

基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策

张 智^{1,2} 杨 志^{1,2} 黎景来^{1,2} 张梦池¹ 李 瑞^{1,2} 贺代伟¹

(1.西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100; 2.农业农村部西北设施园艺重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要: 为对设施甜瓜高效集约化生产实施准确有效的水肥管理,以“千玉六号”甜瓜为对象,于2020年4—7月在陕西省杨凌区的双层大跨度温室内进行试验,设水肥两因素,依据蒸腾蒸发量(ET_c)和目标产量法设计3个灌水量(W1:低水,75% ET_c ; W2:中水,100% ET_c ; W3:高水,125% ET_c)及3个施肥量(F1:低肥,施肥量758.44 kg/hm²; F2:中肥,施肥量948.05 kg/hm²; F3:高肥,施肥量1 137.66 kg/hm²),研究不同水肥条件对甜瓜生长、产量、品质及水肥利用效率的影响,运用综合评价方法确定最优灌水施肥制度。结果表明,水肥耦合对甜瓜各指标的影响不同,基于博弈论的组合赋权法对甜瓜生长、产量、品质及水肥利用效率4类因素12个指标进行综合赋权,其中总产量权重最大,为0.343,游离氨基酸含量最小,为0.007。基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型进行综合评价,中水中肥处理下复合贴近度最佳。水肥配施对甜瓜综合生长的交互作用显著,灌水量及施肥量对甜瓜综合生长的调控均呈先增加再降低的趋势,与实际生产相符。当灌水量为810.52~990.64 m³/hm²、施肥量为853.25~1 042.85 kg/hm²时甜瓜综合生长得分最高,为最优的水肥配施方案。本研究可为当地设施甜瓜生产中水肥科学管理提供依据。

关键词: 甜瓜; 产量; 品质; 水肥效率; TOPSIS; 灰色关联分析法

中图分类号: S626.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0302-10 OSID: 

Water and Fertilizer Irrigation Decision of Melon Based on Grey Relation Analysis and TOPSIS Coupling Model

ZHANG Zhi^{1,2} YANG Zhi^{1,2} LI Jinglai^{1,2} ZHANG Mengchi¹ LI Rui^{1,2} HE Daiwei¹

(1. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to implement accurate and effective water and fertilizer management for the efficient and intensive production of melons in facilities. The melon of “Qianyu No. 6” was selected as test material, in a double-layer large-span greenhouse in Yangling, Shaanxi from April to July in 2020. With two factors of water and fertilizer, three irrigation levels were designed based on the crop transpiration (ET_c) (W1: low water, 75% ET_c , W2: medium water, 100% ET_c , W3: high water, 125% ET_c) and three fertilization rates were calculated according to the target yield method (F1: low fertilizer 758.44 kg/hm², F2: medium fertilizer 948.05 kg/hm², F3: high fertilizer 1 137.66 kg/hm²). To investigate the effects of different water and fertilizer conditions on the growth, yield, quality and water and fertilizer use efficiency and the optimal irrigation and fertilization plan was determined by using a comprehensive evaluation method. The results showed that the coupling of water and fertilizer had different effects on the indicators of melon. The total of 12 indicators from four categories of growth, yield, quality, and profitability were combined and weighed based on game theory. The total yield got the largest comprehensive weight of 0.343, and the lowest weight was obtained from free amino acid content of 0.007. Comprehensive evaluation was carried out based on gray relation analysis and TOPSIS coupling model, and the compound closeness was the best under the medium levels of both irrigation and fertilization. The combined application of fertilization had a significant interaction effect on the

收稿日期: 2021-03-11 修回日期: 2021-05-10

基金项目: 陕西省科技创新团队项目(2021TD-34)、陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2021-YL(XN)04)和现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-C07)

作者简介: 张智(1978—),女,副教授,博士生导师,主要从事设施园艺环境工程研究,E-mail: zhangzhione@126.com

comprehensive growth of melon, and the tendencies of irrigation and fertilization on the comprehensive growth of melon were observed first increasing and then decreasing, which was consistent with actual production. Melon had the highest comprehensive growth score when the irrigation amount was 810.52 ~ 990.64 m³/hm² and the fertilization rate was 853.25 ~ 1 042.85 kg/hm², which was the optimal water and fertilization application plan. The research result can provide a basis for the scientific management of water and fertilizer in the production of melon in local greenhouse.

Key words: melon; yield; quality; water and fertilizer use efficiency; TOPSIS; grey relation analysis

0 引言

甜瓜是一种蔓性草本植物,其果实香甜,营养含量丰富,质地风味独特,深受我国消费者喜爱^[1-2]。水分管理和肥料施用是影响甜瓜生长发育和高产优质最重要的两个因素^[3]。在实际生产中,一些生产者盲目追求高产施用过量的水肥,导致大量养分残留在土壤中,严重破坏了土壤自身结构,导致土壤物理结构失调、生物多样性下降,土壤板结、盐渍化等问题,在水肥资源过度消耗的同时,引起作物产量和品质下降^[4-5]。因此,水肥的科学施用受到关注。对于甜瓜,适宜水分亏缺可以提高品质但不会显著影响其产量^[6],过度的水分亏缺则会使整体光合性能与干物质积累量下降^[7],导致产量和品质的双重下降^[8]。适量施用钾肥可使可溶性糖含量和维生素 C 含量提高^[9],适宜施氮量可以提高可溶性固形物含量和果实品质^[10],但过量施氮却会使可溶性固形物含量降低。由于不同的水肥耦合对作物生长、产量、品质等指标影响不同,且不同指标对同一水肥的响应有差异^[11]。因此,需要综合考虑作物多个指标对水肥条件的响应,科学应用多目标的评价优化方法,才能取得整体水肥优化方案。

国内外很多学者利用先进的方法建立了对多指标的评价分析模型,如主成分分析法和层次分析法^[12-14]。另外隶属函数分析法^[15]、灰色关联度分析法 (Grey relation analysis, GRA)^[16]和基于组合赋权的 TOPSIS (Technique for order preference by similarity to ideal solution) 模型^[17]等方法也在多指标评价中取得了较好的应用效果。然而,这些基于单一评价方法的研究,利用信息的角度和侧重点不同,存在数据波动变化大、难以寻求其典型分布规律的缺陷,限制了评价结果的准确性。TOPSIS 和灰色关联的耦合模型能结合 TOPSIS 法的欧氏距离和 GRA 的态势灰色特征两方面定义综合关联度,基于多属性将评价对象与理想化目标的接近程度进行排序,在评估结果上更具客观性、合理性^[18-20],在解决拆解方案和不确定条件下的辐射源威胁评估问题上均取得了显著成效^[21-22]。

本文引入灰色关联理论对 TOPSIS 评价方法进

行改进,将欧氏距离与灰色关联度相结合,全面考虑甜瓜生长、产量、品质、水肥利用效率,基于多类别多指标对水肥处理效果进行评价,进而获得最佳水肥施用方案,为甜瓜的科学灌溉管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

