

河西走廊莴笋膜下滴灌灌溉制度研究

张玉鑫, 蒯佳琳, 王晓巍, 马彦霞, 康恩祥, 王 萍

(甘肃省农业科学院蔬菜研究所 兰州 730070)

摘要:为探究甘肃河西走廊莴笋膜下滴灌最优灌溉制度,采用双因素试验设计,设置滴灌频率(D1:4 d、D2:6 d、D3:8 d)与灌水定额(W1:75 m³·hm⁻²·次⁻¹、W2:105 m³·hm⁻²·次⁻¹、W3:135 m³·hm⁻²·次⁻¹)组合的9种处理,系统解析二者对莴笋外观品质、营养品质、产量及灌溉水利用效率(IWUE)的协同效应。基于CRITIC法量化外观品质与营养品质指标,采用变异系数法对莴笋外观品质、营养品质、产量和IWUE四个指标进行赋权,运用TOPSIS模型进行多目标综合评价。结果表明,高中频灌溉(D1、D2)配合高灌溉定额(W3)可显著提高莴笋茎粗、茎长、单株质量及产量,D2W3处理产量达78.15 t·hm⁻²,较D3W1显著增产62.9%。与D1W3处理相比,D3W1处理莴笋的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C含量显著增加,分别显著增加了50.8%、7.5%、18.8%,其硝酸盐含量也显著增加了122.8%,达251.1 mg·kg⁻¹。D2W1处理莴笋的IWUE最高(55.31 kg·m⁻³),较D1W3提高了67.8%。TOPSIS综合评价结果显示,D2W3处理(6 d滴灌频率+135 m³·hm⁻²·次⁻¹灌水定额)综合贴近度最高(C_r=0.784 2),兼顾高产、优质与节水,推荐为甘肃河西走廊莴笋膜下滴灌最优灌溉制度。

关键词: 莴笋; 膜下滴灌; 滴灌频率; 灌水定额; CRITIC-TOPSIS 法

中图分类号: S636.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)08-190-09

Research on drip irrigation system of lettuce in Hexi Corridor

ZHANG Yuxin, KUAI Jialin, WANG Xiaowei, MA Yanxia, KANG Enxiang, WANG Ping

(Vegetable Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To explore the optimal irrigation regime for lettuce under mulched drip irrigation in the Hexi Corridor of Gansu province, this study adopted two-factor experimental design with nine combinations of drip irrigation frequency (D1: 4 d, D2: 6 d, D3: 8 d) and irrigation quota (W1: 75 m³·hm⁻²·time⁻¹, W2: 105 m³·hm⁻²·time⁻¹, W3: 135 m³·hm⁻²·time⁻¹). The synergistic effects of these factors on lettuce appearance quality, nutritional quality, yield, and irrigation water use efficiency (IWUE) were systematically analyzed. The CRITIC method was used to quantify appearance and nutritional quality indicators, while the coefficient of variation method assigned weights to appearance quality, nutritional quality, yield, and IWUE. A multi-criteria comprehensive evaluation was conducted using the TOPSIS model. The results showed that high and medium frequency irrigation (D1/D2) and high quota irrigation (W3) could significantly increase the stem diameter, stem length, single plant mass and yield of lettuce. The D2W3 treatment achieved the highest yield of 78.15 t·hm⁻², an increase of 62.9% compared to D3W1. The D3W1 treatment significantly increased soluble sugar content, soluble protein content and vitamin C content, which increased by 50.8%, 7.5% and 18.8%, respectively, compared with D1W3, the nitrate content also significantly increased by 122.8% compared with D1W3, reaching 251.1 mg·kg⁻¹. IWUE of D2W1 was the highest (55.31 kg·m⁻³), 67.8% higher than that of D1W3. The comprehensive evaluation results of TOPSIS showed that D2W3 treatment (6 d drip irrigation frequency+135 m³·hm⁻²·time⁻¹ irrigation quota) had the highest comprehensive similarity degree (C_r=0.784 2), considering high yield, good quality and water saving, so it was recommended as the optimal irrigation system of lettuce under mulched drip irrigation in Hexi Corridor of Gansu province.

Key words: Lettuce; Mulched drip irrigation; Drip irrigation frequency; Irrigation quota; CRITIC-TOPSIS method

收稿日期: 2024-11-09; 修回日期: 2025-03-19

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-24-G-28); 院地合作项目“永昌县高原蔬菜标准化生产技术与示范”; 甘肃省科技特派团专项(22CX8NA034)

作者简介: 张玉鑫, 男, 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, 男, 研究员, 主要从事蔬菜栽培与肥水调控研究。E-mail: wangxw@gsagr.cn

茎用莴苣 (*Lactuca sativa* L. var. *asparagina* Bailey) 又称莴笋, 是菊科莴苣属一年或二年生草本植物, 其肉质茎富含维生素、矿物质及莴苣苦素等成分, 具有抗癌、抗氧化等功效^[1-2], 广泛栽培于我国南北各地^[3-4]。甘肃省河西走廊地区高海拔冷凉气候、昼夜温差大及弱碱性土壤等独特的生态环境有利于莴笋实现优质高产, 近年莴笋已成为该地区高原夏菜主栽品种之一^[5-6]。但该区域水资源短缺问题突出^[7], 农业节水增效成为高质量发展的核心任务^[8], 开展莴笋节水增效技术研究具有重要现实意义。

膜下滴灌是实现节水增效的核心技术手段, 可通过精准控制水肥供给与地膜覆盖协同作用, 显著提高资源利用效率^[9], 已在河西走廊地区莴笋生产中广泛应用^[10]。灌水频率和灌水定额是量化灌溉制度的核心参数^[11], 其制定需综合考虑气候、土壤及作物需水规律^[12]。目前关于莴笋灌溉制度的研究相对较少^[13], 干旱区莴笋灌溉制度的研究多聚焦在传统垄膜沟灌上^[14-15], 针对膜下滴灌模式下滴灌频率-灌水定额耦合效应对莴笋品质、产量及灌溉水利用效率 (IWUE) 影响规律的研究较为薄弱。

