

基于博弈论组合确权的模糊物元模型 决策膜下滴灌向日葵调亏模式

滕安国¹, 王泽义²

(1.民乐县洪水河管理处, 甘肃 张掖 734500; 2.甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070)

摘 要:【目的】优选河西绿洲农区膜下滴灌向日葵适宜的水分调控策略。【方法】借助赋权的模糊物元模型, 以大田向日葵为试验对象, 对比评判向日葵产量、品质及水分生产率对不同水分调亏模式的响应结果。试验设置轻度(65%FC~75%FC, FC为田间持水率)、中度(55%FC~65%FC)和重度(45%FC~55%FC)3个亏水梯度, 在向日葵苗期与成熟期实施不同程度调亏组合, 剩余时期保持充分供水, 共计6个处理, 而全生育期充分(85%FC~75%FC)供水作为对照处理, 各处理3次重复, 采用完全随机区组试验布置。【结果】水分调亏对向日葵各指标的影响不同, 建立了向日葵形态、产量、品质及水资源利用4个方面9个指标的多层次综合评价体系, 采用博弈论组合赋权得出2019年株高权重最大, 为0.141, 粗蛋白量最小, 为0.083, 2020年权重最大是粗脂肪, 为0.162, 最小是水分生产率, 为0.065; 基于模糊物元耦合模型进行综合评判, 连续2个生长季综合得分排序一致, 其中苗期轻度或中度且成熟期轻度处理的欧氏贴近度相对最大。【结论】来水充裕时, 苗期轻度且成熟期轻度调亏模式可获得较高的籽粒产量和品质; 来水不足时, 苗期中度且成熟期轻度调亏模式是较佳的节水灌溉模式。

关键词: 向日葵; 水分调亏; 博弈论; 模糊物元; 评价

中图分类号: S274.1; S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022306

OSID: 

滕安国, 王泽义. 基于博弈论组合确权的模糊物元模型决策膜下滴灌向日葵调亏模式[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 22-29.

TENG Anguo, WANG Zeyi. Using Fuzzy Matter-element Model and Weighted Game Theory to Optimize Deficit Irrigation Scheduling for Sunflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 22-29.

0 引言

【研究意义】向日葵(*Helianthus annuus* L.)属1 a 生的菊科草本植物, 其籽含蛋白、脂肪及维生素等多种人体必需营养物质^[1], 既可入药又能用于榨油, 具有丰富的营养和重要的经济价值^[2-3]。2019年我国向日葵种植面积达85万hm², 总产量242.0万t, 其中葵花籽食用消费占比高达70%^[4]。而向日葵适应性较强, 在全国各地均有栽培但多集中于北方冷凉地区, 其中地处西北旱区的河西绿洲冷凉灌区, 因其独有的气候资源条件和地形优势, 向日葵籽粒品质较佳, 其种植规模逐年趋增^[5], 现已成为该区特色和优势经济农作物。然而, 干旱和灌水过多均不利于向日葵根系正常生长, 进而严重影响籽粒产量及其营养品质^[6-7]。但该区向日葵栽培过程中, 灌水方式大多仍为大水漫灌, 水分生产效率极低, 严重制约着向日葵集约化生产, 加之本身地处内陆旱区, 水资源短缺问题突出, 故而亟须探究高效节水灌溉

模式。作物高效节水模式是在确保作物不减产乃至增产的同时, 有效提升水资源利用率并改善产品品质, 以实现农业节水稳产的目标^[8]。而有关向日葵的灌溉试验亦发现, 水分亏缺能在节水的前提下保证葵花籽粒产量, 使其水分生产效率得到明显提升, 从而获得较高的经济收益^[9-10]。因此, 为提高向日葵籽粒产量、品质以及有限灌水资源的利用效率, 推动区域特色农作物高效生产, 调整农业种植结构, 促进农业良性持续发展, 对向日葵膜下调亏滴灌模式进行评判和筛选是十分有必要的。