本试验于 2020 年 4—7 月在陕西省杨凌示范区揉谷镇锦田果蔬合作社 (北纬 34°16′,东经 108°2′) 的大跨度非对称双层温室中进行。温室长度为 55 m,跨度为 17 m。该试验区地处陕西省中部关中平原腹地,海拔 450 m,属温带季风气候。年平均降水量 635.1 mm,无霜期 211 d,年平均日照时数 2 163.8 h。试验区土质为黄土,土壤中硝态氮质量比 15 mg/kg,铵态氮质量比 96.15 mg/kg,速效磷质量比 30.20 mg/kg,速效钾质量比 99.85 mg/kg,电导率 (EC) 989.33 μS/cm,土壤 pH 值为 6.98,土壤田间持水率为 26%,凋萎含水率为 8.5%。温室内设有小型气象站 (HOBO event logger, Onset Computer Corporation, 美国),自动记录温湿度。供试材料为“千玉六号”薄皮甜瓜。

1.2 试验设计

试验设置水肥两因素,依据蒸腾蒸发量 (Evapotranspiration, ET_c) 设计 3 个滴灌水平 (低水 W1: 75% ET_c; 中水 W2: 100% ET_c; 高水 W3: 125% ET_c), 灌水量 $I = ET_c K_{cp} A$, 式中 ET_c 为 200mm 蒸发皿累计蒸腾蒸发量, mL; K_{cp} 为甜瓜灌溉水平系数; A 为所需灌溉水量控制面积, m²。依据目标产量法^[23]设计 3 个施肥水平 (F1: 低肥, 80% 施肥量 (758.44 kg/hm²); F2: 中肥, 100% 施肥量 (948.05 kg/hm²); F3: 高肥, 120% 施肥量 (1 137.66 kg/hm²))。分别于 5 月 10 日 (伸蔓期)、5 月 27 日 (开花期)、6 月 16 日 (坐果前期)、6 月 28 日 (坐果中期)、7 月 16 日 (坐果后期) 进行滴灌追肥。以高水和不施肥作为对照 CK, 共 10 个处理, 每个处理 3 次重复。

试验于 4 月 23 日选取长势基本一致的三叶一心的甜瓜幼苗进行定值, 7 月 23 日拉秧。试验小区呈随机区组排列, 小区长 9 m、宽 1.2 m, 垄高 0.2 m,

采用一垄两行种植方式,种植密度为 41 400 株/hm²。膜下每垄铺设两条滴灌管,管间距为 40 cm,小区之间用 0.1 mm 黑色塑料膜隔开,防止处理间的水肥相互影响。在定植后统一灌水缓苗,缓苗 7 d 后进行灌施处理,之后每 5~7 d 灌施 1 次,阴雨天不灌水。水肥同时处理,利用数显电子流量计和施肥泵精确控制灌水量和施肥量。试验水肥施用量见表 1。

表 1 灌溉施肥方案

Tab.1 Irrigation and fertilization design

处理	灌水施肥水平	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	施肥量/(kg·hm ⁻²)
T1	W1F1	690.52	758.44
T2	W1F2	690.52	948.05
T3	W1F3	690.52	1 137.66
T4	W2F1	918.58	758.44
T5	W2F2	918.58	948.05
T6	W2F3	918.58	1 137.66
T7	W3F1	1 145.85	758.44
T8	W3F2	1 145.85	948.05
T9	W3F3	1 145.85	1 137.66
CK	W3	1 145.85	

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标

生长指标包括总生物量和净光合速率。总生物量为根、茎、叶、果各部位干物质质量总和。在甜瓜成熟期取样,每个小区选取有代表性的 6 株,分成根、茎、叶、果放入干燥箱 105℃ 杀青 30 min,75℃ 干燥至质量恒定,采用电子天平称量并计算单株干物质质量。净光合速率在采收期选取每株顶端往下第 3 片叶,利用 Li6800 型便携式光合测定仪(Li-Cor,美国)测定,每个处理测定 6 株。

1.3.2 产量指标

果实成熟时,采收成熟度一致的甜瓜。每隔 3~5 d 采收 1 次,每次采收测定单果质量、果实数量,质量用千分之一精度电子天平测定。

1.3.3 品质指标

可溶性固形物含量采用 PAL-1 型手持式糖度仪(日本爱拓公司)测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮兰染色法测定,维生素 C 含量采用钼蓝比色法测定,可溶性总糖含量采用蒽酮比色法测定,游离氨基酸含量采用水合茚三酮法测定,植物组织硝态氮含量采用硝基水杨酸比色法测定^[24]。

1.3.4 水肥利用效率

水分利用效率(Water use efficiency, WUE)计算公式为

$$WUE = Y/I \tag{1}$$

式中 Y——甜瓜总产量,kg/hm²

肥料偏生产力(Fertilizer partial productivity, PFP)计算公式为

$$PFP = Y/F \tag{2}$$

式中 F——投入的 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量,kg/hm²

1.4 GRA-TOPSIS 综合评价

为了合理进行综合评价,首先对因素进行分类,建立系统的递阶层次结构,进而分析系统中各因素之间的关系。

1.4.1 甜瓜各单一指标权重计算

(1) AHP 法确定主观权重

基于 AHP 法^[25]构建评价体系确定主观权重,利用调查问卷对各指标两两进行打分,比较因素间的重要性,指标数采用 1~9 作为打分值。对打分结果计算一致性指标(CI)并查找其对应的平均随机一致性指标(RI),通过一致性比例(CR)检验矩阵可接受程度,当 CR 小于 0.10 时认为一致性检验通过,判断矩阵可接受。

(2) 熵权法确定客观权重

基于熵权法^[26]确定客观权重,采用极值标准化法对甜瓜单一生长指标值进行无量纲转换,设指标集 $X_j = \{X_{ij}\}$,其转换公式为

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_j}{\max X_j - \min X_j} \tag{3}$$

式中 X_{ij} ——处理前指标值

Z_{ij} ——无量纲化处理后的指标值

各指标信息熵计算式为

$$E_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \tag{4}$$

其中

$$P_i = Z_i / \sum_{i=1}^n Z_i$$

式中 n——处理个数

P_i ——对 Z_i 规范化处理的结果

Z_i —— Z_{ij} 的集合

则各指标的客观权重 W_i 为

$$W_i = \frac{1 - E_j}{\sum E_j} \tag{5}$$

(3) 基于博弈论确定组合权重

为更好地兼顾主观和客观的需求,提高权重分配的可靠性和科学性,采用基于博弈论的组合赋权评价方法^[27]确定甜瓜单一指标的综合权重,即在主观 AHP 和客观熵权两种赋权的基础上,构造出权重集 $u_k = \{u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}\} (k = 1, 2)$ 。

$$u = \sum_{k=1}^L \alpha_k u_k^T \tag{6}$$

其中 $\alpha_k > 0 \sum_{k=1}^L \alpha_k = 1$

式中 u ——权重集的权重向量

α_k ——线性组合系数

运用博弈论思想得到组合权重,即

$$W_j^* = \sum_{j=1}^n w_{1j} w_{2j}^T \tag{7}$$

式中 w_{1j} ——基于 AHP 法确定的主权重

w_{2j} ——基于熵权法确定的客观权重

1.4.2 基于 GRA-TOPSIS 的综合评价

(1)TOPSIS 法确定欧氏距离

设 m 个评价指标、 n 个评价对象的原始数据矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

对该矩阵正向化得到

$$Z = [z_{ij}]_{m \times n}$$

其中

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \tag{8}$$

定义最大值 Z^+ 为 $(z_1^+, z_2^+, \cdots, z_m^+)$, 定义最小值 Z^- 为 $(z_1^-, z_2^-, \cdots, z_m^-)$ 。

