

基于 CRITIC-TOPSIS 综合评价法优化温室作物灌溉策略

王宏飞, 李彦彬*, 柳腾飞, 丁家乐, 龚雪文*

(华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046)

摘要:【目的】探讨基于蒸发皿水面蒸发量(E_p)的温室黄瓜和甜瓜最优灌溉策略。【方法】以直径 20 cm 标准蒸发皿的累计水面蒸发量为灌水依据, 开展温室滴灌黄瓜和甜瓜灌溉试验, 每种作物设置 4 种灌水量: $0.5E_p$ 、 $0.7E_p$ 、 $0.9E_p$ 和 $1.1E_p$ 。系统研究了不同灌水量对果实形态指标、品质指标、产量和水分利用效率(WUE)等指标的影响, 并基于 CRITIC-TOPSIS 综合评价方法确定了 2 种作物的灌溉策略。【结果】果实形态方面, 温室黄瓜灌水量为 $0.7E_p$ 和 $0.9E_p$ 时各项形态指标显著优于其他处理, 且 $0.7E_p$ 的单果质量和平均果径略高于 $0.9E_p$, 但单株果数和平均果长相反; 灌水量为 $0.9E_p$ 时对温室甜瓜各项形态指标比较有利。果实品质方面, 温室黄瓜可溶性固形物(TSS)、维生素 C(V_c)、可溶性糖(SSC)和可溶性蛋白质(SPC)均随着灌水量的增加而降低, 而甜瓜的最大 V_c 、SSC 和 SPC 均为 $0.7E_p$ 处理, 最大 TSS 出现在 $0.5E_p$ 处理。温室黄瓜最大产量为 96.1 t/hm^2 ($0.9E_p$), 但 WUE 和灌溉水利用效率(IWUE)较最大值($0.5E_p$)降低了 17.9%和 32.2%; 温室甜瓜灌水量为 $0.9E_p$ 和 $1.1E_p$ 时, 产量无显著性差异, 但 $0.9E_p$ 的 WUE 和 IWUE 较 $1.1E_p$ 显著高 9.2%和 16.3%。【结论】利用 CRITIC-TOPSIS 综合评价法确定了黄瓜和甜瓜灌溉策略, 黄瓜灌水量为 $0.9E_p$, 甜瓜灌水量为 $0.7E_p$ 时, 可实现果实形态、产量、品质和水分利用效率的最优化。

关键词: CRITIC-TOPSIS 综合评价法; 果实形态; 产量; 品质; 水分利用效率

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022600

OSID:



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 Hongfei, LI Yanbin, LIU Tengfei, et al. Optimizing Irrigation Scheduling for Greenhouse Crops Using the CRITIC-TOPSIS Framework[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 52-59.

0 引言

【研究意义】在严守耕地保护红线和水资源节约利用背景下, 设施农业在农业生产中的地位和作用日益突出, 发展设施农业, 提高设施蔬菜产量、品质和水分生产力是高效利用耕地资源和水资源的有效途径^[1]。灌溉是温室作物的唯一水源, 也是影响作物生长、产量和品质的重要因素, 因此, 优化温室作物灌溉策略是促进设施农业可持续发展的首要任务。

【研究进展】针对温室作物最优灌溉制度下的灌水量如何确定, 国内外学者进行了大量工作, 主要集中在作物产量、品质和水分利用效率对水分调控的响应方面, 如李毅杰等^[2]通过研究不同土壤水分下限对温室甜瓜产量和品质的影响, 认为甜瓜适宜土壤水分下限为 65%田间持水率(θ_f); 毋海梅等^[3]研究了不同

水分亏缺对温室黄瓜产量和品质的影响, 认为黄瓜适宜灌水量分别为累计水面蒸发量的 0.8 倍(发育期)和 1.2 倍(生长中/后期)。袁宁宁等^[4]认为温室番茄在开花坐果期之后采用 70% θ_f 可实现产量和水分利用效率的最大化; Yang 等^[5]发现温室辣椒灌水量为 70% θ_f , 温室番茄灌水量为 89.5%和 77.0%蒸发蒸腾量可获得最大产量和水分利用效率。郭勇等^[6]综合考虑温室芹菜的外叶生长期、立心期和心叶生长期以及产量等指标, 认为灌水量为 70% θ_f ~90% θ_f 最优; 李银坤等^[7]综合考虑地上部生物量、产量和水分利用效率, 认为温室生菜适宜灌溉量为 0.7 倍累计水面蒸发量; Hooshmand 等^[8]综合考虑单果质量、收获指数等果实形态指标以及番茄产量, 认为分根区交替灌溉采用灌水量为 85.0%蒸发蒸腾量可达到最佳效果。优化灌溉制度不仅要关注产量或品质等单一目标, 更多地要综合考虑产量、品质、果实形态和水分利用效率等多目标的优化, 这就需要建立多目标评价模型。如朱艳等^[9]利用主成分分析法将具有相关性的产量和品质指标组合成一组新的互相无关的综合指标, 确定了温室番茄基于产量和品质下的最优加气量; 刘聪等^[10]基于主成分分析法对日光温室椰糠栽培番茄产量、水分利用效率和品质等 11 个指标进行了分析, 认为单株产

收稿日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179015); 河南省重点研发与推广专项(192102110090)