关于最优灌溉制度的确定, 现有研究多基于显著性分析或单一目标优化, 评价结果易受试验误差影响^[16]。灌溉制度优化需突破单一目标局限, 构建多目标响应模型。CRITIC 法是一种基于信息熵理论的客观赋权方法, 可量化多维度评价体系中各指标的相对重要性^[17], 该方法在作物品质评价中已成功应用^[18]。TOPSIS 法则是一种基于向量空间距离量的多目标决策方法, 可实现多目标方案的优劣排序^[19]。当前综合评价研究普遍采用方法联用策略, 该方法体系已在芹菜^[20]、番茄^[21]、黄瓜和甜瓜^[22]等作物灌溉制度优化中验证其科学性与普适性。本试验通过设置不同滴灌频率和灌水定额组合, 分析其对莴笋外观品质、营养品质、产量及 IWUE 的影响, 通过 CRITIC 法与 TOPSIS 法联用, 构建莴笋综合效益评价模型, 提出莴笋膜下滴灌最优灌溉制度, 为河西走廊干旱区莴笋节水高产栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于 2019 年 4—7 月在农业农村部西北地区蔬菜科学观测试验站进行。试验站位于甘肃省金昌市永昌县城关镇大坝村, 海拔 1996 m, 属于典型

的温带大陆性干旱气候区, 年平均气温 4.8℃, 年降水量仅为 185.1 mm, 而年蒸发量高达 2 000.6 mm, 无霜期约为 134 d^[6]。试验期间空气温度和降水量如图 1 所示。试验田土壤类型为灌漠土, 基本理化性质如下: 全氮含量 (w , 后同) 为 0.94 g·kg⁻¹、全磷含量为 1.27 g·kg⁻¹、全钾含量为 28.93 g·kg⁻¹、碱解氮含量为 93.70 mg·kg⁻¹、有效磷含量为 56.30 mg·kg⁻¹、速效钾含量为 160.97 mg·kg⁻¹、密度为 1.33 g·cm⁻³、田间持水量为 28.67%。

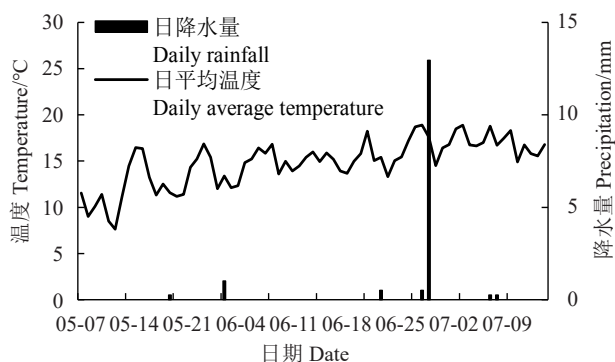


图 1 莴笋生育期内降水量和平均温度的变化

Fig. 1 Diurnal variation of rainfall and average temperature during the growth period of lettuce

1.2 试验设计

试验采用双因素随机区组设计, 设置滴灌频率和灌水定额 2 个因素。基于对以往相关研究成果分析, 以及对当地气候、土壤条件的综合考量, 滴灌频率设置 4 d (D1)、6 d (D2)、8 d (D3) 3 个水平, 这 3 个水平涵盖了相对较高、适中以及较低的滴灌频率, 能够较为全面地反映滴灌频率对莴笋生长及相关指标的影响; 灌水定额设置 75 m³·hm⁻²·次⁻¹ (W1)、105 m³·hm⁻²·次⁻¹ (W2)、135 m³·hm⁻²·次⁻¹ (W3) 3 个水平, 3 个灌水定额水平是根据莴笋的生长需水规律、土壤的保水能力以及当地水资源状况确定的。通过对这 2 个因素不同水平的组合设置, 共 9 个处理; 每个小区面积 81 m², 3 次重复。各处理试验设计与最终灌溉量详见表 1。供试莴笋品种为青美, 青皮尖叶茎用莴笋, 购自四川种都高科种业有限公司。试验采用“一膜两管四行式”平畦滴灌种植模式 (如图 2 所示), 畦宽 140 cm, 畦间距 20 cm; 每畦铺设两根薄壁滴灌带, 内径 16 mm, 滴头间距为 30 cm; 每畦种植 4 行, 单株定植, 行距为 35 cm, 株距为 35 cm。于 4 月 6 日育苗, 5 月 7 日定植, 7 月 14 日采收。定植后各处理均滴灌缓苗水 300 m³·hm⁻², 7 d 后开始试验处理。参照当地农艺实践优化形成的莴笋滴灌施肥方案: 氮、磷、钾肥总

表1 不同灌溉处理试验设计
Table 1 Different irrigation treatment design

处理 Treatment	滴灌频率 Drip irrigation frequency/d	灌水定额/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{次}^{-1}$) Irrigation quota/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{time}^{-1}$)	总灌水量 Total irrigation amount/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
D1W1	4	75	1425
D1W2	4	105	1875
D1W3	4	135	2325
D2W1	6	75	1050
D2W2	6	105	1350
D2W3	6	135	1650
D3W1	8	75	900
D3W2	8	105	1140
D3W3	8	135	1380

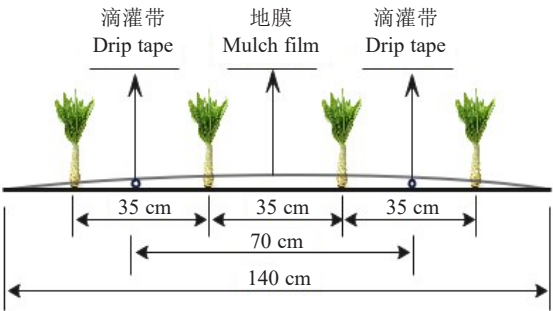


图2 莴笋“一膜、两管、四行”种植模式
Fig. 2 Planting mode of ‘one membrane, two tubes and four rows’ of lettuce