第 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 个评价对象与正理想解 Z_j^+ 的加权距离和负理想解 Z_j^- 的加权距离分别为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^* (Z_j^+ - z_{ij})^2} \tag{9}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^* (Z_j^- - z_{ij})^2} \tag{10}$$

计算得出第 i 个评价对象的得分 S_i 为

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \tag{11}$$

(2)GRA 法确定灰色关联度

依据灰色系统理论^[28] 计算各水肥处理的灰色关联度。其矩阵 Z 各个指标与母序列的灰色关联度为

$$y(x_0(k), x_i(k)) = \frac{a + \rho b}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho b}$$
$$(i = 1, 2, \cdots, m; k = 1, 2, \cdots, n) \tag{12}$$

其中

$$a = \min \min |x_0(k) - x_i(k)|$$
$$b = \max \max |x_0(k) - x_i(k)|$$

式中 ρ ——分辨系数

进一步得到矩阵 C 中第 i 个处理与正理想方案和负理想方案的灰色关联度为

$$Y_i^+ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}^+ \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{13}$$

$$Y_i^- = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}^- \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{14}$$

(3)融合欧氏距离与灰色关联度的综合评价
耦合 TOPSIS 与灰色关联方案,通过加权处理构建一种更为合理的贴近度指标^[21],计算公式为

$$S_i^+ = fD_i^- + (1 - k)Y_i^+ \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{15}$$

$$S_i^- = fD_i^+ + (1 - k)Y_i^- \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{16}$$

式中 f ——决策者对位置形状的偏好程度,取 0.5

最后计算出各水肥处理综合贴近度的归一化得分,计算公式为

$$E_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \tag{17}$$

$$C_i = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \tag{18}$$

式中 E_i ——贴近度 C_i ——归一化得分

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据整理、分类和绘表;利用 SPSS 软件统计数据分析相关性,Origin 2018b 进行绘图;EdrawMax 10.1.2 软件建立评价体系;DPS 9.50 建立数学模型;Matlab 2014b 解析模型。

2 结果与分析

2.1 不同水肥滴灌条件对甜瓜单一指标的影响

2.1.1 对甜瓜生长的影响

由图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著性($P < 0.05$),下同)可知,在同一灌水水平下,甜瓜总干质量随施肥量的增加均呈先上升后下降的趋势,中低水条件下差异并不显著。相比于 W1 和 W2,施用高水(W3)时,甜瓜的总干质量明显降低。施肥水平对甜瓜净光合速率的影响由大到小总体表现为 F3、F2、F1,在同一灌水水平下,净光合速率随施肥量增加而升高,T9(W3F3)处理下达到最大。

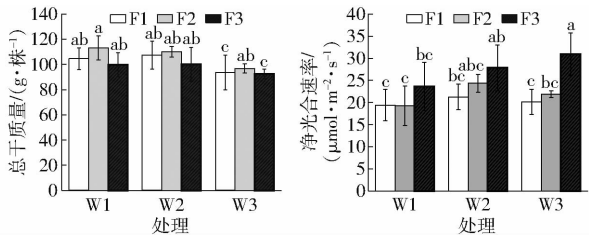


图 1 水肥耦合对甜瓜生长的影响
Fig.1 Effects of water and fertilizer coupling on melon growth

2.1.2 对甜瓜产量的影响

由图 2 可知,在同一灌水水平下,甜瓜的单果质量和总产量均随着施肥量呈现先上升后下降的趋势,中肥 F2 下表现最好。单果质量和产量的最大值均在 T8(W3F2)处理,其次为 T5(W2F2)处理,分别比 T1(W1F1)处理下的最小单果质量和最低产量高 29.64% 和 18.58%。

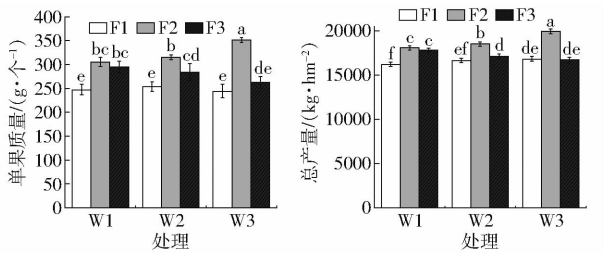


图2 水肥耦合对甜瓜产量的影响

Fig.2 Effects of water and fertilizer coupling on melon yield

表2 不同水肥滴灌条件对甜瓜品质的影响

Tab.2 Effects of different water and fertilizer drip irrigation conditions on melon quality

处理	维生素 C 含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性总糖含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性固形物含量/ %	硝态氮含量/ (μg·g ⁻¹)	游离氨基酸含量/ (μg·g ⁻¹)
F1	(5.13 ± 0.88) ^c	(15.78 ± 1.19) ^a	(7.33 ± 1.84) ^b	(9.57 ± 0.41) ^a	(11.63 ± 1.44) ^b	(20.30 ± 1.99) ^b
F2	(6.70 ± 1.92) ^b	(15.65 ± 0.19) ^{ab}	(8.78 ± 0.89) ^a	(9.33 ± 0.45) ^{ab}	(12.28 ± 3.08) ^a	(24.31 ± 1.33) ^a
F3	(8.66 ± 2.22) ^a	(15.61 ± 0.16) ^{ab}	(8.48 ± 1.02) ^{ab}	(8.62 ± 0.69) ^b	(9.42 ± 1.24) ^c	(16.95 ± 1.88) ^c
W1	(5.51 ± 0.99) ^b	(15.75 ± 0.15) ^{ab}	(7.47 ± 1.29) ^b	(9.43 ± 0.70) ^a	(11.40 ± 2.37) ^b	(17.97 ± 1.61) ^a
W2	(7.17 ± 2.58) ^{ab}	(15.57 ± 0.22) ^a	(9.31 ± 1.33) ^a	(9.40 ± 0.28) ^{ab}	(12.44 ± 2.47) ^a	(17.51 ± 2.12) ^{ab}
W3	(7.82 ± 2.36) ^a	(15.72 ± 0.16) ^{ab}	(7.82 ± 0.98) ^b	(8.68 ± 0.65) ^b	(9.49 ± 1.19) ^c	(17.07 ± 1.32) ^b
T1	(6.24 ± 0.02) ^{cd}	(15.87 ± 0.20) ^a	(5.88 ± 0.37) ^c	(9.87 ± 0.64) ^a	(12.67 ± 1.83) ^{cd}	(18.82 ± 1.02) ^c
T2	(4.46 ± 1.14) ^f	(15.72 ± 0.02) ^{ab}	(8.51 ± 0.28) ^{ab}	(9.57 ± 0.29) ^{abc}	(12.48 ± 2.51) ^{bc}	(18.46 ± 0.97) ^c
T3	(5.83 ± 0.02) ^{de}	(15.65 ± 0.11) ^{ab}	(8.03 ± 0.72) ^{ab}	(8.87 ± 0.81) ^{cd}	(9.05 ± 0.46) ^{abc}	(16.62 ± 2.05) ^c
T4	(4.30 ± 0.28) ^f	(15.63 ± 0.21) ^{ab}	(8.51 ± 1.11) ^{ab}	(9.47 ± 0.06) ^{abcd}	(11.53 ± 0.99) ^{cd}	(15.73 ± 0.82) ^c
T5	(7.17 ± 0.87) ^c	(15.47 ± 0.26) ^b	(9.85 ± 0.55) ^a	(9.63 ± 0.29) ^{ab}	(15.13 ± 2.33) ^d	(15.50 ± 2.83) ^c
T6	(10.03 ± 1.10) ^a	(15.61 ± 0.23) ^{ab}	(9.57 ± 0.50) ^{ab}	(9.10 ± 0.10) ^{bcd}	(10.67 ± 1.10) ^{ab}	(18.31 ± 1.41) ^c
T7	(4.86 ± 0.08) ^{ef}	(15.84 ± 0.02) ^a	(7.60 ± 1.73) ^{bc}	(9.37 ± 0.21) ^{abcd}	(10.69 ± 0.99) ^{ab}	(16.34 ± 2.89) ^b
T8	(8.48 ± 0.18) ^b	(15.75 ± 0.02) ^{ab}	(8.00 ± 0.22) ^{ab}	(8.87 ± 0.10) ^d	(9.23 ± 0.24) ^{abc}	(28.97 ± 3.73) ^a
T9	(10.12 ± 0.64) ^a	(15.55 ± 0.19) ^{ab}	(7.95 ± 0.83) ^{ab}	(7.90 ± 0.10) ^e	(8.55 ± 1.02) ^a	(15.91 ± 1.82) ^c