作者简介: 王宏飞(1992-), 男。硕士研究生, 主要从事农业水资源高效利用方面的研究。E-mail: 718729456@qq.com

通信作者: 李彦彬(1973-), 男。教授, 博士生导师, 主要从事农业水资源高效利用方面的研究。E-mail: liyb101@sina.com

龚雪文(1987-), 男。讲师, 硕士生导师, 主要从事作物水分生理与高效利用方面的研究。E-mail: gxw068@126.com

量和果形指数的累积贡献率最大, 以此确定了不同处理主成分综合得分; 此外, 基于 TOPSIS 的组合评价模型在温室灌溉策略中的评价也逐渐得到应用, 如 Li 等^[11]利用主成分分析法确定了温室番茄在不同水肥条件下的主要品质指标, 并结合 TOPSIS 法获得了温室滴灌番茄最优水肥组合; 李红峥等^[12]采用变异系数法对不同沟灌方式和灌水量下的温室番茄品质、产量、灌溉水利用效率赋权, 结合 TOPSIS 法对各处理的综合效益进行了评价; 李波等^[13]采用熵权法对不同深埋秸秆量和滴灌量下的温室番茄品质、产量和灌溉水利用效率赋权, 结合 TOPSIS 法确定了温室不同灌水量下的最佳秸秆埋设深度。【切入点】这些评价方法已在温室灌溉策略评价中得到了较好的效果, 但通过评价单一或少量因子获得最优灌溉制度仍存在一定缺陷, 随着人们对外观品质的追求, 果实形态-产量-品质-水分利用效率等多目标的优化越显重要, 这就需要综合评价多个指标因子组合优化灌溉制度, CRITIC 赋权法可以对不同指标间的差异性和关联性分析, 得到各项指标的信息量和权重, 能够克服主观赋权法和熵权法的缺陷, 所得权重更加客观可靠。目前基于 CRITIC 赋权法和 TOPSIS 法组合的综合评价方法在温室灌溉策略中的评价还鲜见报道。

【拟解决的关键问题】因此, 本文选择温室黄瓜和甜瓜为研究对象, 参考水面蒸发累计蒸发量为灌水依据, 通过系统研究果实形态指标、产量指标、品质指标和水分利用效率等多指标因子, 采用 CRITIC-TOPSIS 综合评价法获得温室滴灌黄瓜和甜瓜最优灌溉策略, 旨在为优化温室作物灌溉制度提供一种新的评价方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2021 年 3—6 月在华北水利水电大学农业高效用水试验场的塑料大棚中进行 (34°47'N, 113°47'E), 该地区属暖温带大陆性季风气候区, 年平均日照时间 2 366 h, 年平均气温 14.5 °C, 无霜期为 220 d, 年均降水量 616 mm。试验所用温室占地面积 240 m², 在温室顶部和底部设置通风口, 人工控制温室内部环境变化。在温室顶部铺设 2.5 cm 厚保温棉被, 保证作物生长初期的生长温度。温室内部 3—6 月的环境变化如图 1 所示, 温度 (T_a) 在 9.1~32.4 °C 之间变化, 平均值为 22.7 °C, 相对湿度 (RH) 在 20.3%~83.5% 之间变化, 平均值为 51.7%, 太阳辐射 (R_s) 在 11.0~187.3 W/m² 之间变化, 平均值为 110.7 W/m², 水汽压差 (VPD) 在 0.3~3.4 kPa 之间变化, 平均值为 1.7 kPa。试验区土壤为黏壤土, 0~20 cm 土层有机

质量为 22.4 g/kg, 全氮量、全磷量和全钾量分别为 1.2、0.8 g/kg 和 28.4 g/kg。0~100 cm 土层平均体积质量为 1.42 g/cm³, 田间持水率为 0.35 cm³/cm³。

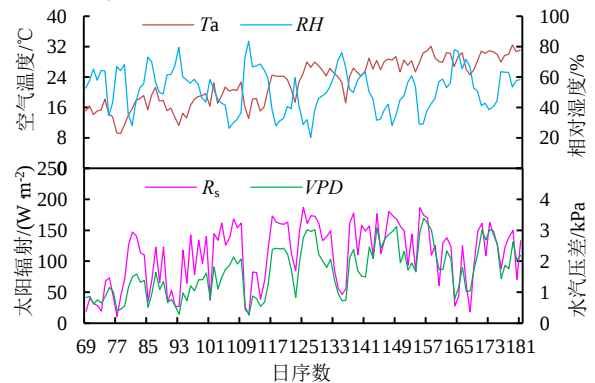


图1 试验期间温室内部环境变化

Fig.1 Variations of meteorological factors in greenhouse during the experiment study

1.2 试验设计

试验研究对象分别为黄瓜 (夏秋 1 号) 和甜瓜 (红蜜 17), 选用 3 叶 1 心的幼苗进行移栽, 黄瓜和甜瓜的移栽时间分别为 3 月 25 日和 4 月 12 日, 黄瓜于 5 月 17 日开始采摘, 于 6 月 22 日采摘结束, 甜瓜于 6 月 18 日开始采摘, 于 6 月 25 日采摘结束。黄瓜和甜瓜均采用宽窄行种植模式, 宽行为 70 cm, 窄行为 40 cm, 株距为 30 cm, 每个试验处理的种植面积为 21.45 m² (3×6.5 m×1.1 m)。移栽前, 以 85 kg/hm² 尿素 (46% N)、130 kg/hm² 硫酸钾 (50% K₂O) 和 95 kg/hm² 过磷酸钾 (14% P₂O₅) 作为基肥。采用滴灌方式灌水, 在水源首部依次安装压差式施肥罐、叠片式过滤器、压力表和控制闸阀, 在每个小区管道上安装精度为 0.001 m³ 的旋转式水表, 沿每个小区作物行带铺设滴灌带, 选用耐特菲姆压力补偿式滴灌带, 滴头间距为 30 cm, 滴头额定流量为 1.1 L/h, 滴头工作压力为 0.1 MPa。进入坐果期之后, 每次追施量为 16 kg/hm² 尿素和 24 kg/hm² 硫酸钾, 全生育期黄瓜和甜瓜分别施肥 5 次和 3 次。

黄瓜和甜瓜的灌水时间和灌水量参考 20 cm 标准蒸发皿的累计蒸发量 (E_p) 进行, 蒸发皿放置在作物冠层上方 20 cm 位置, 随着作物高度调整, 每日早上 07:00 采用雨量筒测量前 1 天的水面蒸发量, 测量完毕后, 清理蒸发皿内部, 添加自来水至 20 mm 深度。当累计水面蒸发量达到 18 mm 以上且不超过 22 mm 时进行灌水, 设置蒸发皿系数分别为 0.5、0.7、0.9 和 1.1, 黄瓜灌水处理分别为: T1 (0.5 E_p)、T2 (0.7 E_p)、T3 (0.9 E_p) 和 T4 (1.1 E_p), 甜瓜灌水处理分别为: K1 (0.5 E_p)、K2 (0.7 E_p)、K3 (0.9 E_p) 和 K4 (1.1 E_p), 全生育期黄瓜和甜瓜累计水面蒸发量分别为 209.5 mm 和 167.4 mm, 灌水次数分别为 10 次和 8 次。为