施用量分别为 $\text{N } 310.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 168.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，基肥施肥量占总施肥量的 20%，莲座期施肥量占总施肥量的 20%，根茎膨大期追施 2 次，每次分别占总施肥量的 30%。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 外观品质指标的测定 在莴笋的成熟期，每个小区随机选取 15 株莴笋，用数显游标卡尺测量茎粗，用卷尺测量茎长，用电子天平测量单株质量。

1.3.2 营养品质指标的测定 在莴笋成熟期，每小区随机选取 5 株莴笋，测定莴笋茎的营养品质指标。参考李合生^[23]的方法测定可溶性糖、可溶性蛋白、可溶性固形物和维生素 C 含量；参照 GB 5009.33—2016 测定硝酸盐含量^[24]。

1.3.3 产量的测定 采用田间称量法测定各处理莴笋的产量。

1.3.4 灌溉水利用效率的计算 根据产量和总灌水量计算灌溉水利用效率^[25]： $\text{IWUE} = 100 Y/I_t$ 。(1)

式中： IWUE 为灌溉水利用效率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)， Y 为产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)， I_t 为总灌水量(mm)，100 为单位转换系数。

1.4 外观品质与营养品质综合评价

采用 CRITIC 法对莴笋外观品质与营养品质进行综合评价^[18]。具体步骤如下：

(1)构建原评价矩阵。将参与评价的 9 个处理设为 A ， $A=(A_1, A_2, \dots, A_9)$ ，参与各评价的指标设为 B ，对于外观品质评价指标， $B=(\text{茎粗}, \text{茎长}, \text{单株质量})$ ，对于营养品质评价指标， $B=(\text{可溶性糖含量}, \text{可溶性蛋白含量}, \text{可溶性固形物含量}, \text{维生素 C 含量}, \text{硝酸盐含量})$ ；处理 A_i 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 $X=(X_{ij})_{9 \times 3}$ (外观品质)和 $X=(X_{ij})_{9 \times 5}$ (营养品质)。

(2)原始数据标准化处理。采用式(2)、(3)对原始数据进行标准化处理。

对于正向指标：

$$D_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \times 100 \quad (X_{ij} \leq X_{\max}); \tag{2}$$

对于逆向指标：

$$D_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{\min}} \times 100 \quad (X_{ij} \geq X_{\min})。 \tag{3}$$

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

(3)计算信息承载量。信息量 C_j 采用式(4)计算。

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - R_{ij})。 \tag{4}$$

式中， σ_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。

(4)计算权重。指标权重 W_j 采用式(5)计算。

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}。 \tag{5}$$

(5)计算综合评价值。综合评价值 V_i 采用式(6)计算。

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j D_{ij}。 \tag{6}$$

1.5 综合效益评价

采用 TOPSIS 法对各处理莴笋的外观品质、营养品质、产量、IWUE 的综合效益进行评价^[25]。具体计算方法如下：

(1)构建加权标准化矩阵。将 9 个灌水处理和外观品质、营养品质、产量、IWUE 4 个评价指标构建初始决策矩阵 $X_{ij}=(x_{ij})_{9 \times 4}$ 。4 个评价指标均为正向指标，根据式(7)得到标准化后的加权决策矩阵 $Y_{ij}=(y_{ij})_{9 \times 4}$ ；

$$y_{ij}=W_j\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^9x_{ij}^2}}。$$
 (7)

式中, x_{ij} 为外观品质、营养品质指标经 CRITIC 法计算的综合评价值与产量、IWUE 的原始指标; y_{ij} 为 x_{ij} 经标准化后的值。

(2)计算权重。采用变异系数法对外观品质、营养品质、产量、IWUE 赋予权重。计算公式为:

$$W_j=\frac{CV_j}{\sum_{j=1}^nCV_j};$$
$$CV_j=\frac{\sigma_j}{x_j}。$$
 (8) (9)

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

(3)确定理想解。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^- 。

$$Y^+=\left\{\max_{1\leq i\leq 9}y_{ij}|i=1,2,\dots,9\right\}=\left\{y_1^+,y_2^+,y_3^+,y_4^+\right\};$$
 (10)
$$Y^-=\left\{\min_{1\leq i\leq 9}y_{ij}|i=1,2,\dots,9\right\}=\left\{y_1^-,y_2^-,y_3^-,y_4^-\right\}。$$
 (11)

式中, $y_1^+\sim y_4^+$ 和 $y_1^-\sim y_4^-$ 分别为外观品质、营养品质、产量、IWUE 正理想解和负理想解的向量。

(4)计算距离。根据式(12)、(13)计算各处理到正、负理想解的距离 D_i^+ 、 D_i^- 。

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^4(y_j^+-y_{ij})^2};$$
 (12)
$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^4(y_j^--y_{ij})^2}。$$
 (13)

(5)计算相对接近度。根据距离计算每个处理与最优解的相对接近度 C_i , C_i 值越大表明综合效益越好。

$$C_i=\frac{D_i^-}{D_i^++D_i^-}。$$
 (14)

1.6 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行整理及图表制作,利用 SPSS 23.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理对莴笋外观品质的影响

由表 2 可知,滴灌频率和灌水定额对莴笋的茎粗、茎长、单株质量均有极显著的影响,二者交互作

表 2 滴灌频率和灌水定额对莴笋外观品质影响的方差分析(F 值)

Table 2 Analysis of variance on effects of drip irrigation frequency and irrigation quota on the appearance quality of lettuce (F value)

因素 Factor	茎粗 Stem diameter	茎长 Stem length	单株质量 Single plant mass
D	44.04**	12.27**	47.08**
W	8.91**	18.75**	26.04**
D×W	2.07 ns	0.59 ns	1.67 ns

注:D 表示滴灌频率;W 表示灌水定额;*表示差异显著($p<0.05$),**表示差异极显著($p<0.01$),ns 表示差异不显著。下同。

Note: D represents the drip irrigation frequency. W represents the irrigation quota. * indicates significant difference ($p<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($p<0.01$), and ns indicates no significant difference. The same below.

