、番茄红素含量随灌水量增加呈先增加后减小趋势。CRITIC法对番茄品质综合评价得分排名为1.0E>1.2E>0.8E>0.4E>0.6E,1.0E处理品质最优。灌水量由0.4E增加到1.0E时,产量随灌水量增加而显著增加,1.0E处理产量较0.4E处理增加了66.4%;灌水量由1.0E增加到1.2E时,产量间无显著差异。IWUE随灌水量的增加而减少,1.2E处理IWUE较0.4E处理减小了28.7%。TOPSIS综合评价结果表明1.0E处理为综合效益最高的处理,即灌溉间隔为2 d,灌水量为1.0E可作为甘肃河西走廊非耕地日光温室秋冬茬番茄基质栽培的适宜灌溉制度。

**关键词:**温室番茄;灌溉制度;CRITIC法;基质栽培;河西走廊

**中图分类号:**S641.2;S274.1 **文献标志码:**A

## Study on irrigation system of tomato substrate cultivation in non-arable land solar greenhouse

ZHANG Yuxin, KUAI Jialin, MA Yanxia, WANG Xiaowei, KANG Enxiang, ZHANG Junfeng  
(Vegetable Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** Through a solar greenhouse experiment, based on the cumulative evaporation rate (E) of a standard evaporating dish with a  $\Phi 20$  cm diameter pan between two irrigations, 0.4E, 0.6E, 0.8E, 1.0E, 1.2E were set as five different levels of irrigation amount, with an irrigation cycle of 2 days. The growth and quality of tomato was evaluated comprehensively by CRITIC method. CRITIC method evaluation comprehensive scores were regarded as the comprehensive growth and quality of tomato. Weight values of comprehensive growth, comprehensive quality, yield and IWUE were calculated by the coefficient of variation method. Then, TOPSIS method was used to evaluate the comprehensive benefits of all irrigation treatments. The height of tomato plants, dry mass of plants, leaves, and fruits increased with the increase of irrigation water. The 1.2E treatment increased by 32.3%, 41.8%, 66.5%, and 39.6% respectively compared with the 0.4E treatment. The root dry mass and root crown ratio showed a trend of first decreasing and then increasing with the increase of irrigation water. The 1.0E treatment decreased by 28.2% and 71.6% respectively compared with the 0.4E treatment. The CRITIC method ranked the comprehensive evaluation

收稿日期:2024-07-09

修回日期:2024-09-24

**基金项目:**甘肃省引导科技发展专项资金(2018GAAS13);甘肃省现代农业科技支撑体系区域创新中心重点科技项目(2019GAAS47);国家现代农业产业技术体系(CARS-24-G-28)

**作者简介:**张玉鑫(1980-),男,甘肃张掖人,副研究员,主要从事蔬菜生理生态及栽培技术研究。E-mail:zhangyuxin@gsagr.cn

**通信作者:**王晓巍(1968-),男,甘肃宁县人,研究员,主要从事蔬菜栽培与水肥调控研究。E-mail:wangxw@gsagr.cn

score of tomato growth as  $1.2E > 1.0E > 0.8E > 0.6E > 0.4E$ , with the 1.2E treatment showing the best growth. The single fruit mass and fruit moisture content of tomatoes increased with the increase of irrigation water. The 1.2E treatment increased by 58.8% and 5.3% respectively compared with the 0.4E treatment. While the soluble solid content and sugar acid ratio decreased with the increase of irrigation water. The 1.2E treatment decreased by 82.7% and 50.7% respectively compared with the 0.4E treatment. The contents of soluble sugars, organic acids, Vc and lycopene showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of irrigation water. The CRITIC method ranked the comprehensive evaluation score of tomato quality as  $1.0E > 1.2E > 0.8E > 0.4E > 0.6E$ , with the 1.0E treatment having the best quality. When the irrigation amount increased from 0.4E to 1.0E, the yield increased significantly with the increase of irrigation amount. The yield of the 1.0E treatment increased by 66.4% compared with the 0.4E treatment. When the irrigation amount increased from 1.0E to 1.2E, there was no significant difference in yield. The *IWUE* decreased with the increase of irrigation amount. The *IWUE* of the 1.2E treatment decreased by 28.7% compared with the 0.4E treatment. The TOPSIS comprehensive evaluation results indicated that the 1.0E treatment had the highest comprehensive benefits. An irrigation interval of 2 days and an irrigation amount of 1.0E can serve as an optimal irrigation system for tomato substrate cultivation during the autumn and winter seasons in greenhouse conditions in the Hexi Corridor of Gansu Province.

**Keywords:** greenhouse tomato; irrigation scheduling; CRITIC method; substrate cultivation; Hexi Corridor

利用戈壁、荒漠、滩涂、盐碱地等非耕地发展设施农业是缓解粮菜争地矛盾、拓展农业发展空间的重要途径。甘肃省非耕地面积达 1 934.8 万  $\text{hm}^2$ , 占全省总土地面积的 42%, 主要集中在河西走廊地区<sup>[1]</sup>。甘肃省利用河西走廊地区丰富的光热资源、广袤的戈壁沙滩, 大力发展非耕地设施农业, 已建成戈壁设施农业 2.67 万  $\text{hm}^2$ , 全产业链产值超过 200 亿元, 不仅解决了粮菜争地矛盾, 也同步丰富了“米袋子”和“菜篮子”<sup>[2]</sup>。

番茄是我国设施栽培面积最大的蔬菜作物<sup>[3]</sup>, 也是甘肃省河西走廊非耕地日光温室基质栽培的主要蔬菜。番茄生长速度快、产量高, 对水分需求量大且敏感<sup>[4]</sup>。栽培基质疏松透气、持水性和缓冲性较差<sup>[5]</sup>, 基质栽培番茄极易发生水分供应不足或过量的问题, 所以制定合理的温室番茄基质栽培灌溉制度, 对提高灌溉水利用效率和实现非耕地设施农业可持续发展具有重要的理论与实践意义。

利用 20 cm 标准蒸发皿蒸发量制定温室作物灌溉制度简便、可靠, 并得到了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。研究发现日光温室内的蒸发皿蒸发量与番茄的耗水量和灌溉水量存在很好的一致性, 可将日光温室内的水面蒸发量作为指导番茄灌溉的灌溉量<sup>[8-9]</sup>。如 Liu 等<sup>[10]</sup>研究提出灌溉间隔 2~6 d、灌水量为 0.9E (0.9 倍的蒸发皿累计蒸发量) 可作为华北平原日光温室番茄的适宜灌溉制度; 焦艳平等<sup>[11]</sup>研究认为华北平原早春茬日光温室滴灌灌水周期为 2 d、蒸发皿系数为 0.8 时, 番茄的产量、品质及灌溉水利用效率最为理想; 张栓堂等<sup>[12]</sup>研究提出滴灌灌水周期为 3 d、蒸