防止水分侧渗,各小区之间埋设 60 cm 深塑料薄膜,每个处理 3 次重复。为确保幼苗成活率,移栽后黄瓜和甜瓜均灌水 25 mm 用于缓苗。试验小区采用相同农艺管理措施。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 气象指标

温室中部安装有自动气象站,可测量太阳辐射、空气温度和相对湿度,传感器安装在距地表以上 2 m 高位置,气象数据每隔 5 s 采集 1 次,15 min 计算 1 次平均值存储在 CR1000 数据采集器中 (Campbell Scientific Inc., USA)。试验期间,温室内部的环境变化如图 1 所示。

1.3.2 果实形态指标

黄瓜形态指标包括单果质量、单株果数、平均果长和平均直径,甜瓜形态指标包括单果质量、果实横径、果实纵径和果型指数。测量方法如下:在每个小区中部选取 20 棵代表植株,采用精度为 5 g 的电子秤测量每棵植株的果实质量,单果质量为总质量除以总个数;黄瓜单株果数为代表植株全部采摘次数的平均值;采用直尺测量黄瓜果长、纵径和横径,取平均值;甜瓜果型指数为果实横径/果实纵径,果型指数越接近于 1,说明果型越好。

1.3.3 品质指标

品质指标包括总可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS)、维生素 C (Vitamin C, V_c)、可溶性糖 (Soluble Sugar Content, SSC) 和可溶性蛋白质 (Soluble Protein Content, SPC)。对于黄瓜试验,每个处理选取 9 根形态和色泽相近果实进行测量,第 3、第 5、第 7 次采摘时进行品质测量,取平均值作为黄瓜最终品质。对于甜瓜试验,只测量最后 1 次采摘的果实品质,每个处理取 3 个形态和色泽相近的果实进行测量。TSS 采用手持测糖仪测定, V_c 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定, SSC 采用蒽酮比色法进行测定, SPC 采用紫外可见分光光度计法进行测定。

1.3.4 土壤含水率和耗水量

采用取土烘干法测量 0~80 cm 范围内的土壤含水率,于每次灌水前用土钻每隔 20 cm 为 1 层进行取样,样品放在铝盒内立刻称湿质量,样品全部取完后放置于烘箱 105 °C 烘干。取样点选择滴灌带 2 个滴头中间位置,每个小区 3 次重复。此外,在播种前和全部采摘后对每个小区含水率进行测量。

采用水量平衡法计算每个小区的耗水量,计算式为:

$$ET=I_r+P_r+U-D+\Delta W, \quad (1)$$

式中: ET 为耗水量 (mm); I_r 为灌水量 (mm); P_r 为降雨量 (mm); U 和 D 分别为地下水补给量和深层渗漏量 (mm); ΔW 为播种前和播种后土壤储水量

的变化 (mm)。温室中没有降雨量,因此 $P_r=0$; 试验点地下水位在 5.0 m 以下,因此 $U=0$; 试验最大灌溉定额为 22 mm,不会发生深层渗漏,故 $D=0$ 。

1.3.5 产量和水分利用效率

黄瓜和甜瓜产量测定方法与果实形态指标的测定方法相同,在形态指标测量结束后进行产量测定。黄瓜采摘标准为瓜长在 35~40 cm 之间,在每个小区中间位置选取 20 棵代表性植株进行测产,采用精度为 5 g 电子秤测量每个小区的产量,每个小区 3 次重复。

黄瓜和甜瓜的水分利用效率和灌溉水利用效率分别采用式 (2) 和式 (3) 进行计算:

$$WUE=Y_a/ET \times 100, \quad (2)$$

$$IWUE=Y_a/I_r \times 100, \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率 (kg/m^3); $IWUE$ 为灌溉水利用效率 (kg/m^3); Y_a 为果实产量 (t/hm^2)。

1.4 CRITIC-TOPSIS 综合评价方法

CRITIC 权重法是一种基于数据波动性的客观赋权法。采用 CRITIC 赋权法为温室黄瓜和甜瓜各项指标赋权,同时考虑不同指标之间的差异性,增加各项指标之间的关联性分析,最终计算得到较为客观的权重。TOPSIS 法是一种常用的综合评价方法,能充分利用原始数据信息,结合权重指标计算结果准确反映各处理之间的差距。本文将 CRITIC 权重法与 TOPSIS 法组合,综合多项指标评价温室黄瓜和甜瓜的灌溉策略,具体步骤如下:

1) 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对策矩阵 $X=(X_{ij})_{n \times m}$ ($1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m$)。

2) 为消除量纲影响,将所得决策矩阵进行标准化处理,得到标准化矩阵 $M=(M_{ij})_{n \times m}$ 。对于正向指标采用式 (4) 处理,对于逆向指标采用式 (5) 处理。

$$M_{ij}^+ = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (4)$$

$$M_{ij}^- = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (5)$$

3) 计算信息承载量,信息量 (C_j) 的计算为指标变异性与冲突性指标的乘积。变异性 (S_j) 使用标准差衡量,标准差越大则权重越大,采用式 (6) 和式 (7) 计算。冲突性 (R_j) 使用各指标之间的相关系数 (r_{ij}) 衡量,相关性越强则冲突性较低,权重越小,采用式 (8) 计算。指标的信息量越大,表明该指标在评价体系中的作用越大,应分配更多的权重,采用式 (9) 计算。

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}, \quad (6)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n-1}}, \quad (7)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad (8)$$

$$C_j = S_j \times R_j. \quad (9)$$

4) 指标的权重采用式 (10) 计算, 通过计算各指标的权重, 得到权重向量: $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^m C_j}. \quad (10)$$

5) TOPSIS 法的计算步骤为: 首先, 将标准化矩阵 M 与各指标权重相乘, 得到加权的标准化决策矩阵 Z . 其次, 确定正理想解 (D^+) 和负理想解 (D^-), 并确定各评价对象指标值与理想解之间的截距。最后, 计算各方案与最优方案的相对贴近度 (N_i)。计算式为:

$$N_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad (11)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\max,j} - Z_{i,j})^2}, \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\min,j} - Z_{i,j})^2}, \quad (13)$$