用并未产生显著影响。由表 3 可知,D1 和 D2 水平间茎粗、茎长和单株质量均无显著差异,但显著大于 D3 水平,D3 水平茎粗、茎长、单株质量较 D1 水平分别显著减小了 9.8%、8.4%、24.7%。茎粗、茎长和单株质量随灌水定额的增加而增大,W1 水平下茎粗、茎长、单株质量较 W2 和 W3 水平分别显著减小了 3.8%和 5.0%、8.5%和 15.2%、14.0%和

表 3 不同灌水处理对莴笋外观品质的影响

Table 3 Effect of different irrigation treatments on the appearance quality of lettuce

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter/cm	茎长 Stem length/cm	单株质量 Single plant mass/kg
D1	4.68±0.17 A	52.29±2.85 A	0.848±0.09 A
D2	4.70±0.19 A	54.68±5.08 A	0.847±0.11 A
D3	4.22±0.13 B	47.92±5.33 B	0.639±0.08 B
W1	4.39±0.19 B	47.33±3.70 C	0.682±0.09 C
W2	4.57±0.26 A	51.76±4.22 B	0.793±0.12 B
W3	4.63±0.33 A	55.80±4.10 A	0.859±0.13 A
D1W1	4.55±0.06 b	49.60±0.95 bc	0.746±0.022 c
D1W2	4.65±0.07 ab	52.17±1.28 bc	0.860±0.019 b
D1W3	4.84±0.09 a	55.10±0.76 ab	0.939±0.021 ab
D2W1	4.46±0.02 bc	49.50±0.25 bc	0.712±0.029 cd
D2W2	4.80±0.06 a	54.93±2.31 ab	0.872±0.025 ab
D2W3	4.82±0.05 a	59.60±1.85 a	0.958±0.008 a
D3W1	4.17±0.06 d	42.90±1.59 d	0.588±0.058 e
D3W2	4.22±0.11 d	48.17±2.28 c	0.647±0.043 de
D3W3	4.26±0.07 cd	52.70±2.48 bc	0.682±0.016 cde

注:同列不同大写字母表示 D 或 W 水平差异显著($p<0.05$),同列不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.01$)。下同。

Note: Different capital letters in the same column indicate significant difference in D or W levels ($p<0.05$), while different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($p<0.01$). The same below.

20.7%。不同组合处理中,D1W3 处理茎粗最大,但与 D1W2、D2W2、D2W3 处理差异不显著;D2W3 处理茎长和单株质量均最大,但均与 D1W3、D2W2 处理差异不显著。说明滴灌频率和灌水定额对莴笋外观品质的影响主要体现为各自的主效应,过低的滴灌频率不利于莴笋茎粗、茎长、单株质量的生长,充足的水分供应能够促进茎的加粗和伸长、增加单株质量。

2.2 莴笋外观品质指标综合评价

茎粗、茎长、单株质量均为正向指标,根据式(2)进行数据标准化(表 4)。对经标准化后的数据进行评价指标间的相关性分析,构建外观品质指标相关

表 4 参评外观品质指标标准化值
Table 4 Standardized value of appearance quality evaluation indexes

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter	茎长 Stem length	单株质量 Single plant mass
D1W1	94.07	83.22	77.89
D1W2	96.07	87.53	89.75
D1W3	100.00	92.45	98.05
D2W1	92.21	83.05	74.31
D2W2	99.31	92.17	91.08
D2W3	99.72	100.00	100.00
D3W1	86.28	71.98	61.38
D3W2	88.08	80.82	67.53
D3W3	87.32	88.42	71.18

表 6 滴灌频率和灌水定额对莴笋营养品质影响的方差分析(F 值)

Table 6 Analysis of variance on effects of drip irrigation frequency and irrigation quota on the nutritional quality of lettuce(F value)

因素 Factor	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	可溶性固形物含量 Soluble solids content	维生素 C 含量 Vitamin C content	硝酸盐含量 Nitrate content
D	141.73**	51.93**	692.26**	97.55**	520.97**
W	60.68**	51.57**	457.63**	6.46**	391.20**
D×W	2.81 ns	8.14**	458.54**	79.76**	70.23**

量随滴灌频率的减小而显著增加,随灌水定额的增大而显著减小;D3 水平可溶性糖含量较 D1 和 D2 分别显著增加了 24.0%和 18.9%,W1 水平可溶性糖含量较 W2 和 W3 分别显著增加了 9.7%和 16.2%;D3W1 处理可溶性糖含量显著大于其他处理,较 D1W3 显著增加了 50.8%。说明延长滴灌间隔时间和减少灌水定额可提高莴笋可溶性糖含量,低频率灌溉和低灌水定额组合有利于莴笋可溶性糖含量的增加。可溶性蛋白含量随着滴灌频率的减小呈先增加后减小的趋势,随灌水定额的增加而显著减小;D2 水平可溶性蛋白含量较 D1 和 D3 分别显著

系数矩阵。根据式(4)、(5)计算得到茎粗、茎长、单株质量的权重分别为 0.223 8、0.432 1、0.344 1。基于各指标权重和标准化矩阵,根据式(6)计算出各处理 C_i ,按 C_i 值对各处理进行排序(表 5),综合外观品质最优的处理为 D2W3。

表 5 CRITIC 法确定的各处理莴笋外观品质得分及排序
Table 5 Lettuce appearance quality index score and its rank based on CRITIC