发皿系数取 1.0, 可作为秋冬茬日光温室番茄的灌溉制度技术指标; 李红峥等<sup>[13]</sup>研究认为西北地区温室番茄采用交替隔沟灌溉, 灌水量为 0.8E 时, 番茄品质、产量和 *IWUE* 最优; 吴宣毅等<sup>[14]</sup>研究认为西北地区日光温室膜下滴灌番茄操作行行距为 80 cm、株距为 35 cm、种植行距 37~47 cm, 灌水量 0.8E~1.0E 为综合品质最优的种植行距和灌水量组合。虽然迄今关于利用蒸发皿蒸发量制定温室番茄灌溉制度的研究较多, 但大多都集中在土壤栽培方面, 而利用蒸发皿蒸发量制定河西走廊非耕地日光温室番茄基质无土栽培灌溉制度的研究鲜见报道。番茄生长、品质是一综合性概念, 受多个指标的综合影响, 仅凭单一指标不能准确地评价番茄的生长和品质<sup>[13-15]</sup>。优化灌溉制度不仅要关注品质或产量等单一目标, 更要综合考虑生长、产量、品质和水分利用效率等多目标的优化, 就需要建立多目标评价模型。CRITIC 赋权法可以对不同指标间的差异性和关联性进行分析, 得到各项指标的信息量和权重, 是一种比熵权法和标准离差法更好的客观赋权法<sup>[16]</sup>, 已应用在某些领域的综合评价中, 也适用于番茄品质的综合评价<sup>[14]</sup>。TOPSIS 法是一种多目标决策分析时常用的距离综合评价法, 能够正确、有效地评价规划方案的优劣<sup>[17]</sup>。近年来, TOPSIS 法广泛应用于番茄栽培灌溉施肥计划研究, 如刘浩等<sup>[18]</sup>借鉴 TOPSIS 综合评价方法建立了温室番茄节水、优质、高产相统一的综合评价模型, 确定了基于水面蒸发量的温室番茄节水调质灌溉制度; 李红峥等<sup>[13]</sup>采用变异系数法对番茄的品质、产量、*IWUE* 赋

权,通过 TOPSIS 法优化了西北地区温室番茄的沟灌方式和灌水量;郑健等<sup>[19]</sup>将 AHP 法和熵权法相结合确定番茄生长、产量及品质指标权重,利用 TOPSIS 法确定了西北地区温室番茄水/沼液一体化水肥灌溉方案;菅毅等<sup>[20]</sup>使用熵权法计算产量、品质和 IWUE 权重,利用 TOPSIS 法确定了喀斯特断陷盆地地区番茄地下灌溉技术指标;姚继超等<sup>[21]</sup>采用熵权法对番茄 6 项决策指标进行赋权,通过 TOPSIS 法确定了小汤山日光温室秋冬茬番茄最优灌溉制度。王可等<sup>[22]</sup>采用变异系数法对番茄的品质、产量、WUE、IWUE 赋权,利用 TOPSIS 法确定了和田地区日光温室越冬茬番茄适宜的灌溉指标。本试验以 20 cm 蒸发皿蒸发量为灌水依据,研究不同灌水量对基质栽培番茄生长、品质、产量以及 IWUE 的影响,采用 CRITIC 法对番茄生长指标和品质指标进行综合评价和量化,利用变异系数法对生长、品质、产量、IWUE 赋权,通过 TOPSIS 法对各处理下温室番茄的综合效益进行评价,提出温室番茄基质栽培最优的灌水指标,为甘肃河西走廊非耕地日光温室番茄的节水高产优质栽培提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验在甘肃省张掖市高台县合黎镇新绿达戈壁农业示范园日光温室内进行。温室为沙袋墙体钢架结构,跨度 10 m、长度 100 m。试验区地处河西走廊中段,海拔 1 345 m,属大陆性温带荒漠干旱气候,年均气温 9.4℃,年均降雨量 100 mm,年均蒸发量 2 000 mm,日照 3 000 h,地表为沙化土壤。栽培槽为下挖式“U”型栽培槽,槽内径 55 cm、槽深 30 cm、槽长 850 cm、槽间距 75 cm,自北向南倾斜 5°,槽内部铺 1 层聚乙烯塑料薄膜,填充 25 cm 厚栽培基质。

### 1.2 试验材料

供试番茄品种为武汉楚为生物科技有限公司选育的‘吉诺比利’。栽培基质原料选用当地农业废弃物双孢菇菇渣、玉米秸秆、牛粪,经高温发酵后,按双孢菇菇渣:玉米秸秆:牛粪:炉渣=2.5:2.0:2.5:3.0 体积比配置成复合基质,其理化性质为 pH 值 7.03、EC 值 1.20 mS·cm<sup>-1</sup>、体积质量 0.529 g·cm<sup>-3</sup>、全氮量 6.97 g·kg<sup>-1</sup>、全磷量 0.947 g·kg<sup>-1</sup>、全钾量 15.37 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 试验设计

根据直径为 20 cm 蒸发皿测定的冠层水面蒸发量设置 5 个灌水量处理,即 0.4E、0.6E、0.8E、1.0E、

1.2E。每 4 个栽培槽为 1 个小区,面积 44.2 m<sup>2</sup>,每个处理 3 次重复,随机排列。灌水方式为膜下滴灌,每槽铺设 2 根薄壁软管(Φ=25 mm),滴水孔间距 20 cm。依据前人研究结果<sup>[23]</sup>,灌水周期统一设为 2 d。每个小区安装精度为 0.001 m<sup>3</sup>的水表,精准控制灌水量。番茄于 2019 年 7 月 24 日采用穴盘育苗,9 月 3 日定植,12 月 4 日第一穗果采收,翌年 2 月 22 日拉秧。每槽定植 2 行,单株定植,株距 45 cm。定植后基质表面不覆膜,等缓苗后基质表面覆 1 层黑色地膜。为确保幼苗的成活率和促进幼苗的生长,移栽后至试验开始之前每个处理均以滴灌方式补充灌水量 4 mm,试验处理于 10 月 1 日开始。整个生育期各处理的灌水情况见表 1。从定植至第一穗果开花期间不追肥,第一穗果开花后至拉秧期间,每 10 d 滴灌追肥 1 次,每次追施 N 26.55 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 9.6 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 37.8 kg·hm<sup>-2</sup>,整个生育期内追肥 7 次。

表 1 全生育期各处理灌水情况

Table 1 Irrigation overview of each treatment in the whole growth period

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount/mm				
	苗期 Seedling	开花坐果期 Flowering~ fruit setting	果实膨大期 Fruit enlargement	成熟采摘期 Fruit maturation	全生育期 Whole growth
0.4E	64	15.7	40.1	53.9	173.8
0.6E	64	23.6	60.2	80.8	228.6
0.8E	64	31.4	80.3	107.8	283.5
1.0E	64	39.3	100.4	134.7	338.4
1.2E	64	47.2	120.4	161.7	393.3

### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 灌水量 使用天津气象仪器厂生产的 ADM7 型 20 cm 标准蒸发皿(内径 20 cm,深度 11 cm)测定冠层上方的水面蒸发量。在温室东部、中间、西部各放置 3 个蒸发皿,蒸发皿放置于冠层上方的 10~15 cm 处。每 2 d 于 8:30—9:00 用精度为 0.1 mm 的配套量筒测量,每次测量完毕之后均添加 20 cm 的蒸馏水。灌水量按下式计算:

$$W = K_{ep} \times 10^{-3} \times A \times E_p \quad (1)$$

式中,  $W$  为小区灌水量(m<sup>3</sup>);  $K_{ep}$  为蒸发皿系数,分别取  $K_{ep} = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ ;  $A$  为小区面积(m<sup>2</sup>);  $E_p$  为 2 次灌水时间间隔内的蒸发皿累积蒸发量(mm)。

1.4.2 生长指标 在盛果期每处理随机选定 15 株,用卷尺测量番茄植株的株高,用数显游标卡尺测量茎粗。每个处理选取 5 株,将植物地上各部分与地下部分分开后装入纸袋称重,在测定鲜质量

后,放入烘箱,105 ℃杀青 30 min 后,75 ℃恒温下烘至恒重,用精度为 0.01 g 的电子天平(TDD50002, BANGYES)称干质量。

**1.4.3 品质指标** 于盛果期在每个小区随机选取成熟度一致的番茄 10 颗,测量果实商品品质(单果质量、果形指数、横径变异系数)<sup>[24]</sup>、风味品质(含水量、可溶性固形物、可溶性糖、有机酸、糖酸比)和保健品质(Vc、番茄红素)<sup>[25]</sup>指标。用电子天平(TDD50002, BANGYES)测量单果质量,用游标卡尺(MNT-150,上海美耐特实业有限公司)测定果实的横、纵径,横径变异系数为果身平面上 2 个垂直方向横径标准差与平均值的比值,果形指数为番茄纵径与平均横径的比值。采用烘干法测定果实含水量,采用手持式糖度计(IR200S,上海仪迈仪器科技有限公司)测定可溶性固形物含量,0.1 mol·L<sup>-1</sup>NaOH 滴定法测定有机酸含量,硫酸-萘酚比色法测定可溶性糖含量,钼蓝比色法测定 Vc 含量,紫外-可见分光光度计法测定番茄红素含量。

**1.4.4 产量** 采用田间称量法记录各处理小区每次的采收量,至采收全部结束后,汇总统计得出各处理小区的总产量。

**1.4.5 灌溉水利用效率** 采用下式计算:

$$IWUE = 100Y/I_r \quad (2)$$

式中, $IWUE$  为灌溉水利用效率( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ); $Y$  为产量( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $I_r$  为总灌水量( $\text{mm}$ );100 为单位转换系数。

## 1.5 生长与品质综合评价

采用 CRITIC 法对番茄生长和品质进行综合评价。具体步骤如下:

**1.5.1 原评价矩阵的规范化** 将参与评价的处理集设为  $A, A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ , 参与各处理的评价指标设为  $B, B = (B_1, B_2, \dots, B_m)$ , 处理  $A_i$  中的  $B_j$  指标定义为  $X_{ij}$ , 将各处理的指标进行组合后形成原始指标值矩阵  $X = (X_{ij})_{n \times m} (1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m)$ 。选择能整体表征番茄生长的株高( $X_{1-1}$ )、茎粗( $X_{2-1}$ )、植株干质量( $X_{3-1}$ )、叶干质量( $X_{4-1}$ )、茎干质量( $X_{5-1}$ )、果实干质量( $X_{6-1}$ )、根干质量( $X_{7-1}$ )、根冠比( $X_{8-1}$ ) 8 个指标作为评价变量。选择能整体表征番茄品质的单果质量( $X_{1-2}$ )、果形指数( $X_{2-2}$ )、横径变异系数( $X_{3-2}$ )、果实含水量( $X_{4-2}$ )、可溶性固形物含量( $X_{5-2}$ )、可溶性糖含量( $X_{6-2}$ )、有机酸含量( $X_{7-2}$ )、糖酸比( $X_{8-2}$ )、Vc 含量( $X_{9-2}$ )、番茄红素含量( $X_{10-2}$ ) 10 个指标作为评价变量。

**1.5.2 原始数据的标准化、同趋化处理** 不同指标在量纲和取值上存在较大的差异,为消除量纲影

响,采用式(3)、(4)对原始数据进行标准化和同趋化处理。

对于正向指标:

$$ZX_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \times 100 \quad (X_{ij} \leq X_{\max}) \quad (3)$$

对于逆向指标:

$$ZX_{ij} = \frac{X_{\min}}{X_{ij}} \times 100 \quad (X_{ij} \geq X_{\min}) \quad (4)$$

式中, $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别为指标最大值和最小值; $ZX_{ij}$  为  $X_{ij}$  经标准化和同趋化后的值。

**1.5.3 计算评价指标的变异性和冲突性** 各评价指标的客观权重以评价指标间的对比强度和冲突性来综合衡量,设  $C_j$  表示第  $j$  个评价指标所包含的信息量:

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - R_{ij}) \quad (5)$$

式中, $\sigma_j$  为第  $j$  个评价指标的标准差; $R_{ij}$  为评价指标间的相关系数。

**1.5.4 计算权重系数**  $C_j$  越大,表明第  $j$  个评价指标所包含的信息量越大,该指标的相对重要性也就越大,所以第  $j$  个评价指标的客观权重  $W_j$  可表示为:

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (6)$$

**1.5.5 计算综合评价值** 计算番茄生长和品质的综合评价值  $V_i$ , 综合评价值  $V_i$  为:

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j d_{ij} \quad (7)$$

## 1.6 综合效益评价

采用 TOPSIS 法(逼近理想解排序法)对各处理下番茄的生长、品质、产量、 $IWUE$  综合效益进行评价。其基本原理是:基于标准化加权评价决策矩阵,找出有限方案中的正理想解  $Y^+$  和负理想解  $Y^-$  后计算各方案与理想解的相对贴近度  $C_i$ , 以  $C_i$  的大小进行方案的优劣排序<sup>[13]</sup>。具体方法如下:

将 5 个灌水处理和生长、品质、产量、 $IWUE$  构建初始决策矩阵  $X_{ij} = (x_{ij})_{5 \times 4}$ 。上述 4 个评价指标均为正向指标,根据式(8)得到标准化后的加权决策矩阵  $Y_{ij} = (y_{ij})_{5 \times 4}$ :

$$y_{ij} = W_j \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^5 x_{ij}^2}} \quad (8)$$

采用变异系数法对生长、品质、产量、 $IWUE$  赋予权重。变异系数法确定指标权重的计算公式为:

$$W_j = \frac{CV_j}{\sum_{j=1}^n CV_j} \quad (9)$$

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{x_j} \quad (10)$$

式中,  $W_j$  为指标  $j$  的权重;  $CV_j$  为指标  $j$  的变异系数;  $\sigma_j$  为指标  $j$  的标准差;  $x_j$  为指标  $j$  的平均值。