式中: N_i 为 i 处理的综合评价指标 ($0 \leq N_i \leq 1$); D_i^+ 和 D_i^- 分别为正理想解和负理想解的截距; $Z_{\max,j}$ 和 $Z_{\min,j}$ 分别为正理想解和负理想解的向量; $Z_{i,j}$ 是标准化指标。 N_i 的值越接近 1, 表明评价对象的结果越优。

1.5 数据处理

本文所有数据均采用 Microsoft Excel 2016 处理并作图, 利用 SPSS Statistics 20.0 软件进行方差分析和显著性检验, 多重比较采用 Duncan(D)法进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量对温室黄瓜和甜瓜果实形态的影响

图 2 是不同灌水量下温室黄瓜和甜瓜果实的果实形态指标。对于温室黄瓜, T2 处理的各项果实形态表现较好, 且平均单果质量最大, 为 0.24 kg, T1 处理的平均单果质量最小, 为 0.20 kg, T1 处理显著低于 T2 处理和 T3 处理 ($P < 0.05$) (图 2 (a)); T1 处理的单株果数显著低于其他处理, 分别较 T2、T3 处理和 T4 处理低 5.8%、6.1% 和 4.8% (图 2 (b)); T3 处理的平均果长最大 (38.5 cm), 仅显著高于 T1 处理 6.0% (图 2 (c)); T1 处理和 T2 处理的平均果径显著高于 T3 处理和 T4 处理, 但 T1 处理和 T2 处理之间无显著性差异 (图 2 (d))。

对于温室甜瓜, K3 处理的各项形态指标表现较好, K3 处理单果质量最高 (1.16 kg), 显著高于 K4、K2 处理和 K1 处理 6.0%、11.2% 和 21.7%, 且不同灌水处理之间的单果质量差异显著 ($P < 0.05$) (图 2 (e)); 甜瓜 K3 处理的果实横径和纵径显著高于 K1 处理和 K4 处理, 但 K1 处理和 K4 处理之间无显著性差异 (图 2 (f), 图 2 (g)); 不同灌水处理下甜瓜果型指数在 0.89~0.92 之间变化, 各处理之间无显著性差异 (图 2 (h))。

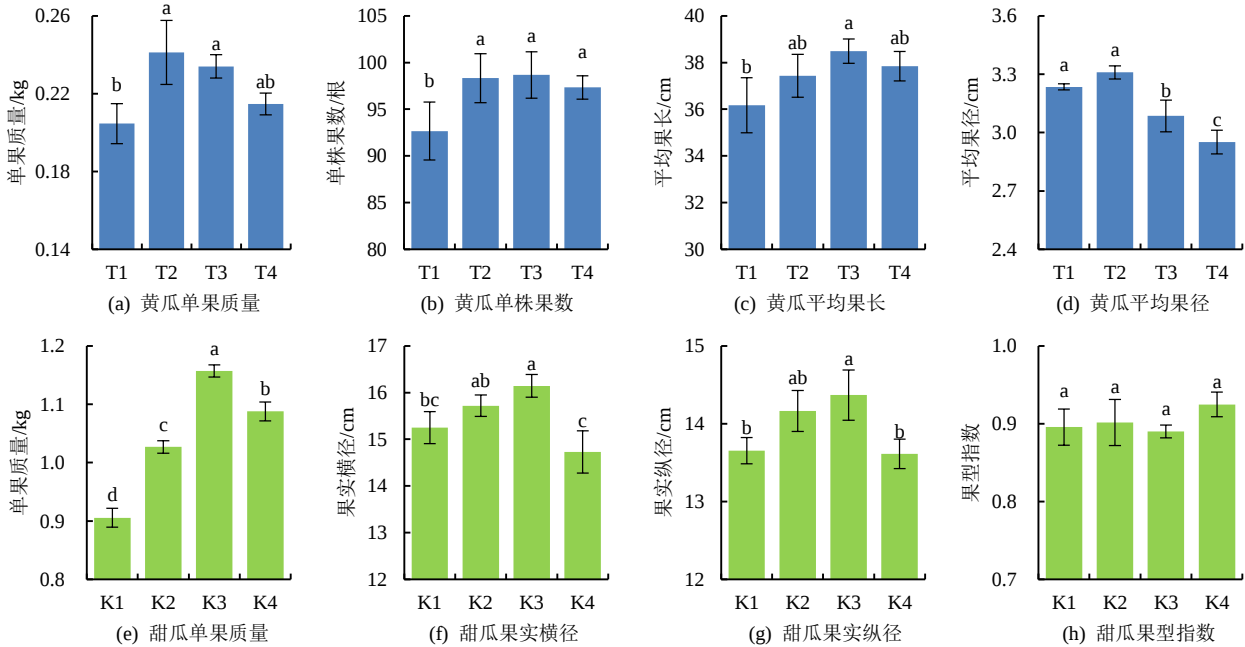


图2 不同灌水量下温室黄瓜和甜瓜果实的果实形态指标

Fig.2 Fruit morphological indexes of cucumber and melon under different irrigation amounts

2.2 不同灌水量对温室黄瓜和甜瓜品质的影响

图 3 为不同灌水量下温室黄瓜和甜瓜的品质指标。温室黄瓜的各项品质指标均表现为随着灌水量的增加而降低, T4 处理的 TSS 最小 (3.34%), 且显著低于其他处理, 但 T1、T2 处理和 T3 处理的 TSS 无

显著性差异 (图 3 (a)); T1 处理的 V_c 最高, 为 59.0 mg/kg, T2 处理和 T3 处理的 V_c 分别为 51.9 和 51.1 mg/kg, 二者无显著性差异, T4 处理的 V_c 最低, 仅为 45.6 mg/kg, 显著低于其他处理 (图 3 (b)); SSC 在 1.1%~1.3% 之间变化, 显著性差异仅表现在 T1 与