处理 Treatment	综合得分 Comprehensive scores	排序 Ranking
D1W1	83.82	5
D1W2	90.20	4
D1W3	96.07	2
D2W1	82.10	7
D2W2	93.39	3
D2W3	99.94	1
D3W1	71.53	9
D3W2	77.87	8
D3W3	82.24	6

2.3 不同灌水处理对莴笋营养品质的影响

由表 6 可知,滴灌频率和灌水定额对莴笋的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、维生素 C 含量、硝酸盐含量均有极显著的影响;二者交互作用对可溶性糖含量无显著影响,对可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、维生素 C 含量、硝酸盐含量均有极显著影响。由表 7 可知,可溶性糖含

增加了 4.6%和 2.7%,W1 水平可溶性蛋白含量较 W2 和 W3 分别显著增加了 2.8%和 4.6%,D3W1 和 D2W1 处理含量最高,D3W1 处理较 D1W3 显著增加了 7.5%。说明中频率滴灌和减少灌水定额有利于莴笋可溶性蛋白含量的增加。可溶性固形物含量随滴灌频率的减小而显著增加,D3 水平可溶性固形物含量较 D1 和 D2 分别显著增加了 22.0%和 7.3%;W2 和 W3 水平间可溶性固形物含量无显著差异,但均显著小于 W1。D2W1 处理可溶性固形物含量显著高于其他处理,说明延长滴灌间隔时间和减少灌水定额可提高莴笋可溶性固形物含量,

中频率灌溉和低灌水定额组合有利于可溶性固形物含量的增加。D2 和 D3 水平维生素 C 含量均显著高于 D1,分别较 D1 显著增加了 17.5%和 17.6%;维生素 C 含量随灌水定额的增加呈先增加后降低的趋势,W2 水平维生素 C 含量较 W1 和 W3 分别增加了 4.8%和 2.3%;D2W3、D3W1、D3W2 处理维生素 C 含量显著高于其他处理,D3W1 处理较 D1W3 和 D3W3 分别显著增加了 18.8%和 32.6%。说明中频率滴灌下充分灌溉可提高维生素 C 含量,低频率灌溉下减少灌水定额能够增加维生素 C

表 7 不同灌水处理对莴笋营养品质的影响
Table 7 Effects of different irrigation treatments on the nutritional quality of lettuce

处理 Treatment	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·g ⁻¹)	w(硝酸盐) Nitrate content/ (mg·kg ⁻¹)
D1	8.12±0.755 C	0.259±0.006 C	3.50±0.308 C	0.239±0.024 B	145.3±42.619 C
D2	8.47±0.424 B	0.271±0.003 A	3.98±0.723 B	0.281±0.022 A	187.9±46.088 B
D3	10.07±0.735 A	0.264±0.009 B	4.27±0.249 A	0.281±0.037 A	230.5±17.299 A
W1	9.62±1.028 A	0.271±0.004 A	4.28±0.495 A	0.261±0.044 B	225.1±21.857 A
W2	8.77±0.796 B	0.263±0.006 B	3.73±0.389 B	0.273±0.024 A	187.4±49.807 B
W3	8.28±0.933 C	0.259±0.008 C	3.73±0.632 B	0.267±0.033 AB	151.2±47.946 C
D1W1	8.94±0.188 c	0.266±0.001 bc	3.90±0.012 e	0.211±0.009 e	201.6±2.042 d
D1W2	8.16±0.159 d	0.256±0.002 d	3.36±0.012 g	0.247±0.006 c	121.6±2.003 ef
D1W3	7.27±0.021 e	0.254±0.001 d	3.23±0.015 h	0.260±0.001 b	112.7±4.071 f
D2W1	8.96±0.047 c	0.273±0.002 a	4.93±0.047 a	0.262±0.003 b	222.5±2.904 bc
D2W2	8.36±0.144 d	0.270±0.001 ab	3.60±0.012 f	0.272±0.003 b	214.3±3.315 c
D2W3	8.10±0.150 d	0.269±0.003 ab	3.40±0.012 g	0.308±0.002 a	126.9±2.631 e
D3W1	10.96±0.156 a	0.273±0.001 a	4.00±0.023 d	0.309±0.003 a	251.1±2.463 a
D3W2	9.79±0.070 b	0.264±0.001 c	4.23±0.015 c	0.301±0.003 a	226.3±3.012 b
D3W3	9.46±0.264 b	0.254±0.001 d	4.57±0.046 b	0.233±0.004 d	214.1±5.279 c

含量。硝酸盐含量对滴灌频率和灌水定额的响应与可溶性糖含量一致,D3 水平硝酸盐含量较 D1 和 D2 分别显著增加了 58.7%和 22.7%,W1 水平硝酸盐含量较 W2 和 W3 分别显著增加了 20.1%和 48.8%;D3W1 处理硝酸盐含量显著高于其他处理,较 D1W3 处理显著增加了 122.8%。

2.4 莴笋营养品质指标综合评价

根据公式(2)、(3)对营养品质指标原始数据进行标准化处理,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、维生素 C 含量为正向指标,硝酸盐含量为逆向指标,数据标准化后的结果见表 8。对经标准化后的数据进行相关性分析,得到营养品质指标相关系数矩阵。根据式(4)、(5)计算得到可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、维生素 C 含量、硝酸盐含量的权重分别为 0.132 4、0.036 9、0.179 8、0.143 0、0.507 8。基于各指标权重和标准化矩阵,根据式(6)计算得到各处理营养品质综合评价值(表 9);综合品质最优的为 D1W3 处理,综合得分为 86.78;D2W3 处理次之,综合得分为 85.16。