基于标准化加权评价决策矩阵, 计算正理想解  $Y^+$  和负理想解  $Y^-$ 。

$$Y^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq 5} y_{ij}^+ \mid i = 1, 2, \dots, 5 \} = \{ y_1^+, y_2^+, y_3^+, y_4^+ \} \quad (11)$$

$$Y^- = \{ \min_{1 \leq i \leq 5} y_{ij}^- \mid i = 1, 2, \dots, 5 \} = \{ y_1^-, y_2^-, y_3^-, y_4^- \} \quad (12)$$

计算各处理到正、负理想解的距离  $D_i^+$ 、 $D_i^-$  以及相对贴适度  $C_i$ ,  $C_i$  值越大, 表明生长、品质、产量、 $IWUE$  的综合效益越好, 根据  $C_i$  的大小, 对各灌水处理进行优劣排序。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (y_j^+ - y_{ij}^+)^2} \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (y_j^- - y_{ij}^-)^2} \quad (14)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (15)$$

## 1.7 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 23.0 进行数据处理和统计分析, 采用 Duncan 法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水量对基质栽培番茄生长的影响

由表 2 可知, 株高随灌水量的增加而显著增大。0.4E 处理茎粗显著小于 0.8E 处理, 与其他处理无显著差异。植株、叶、果实干质量随灌水量的增加而增大。1.0E 和 1.20E 处理间植株、叶、果实干质

量间无显著差异, 但均显著大于 0.4E 和 0.6E 处理; 1.0E 和 1.20E 处理植株干质量较 0.4E、0.6E 处理分别增加了 33.5%、23.1% 和 41.8%、30.7%, 叶干质量分别增加了 44.4%、31.8% 和 66.5%、51.9%, 果实干质量分别增加了 33.9%、24.6% 和 39.6%、29.8%。茎干质量以 1.0E 处理最大, 显著大于 0.4E 处理, 与其他处理无显著差异。根干质量和根冠比随灌水量的增加呈先减小后增大的趋势, 0.4E 处理根干质量和根冠比最大, 1.0E 处理根干质量和根冠比最小。

### 2.2 番茄生长指标综合评价

采用 CRITIC 法对番茄生长指标进行客观评价。初始数据的标准化、同趋化合并进行, 株高、茎粗、植株干质量、叶干质量、茎干质量、果实干质量为正向指标, 根干质量和根冠比为逆向指标, 根据式(3)、(4)进行数据标准化和同趋化, 如表 3 所示。对经标准化、同趋化后的数据进行评价指标间的相关性分析, 得到相关系数矩阵  $R = (R_{ij})_{5 \times 8}$  (表 4)。根据式(5)和(6)计算得到各生长指标权重(表 5)。基于各指标权重和标准化矩阵, 根据式(7)计算出各处理综合得分(表 6)。可以看出, 随灌水量的增加生长综合得分逐渐增大, 各处理排名表现为 1.2E > 1.0E > 0.8E > 0.6E > 0.4E, 综合生长最优处理为 1.2E。

### 2.3 灌水量对基质栽培番茄果实品质的影响

由表 7 可知, 单果质量随灌水量的增加而增大, 果形指数和横茎变异系数随灌水量的增加而减小; 1.0E 和 1.2E 处理间番茄单果质量无显著差异, 但均显著大于 0.4E、0.6E、0.8E 处理, 1.0E 和 1.2E 处理单果质量较 0.4E、0.6E、0.8E 处理分别增加了 56.8%、37.6%、16.4% 和 58.8%、39.3%、17.8%; 0.4E 处理果形指数显著大于 0.8E、1.0E、1.2E 处理, 0.4E 和 0.6E 处理横茎变异系数显著大于 1.0E 和 1.2E 处理。果实含水量随灌水量的增加而增大, 可溶性固形物含量和糖酸比随灌水量的增加而减少, 可溶性糖含量和有机酸含量随灌水量的增大呈先增加后减

表 2 灌水量对温室基质栽培番茄生长的影响

Table 2 Effects of irrigation amount on tomato growth in greenhouse substrate cultivation

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem thick	植株干质量/g Plant dry mass	叶干质量/g Leaves dry mass	茎干质量/g Stem dry mass	果实干质量/g Fruit dry mass	根干质量/g Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio
0.4E	167.0e	12.78b	153.76c	37.84c	31.66b	78.95b	5.32a	0.0357a
0.6E	179.9d	13.17ab	166.79bc	41.48c	35.48ab	84.88b	4.95ab	0.0306ab
0.8E	195.2c	13.74a	176.88b	44.93bc	37.04ab	90.16ab	4.75ab	0.0275bc
1.0E	204.6b	13.36ab	205.33a	54.65ab	40.80a	105.73a	4.15b	0.0208c
1.2E	221.0a	13.68ab	217.98a	63.00a	40.16a	110.19a	4.64ab	0.0217c

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 3 参评生长指标同趋化、标准化值

Table 3 Chemotactic and standardized value of growth evaluation indexes

处理 Treatment	株高 Plant height	茎粗 Stem thick	植株干质量 Plant dry mass	叶干质量 Leaves dry mass	茎干质量 Stem dry mass	果实干质量 Fruit dry mass	根干质量 Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio
0.4E	75.57	93.02	70.54	60.06	77.58	71.65	77.99	58.26
0.6E	81.42	95.85	76.52	65.84	86.96	77.03	83.77	67.97
0.8E	88.33	100.00	81.14	71.32	90.79	81.82	87.36	75.64
1.0E	92.58	97.25	94.19	86.75	100.00	95.95	100.00	100.00
1.2E	100.00	99.61	100.00	100.00	98.42	100.00	89.43	95.85

表 4 番茄生长评价指标的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of tomato growth evaluation indicators

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem thick	植株干质量 Plant dry mass	叶干质量 Leaves dry mass	茎干质量 Stem dry mass	果实干质量 Fruit dry mass	根干质量 Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio
株高 Plant height	1.000							
茎粗 Stem thick	0.832	1.000						
植株干质量 Plant dry mass	0.974	0.692	1.000					
叶干质量 Leaves dry mass	0.969	0.671	0.991	1.000				
茎干质量 Stem dry mass	0.932	0.757	0.943	0.893	1.000			
果实干质量 Fruit dry mass	0.964	0.674	0.999	0.984	0.949	1.000		
根干质量 Root dry mass	0.723	0.533	0.786	0.697	0.911	0.813	1.000	
根冠比 Root-shoot ratio	0.921	0.651	0.968	0.927	0.976	0.979	0.915	1.000