【研究进展】国内外许多学者先后利用不同的方法对不同作物节水灌溉模式建立了分析评价模型, 如投影寻踪法^[11]、主成分分析法^[12-13]、灰色关联分析法^[14-15]、模糊评价^[16-17]、优劣解距离法^[18-19]等模型, 这些方法各有特点且均在多因子评价中取得了较好的应用效果。然而, 此类评价研究中大多采用单一评价方法, 获取信息的角度和偏向均存在差异, 存在数据变化幅度较大、分布规律难寻的缺点^[20], 另外, 还存在参评因子未赋权或确权结果不均衡的问题, 这直接影响到最终评价结果的准确性。物元分析^[21-22]的本质是推动事物转化, 处理不相容问题,

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(18YFNA073); 国家自然科学基金项目(52269008); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2022CYZC-51)
作者简介: 滕安国(1972-), 男, 正高级工程师, 主要从事水利工程建设管理及节水技术研究。E-mail: tenganguo@126.com

常用于多因素评估问题。而在此基础上，引入模糊量值和欧氏贴近度（距离）的概念，基于多属性将评价对象与标准化方案的接近程度进行排序，所得评判结果更为客观和合理。

【切入点】适宜的灌溉模式对作物栽培非常关键。一方面，作物调亏模式的优选大多依据不同实测指标的定性分析，而基于数学模型的定量评价相对较少；另一方面，向日葵调亏模式决策涉及指标项多且衡量复杂，而有关综合评判的研究较少，针对河西绿洲向日葵在这方面的报道更是少见。【拟解决的关键问题】因此，本文采用模糊物元模型的同时，为提高评判结果的准确性，还借助层次分析法（AHP）和指标重要性相关法（CRITIC），在确定各评价指标主观与客观权重的基础上引入博弈论思想计算组合权重，统筹考虑向日葵形态、产量、品质和水资源利用，以多层次多属性指标对水分效应进行综合评判，从而获得最佳水分调亏模式，为绿洲向日葵的高效节水灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于 2019 年和 2020 年 5—9 月在甘肃农业大学联合科研基地益民灌溉试验进行。该区位于甘肃省民乐县三堡镇（100°43'E，38°39'N，海拔 1 970 m）。试区干燥少雨（多年平均值仅约 200 mm），蒸发量较大（多年均值达 2 000 mm），日照时间久（多年均值为 3 000 h），年无霜期 118 d，昼夜温差大且水源不足。2019 年和 2020 年向日葵生育期总降水量分别为 221.9 mm 和 147.4 mm，有效降水量

（单次降水量>5 mm）分别为 166.1 mm 和 106.9 mm，均集中在 7、8 月。试区土壤为轻质壤土，最大田间持水率（FC）为 24%，土壤体积质量 1.46 g/cm³，pH 值 7.2，0~20 cm 耕层的有机质量、碱解氮量、速效磷量、速效钾量依次为 12.8 g/kg、63.5 mg/kg、13.1 mg/kg、192.7 mg/kg。地下水位较低，无盐碱化现象。

供试向日葵品种为‘JK601’，2019 年 4 月 16 日播种而 9 月 9 日收获，2020 年 4 月 28 日播种而 9 月 15 日收获。试验灌水方式为覆膜滴灌，各小区单元分支球阀和水表精量控制灌水。试验采用单因素随机区组布置，重复 3 次，小区面积 3 m×8 m，株行距 40 cm×55 cm。将向日葵生育期划分为 4 个时期，依次为苗期、现蕾期、开花期和成熟期，考虑地区生产实践，设置 75%~85% 的田间持水率（FC）为充分供水，65%FC~75%FC 为轻度调亏，55%FC~65%FC 为中度调亏，45%FC~55%FC 为重度调亏，水分上下限设计控制与区域实况较为符合。考虑到现蕾期和开花期是向日葵需水临界期，植株受水分亏缺的影响较大，据此试验共设 6 个处理（T1—T6），1 个对照（CK），分别为向日葵苗期和成熟期均轻度调亏处理（T1）、苗期轻度且成熟期中度调亏处理（T2）、苗期中度且成熟期轻度调亏处理（T3）、苗期和成熟期均中度调亏处理（T4）、苗期重度且成熟期轻度调亏处理（T5）、苗期重度且成熟期中度调亏处理（T6）及全生育期均充分供水处理（CK）。2019 年和 2020 年向日葵生长季内灌水量和灌水日期见图 1。