注:同列数字后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

瓜维生素 C 含量 ($P < 0.01$)、硝态氮含量 ($P < 0.05$) 以及游离氨基酸含量 ($P < 0.01$) 均有显著的影响。

维生素 C 含量随灌水量和施肥量的增长均呈逐渐增大的趋势,在高水高肥水平下达到最大值 10.12 mg/g;可溶性蛋白含量受水肥单因素及交互作用的影响均不显著,9 个处理间的最大差异仅为 2.52%;可溶性总糖含量随灌水和施肥增加均呈先升高再降低的趋势,T5(W2F2)处理下达到最大值;可溶性固形物含量在低水低肥时表现最好,水肥施用量的增加会抑制其形成;硝态氮含量对水肥因素的响应趋势与可溶性总糖含量趋势相反,由于硝态氮是人体有害物质,其含量越少越好;游离氨基酸含量随灌水量增长呈降低趋势,在 T8(W3F2)处理下其含量达到最大值,为 28.97 μg/g。

2.1.4 对甜瓜水肥利用效率的影响

由图 3 可知,水分利用效率受灌水量影响显著,由大到小表现为 W1、W2、W3。在 W1 和 W2 水平下,水分利用效率表现为随施肥量的增加而上升,在 W3 灌水水平下,中肥处理下水分利用率最大,但仅比高肥处理下高 3.0%。肥料偏生产力在不同灌水

2.1.3 对甜瓜品质的影响

甜瓜的维生素 C 含量、可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、可溶性总糖含量、硝态氮含量及游离氨基酸含量 6 个品质指标受不同水肥滴灌条件的影响,如表 2 所示。其中,施肥量对甜瓜维生素 C 含量、可溶性固形物含量、硝态氮含量以及游离氨基酸含量影响显著 ($P < 0.01$),仅可溶性蛋白含量受灌水量影响不显著 ($P > 0.05$),而水肥交互作用对甜

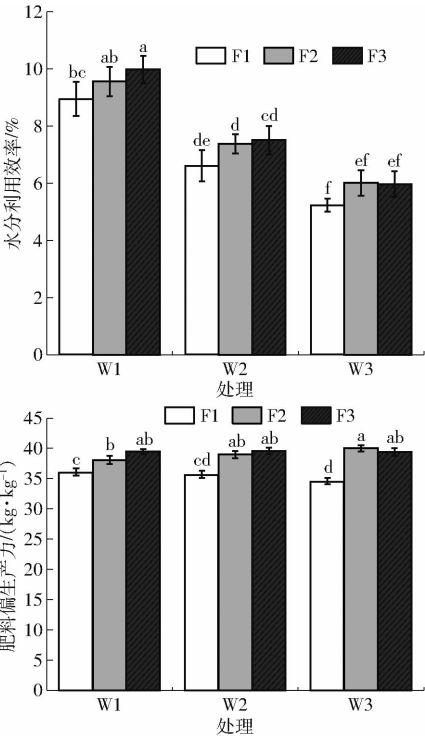


图3 水肥耦合对甜瓜水肥利用效率的影响

Fig.3 Effect of water and fertilizer coupling on water and fertilizer utilization efficiency of melon

水平下差异不大,施用中高肥时无显著性差异。

2.2 融合 TOPSIS 和灰色关联的甜瓜生长综合评价

2.2.1 甜瓜单一指标的相关性分析

为合理建立评价体系,对甜瓜各项指标进行 Spearman 相关性分析(表 3)。结果表明,总干质量与可溶性固形物含量和硝态氮含量均显著正相关,与肥料偏生产力显著负相关;净光合速率与肥料偏生产力、维生素 C 含量极显著正相关;总产量与单果质量、可溶性总糖含量、肥料偏生产力极显著正相

关;单果质量与可溶性总糖含量、肥料偏生产力极显著正相关;维生素 C 含量与肥料偏生产力极显著正相关,与水分利用效率显著负相关;可溶性蛋白含量与可溶性总糖含量极显著正相关,而与游离氨基酸含量和水分利用效率则显著正相关;可溶性固形物含量与硝态氮含量和水分利用率显著正相关;硝态氮含量与水分利用效率显著正相关。表明用甜瓜单一指标反映信息时,其信息间具有一定重叠性,但是每一个指标在反映甜瓜综合生长中不可替代。

表 3 甜瓜单一指标间的 Spearman 相关系数
Tab.3 Spearman correlation coefficient of melon single index

	总干 质量	净光合 速率	总产量	单果 质量	维生素 C 含量	可溶性蛋 白含量	可溶性 总糖含量	可溶性固 形物含量	硝态氮 含量	游离氨基 酸含量	水分利 用效率	肥料偏 生产力
总干质量	1											
净光合速率	-0.310	1										
总产量	-0.221	0.108	1									
单果质量	-0.223	0.175	0.952 **	1								
维生素 C 含量	-0.368	0.512 **	0.183	0.258	1							
可溶性蛋白含量	0.106	-0.183	-0.150	-0.093	-0.258	1						
可溶性总糖含量	-0.190	-0.010	0.637 **	0.585 **	0.129	0.500 **	1					
可溶性固形物含量	0.422 **	-0.187	0.028	0.060	-0.517	0.413	-0.048	1				
硝态氮含量	0.388 *	-0.192	0.242	0.335	-0.299	0.146	0.147	0.744 *	1			
游离氨基酸含量	-0.127	0.081	-0.064	0.031	0.044	0.526 *	-0.204	0.009	-0.025	1		
水分利用效率	0.231	-0.030	0.153	0.283	-0.415 *	0.396 *	-0.131	0.431 *	0.478 *	0.371	1	
肥料偏生产力	-0.442 *	0.448 **	0.681 **	0.801 **	0.591 **	-0.048	0.347	-0.317	-0.025	0.257	0.203	1