表 5 CRITIC 法确定的番茄单一生长指标权重

Table 5 Weights of single tomato growth indicator based on CRITIC method

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem thick	植株干质量 Plant dry mass	叶干质量 Leaves dry mass	茎干质量 Stem dry mass	果实干质量 Fruit dry mass	根干质量 Root dry mass	根冠比 Root-shoot ratio
权重 Weight	0.089	0.085	0.108	0.193	0.079	0.106	0.179	0.161

表 6 CRITIC 法确定的各处理番茄生长得分及排序

Table 6 Tomato growth index and its rank based on CRITIC

处理 Treatment	综合得分 Comprehensive scores	排序 Ranking
0.4E	70.91	5
0.6E	77.34	4
0.8E	82.56	3
1.0E	95.50	2
1.2E	97.28	1

小趋势。1.0E 和 1.2E 处理果实含水量显著高于 0.4E 和 0.6E 处理,分别增加了 5.0%、3.0% 和 5.3%、3.3%。0.4E 处理可溶性固形物含量显著大于其他处理,0.6E 处理可溶性固形物含量与 0.8E 处理间无显著差异,但显著大于 1.0E 和 1.2E 处理,0.4E 和 0.6E 处理可溶性固形物含量较 1.0E 和 1.2E 处理分别增加了 79.8%、82.7% 和 23.0%、24.9%。可溶性糖含量以 0.8E 处理最大,显著大于其他处理;0.4E

处理可溶性糖含量最低,较 0.8E 处理减少了 21.4%。0.8E 和 1.0E 处理间有机酸含量无显著差异,但显著大于 0.4E、0.6E、1.2E 处理;0.4E 处理有机酸含量最低,较 0.8E 和 1.0E 处理减少了 63.3% 和 61.7%。0.4E 处理糖酸比与 0.6E 处理间无显著差异,但显著大于 0.8E、1.0E、1.2E 处理,0.4E 处理糖酸比较 0.8E、1.0E、1.2E 处理分别增加了 34.6%、38.7%、50.7%。Vc 含量和番茄红素含量随灌水量的增大呈先增加后减小趋势。Vc 含量以 1.0E 处理最大,达到 204.35 mg · kg<sup>-1</sup>;0.4E 处理 Vc 含量最低,显著小于 0.8E、1.0E、1.2E 处理。番茄红素以 0.8E 处理含量最大,达到 157.6 mg · kg<sup>-1</sup>。

#### 2.4 番茄品质指标综合评价

采用 CRITIC 法对番茄品质进行综合评价。根据公式(3)、(4)对原始数据进行标准化、同趋化处

理,单果质量、果形指数、可溶性固形物、可溶性糖、有机酸、糖酸比、Vc、番茄红素为正向指标,横径变异系数和果实含水量为逆向指标,数据标准化、同趋化后的结果见表 8。对经标准化、同趋化后的数据进行评价指标相关性分析,得到品质指标相关系数矩阵(表 9)。根据式(5)和(6)计算出单果质量、果形指数、横径变异系数、果实含水量、可溶性固形

物、可溶性糖、有机酸、糖酸比、Vc、番茄红素权重分别为 0.1554、0.0276、0.1587、0.0222、0.2003、0.0664、0.1472、0.1394、0.0407、0.0420。基于各指标权重和标准化矩阵,根据式(7)计算得到各处理综合评价(表 10)。可以看出,各处理排名为 1.0E>1.2E>0.8E>0.4E>0.6E;综合品质最优处理为 1.0E,综合得分为 84.19;1.2E 次之,综合得分为 83.70。

表 7 灌水量对番茄品质的影响

Table 7 Effects of irrigation amount on tomato quality

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	果形指数 Fruit shape index	横径变异系数 CV of transverse diameter	含水量 Water content/%	可溶性 固形物 Soluble solid/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	有机酸 Organic acid/%	糖酸比 Sugar-acid ratio	Vc Vitamin C /(mg·kg <sup>-1</sup> )	番茄红素 Lycopene /(mg·kg <sup>-1</sup> )
0.4E	140.54d	0.8586a	0.0527a	89.69c	8.13a	3.09d	0.3610d	8.56a	179.51c	137.2c
0.6E	160.21c	0.8358ab	0.0572a	91.46bc	5.56b	3.58b	0.4961c	7.22ab	188.62bc	142.5bc
0.8E	189.42b	0.8179b	0.0488ab	92.54ab	4.92bc	3.75a	0.5894a	6.36bc	192.63ab	157.6a
1.0E	220.43a	0.8092b	0.0403bc	94.19a	4.52c	3.61b	0.5851a	6.17bc	204.35a	147.3b
1.2E	223.16a	0.8035b	0.0354c	94.47a	4.45c	3.19c	0.5621b	5.68c	195.22ab	142.4bc

表 8 参评品质指标同趋化、标准化值

Table 8 Chemotactic and standardized value of evaluation indexes

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass	果形指数 Fruit shape index	横径变异系数 VC of transverse diameter	含水量 Water content	可溶性固形物 Soluble solid	可溶性糖 Soluble sugar	有机酸 Organic acid	糖酸比 Sugar-acid ratio	Vc Vitamin C	番茄红素 Lycopene
0.4E	62.98	100.00	67.17	100.00	100.00	100.00	82.40	61.25	87.86	87.06
0.6E	71.79	97.34	61.89	98.07	68.39	84.35	95.47	84.17	92.32	90.42
0.8E	84.88	95.26	72.54	96.93	60.52	74.30	100.00	100.00	94.27	100.00
1.0E	98.78	94.25	87.84	94.94	55.60	72.08	96.27	99.27	100.00	93.46
1.2E	100.00	93.58	100.00	95.23	54.74	66.36	85.07	95.37	95.55	90.36

表 9 番茄品质评价指标的相关系数矩阵

Table 9 Correlation coefficient matrix of tomato quality evaluation indicators

指标 Index	单果质量 Single fruit mass	果形指数 Fruit shape index	横径变异系数 VC of transverse diameter	含水量 Water content	可溶性 固形物 Soluble solid	可溶性糖 Soluble sugar	有机酸 Organic acid	糖酸比 Sugar-acid ratio	Vc Vitamin C	番茄红素 Lycopene
单果质量 Single fruit mass	1.000									
果形指数 Fruit shape index	-0.972	1.000								
横径变异系数 VC of transverse diameter	0.894	-0.801	1.000							
含水量 Water content	-0.987	0.978	-0.826	1.000						
可溶性固形物 Soluble solid	-0.881	0.959	-0.615	0.929	1.000					
可溶性糖 Soluble sugar	0.237	-0.379	-0.221	-0.345	-0.569	1.000				
有机酸 Organic acid	0.853	-0.935	0.547	-0.893	-0.971	0.677	1.000			
糖酸比 Sugar-acid ratio	-0.944	0.995	-0.763	0.955	0.970	-0.401	-0.943	1.000		
Vc Vitamin C	0.907	-0.890	0.663	-0.950	-0.881	0.516	0.876	-0.853	1.000	
番茄红素 Lycopene	0.395	-0.520	0.045	-0.421	-0.586	0.828	0.752	-0.541	0.477	1.000