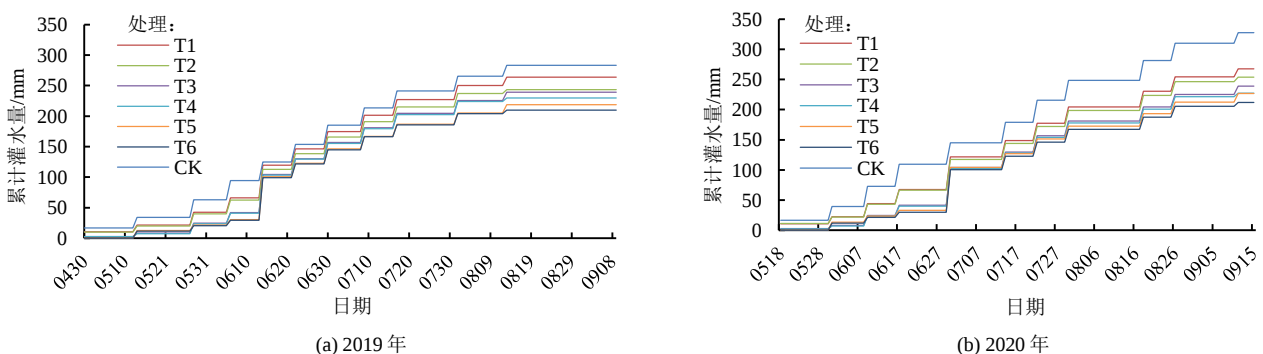


图 1 不同水分亏缺模式下向日葵生育期灌水方案

Fig.1 Irrigation schemes of sunflower growth periods under different water deficit modes

1.2 测试指标及方法

1) 土壤含水率：处理开始后每隔 5~7 d 采用烘干法逐层（取土深度 0~80 cm，每 20 cm 为 1 层）计算土壤含水率，随机选择 2 株向日葵中间连线任意处取样，依据 0~40 cm 计划湿润层（向日葵根系分布层）内土壤含水率均值计算灌水量。在向日葵播前、灌水后及降水后加测。

2) 作物形态指标：各小区随机选取 5 株向日葵植株做标记，用钢卷尺（分度值 1 mm）每 10 天测定 1 次植株株高、叶长宽及盘径，并在停止生长后停止测量；叶面积=叶长×叶宽×0.65。

3) 产量及水分利用效率：成熟期末收获提前标记的 5 株向日葵，测得单株籽粒产量和百粒质量等；水分生产率等于籽粒产量与耗水（灌水）量的比值。

4) 籽粒品质: 葵花籽粗蛋白和粗脂肪量参考文献[23]方法测定。

1.3 模糊物元模型构建

1.3.1 向日葵单一指标权重的确定

1) AHP 法确定主观权重

基于 AHP (Analytic Hierarchy Process) 法^[24]构建评价体系确定主观权重, 通过调查法对各参评指标两两对比打分以确定因子间的重要程度, 按重要性(满意度)用 1~9 及倒数作为打分值, 构造判断矩阵, 并计算其一致性指标 (CI), 查找对应平均随机一致性指标 (RI), 后由 CI 与 RI 相比得到一致性比例 (CR), 若 $CR < 0.1$ 时, 则认为判断矩阵的一致性能够接受, 否则须修正; 最后通过一致矩阵算得参评指标的权重向量。

2) CRITIC 法确定客观权重

基于 CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) 法^[25]确定参评因子(指标)客观权重, 通过因子所在方案(处理)间对比强度与参评因子间冲突性的综合考量得到参评因子所包含的信息量 c_j , 其信息量越大, 参评因子相对越重要, 即对应权重越大。信息量及权重的具体计算式为:

$$c_j = \delta_j \cdot \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad \theta_j = c_j \cdot \sum_{j=1}^m c_j, \quad (1)$$

式中: c_j 表示第 j 个评价因子所包含的信息量; θ_j 表示第 j 个因子的归一化权重; δ_j 为同一因子各方案结果的标准差; r_{ij} 为评价因子间的相关系数; $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