T4 处理之间, T1 处理比 T4 处理高 11.6%(图 3(c)); SPC 的变化趋势和显著性差异与 V_c 相同(图 3(d))。

温室甜瓜的 TSS 同样表现出随灌水量增加而降低的趋势, 且 K1 处理显著高于其他处理, 而 K2 处理和 K3 处理之间无显著性差异, 但显著高于 K4 处理(图 3(e)); K1 处理和 K2 处理的 V_c 分别为 61.5

mg/kg 和 64.6 mg/kg, 二者无显著性差异, 但显著高于 K3 处理和 K4 处理(图 3(f)); 不同灌水处理 SSC 表现为: K2 处理>K3 处理>K1 处理>K4 处理, 且不同处理间差异显著(图 3(g)); K2 处理和 K3 处理的 SPC 显著高于 K1 处理和 K4 处理, 其中 K2 处理比 K1 处理高 28.5%(图 3(h))。

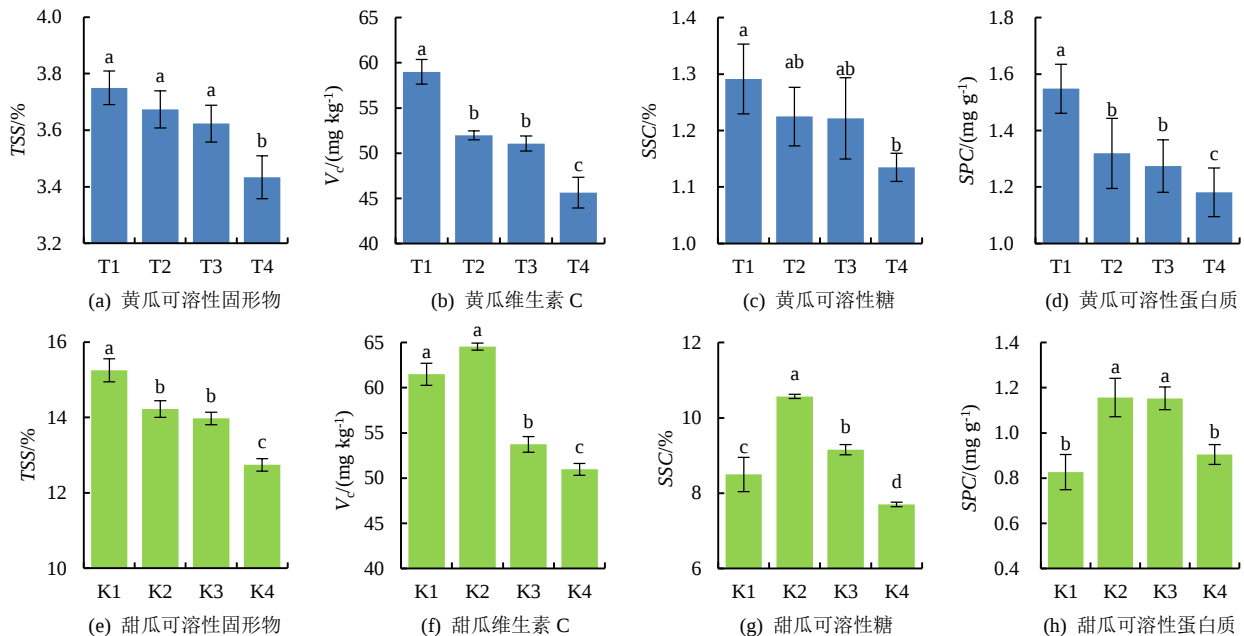


图3 不同灌水量下温室黄瓜和甜瓜的品质指标

Fig.3 Quality indexes of cucumber and melon under different irrigation amounts

2.3 不同灌水量对温室黄瓜和甜瓜产量和水分利用效率的影响

表 1 是温室黄瓜和甜瓜在不同灌水量下的产量、耗水量 (ET)、水分利用效率 (WUE) 和灌溉水利用效率 ($IWUE$)。温室黄瓜的产量随着灌水量的增加呈先增大后减小的趋势, 最大产量为 T3 处理, 为 96.1 t/hm², T2 处理的产量仅次于 T3 处理, 二者无显著性差异, 对照 T3 处理, T1 处理和 T4 处理的产量分别降低 10.3%和 3.7%。随着灌水量的增加, ET 逐渐增加, 但 WUE 和 $IWUE$ 显著下降, T1、T2 处理和 T3

处理的 WUE 和 $IWUE$ 与 T4 处理的比值分别为 1.83、1.52 和 1.24。

对于温室甜瓜, K3 处理和 K4 处理的产量相同且最高, 分别较 K1 处理和 K2 处理显著高 25.5%和 12.8%。温室甜瓜的 ET 同样是随着灌水量的增加而增加, WUE 和 $IWUE$ 下降, K1 处理和 K2 处理的 WUE 和 $IWUE$ 无显著性差异, 温室甜瓜最高 WUE 和 $IWUE$ 分别为 18.5 kg/m³ 和 28.6 kg/m³, K3 处理和 K4 处理的 WUE 和 $IWUE$ 分别较最大值低 6.0%和 16.9%、14.5%和 30.4%。

表 1 不同灌水量下温室黄瓜和甜瓜产量、灌水量、耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率

Table 1 Yield, irrigation amount, water consumption, water use efficiency and irrigation

water use efficiency of cucumber and melon under different irrigation amounts

作物	处理	产量/(t hm ⁻²)	灌水量/mm	ET /mm	WUE /(kg m ⁻³)	$IWUE$ /(kg m ⁻³)
黄瓜	T1	86.1±3.0 c	129.8	182.2±0.8 d	47.3±1.6 a	66.4±2.3 a
	T2	94.3±1.6 ab	171.7	213.4±1.2 c	44.2±0.7 b	54.9±0.9 b
	T3	96.1±1.9a	213.6	247.8±4.2 b	38.8±1.0 c	45.0±0.9 c
	T4	92.5±1.9 b	255.5	279.3±4.7 a	33.1±0.5 d	36.2±0.8 d
甜瓜	K1	31.1±0.5 c	108.7	168.8±2.0 d	18.4±0.1 a	28.6±0.4 a
	K2	36.4±0.5 b	136.8	196.8±1.7 c	18.5±0.4 a	26.6±0.3 a
	K3	41.7±1.3 a	175.7	240.0±1.2 b	17.4±0.5 b	23.8±0.8 b
	K4	41.7±1.2 a	209.1	263.4±2.0 a	15.8±0.3 c	19.9±0.6 c