表 8 参评营养品质指标标准化值
Table 8 Standardized value of nutritional quality indexes

处理 Treatment	可溶性 糖含量 Soluble sugar content	可溶性 蛋白含量 Soluble protein content	可溶性固 形物含量 Soluble solids content	维生素 C 含量 Vitamin C content	硝酸盐 含量 Nitrate content
D1W1	81.57	97.33	79.05	68.13	55.90
D1W2	74.45	93.67	68.11	79.75	92.68
D1W3	66.33	92.94	65.47	83.95	100.00
D2W1	81.75	99.89	100.00	84.69	50.64
D2W2	76.28	98.79	72.97	87.92	52.60
D2W3	73.91	98.43	68.92	99.68	88.79
D3W1	100.00	100.00	81.15	100.00	44.88
D3W2	89.35	96.60	85.74	97.19	49.79
D3W3	86.31	92.83	92.57	75.33	52.64

2.5 不同灌水处理对莴笋产量及灌溉水利用效率的影响

由表 10 可知,滴灌频率和灌水定额对莴笋产量和 IWUE 均有极显著的影响,但二者交互作用并未产生显著影响。由表 11 可知,D1 和 D2 水平间产量无显著差异,但均显著高于 D3,D1 和 D2 产量

较 D3 分别显著增加了 32.8%和 32.6%;产量随灌水定额的增加而显著增高,W3 水平产量较 W1 和 W2 分别显著增加了 26.1%和 8.4%;由图 3 可知,D2W3 处理产量最高(78.15 t·hm⁻²),较 D3W1 显著增产 62.9%,但与 D1W3、D2W2 处理无显著差异,表明过低的滴灌频率不利于莴笋产量的增加,水分亏缺会抑制莴笋产量的提高,中高滴灌频率加适当的高灌水定额有利于提高莴笋的产量。由表 11 可知,IWUE 随着滴灌频率的减小呈先增加后降低的趋势,随灌水定额的增加而显著降低;D2 水平 IWUE 较 D1 和 D3 水平分别显著增高了 37.4%和 11.1%,W1 水平 IWUE 较 W2 和 W3 分别显著提高了 10.9%和

25.4%;由图 4 可知,D2W1 处理 IWUE 最大(55.31 kg·m⁻³),较 D1W3 提高了 67.8%,与 D2W2、D3W1 处理无显著差异,说明高频和低频灌溉均不利于 IWUE 的提高,减少灌水定额可提高 IWUE。

表 9 CRITIC 法确定的各处理莴笋营养品质得分及排序
Table 9 Lettuce nutrition quality index score and its rank based on CRITIC

处理 Treatment	综合得分 Comprehensive scores	排序 Ranking
D1W1	66.74	8
D1W2	84.04	3
D1W3	86.78	1
D2W1	70.33	4
D2W2	66.16	9
D2W3	85.16	2
D3W1	68.62	7
D3W2	70.00	5
D3W3	69.01	6

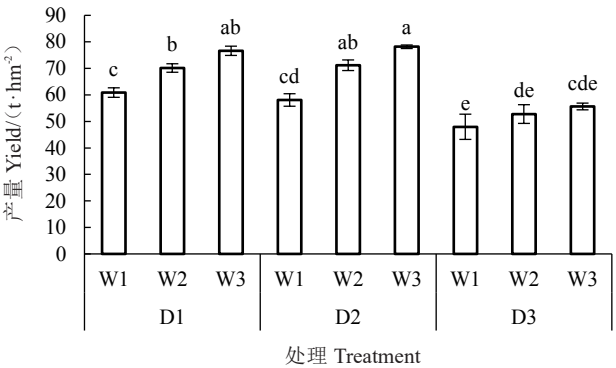
表 10 滴灌频率和灌水定额对莴笋产量和 IWUE 影响的方差分析(F 值)

Table 10 Analysis of variance on effects of drip irrigation frequency and irrigation quota on yield and IWUE of lettuce (F value)

因素 Factor	产量 Yield	IWUE
D	47.11**	28.23 **
W	26.06 **	14.51 **
D×W	1.67 ns	0.37 ns

表 11 滴灌频率和灌水定额对莴笋产量和 IWUE 的影响
Table 11 Effects of drip irrigation frequency and irrigation quota on yield and IWUE of lettuce

处理 Treatment	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	IWUE/(kg·m ⁻³)
D1	69.21±7.32 A	37.70±4.48 C
D2	69.13±9.24 A	51.80±4.23 A
D3	52.12±6.23 B	46.63±7.78 B
W1	55.64±7.63 C	50.44±7.76 A
W2	64.69±9.72 B	45.47±7.33 B
W3	70.13±11.08 A	40.21±6.33 C



注:不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($p<0.05$). The same below.

图 3 不同灌水处理对莴笋产量的影响
Fig. 3 Effect of different irrigation treatments on lettuce yield

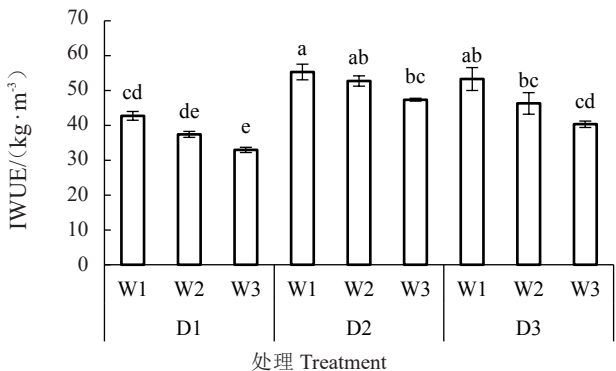


图 4 不同灌水处理对莴笋灌溉水利用效率的影响
Fig. 4 Effects of different irrigation treatments on IWUE

2.6 综合效益评价

以 CRITIC 法对莴笋外观品质和营养品质综合评价时得到的综合得分作为量化的外观品质和营养品质指标,结合产量与 IWUE,对 9 个灌水处理进行综合效益评价,从而选出最优的灌水处理。根据式(8)、(9)计算得到外观品质、营养品质、产量、IWUE 的权重(表 12),权重顺序为产量>IWUE>营养品质>外观品质。利用式(7)得到标准化后的加权决策矩阵(表 13),由式(10)、(11)确定正、负理想解 Y^+ 、 Y^- 。根据式(12)、(13)、(14)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 9 个处理的综合效益进行排序(表 14),D2W3 处理相对贴近度 C_i 最大,综合效益评价最高。