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

因此,从经济、社会、生态多方面考量,以生长指标、产量指标、品质指标和效率指标 4 大类进行划分,构成综合生长评价体系的准则层(图 4)。

2.2.2 甜瓜各级指标权重确定

基于 AHP 法确定主观权重结果如表 4 所示, $\lambda_{\max}$ 为最大特征值,甜瓜一级指标权重的最大值为

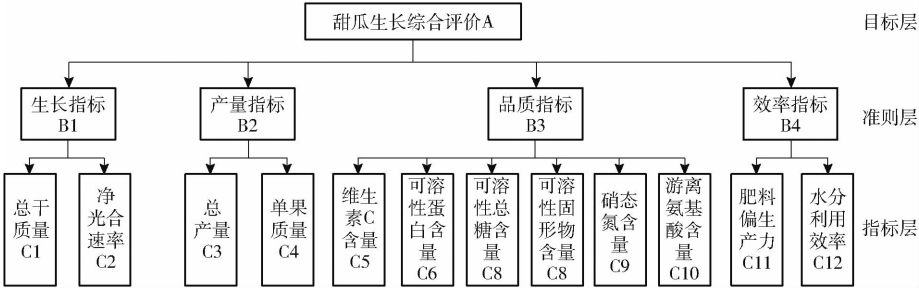


图 4 甜瓜生长综合评价体系
Fig.4 Comprehensive evaluation system for melon growth

产量指标(0.324),其次为生长指标和品质指标,效率指标权重最小,仅为 0.171;各项二级指标中权重 (w_{ij}) 的最大值为总产量 C3,为 0.216,其次是总干质量 C1,达 0.169,最小的游离氨基酸含量 C10 仅为 0.013。

基于熵权法确定客观权重 (w_{2j}) 结果见表 5。其中,产量 C3 权重最大,达 0.359,其次为水分利用效率 C12(0.243)和可溶性总糖含量 C7(0.142)。

通过博弈论组合赋权法确定甜瓜各指标的综合

权重 (W_j^*) 结果见表 6。总产量 C3 的综合权重最大,达 0.343,其次水分利用效率 C12(0.224)和可溶性总糖含量 C7(0.119),游离氨基酸含量 C10 最小,仅为 0.007。

2.2.3 甜瓜生长综合评价

首先,基于 TOPSIS 计算各水肥处理的欧氏距离 D_i^+ 、 D_i^- 分别为

$$D_i^+ = \{0.164\ 1, 0.110\ 5, 0.156\ 1, 0.176\ 7, 0.236\ 7, 0.145\ 9, 0.163\ 7, 0.150\ 7, 0.150\ 1, 0.193\ 6\}$$

表 4 基于 AHP 层次分析法计算权重的结果

Tab.4 Results of weight calculation based on AHP

	局部权重	最终权重	一致性检验参数
目标层 A	0.253	0.253	CR 为 0.09,小于 0.10 $\lambda_{\max}=4$
	0.324	0.324	
	0.252	0.252	
	0.171	0.171	
准则层 B1	0.667	0.169	CR 为 0,小于 0.10 $\lambda_{\max}=2$
	0.333	0.084	
准则层 B2	0.667	0.216	CR 为 0,小于 0.10 $\lambda_{\max}=2$
	0.333	0.108	
准则层 B3	0.212	0.053	CR 为 0.064 8,小于 0.10 $\lambda_{\max}=6$
	0.212	0.053	
	0.061	0.015	
	0.357	0.090	
	0.108	0.027	
准则层 B4	0.050	0.013	CR 为 0,小于 0.10 $\lambda_{\max}=2$
	0.600	0.103	
	0.400	0.069	

表 5 基于熵权法确定的甜瓜单一指标权重

Tab.5 Single index weight of melon determined by entropy weight method

指标 C	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
权重 w_{2j}	0.010	0.021	0.359	0.092	0.004	0.055	0.142	0.002	0.044	0.006	0.022	0.243

表 6 基于组合赋权法确定的甜瓜单一指标权重

Tab.6 Single index weight of melon determined based on combination weighting method

指标 C	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
权重 W_j^*	0.028	0.029	0.343	0.093	0.017	0.055	0.119	0.011	0.043	0.007	0.031	0.224

表 7 基于 GRA – TOPSIS 的甜瓜综合生长评价

Tab.7 Evaluation of melon comprehensive growth based on GRA – TOPSIS

处理	TOPSIS		GRA – TOPSIS	
	得分	排序	得分	排序
T1	0.100	6	0.098	6
T2	0.094	8	0.092	9
T3	0.093	9	0.093	8
T4	0.095	7	0.099	5
T5	0.112	1	0.117	1
T6	0.105	3	0.107	3
T7	0.102	5	0.103	4
T8	0.110	2	0.111	2
T9	0.103	4	0.095	7
CK	0.086	10	0.085	10

分更高,为 0.117。两种评价方法所得到的综合排序位次差最大仅为 3, Spearman 相关系数为 0.930 ($P < 0.01$),表明这两种评价方法的关联度极高^[29]。计算传统 TOPSIS 和 GRA – TOPSIS 两种方法下甜瓜综合评价值的极差分别为 0.026 和 0.032,变异系数分别为 8.08% 和 9.64%;极差和变

$D_i^- = \{0.217\ 9,0.232\ 4,0.220\ 0,0.207\ 8,0.166\ 8,0.193\ 4,0.212\ 7,0.186\ 0,0.198\ 9,1.366\ 3\}$

其次,基于 GRA 确定各水肥处理的灰色关联度 $Y_i^+、Y_i^-$ 为

$Y_i^+ = \{1.006\ 2,1.190\ 0,0.997\ 2,0.980\ 5,1.293\ 7,0.922\ 0,1.038\ 3,1.010\ 8,0.984\ 3,1.076\ 9\}$

$Y_i^- = \{1.001\ 8,1.088\ 6,0.995\ 6,0.975\ 9,1.780\ 9,1.122\ 3,1.135\ 6,1.307\ 1,0.981\ 7,1.282\ 2\}$

在此基础上,耦合 TOPSIS 与灰色关联方案,通过加权处理构建复合贴近度

$S_i^+ = \{0.612\ 0,0.711\ 2,0.608\ 6,0.594\ 2,0.730\ 3,0.557\ 7,0.625\ 5,0.598\ 4,0.591\ 6,1.221\ 6\}$

$S_i^- = \{0.582\ 9,0.599\ 5,0.575\ 9,0.576\ 3,1.008\ 8,0.634\ 1,0.649\ 6,0.728\ 9,0.565\ 9,0.737\ 9\}$

由各水肥处理综合贴近度的归一化得分(表 7)可见,T5 处理在传统 TOPSIS 和 GRA – TOPSIS 两种方法评价下均排名第一,而基于 GRA – TOPSIS 的评

异系数^[21]越大说明综合评价值分辨水平、离散程度越高^[30],对区分不同水肥处理等级具有更强的适宜性。因此,GRA – TOPSIS 方法较传统 TOPSIS 法更有利于直观地区分各水肥处理。