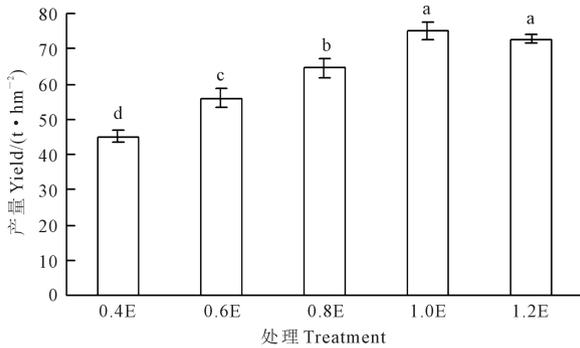
## 2.5 灌水量对基质栽培番茄产量及灌溉水利用效率的影响

由图 1 可以看出,当灌水量由 0.4E 增加到 1.0E 时,产量呈显著递增趋势,但当灌水量由 1.0E 增加到 1.2E 时,产量略有降低。0.4E、0.6E、0.8E 处理番茄平均产量显著小于 1.0E 和 1.2E 处理,1.0E 和 1.2E 处理间产量无显著差异。*IWUE* 随灌水量增加而降低(图 2)。1.0E 处理产量最高,较 0.4E、0.6E、0.8E 处理分别增加 66.4%、34.0%、16.3%,但 *IWUE* 分别减小 14.5%、9.5%、2.6%。1.0E 处理产量较 1.2E 处理增加了 3.2%、*IWUE* 提高了 19.9%。可见,当灌水量为 1.2E 时,对产量的影响并不大,反而增加了灌溉水的无效损失。

表 10 CRITIC 法确定的番茄综合品质得分及排序

Table 10 Tomato comprehensive quality index and its rank based on CRITIC

处理 Treatment	综合得分 Comprehensive scores	排序 Ranking
0.4E	81.13	4
0.6E	77.59	5
0.8E	81.37	3
1.0E	84.19	1
1.2E	83.70	2



注:图中不同小写字母表示处理间在  $P<0.05$  水平差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments at the  $P<0.05$  level. The same below.

图 1 灌水量对番茄产量的影响

Fig.1 Effects of irrigation amount on yield

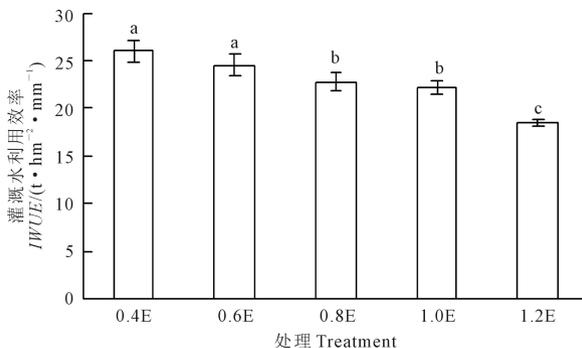


图 2 灌水量对番茄灌溉水利用效率的影响

Fig.2 Effects of irrigation amount on *IWUE*

## 2.6 综合效益评价

以 CRITIC 法对生长和品质综合评价时得到的综合得分作为量化的生长和品质指标,结合产量与 *IWUE*,对 5 个灌水处理进行综合效益评价,从而选出温室基质栽培番茄最优的灌水处理。根据式(9)、(10)计算得到生长、品质、产量、*IWUE* 的权重(表 11),权重顺序为产量>生长>*IWUE*>品质。利用式(8)得到标准化后的加权决策矩阵,由式(11)、(12)确定正、负理想解(表 12)。根据式(13)、(14)、(15)计算得到各处理距正、负理想解的距离  $D^+$ 、 $D^-$  以及相对贴近度  $C_i$ ,根据  $C_i$  值的大小对 5 个处理的综合效益进行排序,可得 1.0E>1.2E>0.8E>0.6E>0.4E(表 13),1.0E 处理相对贴近度  $C_i$  最大,综合效益评价最高。

## 3 讨论

追求节水优质高产的灌溉策略始终是设施农业发展的目标<sup>[26]</sup>,本试验以非耕地日光温室基质栽

表 11 生长、品质、产量、*IWUE* 指标权重

Table 11 Weight of growth, quality, yield and *IWUE*

指标 Index	生长 Develop	品质 Quality	产量 Yield	<i>IWUE</i>	总和 Sum
标准差 <i>SD</i>	11.4420	2.6207	12.3770	2.8192	
平均值 <i>AVG</i>	84.7181	81.5940	62.7547	22.8019	
变异系数 <i>CV</i>	0.1351	0.0321	0.1972	0.1236	0.4880
权重 <i>Weight</i>	0.2767	0.0658	0.4041	0.2533	1.0000

表 12 各指标标准化后的加权矩阵

Table 12 Weighted matrix of the normalized evaluation indicators

处理 Treatment	生长 Develop	品质 Quality	产量 Yield	<i>IWUE</i>
0.4E	0.1028	0.0293	0.1280	0.1283
0.6E	0.1122	0.0280	0.1590	0.1211
0.8E	0.1197	0.0293	0.1832	0.1125
1.0E	0.1385	0.0304	0.2131	0.1096
1.2E	0.1411	0.0302	0.2065	0.0914
正理想解 Positive ideal solution	0.1411	0.0304	0.2131	0.1283
负理想解 Negative ideal solution	0.1028	0.0280	0.1280	0.0914

表 13 各处理的排序指标值

Table 13 Index value for sorting different irrigation treatments

处理 Treatment	$D^+$	$D^-$	$C_i$	排序 Ranking
0.4E	0.0933	0.0369	0.2834	5
0.6E	0.0618	0.0439	0.4155	4
0.8E	0.0400	0.0615	0.6060	3
1.0E	0.0188	0.0940	0.8331	1
1.2E	0.0374	0.0874	0.7000	2

培番茄为研究对象,以 20 cm 标准蒸发皿的水面蒸发量为灌水依据,探讨了不同灌水量对生长、品质、产量和 *IWUE* 等指标的影响。研究发现,灌水量对番茄的株高、植株干质量、茎干质量、果实干质量和根冠比有显著影响,株高、植株干质量、叶干质量、果实干质量随灌水量的增加而增大,根干质量和根冠比随灌水量的增加呈先减小后增大趋势,1.0E 和 1.20E 处理植株、叶、果实干质量显著大于 0.4E、0.6E 处理,根冠比显著减小,体现出适宜灌溉量能显著促进番茄生长并提高干物质质量<sup>[27]</sup>;水分亏缺会刺激地下部生长,提高番茄的根冠比<sup>[28-29]</sup>。采用 CRITIC 法对番茄生长进行综合评价,叶干质量、根干质量、根冠比 3 个指标所占权重较大,各处理综合得分为 1.2E>1.0E>0.8E>0.6E>0.4E,综合生长最优处理为 1.2E。