2.4 基于 CRITIC-TOPSIS 法综合评价温室黄瓜和甜瓜灌溉策略

黄瓜的评价指标包括单果质量 (X_1)、单株果数

(X_2)、平均果长 (X_3)、平均果径 (X_4)、TSS (X_5)、 V_c (X_6)、SSC (X_7)、SPC (X_8)、产量 (X_9)、 WUE (X_{10}) 和 ET (X_{11}), 共 11 个指标作为评价因子。甜

瓜的评价指标包括果实横径 (Y_1)、果实纵径 (Y_2)、单果质量 (Y_3)、TSS (Y_4)、 V_c (Y_5)、SSC (Y_6)、SPC (Y_7)、产量 (Y_8)、WUE (Y_9) 和 ET (Y_{10})，共 10 个指标作为评价因子。将 ET 因子作为逆向指标，其余因子均为正向指标，计算得到各因子的信息量和权重，如表 2 所示。黄瓜平均果长指标的权重最高，为 14.66%，其次为单株果数，产量指标排在第 3 位， ET 指标的权重最低，仅为 3.34%。甜瓜产量指标的权重最高，为 16.96%，其次为单果质量，同样是 ET 指标的权重最低，仅为 5.53%。

表 2 各评价指标的信息量和权重

黄瓜指标	信息量 C	权重 W/%	甜瓜指标	信息量 C	权重 W/%
单果质量 (X_1)	8.489	9.96	果实横径 (Y_1)	4.731	7.51
单株果数 (X_2)	11.422	13.40	果实纵径 (Y_2)	4.990	7.92
平均果长 (X_3)	12.498	14.66	单果质量 (Y_3)	9.287	14.74
平均果径 (X_4)	5.903	6.92	TSS (Y_4)	7.303	11.59
TSS (X_5)	5.875	6.89	V_c (Y_5)	6.625	10.52
V_c (X_6)	6.969	8.17	SSC (Y_6)	4.741	7.53
SSC (X_7)	6.389	7.49	SPC (Y_7)	5.350	8.49
SPC (X_8)	7.647	8.97	产量 (Y_8)	10.683	16.96
产量 (X_9)	11.002	12.90	WUE (Y_9)	5.802	9.21
WUE (X_{10})	6.213	7.29	ET (Y_{10})	3.486	5.53
ET (X_{11})	2.852	3.34	-	-	-

将各指标的权重代入 TOPSIS 中，可以得到不同处理的排名情况。表 3 为 CRITIC-TOPSIS 综合评价结果和排序，温室黄瓜各处理的贴适度 N_i 从优到劣依次为 T3 处理>T2 处理>T1 处理>T4 处理，温室甜瓜依次为 T2 处理>T3 处理>T1 处理>T4 处理。可见，温室黄瓜采用 $0.9E_p$ 的灌水量，温室甜瓜采用 $0.7E_p$ 的灌水量可实现果实形态、品质、产量和水分利用效率的最优化。

表 3 CRITIC-TOPSIS 评价结果和排序

作物	处理	正理想解 距离 D+	负理想解 距离 D-	相对 接近度 C	排序结果
黄瓜	T1	1.605	1.232	0.434	3
	T2	0.828	1.745	0.678	2
	T3	0.766	1.628	0.680	1
	T4	1.742	1.087	0.384	4
甜瓜	K1	1.615	1.561	0.491	3
	K2	0.802	1.694	0.679	1
	K3	0.949	1.711	0.643	2
	K4	1.729	1.06	0.380	4

3 讨论

追求节水增产优质高效的灌溉策略始终是设施农业发展的目标，本试验以温室滴灌黄瓜和甜瓜为研究对象，以 20 cm 标准蒸发皿的水面蒸发量为灌水依据，深入系统地探讨了不同灌水量对果实形态、品质指标、产量和水分利用效率等指标的影响。研究发现，适宜灌水量有利于果实的外观品质，温室黄瓜灌水量为 $0.7E_p$ 时单果质量、单株果数、平均果长和平均果

径较佳。虽然黄瓜需水量较大，但过多的土壤水分会导致根系缺氧，抑制黄瓜生殖生长过程，从而降低果实的单果质量和平均果径^[14]，本研究试验地为黏壤土，透水性较差可能是导致根部缺氧的主要原因。研究结果与毋海梅等^[3]较为相似，但 Ertek 等^[15]认为大田环境下蒸发皿系数选用 1.0，Zhang 等^[16]认为地下滴灌条件下蒸发皿系数选用 0.8 时黄瓜的果实形态指标最好，这种差异主要是环境条件和灌水方式的不同造成的。对于温室甜瓜，灌水量为 $0.9E_p$ 时单果质量、果实横径、纵径和果形指数较好，这可能是甜瓜在果实膨大期对水分需求较大引起的，但研究发现水分过多同样会导致甜瓜根系缺氧，不利于果实生长^[17]。郜森等^[18]认为对于秋季甜瓜土壤水分下限和上限为 $65\%\theta_f \sim 100\%\theta_f$ 时果实横径和纵径最大，这与本研究略有不同，原因可能是生长季节不同导致的差异。