2.3 甜瓜综合生长水肥决策

通过对甜瓜不同水肥用量下的综合评价值进行二次多项式逐步回归拟合,得到综合评价指标对水肥用量的回归方程为

$$Y^* = -0.021\ 9x_1^2 - 0.004\ 4x_1 - 0.035\ 5x_2^2 - 0.006\ 0x_2 + 0.024\ 0x_1x_2 + 0.117\ 3$$

(19)

式中 Y^* ——水肥用量对甜瓜生长、产量、品质和
水肥利用效率的综合评价得分

$x_1、x_2$ ——灌水量、施肥量编码值,取 $-1 \sim 1$
其 $R^2 = 0.950, F = 11.395 > F_{0.01}(5,3), P = 0.001 < 0.01$,水肥耦合对综合评价得分具有显著影响。

2.3.1 水肥因子对甜瓜综合生长的调控效应

为探究水肥单因素对甜瓜综合评价指标的影响,对上述模型降维,得到灌水量和施肥量对甜瓜综合评价指标的单因素效应函数式,分别为

$$Y_1^* = -0.021\ 9x_1^2 - 0.004\ 4x_1 + 0.117\ 3$$

(20)

$Y_2^* = -0.0355x_1^2 - 0.0060x_2 + 0.1173$ (21)
式中 Y_1^* 、 Y_2^* ——灌水量、施肥量对甜瓜综合评价
指标影响的单因素效应函数

灌水量与施肥量对甜瓜综合生长的影响如图 5 所示。随水肥施入量增加,综合评价得分呈现先升后降的趋势,说明水肥二因素符合报酬递减规律,当灌水量编码值 x_1 为 -0.091 、施肥量编码值 x_2 为 -0.084 时,甜瓜综合评价价值最高。

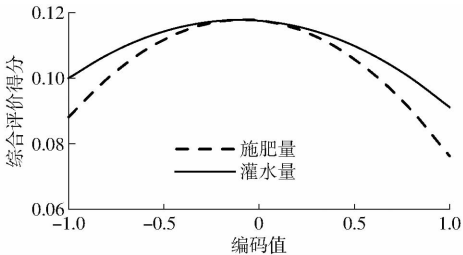


图 5 水肥单因素对甜瓜综合评价得分的调控效应
Fig.5 Regulating effects of single factor for water and fertilizer on comprehensive evaluation value

2.3.2 基于甜瓜综合生长的最优水肥施用量

甜瓜的不同水肥用量对其综合评价价值具有显著影响,通过 Matlab 软件对回归模型进行模拟寻优,得到甜瓜水肥用量的最适区间(图 6)。中水中肥处理使综合评价得分维持在较高水平,在此区间最有利于综合生长。如图 6b 所示,以超过综合评价得分最大值的 90% 确定水肥最佳施用量,即当灌水量在 $810.52 \sim 990.64 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、施肥量在 $853.25 \sim 1\,042.85 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间时,甜瓜生长、产量、品质及水

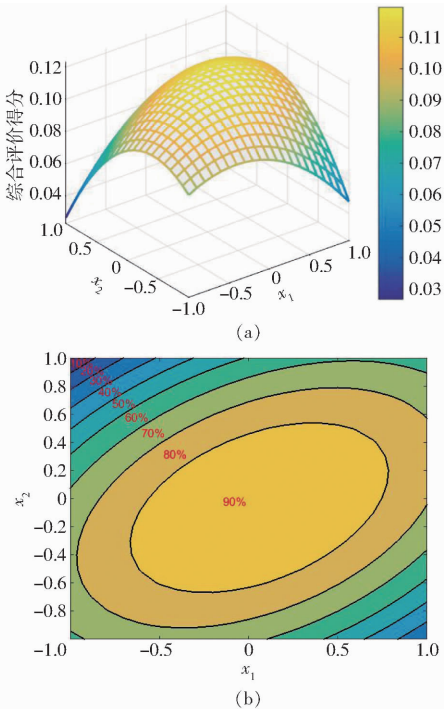


图 6 水肥交互对甜瓜综合评价得分的调控效应
Fig.6 Effect of water – fertilizer interaction on comprehensive score of melon

肥利用效率指标综合最优,最有利于实现甜瓜高产优质高效。

3 讨论

农田水肥管理的目的是在协调灌水和施肥关系达到最优时,实现节水节肥高产优质,因此研究水肥施用量对甜瓜综合生长的影响具有重要意义。在供水充足条件下,增施肥料可以提高甜瓜光合速率,这一结论与张秋英等^[31]在大豆上的研究结果一致。产量和单果质量在 T8(高水中肥)处理下最大,说明在充分灌溉下会促进果实对肥料的吸收,使产量增加^[32]。可溶性蛋白含量和可溶性固形物含量在低水低肥水平下最高,这是因为亏缺灌溉可以减少水分的消耗,降低水分对果实的稀释作用,使果实品质得到提升^[33]。研究结果表明,甜瓜在低水条件下水分利用效率最大,但是肥料偏生产力效果不显著,表明亏缺灌溉下,甜瓜吸水快水分蒸发量少,对于土壤肥料吸收效果不明显^[34]。

为了统筹兼顾不同类别指标,本研究引入 TOPSIS 和灰色关联相结合的方法对甜瓜生长进行综合评价,更准确地解析甜瓜的水肥需求规律。利用 Spearman 相关系数得到甜瓜各生长、产量、品质及水肥利用效率指标之间既有重叠性又有不可替代性,这表明在评价甜瓜生长状况时,为了保证评价的合理性,应综合考虑不同类别指标的相互影响。本研究采用基于主观 AHP 和客观熵权法相结合的组合赋权法对生长、产量、品质、效率的 12 个指标进行赋权,其中总产量综合权重最大,这与李建明等^[35]在西瓜研究上得到的权重排序类似,与高产优质高效的目标相契合。这表明在甜瓜水肥处理时,应该优先考虑产量需求。通过 GRA – TOPSIS 方法,得到 T5 处理的综合评价得分最高,说明在甜瓜生长发育过程中,中水中肥最能促进其综合生长,这与王新等^[36]取得的中水中肥下产量最好的研究结果相同。依据生长、产量、品质、效率 4 大类指标综合协同确定最优灌水施肥制度,可兼顾经济、社会、生态 3 方面,有效指导甜瓜的水肥管理。其中产量和品质是经济效益的最直接指标,刘志刚等^[37]研究表明甜瓜产量和品质最高的同时,纯收入也达到最高,奚辉等^[38]研究表明柑橘产量和品质最高时能提高经济效益 6.73% ~ 25.39%;水肥利用效率则为生态因素的表征,水肥利用效率的提升在节约水肥资源的同时可减少土壤中肥料残留、有效地阻控农田养分损失,加强土壤肥力^[39],而水分利用效率上升时,对土壤团粒结构破坏的程度较小,使土壤水、气、热相对协调^[40],进而改善土壤生态环境。

融合 TOPSIS 和灰色关联多属性的甜瓜综合生长评价方法克服了单一评价模型准确性受限的问题,同时对评价结果进行数学模拟分析,提升了甜瓜水肥用量的合理性,此方法在其他作物的水肥管理上同样适用。但是由于本研究中使用的是复合肥料,尚不能确定是哪一种肥料元素起主导作用,关于氮磷钾肥因子对甜瓜的调控作用有待进一步研究和验证。