表 12 外观品质、营养品质、产量、IWUE 的权重
Table 12 Weight of appearance quality, nutrition quality, yield and IWUE

参数 Parameter	外观品质 Appearance quality	营养品质 Nutrition quality	产量 Yield	IWUE	总和 Sum
标准差 <i>SD</i>	9.249	8.626	10.925	7.685	
平均值 <i>AVG</i>	86.271	74.055	63.538	45.407	
变异系数 <i>CV</i>	0.107	0.116	0.172	0.169	0.565
权重 <i>Weight</i>	0.190	0.206	0.304	0.300	1.000

表 13 各指标标准化后的加权矩阵
Table 13 Weighted matrix of the normalized evaluation indicators

处理 Treatment	外观品质 Appearance quality	营养品质 Nutrition quality	产量 Yield	IWUE
D1W1	0.061 0	0.061 3	0.096 1	0.093 2
D1W2	0.065 6	0.077 2	0.110 7	0.081 6
D1W3	0.069 9	0.079 7	0.120 9	0.071 9
D2W1	0.059 7	0.064 6	0.091 7	0.120 6
D2W2	0.067 9	0.060 8	0.112 3	0.115 0
D2W3	0.072 7	0.078 2	0.123 3	0.103 3
D3W1	0.052 0	0.063 1	0.075 7	0.116 2
D3W2	0.056 6	0.064 3	0.083 3	0.101 0
D3W3	0.059 8	0.063 4	0.087 8	0.087 9
<i>Y</i> ⁺	0.072 7	0.079 7	0.123 3	0.120 6
<i>Y</i> ⁻	0.052 0	0.060 8	0.075 7	0.071 9

表 14 各处理的排序指标值
Table 14 Index value for sorting different irrigation treatments

处理 Treatment	<i>D</i> ⁺	<i>D</i> ⁻	<i>C_i</i>	排序 Ranking
D1W1	0.044 4	0.030 8	0.409 5	7
D1W2	0.041 7	0.042 1	0.502 3	5
D1W3	0.048 9	0.052 2	0.516 3	4
D2W1	0.037 4	0.052 0	0.581 5	3
D2W2	0.023 1	0.058 8	0.717 7	2
D2W3	0.017 4	0.063 2	0.784 2	1
D3W1	0.054 7	0.044 4	0.448 0	6

3 讨论与结论

合理的灌水频率和灌水定额可显著减少灌溉水径流损失,同时可有效调节土壤环境因子,促进作物生长,改善果实品质,增加产量^[26-28]。本研究发现,高中频次灌溉(D1、D2)配合较高灌水定额(W3)可显著促进莴笋茎粗和茎长的增长,提高单株质量,这与马铃薯^[29]、南瓜^[30]、番茄^[31]等作物的水分响应规律一致。低频率滴灌(D3)不利于莴笋茎粗、茎

长以及单株质量的生长,可能因灌溉间隔过长引发水分亏缺,抑制了细胞分裂与伸长,从而影响了莴笋的整体生长发育。滴灌频率与灌水定额对外观品质的影响以主效应为主,交互作用未达显著水平,可能是因为莴笋对滴灌频率和灌水定额的响应在一定程度上具有独立性,当其中一个因素发生变化时,莴笋能够通过自身的调节机制在一定范围内适应这种变化。但在实际生产中,仍需关注二者组合对土壤水分分布和利用的协同影响。经 CRITIC 法综合评价,D2W3 处理(滴灌频率 6 d、灌水定额 135 m³·hm⁻²·次⁻¹)外观品质得分最高。

滴灌制度对莴笋营养品质的影响呈指标特异性。可溶性糖含量随滴灌频率降低与灌水定额减少显著增加,可能是由于适度水分胁迫可激活光合产物向糖类转化的代谢通路,而过度供水则可能抑制该过程^[32]。可溶性蛋白含量随着滴灌频率的减小表现为“先升后降”趋势,随灌水定额的增加而显著减小,在中等滴灌频率(D2)与低灌水定额(W1)组合下最高,反映出适度水分胁迫可诱导防御蛋白合成,但极端缺水会限制生理活动^[33]。延长滴灌间隔并减少灌水量可提升莴笋可溶性固形物含量,可能因低频灌溉诱导根系对水分和养分的吸收更加集中,从而提高了可溶性固形物含量,而过度灌水则通过稀释效应降低其积累^[15]。维生素 C 含量对水分的响应呈阈值效应,适度增加灌溉量可提升莴笋维生素 C 含量,但过量灌水反致其下降。前者可能是因为适量的水分供应可激活代谢活动,促进维生素 C 合成,后者会因过多水分导致土壤缺氧,抑制根系呼吸,进而阻碍维生素 C 的合成。硝酸盐积累与水分供应呈负相关,低频率低定额灌溉组合下(D3W1)莴笋硝酸盐含量最高,可能是因为水分胁迫抑制硝酸盐同化代谢,适度增加灌溉频率和灌水定额可通过促进莴笋对硝酸盐的吸收和代谢进而减少其积累^[15]。交互作用分析表明,滴灌频率与灌水定额组合通过调控根区水分动态,显著影响可溶性蛋白、可溶性固形物、维生素 C 及硝酸盐含量。基于 CRITIC 法评价,D1W3 处理(滴灌频率 4 d、灌水定额 135 m³·hm⁻²·次⁻¹)营养品质综合得分最高。

产量与 IWUE 对水分管理的响应具有显著权衡关系。D1、D2 产量分别较 D3 显著增加了 32.8% 和 32.6%,灌水定额提升至 W3 时产量达峰值,印证了充分灌溉对干旱区作物增产的关键作用^[34]。IWUE 随着滴灌频率的减小呈现“先升后降”、随灌水定额的增加而显著降低的趋势,D2 水平 IWUE