研究表明,灌水量的减少会降低番茄的商品品质<sup>[13]</sup>,适度的水分亏缺可提高番茄营养品质<sup>[14,30]</sup>,本研究印证了这一结论。本试验结果表明,番茄单果质量随灌水量的减少而减小,果形指数和横茎变异系数随灌水量的减少而增大,灌水量的减少降低了基质栽培番茄的商品品质。果实含水量随灌水量的增加而增大,可溶性固形物含量和糖酸比随灌水量的增加而减少,可溶性糖含量和有机酸含量随灌水量的增大呈先增加后减小趋势;0.4E、0.6E 处理果实含水量显著小于 1.0E 和 1.2E 处理,可溶性固形物含量和糖酸比显著大于 1.0E 和 1.2E 处理,0.8E 处理可溶性糖含量、有机酸含量最大;表明适度的水分亏缺可提高基质栽培番茄的风味品质,这可能是因为水分亏缺影响了汁液从韧皮部向果实的运输,减少了从木质部向果实的水分流量,降低了果实含水量,有利于风味品质提升<sup>[31]</sup>。Vc 含量和番茄红素含量随灌水量的增大呈先增加后减小的趋势,Vc 含量以 1.0E 处理最大,番茄红素含量以 0.8E 处理最大;适度的亏缺灌溉可提升番茄的保健品质,可能是因为亏缺灌溉减小了叶面积指数,增加了果实受到的光照,从而促进了果实内 Vc 和番茄红素的形成<sup>[32]</sup>;也有研究认为亏缺灌溉导致了较高的土壤电导率和含盐度,从而引起了果实内化学物质浓度的增加<sup>[33]</sup>。番茄各品质指标随灌水量增加呈现不同增降规律,单一品质比较无法全面反映番茄品质优劣,本文采用 CRITIC 法对番茄品质指标进行综合评价,可溶性固形物、横茎变异系数、单果质量、有机酸、糖酸比所占权重较大,果实含水量、果形指数、Vc、番茄红素、可溶性糖所占权重较小,各处理综合得分为 1.0E>1.2E>0.8E>0.4E>

0.6E,综合品质最优处理为 1.0E,1.2E 处理次之。

较多研究表明,番茄产量与灌水量呈二次抛物线关系,且当灌水超过一定的阈值时,产量增长不明显或出现减产,*IWUE* 均随灌水量的增加而减少<sup>[13,34-35]</sup>。本试验研究表明,当灌水量由 0.4E 增加到 1.0E 时,产量呈显著递增趋势,但当灌水量由 1.0E 增加到 1.2E 时,产量略有降低,而 *IWUE* 均随灌水量的增加而减少;0.4E 和 0.6E 处理 *IWUE* 较大,但产量较 1.0E 处理分别降低了 66.4% 和 34.0%;1.0E 处理产量最大,较 1.2E 处理灌水量减少了 16.2%,产量增加了 3.2%,*IWUE* 提高了 19.9%;说明适度亏水对提高 *IWUE* 具有一定的正效应,增加灌水量也会显著降低水分利用效率,灌水量为 1.0E 是平衡产量与水分利用的阈值。

本文采用 CRITIC 法对番茄生长和品质指标进行量化,利用变异系数法分别对生长、品质、产量、*IWUE* 赋权,通过 TOPSIS 法对各处理下番茄的综合效益进行评价,该方法有效避免了主观片面的缺陷,使赋权更为客观。通过计算分析得出番茄产量所占权重最大,而品质所占权重最小;1.0E 处理相对贴适度  $C_i$  最大,综合效益评价最高。有研究表明,对于短季节栽培番茄,0.8E~1.0E 是较为适宜的灌水量<sup>[14]</sup>,这与本研究结果基本一致。本研究表明,根据蒸发皿蒸发量制定非耕地日光温室番茄基质栽培灌溉制度简单可行,1.0E 处理是最适宜的灌水方案。即灌溉间隔为 2 d,灌水量为 1.0E 可作为甘肃河西走廊非耕地日光温室秋冬茬番茄基质栽培适宜灌溉制度。

## 4 结 论

1) 基质栽培番茄株高、植株干质量、叶干质量、果实干质量随灌水量的增加而增大,根干质量和根冠比随灌水量增加呈先减小后增加的趋势;CRITIC 法对番茄生长综合评价得分排名为 1.2E>1.0E>0.8E>0.6E>0.4E,1.2E 处理生长最优。

2) 基质栽培番茄单果质量、果实含水量随灌水量的增加而增大,可溶性固形物含量和糖酸比随灌水量的增加而减少,可溶性糖含量、有机酸含量、Vc 含量和番茄红素含量随灌水量的增大呈现先增加后降低趋势。减少灌水量会降低番茄的商品品质,适度亏缺灌溉可提升番茄的营养品质。CRITIC 法对番茄品质综合评价得分排名为 1.0E>1.2E>0.8E>0.4E>0.6E,1.0E 处理综合品质最优。

3) 当灌水量由 0.4E 增加到 1.0E 时,基质栽培番茄产量呈显著递增趋势,灌水量由 1.0E 增加到

1.2E时,产量略有降低。*IWUE* 随灌水量的减少而增大。灌水量为 1.0E 是平衡产量与水分利用的阈值。

4)利用变异系数法对番茄生长、品质、产量、*IWUE* 指标赋权,通过 TOPSIS 法对各处理下番茄的综合效益进行评价,得出 1.0E 处理是最适宜的灌水方案,可为甘肃河西走廊非耕地日光温室番茄基质栽培灌溉管理提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 王晓巍,张玉鑫,马彦霞,等. 甘肃省戈壁农业发展现状及对策[J]. 甘肃农业科技, 2020, (7): 71-75.  
WANG X W, ZHANG Y X, MA Y X, et al. Development status and countermeasures of Gebi agriculture in Gansu Province[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2020, (7): 71-75.
- [2] 王一民,冯克,焦宏,等. 春风吹度玉门关——中国现代特色农业的甘肃实践[EB/OL]. 2023(2023-07-10). [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_23793009](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23793009).  
WANG Y M, FENG K, JIAO H, et al. Spring breeze blows Yumen Pass — Gansu practice of modern characteristic agriculture in China [EB/OL]. 2023(2023-07-10). [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_23793009](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23793009).
- [3] 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.
- [4] 邢英英,张富仓,吴立峰,等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, (z1): 110-121.  
XING Y Y, ZHANG F C, WU L F, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, (z1): 110-121.
- [5] 马彦霞,王晓巍,张玉鑫,等. 戈壁荒漠区基质槽培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 Gebi Desert[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(11): 1-8.
- [6] WANG Z Y, LIU Z X, ZHANG Z K, et al. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 123(1): 51-57.
- [7] 葛建坤,李佳,罗金耀. 基于水面蒸发法的日光温室膜下滴灌番茄需水量计算模型[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 53-56.  
GE J K, LI J, LUO J Y. Water requirement calculation model of tomato with drip irrigation under mulch in sunlight greenhouse based on water surface evaporation method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(8): 53-56.
- [8] 原保忠,康跃虎. 番茄滴灌在日光温室内耗水规律的初步研究[J]. 节水灌溉, 2000, (3): 25-27.  
YUAN B Z, KANG Y H. Elementary studies on water consumption rules of tomato with drip irrigation in green house of sunshine[J]. Water Saving Irrigation, 2000, (3): 25-27.
- [9] 姜展博,王丽学,李明月,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.
- [10] 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(3): 520-531.
- [11] 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.
- [12] 张栓堂,焦艳平,王福田,等. 温室番茄不同灌水方式试验研究[J]. 节水灌溉, 2016, (10): 59-63.  
ZHANG S T, JIAO Y P, WANG F T, et al. Experiment on different irrigation methods of tomato in solar greenhouse [J]. Water Saving Irrigation, 2016, (10): 59-63.
- [13] 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.
- [14] 吴宣毅,曹红霞,王虎兵,等. 不同种植行距和灌水量对中国西北地区日光温室短季节栽培番茄品质的交互影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 940-951.  
WU X Y, CAO H X, WANG H B, et al. Effect of planting row spacing and irrigation amount on comprehensive quality of short-season cultivation tomato in solar greenhouse in Northwest China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 940-951.
- [15] 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.
- [16] 王昆,宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003, (6): 48-49.  
WANG K, SONG H Z. Comparison and analysis of three objective weighting methods [J]. Technoeconomics & Management Research, 2003, (6): 48-49.
- [17] ZAVADSKAS E K, ZAKAREVICIUS A, ANTUCHEVICIENE J. E-