4 结论

(1)甜瓜各指标对水肥因素响应不同,基于甜瓜生长、产量、品质、效率4类12个指标构建了综合评价体系,采用主观 AHP 和客观熵权法相结合的博弈论组合赋权法确定各项指标的最终权重。其中总

产量权重最大,达0.343,其次为总干质量,硝铵态氮含量权重最小。

(2)融合 TOPSIS 和灰色关联的耦合方案对甜瓜综合生长进行评价,结合欧氏距离与灰色关联度确定最终贴近度,其中 T5(W2F2)处理贴近度最大,其次为 T8(W3F2)处理,CK 处理最小,表明中肥中高水处理对甜瓜多类指标综合促进最优。

(3)建立了水肥施用量对甜瓜综合生长的调控模型,水肥因素对甜瓜综合生长的影响均呈先升高再降低的趋势,存在最优区间。应用 Matlab 软件解析模型,确定甜瓜水肥的最适施用区间为灌水量 $810.52 \sim 990.64 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,施肥量 $853.25 \sim 1042.85 \text{ kg}/\text{hm}^2$,在此区域最有利于实现甜瓜的优质高效生产。

参 考 文 献

- [1] FARCUH M, COPEL B, LE-NAVENEC G, et al. Sensory, physicochemical and volatile compound analysis of short and long shelf-life melon (*Cucumis melo* L.) genotypes at harvest and after postharvest storage[J]. Food Chemistry: X, 2020, 8: 100 – 107.
- [2] WU Z F, TU M M, YANG X P, et al. Effect of cutting and storage temperature on sucrose and organic acids metabolism in postharvest melon fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 161: 111081.
- [3] BERNACCHI C J, VANLOOKE A. Terrestrial ecosystems in a changing environment: a dominant role for water[J]. Annual Review of Plant Biology, 2015, 66: 599 – 622.
- [4] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impact on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2–3): 117 – 127.
- [5] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778 – 783.
- [6] 原保忠, 千晶晶, 别之龙, 等. 亏缺灌溉对大棚甜瓜果实发育及品质影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2053 – 2059. YUAN Baozhong, QIAN Jingjing, BIE Zhilong, et al. Effects of deficit irrigation on fruit development and quality of muskmelon in greenhouse[J]. Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2053 – 2059. (in Chinese)
- [7] 任瑞丹. 灌溉量对全有机营养甜瓜和番茄水肥利用及产量和品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. REN Ruidan. Effects of irrigation amount on water and fertilizer utilization, yield and quality of melon and tomato with total organic nutrition[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [8] 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 different lower limits of soil moisture on yield and quality of muskmelon under drip irrigation in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 132 – 138. (in Chinese)
- [9] LEASTER G E, JIFON J L, MAKUS D J. Impact of potassium nutrition on postharvest fruit quality: melon (*Cucumis melo* L.) case study[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1): 117 – 131.
- [10] ARAUJO W F, BARROS M M, MEDEIROS R D, et al. Crescimento e produção de melancia submetida a doses de nitrogênio[J]. Revista Caatinga, 2011, 24(4): 80 – 85.
- [11] 张智, 和志豪, 洪婷婷, 等. 基于多层次模糊评判的樱桃番茄综合生长水肥耦合调控[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 278 – 287. ZHANG Zhi, HE Zhihao, HONG Tingting, et al. Coupling regulation of water and fertilizer factors for comprehensive growth of cherry tomatoes based on multi level fuzzy comprehensive evaluation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 278 – 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191232&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.032. (in Chinese)
- [12] 李灿东. 黑龙江省北部大豆主栽品种产量性状主成分分析[J]. 现代化农业, 2020(12): 4 – 8.
- [13] 金宁. 基质栽培黄瓜生长生理、产量及品质对不同灌水下限的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020. JIN Ning. The response of the growth physiology, yield and quality of the species of the species to the lower limit of the water in the matrix[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [14] 张亚琼, 张伟, 戴思兰, 等. 基于 AHP 的中国传统盆栽菊花产业化品种筛选[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4438 – 4446. ZHANG Yaqiong, ZHANG Wei, DAI Silan, et al. Selection of Chinese traditional potted chrysanthemum varieties based on AHP[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4438 – 4446. (in Chinese)
- [15] WANG Y X, ZHU Y F, CHEN B H, et al. Effects of paclobutrazol on the physiological characteristics of *Malus halliana* Koehne seedlings under drought stress via principal component analysis and membership function analysis[J]. Arid Land Research and Management, 2019, 33(1): 97 – 113.