研究发现，通过减少灌水量使作物遭受干旱逆境之后可有效提高果实品质，这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，降低了果实中水分量有利于品质提升^[19]。本研究发现温室黄瓜 TSS、 V_c 、SSC 和 SPC 同样是随着灌水量的增加而降低，这与多数研究相似^[3,16,20]。对于温室甜瓜，除 TSS 之外， V_c 、SSC 和 SPC 的最大值均出现在 $0.7E_p$ 处理，这可能是由于灌水量为 $0.5E_p$ 造成土壤水分胁迫过重，植株合成碳水化合物等营养物质的功能收到抑制，从而导致甜瓜果实品质下降^[2]。该结果与温室葡萄^[21]、番茄^[22]和西瓜^[23]等作物的研究结果相似。追求作物产量最大化的同时往往无法获得较高的 WUE 和 IWUE，本研究发现温室黄瓜最大产量为灌水量 $0.9E_p$ ，但灌水量为 $0.5E_p$ 时 WUE 和 IWUE 最大，且 2 个处理差异显著，该研究结果与温室芹菜^[6]、甜瓜^[17]和番茄^[8,11,22]等作物相似。然而，Zhang 等^[16]认为温室秋季黄瓜蒸发皿系数为 0.8 时可获得最大 WUE 和 IWUE，这可能是由于生长季节不同造成的差异。温室甜瓜灌水量为 $0.9E_p$ 和 $1.1E_p$ 时产量最大，且无显著性差异，而灌水量为 $0.5E_p$ 和 $0.7E_p$ 时 WUE 和 IWUE 最大，无显著性差异，说明灌水量为 $0.7E_p$ （土壤含水率为 $65\%\theta_f \sim 75\%\theta_f$ ）是平衡产量与水分利用的阈值。该结论与郜森等^[18]研究结果较为相似。然而，李毅杰等^[2]认为甜瓜在营养生长阶段的亏水程度阈值在 $55\%\theta_f$ 左右，低于该阈值产量、WUE 和 IWUE 均产生影响，这可能是由于不同地域和气候条件差异造成的。

本研究选择黄瓜 11 个指标和甜瓜 10 个指标评价不同灌溉策略的优劣，在使用多指标综合评价时，关键要准确客观的确定各项指标的权重，本研究采用 CRITIC 赋权法为温室黄瓜和甜瓜各项指标赋权，对

不同指标间的差异性和关联性分析, 得到各项指标的信息量和权重, 克服了主观赋权法和熵权法的缺陷, 所得权重更加客观可靠。通过计算发现黄瓜的平均果长和甜瓜的产量指标权重最高, 而 ET 指标权重最低。TOPSIS 是一种多目标决策方法, 能够正确、有效地评价规划方案的优劣, 因此在灌溉施肥计划、水利、工程等领域得到广泛应用, 具有真实、直观、可靠的优点。目前基于 TOPSIS 方法评价温室灌溉制度的研究主要集中在单一模型方面, 如 Li 等^[11]以温室番茄产量、作物水分生产力、氮素利用效率和果实品质为评价指标, 根据各因素的重要性设置权重, 结合 TOPSIS 提出高产优质番茄的最优施肥策略; Liu 等^[24]利用 TOPSIS 方法, 通过平衡产量、果实品质和 WUE 之间的关系, 优化了温室番茄的灌溉频率和灌溉量; Luo 等^[25]基于 TOPSIS 方法评价了 3 种滴灌方式与 5 种氮肥组合下的番茄产量、品质和 WUE 。本研究采用 CRITIC 和 TOPSIS 组合评价法对温室滴灌黄瓜和甜瓜进行了综合评价后发现, 温室黄瓜采用 $0.9E_p$ 的灌水量, 而温室甜瓜采用 $0.7E_p$ 的灌水量可实现果实形态、品质、产量和水分利用效率的最优化。

4 结 论

1) 温室滴灌黄瓜的单果质量、单株果数和平均果长随着灌水量的减少而显著降低, 但平均果径却相反。采用较低 ($0.5E_p$) 或较高 ($1.1E_p$) 的灌水量均会降低温室甜瓜的形态指标, 灌水量为 $0.9E_p$ 时甜瓜的各项形态指标最优。

2) 温室黄瓜和甜瓜的 TSS 均随着灌水量的增加而下降, 黄瓜灌水量为 $0.7E_p$ 和 $0.9E_p$ 时各项品质指标无显著性差异, 但 $0.5E_p$ 灌水量却大幅提高了黄瓜品质, 甜瓜的最大 V_c 、可溶性糖和可溶性蛋白质均出现在灌水量为 $0.7E_p$ 处理。

3) 温室黄瓜的灌水量为 $0.9E_p$ 时可获得最大产量 (96.1 t/hm^2), 但 WUE 和 $IWUE$ 却比最大值低 17.9% 和 32.2%。灌水量为 $0.9E_p$ 和 $1.1E_p$ 时温室甜瓜产量无显著性差异, 但 $0.9E_p$ 的 WUE 和 $IWUE$ 却显著较 $1.1E_p$ 高 9.2% 和 16.3%。黄瓜和甜瓜权重最高的指标分别是平均果长和产量, 分别为 14.66% 和 16.96%, 本试验条件下利用 CRITIC-TOPSIS 综合评价法得出温室黄瓜和甜瓜的最优灌水量分别为 $0.9E_p$ 和 $0.7E_p$ 。

参考文献:

- [1] 刘宽红, 蒋先平, 程俊峰, 等. 国外有机设施园艺现状及对设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 1-9.
LIU Nihong, JIANG Xianping, CHENG Junfeng, et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 1-9.
- [2] 李毅杰, 原保忠, 别之龙, 等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 132-138.
LI Yijie, YUAN Baozhong, BIE Zhilong, et al. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 132-138.
- [3] 毋海梅, 闫浩芳, 张川, 等. 温室滴灌黄瓜产量和水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 84-93.
WU Haimei, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Responses of yield and water use efficiency of drip-irrigated cucumber in greenhouse to water stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 84-93.
- [4] 袁宁宁, 白清俊, 张明智, 等. 温室番茄在宽垄覆膜沟灌下水分调亏下限指标研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 17-23.
YUAN Ningning, BAI Qingjun, ZHANG Mingzhi, et al. Optimizing the soil moisture threshold for scheduling deficit furrow irrigation of greenhouse tomato grown in raised bed with film mulching[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 17-23.
- [5] YANG Hui, DU Taisheng, QIU Rangjian, et al. Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 193-204.
- [6] 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.
GUO Yong, MA Juanjuan, ZHENG Lijian, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on growth and water use of celery in greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2022(9): 9-16.
- [7] 李银坤, 詹保成, 郭文忠, 等. 基于蒸发皿水面蒸发量的温室生菜适宜灌溉量研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 13-19.
LI Yinkun, ZHAN Baocheng, GUO Wenzhong, et al. Optimizing irrigation amount for greenhouse lettuce production based on pan-measured evaporation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 13-19.
- [8] HOOSMAND Mohammad, ALBAJI Mohammad, BOROOMAND NASAB Saeed, et al. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 254: 84-90.
- [9] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 基于温室番茄产量和果实品质对加气灌溉处理的综合评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2 241-2 252.
ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Comprehensive evaluation of different oxanion treatments based on fruit yield and quality of greenhouse tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(11): 2 241-2 252.
- [10] 刘聪, 宫彬彬, 高洪波, 等. 基于蒸发皿蒸发量的椰糠盆栽番茄适宜灌溉量估算与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 117-124.
LIU Cong, GONG Binbin, GAO Hongbo, et al. Estimation and experiment of the suitable irrigation amount of potted tomatoes with coconut bran using pan evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 117-124.
- [11] LI Huanhuan, LIU Hao, GONG Xuewen, et al. Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106 570.
- [12] 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): 4 179-4 191.
LI Hongzheng, CAO Hongxia, GUO Lijie, 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): 4 179-4 191.