3) 基于博弈论确定组合权重

基于博弈论 (Game Theory) 组合赋权法^[26]确定评价因子综合权重, 既避免了决策者的主观偏好, 又反映了评价对象中客观数据对决策的贡献比重, 提高了评价因子赋权的科学性和评价结论的可靠性。设 L 个 (本文为 2) 权重向量为 $W_k = \{W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}\} (k=1, 2, \dots, L)$, n 参评因子数, L 为权重向量个数。权重线性组合系数 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$, 则组合权重 $w = \sum_{k=1}^L \alpha_k \cdot W_k^T$; 若组合系数 α 最优, 则组合权重 w 最佳。

基于博弈论思想, 在 w 与 W_k 差值最小的目标下优化上述组合系数, 即目标函数: $\min \|\sum_{k=1}^L \alpha_k \cdot W_k^T - w_j\| (j=1, 2, \dots, L)$, 最优化一阶导数条件为: $\sum_{k=1}^L \alpha_k \cdot W_j \cdot W_k^T (j=1, 2, \dots, L)$, 对求得的 α 进行归一化便可得到线性组合系数, 进而得到组合权重 $w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \cdot W_k^T$ 。

1.3.2 模糊物元模型的构建

1) 模糊物元的构建^[27]

物元指由事物的名称 (N) 及其特征 (c) 的量

值 (x) 所构成的有序三元 $R = (N, c, x)$ 的简称, 而当 x 有模糊性的事物称模糊物元。 m 个事物的 n 维物元组合构成复合物元 (R_{mn}), 其中 n 维物元是指事物 N 有 n 个特征及对应量值。若将 R_{mn} 中各特征的值转为模糊性量值, 则称为复合模糊物元 ($\underline{R}_{mn}$)。

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ x_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ x_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\underline{R}_{mn} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ x_1 & u_{11} & u_{21} & \cdots & u_{m1} \\ x_2 & u_{12} & u_{22} & \cdots & u_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_n & u_{1n} & u_{2n} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: R_{mn} 和 $\underline{R}_{mn}$ 分别指 m 个事物 n 维的复合物元及对应复合模糊物元; N_i 指第 i 个事物, $i=1, 2, \dots, n$; c_k 指第 k 个特征, $k=1, 2, \dots, n$; x_{ik} 和 u_{ik} 分别指第 i 个事物第 k 项特征的量值及对应模糊量值。

各单项参评因子均有相应的模糊量值, 而从属于标准方案各参评因子对应的模糊量值隶属程度, 称为从优隶属度。针对一般不同类型参评因子的模糊量值计算式为:

$$\text{效益型: } u_{ik} = x_{ik} / \max x_{ik}, \quad (4)$$

$$\text{成本性: } u_{ik} = \min x_{ik} / x_{ik}, \quad (5)$$

式中: x_{ik} 与 u_{ik} 分别是第 i 个事物 (方案) 第 k 项特征 (因子) 对应的量值和模糊量值; $\max x_{ik}$ 与 $\min x_{ik}$ 分别是各事物中每项特征所有量值 x_{ik} 中的最大和最小值。

2) 差平方复合模糊物元的构建

从各方案的从优隶属度中提取最大或最小值组成 n 维标准模糊物元 R_{0n} , 而由 R_{0n} 与 $\underline{R}_{mn}$ 中各项差的平方值 Δ_{ij} 构成差平方复合模糊物元矩阵 R_{Δ} , 即:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ x_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\ x_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3) 加权欧氏贴近度的计算及综合评价

运用 $M(\cdot, +)$ 算法, 则

$$\rho H_j = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^* \cdot \Delta_{ij}}, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

$$S = \rho H_j / \sum_{j=1}^m \rho H_j, \quad (8)$$

式中: ρH_j 为第 j 个方案与标准方案间的相互接近程度; S 为归一化后欧氏贴近度; w_i^* 为特征 (参评因子) 的组合权重。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 (Microsoft Corp., Raymond, Washington, USA) 计算数据 3 次重复的均值和制表;

Edraw Max10.1.2 (Shenzhen Yitu Software Co., LTD, Shenzhen, CN) 软件建立递阶层次评价体系; Matlab2017b (MathWorks, Corp., Natick, Massachusetts, USA) 解析模型。借助 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件 Duncan 法进行在 5%水平的显著性检验。*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