- [16] 何梦婷,张玲玲.基于灰色关联—熵的威海市多水源利用综合效益分析[J].生态经济,2020,36(10):155–159.
HE Mengting, ZHANG Lingling. Comprehensive benefit analysis of multi water source utilization in Weihai City based on grey correlation entropy [J]. Ecological Economy, 2020,36(10): 155–159. (in Chinese)
- [17] LIN S S, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Approach based on TOPSIS and Monte Carlo simulation methods to evaluate lake eutrophication levels[J]. Water Research,2020,187:1–10.
- [18] 秦聪,郭华.基于熵权-TOPSIS法的汾河水质评价[J].水资源开发与管理,2020(9):34–39.
QIN Cong, GUO Hua. Water quality evaluation of Fenhe River based on entropy-TOPSIS method [J]. Water Resources Development and Management,2020(9):34–39. (in Chinese)
- [19] 王文川,马俊清,徐冬梅,等.基于博弈论的灰色关联模型在水利工程方案优选中的应用[J].水利规划与设计,2020(1):55–58.
WANG Wenchuan, MA Junqing, XU Dongmei, et al. Application of grey relational model based on game theory in optimal selection of hydraulic engineering scheme [J]. Water Resources Planning and Design,2020(1):55–58. (in Chinese)
- [20] 严富来,张富仓,范兴科,等.基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J/OL].农业机械学报,2020,51(9):258–265.
YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Optimal irrigation and nitrogen application amounts for spring maize based on evaluation model in sandy soil area in Ningxia[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):258–265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200929&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.029. (in Chinese)
- [21] 田广东,张洪浩,王丹琦.基于模糊AHP-灰色关联TOPSIS的拆解方案评估研究[J].机械工程学报,2017,53(5):34–40.
TIAN Guangdong, ZHANG Honghao, WANG Danqi. Research on disassembly scheme evaluation based on fuzzy AHP and grey relation TOPSIS [J]. Journal of Mechanical Engineering,2017,53(5):34–40. (in Chinese)
- [22] 董鹏宇,王红卫,陈游.区间条件下基于GRA和TOPSIS的辐射源威胁评估[J].控制与决策,2021,36(6):1516–1522.
DONG Pengyu, WANG Hongwei, CHEN You. Combining TOPSIS and GRA for emitter threat evaluation with interval number [J]. Control and Decision,2021,36(6):1516–1522. (in Chinese)
- [23] 付汝勇,张明刚.作物测土配方施肥配方的实用方法——目标产量法,以玉米为例[J].农业科技与信息,2015(8):37–38.
- [24] 张敬敬,李冰,高秀瑞,等.河北省不同厚皮甜瓜品种的品质测定与综合评价[J].黑龙江农业科学,2018(4):116–118.
ZHANG Jingjing, LI Bing, GAO Xiurui, et al. Quality determination and comprehensive evaluation of different thick-skinned muskmelon varieties in Hebei Province [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences,2018(4):116–118. (in Chinese)
- [25] ESRA A, YASEMIN C E. Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: an application of multiple criteria decision making problem[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2004,15(4):491–503.
- [26] 蒋荣超,刘大维,王登峰.基于熵权TOPSIS方法的整车动力学性能多目标优化[J].机械工程学报,2018,54(2):150–158.
JIANG Rongchao, LIU Dawei, WANG Dengfeng. Multi-objective optimization of vehicle dynamics performance based on entropy weight TOPSIS method [J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(2):150–158. (in Chinese)
- [27] 王金祥,赵树恩,杨其芝,等.基于博弈论组合赋权TOPSIS法的汽车碰撞危险态势评估[J].科学技术与工程,2020,20(8):3315–3322.
WANG Jinxiang, ZHAO Shuen, YANG Qizhi, et al. Vehicle crash hazard situation assessment based on game theory combination entropy TOPSIS method [J]. Science Technology and Engineering,2020,20(8):3315–3322. (in Chinese)
- [28] 赵国飞,康天合,郭俊庆,等.基于区间值灰色关联度的煤层气区块生产潜力评价模型及应用[J].采矿与安全工程学报,2020,37(4):794–803.
ZHAO Guofei, KANG Tianhe, GUO Junqing, et al. Evaluation model and application of production potential of coalbed methane block based on interval value grey correlation degree [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2020,37(4):794–803. (in Chinese)
- [29] 付新伟,杨昌其,肖奇.博弈论赋权的空管运行单位安全保障能力GRA-TOPSIS评估模型[J].民航学报,2020,4(4):44–48.
FU Xinwei, YANG Changqi, XIAO Qi. Evaluation model of safety assurance capability of air traffic control units based on game theory [J]. Journal of Civil Aviation of China,2020,4(4):44–48. (in Chinese)
- [30] 徐海峰,张雁,刘江,等.基于变异系数和最大特征树的特征选择方法[J].南京师范大学学报(自然科学版),2021,44(1):111–118.
XU Haifeng, ZHANG Yan, LIU Jiang, et al. Feature selection method based on coefficient of variation and maximum feature tree [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2021,44(1):111–118. (in Chinese)
- [31] 张秋英,刘晓冰,金剑,等.水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2003,1(1):47–50.
ZHANG Qiying, LIU Xiaobing, JIN Jian, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics and yield and quality of soybean[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003,1(1):47–50. (in Chinese)
- [32] SHARMA S P, LESKOVAR D I, CROSBY K M, et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management,2014,136:75–85.
- [33] 张兆辉,姜玉萍,杨晓峰,等.N、P、K配施条件下厚皮甜瓜品质模型的构建[J].中国瓜菜,2014,27(5):21–25.
ZHANG Zhaohui, JIANG Yuping, YANG Xiaofeng, et al. Construction of quality model of muskmelon under N, P and K combined application conditions [J]. China Cucumis and Vegetable,2014,27(5):21–25. (in Chinese)

- crop yields[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 33–38. (in Chinese)
- [25] DAS B, CHAKRABORTY D, SINGH V K, et al. Evaluating fertilization effects on soil physical properties using a soil quality index in an intensive rice-wheat cropping system[J]. Pedosphere, 2016, 26(6): 887–894.
- [26] MASTO R E, CHHONKAR P K, SINGH D, et al. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid inceptisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 118(1–4): 130–142.
- [27] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 16–25.
LI Guilin, CHEN Jie, TAN Manzhi, et al. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 16–25. (in Chinese)
- [28] LI X Y, WANG D Y, REN Y X, et al. Soil quality assessment of croplands in the black soil zone of Jilin Province, China: establishing a minimum data set model[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105251.
- [29] TESFAHUNE G B, TAMENE L, VLEK P L G. Evaluation of soil quality identified by local farmers in Mai-Negus catchment, northern Ethiopia[J]. Geoderma, 2011, 163(3–4): 209–218.
- [30] 卓志清, 李勇, 兴安, 等. 东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 259–268, 336.
ZHUO Zhiqing, LI Yong, XING An, et al. Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 259–268, 336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191030&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.030. (in Chinese)
- [31] 史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 270–279.
SHI Dongmei, JIANG Guangyi, JIANG Ping, et al. Effects of soil erosion factors on cultivated-layer quality of slope farmland in purple hilly area[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 270–279. (in Chinese)
- [32] 刘志鹏, 史东梅, 金慧芳, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018, 6(3): 7–13.
LIU Zhipeng, SHI Dongmei, JIN Huifang, et al. Soil quality and its limitation factors of slope farmland plough layer of red soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, 6(3): 7–13. (in Chinese)
- [33] 葛畅, 刘慧琳, 张世文, 等. 耕作方式和土壤类型对皖北旱作农田土壤紧实度的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 89–94.
GE Chang, LIU Huilin, ZHANG Shiwen, et al. Effect of tillage methods and soil types on characteristics of soil compaction in rainfed farmland in northern Anhui Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 89–94. (in Chinese)
- [34] 石磊, 王娟铃, 许明祥, 等. 陕西省农田土壤紧实度空间变异及其影响因素[J]. 西北农业学报, 2016, 25(5): 770–778.
SHI Lei, WANG Juanling, XU Mingxiang, et al. Spatial variability and influence factors of cropland soil compaction in Shaanxi Province[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25(5): 770–778. (in Chinese)

(上接第 311 页)

- [34] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109–118.
YANG Xiaozhen, ZHANG Xian, MA Jianxiang, et al. Effects of drip irrigation and fertilization on growth, yield and quality of watermelon in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 109–118. (in Chinese)
- [35] 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 Xuwei, et al. Optimization of drip irrigation water and fertilizer system for watermelon based on yield, quality and water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 75–83. (in Chinese)
- [36] 王新, 马富裕, 刁明, 等. 不同施氮水平下加工番茄植株生长和氮素积累与利用率的动态模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1043–1050.
WANG Xin, MA Fuyu, DIAO Ming, et al. Effects of different nitrogen application levels on plant growth, nitrogen accumulation and utilization efficiency of tomato[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1043–1050. (in Chinese)
- [37] 刘志刚, 任红松, 王岩萍, 等. 不同施氮处理对设施甜瓜生长发育、产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(10): 36–41.
LIU Zhigang, REN Hongsong, WANG Yanping, et al. Effects of different nitrogen application treatments on growth, yield and quality of greenhouse muskmelon[J]. China Cucumis and Vegetables, 2019, 32(10): 36–41. (in Chinese)
- [38] 奚辉, 李国雷, 陶安安, 等. 滴灌施用有机液肥对红美人柑橘园土壤环境、柑橘产量、品质和经济效益的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 4(11): 670–677.
XI Hui, LI Guolei, TAO Anan, et al. Effects of drip irrigation on soil environment, yield, quality and economic efficiency of citrus in Red Beauty citrus orchard[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 4(11): 670–677. (in Chinese)
- [39] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
- [40] 戴健, 王朝辉, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 956–965.
DAI Jian, WANG Chaohui, LI Qiang, et al. Effects of nitrogen fertilizer rates on dryland winter wheat yield and soil nitrate nitrogen changes during the summer fallow period[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 956–965. (in Chinese)