- valuation of ranking accuracy in multi-criteria decisions[J]. *Informatica*, 2006, 17(4): 601-618.
- [18] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 等. 温室番茄节水调质灌水方案评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, (6): 529-534, 540.  
LIU H, DUAN A W, SUN J S, et al. Evaluation of irrigation scheme with high quality and efficiency for greenhouse grown tomato [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, (6): 529-534, 540.
- [19] 郑健, 朱传远, 齐兴赞, 等. 不同生育阶段水/沼液一体化灌溉对番茄生长及产量和品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(5): 64-71.  
ZHENG J, ZHU C Y, QI X Y, et al. The effects of irrigation with diluted biogas slurry on growth, yield and fruit quality of tomato [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(5): 64-71.
- [20] 菅毅, 周金星, 万龙, 等. 基于TOPSIS方法的喀斯特断陷盆地番茄地下灌溉技术节水效益综合评价[J]. *节水灌溉*, 2022, (2): 89-94, 100.  
JIAN Y, ZHOU J X, WAN L, et al. Comprehensive evaluation of water-saving benefits of subsurface irrigation technology for tomato planting in the Karst Faultedbasin based on TOPSIS method [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022, (2): 89-94, 100.
- [21] 姚继超, 闫华, 薛绪掌, 等. 基于熵权-逼近理想解法的设施番茄灌溉制度评价研究[J]. *节水灌溉*, 2023, (11): 107-114.  
YAO J C, YAN H, XUE X Z, et al. Study on evaluation of irrigation system of greenhouse tomato based on entropy Weight-TOPSIS [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023, (11): 107-114.
- [22] 王可, 谢香文, 洪明. 基于TOPSIS法对和田地区温室番茄滴灌方案优选研究[J]. *节水灌溉*, 2024, (1): 115-120, 127.  
WANG K, XIE X W, HONG M. Optimization of drip irrigation schemes for greenhouse tomatoes in Hotan prefecture based on TOPSIS method [J]. *Water Saving Irrigation*, 2024, (1): 115-120, 127.
- [23] 黄绍文, 唐继伟, 殷学云, 等. 基于发育阶段的日光温室有机基质栽培番茄水肥一体化技术[J]. *中国果菜*, 2017, 37(9): 52-54, 60.  
HUANG S W, TANG J W, YIN X Y, et al. Drip fertigation technology of tomato cultivated in greenhouse organic substrates based on management strategy at different growth stages [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2017, 37(9): 52-54, 60.
- [24] 蔡润, 孙正梁, 胡京昂, 等. 不同口感型番茄品种的品质鉴定及多元统计分析[J]. *中国蔬菜*, 2023, (11): 87-97.  
CAI R, SUN Z L, HU J A, et al. Quality identification and multivariate statistical analysis of different palatable tomato varieties [J]. *China Vegetables*, 2023, (11): 87-97.
- [25] 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.
- [26] 王宏飞, 李彦彬, 柳腾飞, 等. 基于CRITIC-TOPSIS综合评价法优化温室作物灌溉策略[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(2): 52-59.  
WANG H F, LI Y B, LIU T F, et al. Optimizing irrigation scheduling for greenhouse crops using the CRITIC-TOPSIS framework [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 52-59.
- [27] SHABBIR A, MAO H P, ULLAH I, et al. Effects of drip irrigation emitter density with various irrigation levels on physiological parameters, root, yield, and quality of cherry tomato [J]. *Agronomy*, 2020, 10(11): 1685.
- [28] 夏海波, 于晓蕾, 黄乾. 不同水分处理对无土栽培番茄根系的影响[J]. *山东水利*, 2022, (2): 1-2, 11.  
XIA H B, YU X L, HUANG Q. Effects of different water treatments on root system of soilless tomato cultivation [J]. *Shandong Water Resources*, 2022, (2): 1-2, 11.
- [29] 李红峥, 曹红霞, 吴宣毅, 等. 沟灌方式与灌水量对温室番茄生长指标的影响[J]. *节水灌溉*, 2016, (9): 90-93.  
LI H Z, CAO H X, WU X Y, et al. Effect of furrow irrigation pattern and irrigation amount on growth index of greenhouse tomato [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016, (9): 90-93.
- [30] FAVATI F, LOVELLI S, GALGANO F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(4): 562-571.
- [31] CHEN J L, KANG S Z, DU T S, et al. Modeling relations of tomato yield and fruit quality with water deficit at different growth stages under greenhouse condition [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 131-148.
- [32] 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.
- [33] CHEN R Q, KANG S Z, HAO X M, et al. Variations in tomato yield and quality in relation to soil properties and evapotranspiration under greenhouse condition [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 197: 318-328.
- [34] 吕剑, 颀建明, 郁继华, 等. 灌水下限对基质栽培番茄生长、水分利用效率及果实品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2013, 48(1): 37-41, 48.  
LV J, JIE J M, YU J H, et al. Effects of irrigation lower limit on growth, utilization efficiency of water and quality of tomato under substrate culture [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(1): 37-41, 48.
- [35] 王晓艳, 高艳明, 李建设, 等. 分根区交替滴灌对樱桃番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(11): 2457-2464.  
WANG X Y, GAO Y M, LI J S, et al. Effect of rootzone alternative drip irrigation on yield quality and water use efficiency of cherry tomato [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(11): 2457-2464.