2 结果与分析

2.1 单个指标的相关性分析

选取向日葵株高 (h, x_1)、叶面积系数 (LAI, x_2)、盘径 (D, x_3)、百粒质量 (BM, x_4)、产量 (Y, x_5)、粗脂肪 (CF, x_6)、粗蛋白 (CP, x_7)、灌溉水生产率

(IWP, x_8) 和水分生产率 (WP, x_9), 共计 9 项指标作为参评指标, 如表 1 所示。为了合理构建综合评价体系, 首先对向日葵各项参评指标进行简单相关性分析, 具体结果如图 2 所示。2 a 研究表明, h 与 LAI 、 D 、 BM 及 Y 正相关且呈显著或极显著水平, 而与 WP 显著负相关; LAI 与 D 、 BM 及 Y 均极显著正相关, 与 CF 显著正相关; D 与 BM 和 Y 极显著正相关; BM 与 Y 极显著正相关, 与 CP 显著正相关; Y 与 CF 和 CP 显著正相关; CF 与 CP 极显著正相关。可见只用向日葵单个指标反馈试验效应时, 其效应间可能存在一定重叠性, 且无法全面体现作物水分亏缺效应, 须进一步进行综合分析评判。

表 1 不同水分调亏模式下各参评指标的试验结果

Table 1 Experimental results of each evaluation indicator under different water deficit modes

年份	指标	T1 处理	T2 处理	T3 处理	T4 处理	T5 处理	T6 处理	CK
2019	h/cm	283.20b	282.80b	271.50c	273.00c	257.10d	256.40d	293.20a
	LAI	3.70a	3.30bc	3.60ab	3.20c	3.00c	2.60d	3.80a
	D/cm	29.80a	28.00b	27.90b	26.10c	24.90d	23.70d	28.10b
	BM/g	25.70a	23.60b	24.80ab	21.90c	20.70cd	20.30d	25.30a
	$Y/(kg\ hm^{-2})$	4\ 223.00a	4\ 012.00bc	4\ 145.00ab	3\ 859.00c	3\ 662.00d	3\ 505.00d	4\ 182.00ab
	$CF/\%$	36.20a	33.60ab	37.20a	34.30ab	31.30bc	29.40c	33.60ab
	$CP/\%$	23.00ab	22.00bc	23.70a	21.40cd	20.00e	18.50f	20.60de
	$IWP/(kg\ hm^{-2}\ mm^{-1})$	16.00b	16.50ab	17.30a	16.80ab	16.80ab	16.70ab	14.80c
2020	$WP/(kg\ hm^{-2}\ mm^{-1})$	9.40bc	9.40bc	10.10a	9.60ab	9.30bc	9.20bc	9.00c
	h/cm	222.10a	221.90a	205.20b	204.80b	190.40c	189.30c	225.70a
	LAI	3.80b	3.20d	3.50c	2.90e	2.50f	2.30f	4.10a
	D/cm	28.20a	28.30a	27.30b	27.30b	24.80c	24.40c	27.90ab
	BM/g	21.90a	21.50b	21.50b	20.80c	19.60d	19.10e	22.00a
	$Y/(kg\ hm^{-2})$	4\ 863.20a	4\ 749.60ab	4\ 798.20a	4\ 696.30ab	4\ 533.00bc	4\ 357.50c	4\ 867.90a
	$CF/\%$	32.20a	30.50b	32.00a	30.10bc	31.20ab	29.40c	32.20a
	$CP/\%$	17.80ab	17.20cd	17.60bc	16.90de	17.20cd	16.50e	18.20a
	$IWP/(kg\ hm^{-2}\ mm^{-1})$	18.20d	18.70c	20.10b	20.60a	20.00b	20.60a	14.90e
	$WP/(kg\ hm^{-2}\ mm^{-1})$	12.10c	12.10c	12.70a	12.70a	12.80a	12.50b	11.20d

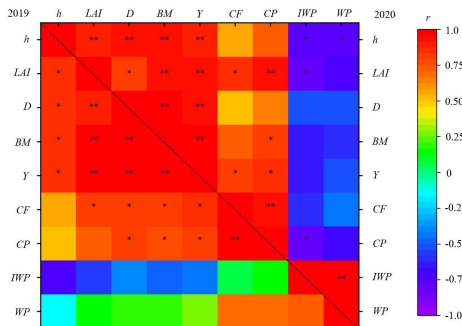


图 2 单个指标间的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of single indicators