- [13] 李波, 邢经纬, 姚名泽, 等. 深埋秸秆量和滴灌量对温室番茄品质、产量及IWUE的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(1): 51-59.
LI Bo, XING Jingwei, YAO Mingze, et al. Effects of the amounts of deep-buried straw and drip irrigation on quality, yield and IWUE of tomato in greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(1): 51-59.
- [14] 杨冬艳, 桑婷, 冯海萍, 等. 灌溉频率对日光温室早春茬黄瓜果实发育及根系分布的影响[J]. 节水灌溉, 2022(4): 31-36.
YANG Dongyan, SANG Ting, FENG Haiping, et al. Effects of irrigation frequency on fruit development and root distribution of early spring cucumber in solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2022(4): 31-36.
- [15] ERTEK Ahmet, ŞENSOY Suat, GEDIK İbrahim, et al. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under field conditions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1): 159-172.
- [16] ZHANG Hexi, CHI Daocai, WANG Qun, et al. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(6): 921-930.
- [17] 龚雪文, 孙景生, 刘浩, 等. 开花坐果期不同水分下限对温室滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 28-32.
GONG Xuewen, SUN Jingsheng, LIU Hao, et al. Effects of different soil moisture lower limits on quality and yield of greenhouse muskmelon in blossom and fruit-set period under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 28-32.
- [18] 郇森, 王恩煜, 朱昌伟, 等. 土壤含水量对温室甜瓜生长、产量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 89-96.
GAO Sen, WANG Enyu, ZHU Changwei, et al. Effects of soil moisture contents on growth, yield and quality of melon in greenhouse[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(12): 89-96.
- [19] CHEN Jinliang, KANG Shaozhong, DU Taisheng, 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.
- [20] WANG Haidong, LI Jing, CHENG Minghui, et al. Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 243: 357-366.
- [21] 张彩仙, 杨苗, 杨萍果, 等. 灌水量对鲜食葡萄生长及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 16-22.
ZHANG Caixian, YANG Miao, YANG Pingguo, et al. Effects of irrigation amount on growth and fruit quality of table grape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 16-22.
- [22] GONG Xuewen, LI Xiaoming, QIU Rangjian, et al. Ventilation and irrigation management strategy for tomato cultivated in greenhouses[J]. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107 908.
- [23] 李建明, 于雪梅, 王雪威, 等. 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 75-83.
LI Jianming, YU Xuemei, WANG Xuewei, et al. Optimization of fertigation scheduling for drip-irrigated watermelon based on its yield, quality and fertilizer and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 75-83.
- [24] LIU Hao, LI Huanhuan, NING Huiheng, et al. Optimizing irrigation frequency and amount to balance yield, fruit quality and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. Agricultural Water Management, 2019, 226: 105 787.
- [25] LUO Hui, LI Fusheng. Tomato yield, quality and water use efficiency under different drip fertigation strategies[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 235: 181-188.

Optimizing Irrigation Scheduling for Greenhouse Crops Using the CRITIC-TOPSIS Framework

WANG Hongfei, LI Yanbin*, LIU Tengfei, DING Jiale, GONG Xuewen*

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: 【Objective】Greenhouse agriculture relies on irrigation and optimizing irrigation to balance crop yield and quality is critical to maximizing its profitability. Taking cucumber and melon as an example, we propose to optimize the irrigation based on evaporation measured from standard 20 cm evaporation pan (E_p) and other factors. 【Method】The experiment is carried out in a drip-irrigated greenhouse. It compares four irrigation treatments with the irrigation amount setting at 50 (I5), 70 (I7), 90 (I9) and 110% (I11) of E_p respectively. In each treatment, we analyze the changes in morphological and quality indexes of the fruits, as well as yield and water use efficiency (WUE). The optimal irrigation for each crop is determined using the CRITIC-TOPSIS framework.【Results】①I7 and I9 increase the weight and diameter of the cucumber significantly compared with other treatments, but at the expense of fruit numbers and fruit length. For the melon, I9 is optimal for improving morphological traits of the fruits. ②Increasing irrigation amount reduces the total soluble solids (TSS), vitamin C (V_c), soluble sugars content (SSC) and soluble proteins content (SPC) in the cucumbers. For the melon, its V_c , SSC and SPC peaks in I7, and TSS maximizes in I5. ③The maximum cucumber yield is 96.1 t/hm^2 , achieved in I9, with its WUE and irrigation water use efficiency ($IWUE$) being 17.9% and 32.2% respectively less than those in I5. There is no significant difference in melon yield between I9 and I11, but the WUE and $IWUE$ of the former are 9.2% and 16.3% higher than those in the latter. 【Conclusion】Comprehensive evaluation using 11 indicators for the cucumber and 10 for the melon shows that the optimal irrigation for the greenhouse cucumber and melon is to irrigate 90% and 70% of water evaporated from the 20 cm standard evaporation pan installed in the greenhouse, respectively.

Key words: CRITIC-TOPSIS comprehensive evaluation method; fruit morphology; yield; quality; water use efficiency

责任编辑: 赵宇龙