较 D1 和 D3 分别提高 37.4% 和 11.1%, 而 W1 水平 IWUE 最高, 表明适度减少灌水量可通过降低渗漏与蒸发损失提升水分利用效率。这一结果显示, 高频灌溉虽利于增产, 但可能导致水分浪费; 低频灌溉虽节水却抑制产量, 需通过参数优化实现协同增效。

不同指标对滴灌频率和灌水定额的响应存在一定的差异, 仅凭单一指标难以准确地做出评价^[27]。本研究采用 CRITIC 法对莴笋外观品质和营养品质指标进行量化, 利用变异系数法对外观品质、营养品质、产量、IWUE 四个指标赋权, 运用 TOPSIS 法对各处理莴笋的综合效益进行评价。这种多方法耦合的评价模式既克服了单一评价体系的局限性, 又充分整合了各方法的优势特性, 确保了评价结果的科学性、客观性与准确性。结果显示, D2W3 处理 C_i 值最高 (0.784 2), 即以 6 d 滴灌频率配合 $135 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{次}^{-1}$ 灌水定额, 可在品质、产量与 IWUE 间实现最优平衡, 可作为河西走廊莴笋膜下滴灌的推荐灌溉制度, 为区域节水高产栽培提供技术依据。

参考文献

- [1] NIE C Z P, ZHU P L, MA S P, et al. Purification, characterization and immunomodulatory activity of polysaccharides from stem lettuce[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 188: 236-242.
- [2] DU P, WU Q L, LIU Y H, et al. WRKY transcription factor family in lettuce plant (*Lactuca sativa*): Genome-wide characterization, chromosome location, phylogeny structures, and expression patterns[J]. PeerJ, 2022, 10: e14136.
- [3] 田雪珂, 王启璋, 田洁, 等. 不同种植方式和密度对茎用莴苣生长及产量的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(17): 5874-5883.
- [4] 杜萍, 吴庆莲, 伊文一, 等. 茎用莴苣 2 个 WRKYIII 亚族转录因子基因的克隆与表达[J]. 西北植物学报, 2022, 42(10): 1644-1653.
- [5] 马彦霞, 王晓巍, 张俊峰, 等. 茎用莴苣品种适应性及适宜密度和栽培方式研究[J]. 北方园艺, 2016(13): 36-39.
- [6] 蒯佳琳, 马彦霞, 侯栋, 等. 稳定性肥料配施微生物菌剂对莴笋生长及品质的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 24-30.
- [7] 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.
- [8] 李振涛. 河西走廊干旱区农业用水效益影响因素分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [9] 张小静, 唐彩梅, 袁安明, 等. 灌水量对膜下滴灌马铃薯生长、产量及水分利用的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(10): 93-100.
- [10] 蒯佳琳, 侯栋, 张玉鑫, 等. 高山高原蔬菜十大主推技术(十) 高原喜冷凉蔬菜膜下滴灌生产技术[J]. 中国蔬菜, 2022(12): 109-112.
- [11] 向凌潇, 张俊威, 李建明. 灌溉量与灌溉频率对番茄根系生长、产量和营养元素吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 80-92.
- [12] 李菊, 张富仓, 王艳丽, 等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8-20.
- [13] 黄艳, 金秋, 陈竞楠, 等. 节水灌溉对块根作物和土壤微生物影响的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(4): 115-119.
- [14] 王志伟, 张玉鑫, 王晓巍, 等. 隔沟交替灌溉在高原夏菜莴笋上的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(8): 77-79.
- [15] 周德霞, 张国斌, 杨伟, 等. 水肥耦合对高原莴笋生长、养分吸收和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(25): 194-200.
- [16] 蒋正文, 岳宏伟, 陈娇, 等. 基于隶属函数法的宁夏滴灌玉米灌溉制度研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(7): 190-196.
- [17] 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.
- [18] 吴宜毅, 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.
- [19] ZAVADSKAS E K, ZAKAREVICIUS A, ANTUCHEVICIENE J. Evaluation of ranking accuracy in multi-criteria decisions[J]. Informatica, 2006, 17(4): 601-618.
- [20] 郭勇, 马娟娟, 郑利剑, 等. 滴灌水分调控对设施芹菜生长与水分利用的影响[J]. 节水灌溉, 2022(9): 9-16.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [24] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定: GB 5009.33—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [25] 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.
- [26] 侯建安, 南雄雄, 康超, 等. 滴灌频率和定额对枸杞园土壤水分分布及产量的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(2): 58-66.
- [27] 王英, 张富仓, 王海东, 等. 滴灌频率和灌水量对榆林沙土马铃薯产量、品质和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4159-4168.
- [28] 郭鹏飞, 张筱茜, 韩文, 等. 滴灌频率和施氮量对温室西葫芦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 109-114.
- [29] 侯翔皓, 张富仓, 胡文慧, 等. 灌水频率和施肥量对滴灌马铃薯生长、产量和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 85-96.
- [30] 杨晓婷, 张恒嘉, 张明, 等. 灌水频率与灌水量对南瓜耗水特征与水生产力的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(4): 192-198.
- [31] 祁娟霞, 刘馨, 赵小兵, 等. 不同灌水量和灌水频率对番茄植株生长、光合与荧光特性的影响[J]. 节水灌溉, 2017(4): 50-56.
- [32] 周海霞, 兰挚谦, 张凯歌, 等. 不同灌水量及频率对番茄品质及糖分累积影响的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 86-93.
- [33] 樊安静, 杨鑫, 何虎翼, 等. 水氮耦合对旱藕产量、生理特性和土壤理化性状的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1069-1078.
- [34] 黄兴法, 张洲笔, 黄泽军. 西北地区玉米膜下滴灌技术参数优化: 灌水频率及滴灌带间距[J]. 农业工程, 2019, 9(8): 72-78.