为此, 从经济、生态和资源利用等多角度考虑, 以向日葵形态指标、产量及构成要素、品质指标和水资源利用 4 个方面表现进行划分, 构建包括目标层、准则层及指标层的多层次综合评价体系。具体递阶层次结构如图 3 所示。

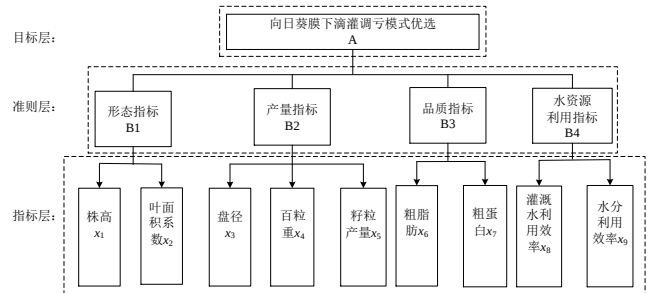


图 3 向日葵生长综合评价体系

Fig.3 Comprehensive evaluation system of edible sunflower growth

2.2 模糊物元评价模型的构建

向日葵膜下滴灌水分调亏方案共有 7 个, 即 N (事物) 为 7。根据式 (4) 和式 (5) 计算各方案中 9 项评价指标的模糊性量值 (从优隶属度), 得到复合模糊物元 R_{mn} , 即:

2019	T1 N_1	T2 N_2	T3 N_3	T4 N_4	T5 N_5	T6 N_6	CK N_7
x_1	0.965 795	0.964 328	0.925 997	0.930 839	0.876 820	0.874 331	1.000 000
x_2	0.960 836	0.851 175	0.929 504	0.827 676	0.772 846	0.678 851	1.000 000
x_3	1.000 000	0.940 920	0.934 877	0.877 476	0.834 508	0.796 240	0.943 941
$R_{mn} = x_4$	1.000 000	0.917 835	0.963 785	0.854 361	0.805 296	0.788 551	0.985 981
x_5	1.000 000	0.950 036	0.981 530	0.913 805	0.867 156	0.829 979	0.990 291
x_6	0.973 140	0.901 961	1.000 000	0.922 374	0.841 257	0.790 492	0.901 961
x_7	0.973 362	0.930 655	1.000 000	0.904 017	0.845 666	0.781 818	0.872 304
x_8	0.924 409	0.950 952	1.000 000	0.968 263	0.967 109	0.964 224	0.852 279
x_9	0.931 480	0.933 466	1.000 000	0.955 313	0.924 528	0.912 612	0.897 716
2020	T1 N_1	T2 N_2	T3 N_3	T4 N_4	T5 N_5	T6 N_6	CK N_7
x_1	0.983 698	0.982 945	0.908 789	0.907 150	0.843 625	0.838 620	1.000 000
x_2	0.924 205	0.772 616	0.843 521	0.709 046	0.618 582	0.559 902	1.000 000
x_3	0.995 411	1.000 000	0.963 643	0.963 643	0.875 397	0.862 337	0.985 881
$R_{mn} = x_4$	0.998 634	0.978 597	0.979 053	0.947 632	0.892 532	0.871 129	1.000 000
x_5	0.998 815	0.975 690	0.985 672	0.964 734	0.931 193	0.895 151	1.000 000
x_6	0.999 689	0.949 332	0.993 472	0.935 965	0.969 537	0.912 341	1.000 000
x_7	0.982 369	0.946 006	0.970 248	0.928 375	0.946 006	0.910 193	1.000 000
x_8	0.883 495	0.907 767	0.975 728	1.000 000	0.970 874	1.000 000	0.723 301
x_9	0.945 313	0.945 313	0.992 188	0.992 188	1.000 000	0.976 563	0.875 000

取复合模糊物元中各指标行的最大值组成标准模糊物元 R_{0n} , 即 $u_{0i}=1.0, i=1, 2, \dots, 9$ 。然后依据式

(6) 计算各方案相应指标的差平方值 Δ_{ij} , 从而得到差平方复合模糊物元 R_{Δ} , 即:

2019	T1 N_1	T2 N_2	T3 N_3	T4 N_4	T5 N_5	T6 N_6	CK N_7
x_1	0.001 170	0.001 272	0.005 476	0.004 783	0.015 173	0.015 793	0.000 000
x_2	0.001 534	0.022 149	0.004 970	0.029 695	0.051 599	0.103 137	0.000 000
x_3	0.000 000	0.003 490	0.004 241	0.015 012	0.027 388	0.041 518	0.003 143
$R_{\Delta} = x_4$	0.000 000	0.006 751	0.001 312	0.021 211	0.037 910	0.044 711	0.000 197
x_5	0.000 000	0.002 496	0.000 341	0.007 430	0.017 648	0.028 907	0.000 094
x_6	0.000 721	0.009 612	0.000 000	0.006 026	0.025 199	0.043 894	0.009 612
x_7	0.000 710	0.004 809	0.000 000	0.009 213	0.023 819	0.047 603	0.016 306
x_8	0.005 714	0.002 406	0.000 000	0.001 007	0.001 082	0.001 280	0.021 821
x_9	0.004 695	0.004 427	0.000 000	0.001 997	0.005 696	0.007 637	0.010 462
2020	T1 N_1	T2 N_2	T3 N_3	T4 N_4	T5 N_5	T6 N_6	CK N_7
x_1	0.000 266	0.000 291	0.008 319	0.008 621	0.024 453	0.026 044	0.000 000
x_2	0.005 745	0.051 703	0.024 486	0.084 654	0.145 480	0.193 686	0.000 000
x_3	0.000 021	0.000 000	0.001 322	0.001 322	0.015 526	0.018 951	0.000 199
$R_{\Delta} = x_4$	0.000 002	0.000 458	0.000 439	0.002 742	0.011 549	0.016 608	0.000 000
x_5	0.000 001	0.000 591	0.000 205	0.001 244	0.004 734	0.010 993	0.000 000
x_6	0.000 000	0.002 567	0.000 043	0.004 100	0.000 928	0.007 684	0.000 000
x_7	0.000 311	0.002 915	0.000 885	0.005 130	0.002 915	0.008 065	0.000 000
x_8	0.013 573	0.008 507	0.000 589	0.000 000	0.000 848	0.000 000	0.076 562
x_9	0.002 991	0.002 991	0.000 061	0.000 061	0.000 000	0.000 549	0.015 625

2.3 向日葵各级指标权重的确定

基于 AHP 法计算的主观权重结果如表 2 所示, 采用特征值法求解权重向量且结果均通过一致性检验, 即 $CR < 0.1$, 其中向日葵一级指标权重结果中产

量指标最大 (0.374), 其次为形态指标和品质指标, 水资源利用指标权重最小, 为 0.147; 各二级指标权重结果中最大值为百粒质量, 为 0.141, 籽粒产量次之, 为 0.135, 水分生产率最小, 仅为 0.063。

表 2 基于 AHP 法计算各指标主观权重的结果

Table 2 Results of calculating the subjective weight of each index based on AHP

指标	目标层 A				准则层 B1		准则层 B2			准则层 B3		准则层 B4	
局部权重	0.224	0.374	0.255	0.147	0.600	0.400	0.261	0.377	0.362	0.667	0.333	0.571	0.429
最终权重	0.224	0.374	0.255	0.147	0.134	0.090	0.098	0.141	0.135	0.170	0.085	0.084	0.063
一致性检验	CR 为 0.021, <0.10				CR 为 0, <0.01		CR 为 0.017, <0.10			CR 为 0, <0.10		CR 为 0, <0.10	

基于 CRITIC 法确定的客观权重结果如表 3 所示。2019 年株高和水分生产率权重相对较大，分别为 0.150 和 0.151，而粗脂肪和粗蛋白相对最小，分别为 0.078 和 0.081；2020 年株高权重最大，为 0.145，其次是粗脂肪，为 0.137，而最小是灌溉水生产率，为 0.059。可见，2 a 的计算结果有所差异，这主要与该方法以指标实测结果间的对比强度和冲突性来确权有关。

表 3 基于 CRITIC 法计算各指标客观权重的结果

Table 3 Results of calculating the objective weight of each indicator based on CRITIC

年份	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
2019	0.150	0.104	0.093	0.113	0.096	0.078	0.081	0.135	0.151
2020	0.145	0.114	0.132	0.117	0.105	0.137	0.119	0.059	0.072

基于博弈论组合确权法计算向日葵的综合权重结果如表 4 所示。2019 年综合权重值最大为株高 (0.141)，粗脂肪 (0.131) 次之，粗蛋白 (0.083) 最小；2020 年综合权重值最大为粗脂肪 (0.162)，其次是株高 (0.137)，最小是水分生产率 (0.065)。

表 4 基于博弈论法计算各指标组合权重的结果

Table 4 Results of weight calculation of each index combination based on game theory method

年份	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
2019	0.141	0.096	0.096	0.129	0.118	0.131	0.083	0.106	0.100
2020	0.137	0.096	0.106	0.135	0.128	0.162	0.094	0.078	0.065

2.4 基于模糊物元模型的向日葵调亏模式综合评价

基于模糊物元模型计算的 2 a 欧氏贴近度及其归一化排序如表 5 所示。利用式 (6) 差平方复合模糊物元 R_Δ 和表 4 得出的组合权重系数，由式 (7) 分别计算得到各方案欧式贴近度 ρH ，然后经式 (8) 归一化并排序。

表 5 欧式贴近度及其归一化得分排序

Table 5 Euclidean closeness and its normalized score ranking

处理	2019 年			2020 年		
	贴近度 ρH	归一化 S	排序	贴近度 ρH	归一化 S	排序
T1	0.960 751	0.152 077	1	0.956 748	0.151 764	1
T2	0.921 508	0.145 865	3	0.918 261	0.145 659	3
T3	0.956 840	0.151 458	2	0.937 945	0.148 781	2
T4	0.897 840	0.142 119	5	0.894 577	0.141 902	5
T5	0.849 488	0.134 465	6	0.853 033	0.135 312	6
T6	0.810 546	0.128 301	7	0.827 285	0.131 228	7
CK	0.920 554	0.145 714	4	0.916 333	0.145 353	4

据归一化的欧氏贴近度排序结果可知，8 种水分调亏模式的节水灌溉方案 2 a 的排序结果一致，从优到劣依次为 T1 处理>T3 处理>T2 处理>CK>T4 处理>T5 处理>T6 处理。由此可以作出评价：河西绿洲膜下滴灌向日葵最佳水分调亏模式为 T1 处理，即苗期和成熟期均轻度 (65%FC~75%FC) 水分亏缺，而 T3 处理，即苗期中度 (55%FC~65%FC) 而成熟期轻度 (65%FC~75%FC) 可作为备用模式，且与试验数据结果一致。

3 讨论

本研究引入物元模型与模糊性量值 (从优隶属度) 耦合的方法，建立多层次综合评价体系以统筹兼顾不同属性指标对向日葵膜下滴灌调亏效应进行综合评判，定量化筛选出最佳滴灌调亏模式。借助双变量相关系数得出向日葵形态、产量、品质及水资源利用率指标之间存在重叠性，而仅用单个指标无法代表全面作物生物效应，这说明在评判向日葵调亏效应时，应全面考量不同属性指标间的相互影响以保证评判的科学性。

本研究首先分别基于 AHP 法和 CRITIC 法确定参评指标的主观与客观权重，然后为有效互补主观或客观单一赋权法的劣势，利用博弈论组合确权法均衡后对形态、产量、品质和水资源利用率 4 个方面 9 个指标进行赋权，其中株高的组合权重较大，表明在向日葵水分处理时，应该考虑其对茎秆生长发育的影响，这与汪顺生等^[28]和孙继鹏等^[29]在玉米研究上得到的权重排序不同，分析原因可能与作物品种和栽培环境有关。通过模糊隶属度和物元模型方法，对向日葵连续 2 个生长季不同调亏结果进行综合评判，均得到 T1 处理综合得分最高 (2019 年：0.152 077，2020 年：0.151 764)，T2 处理次之 (2019 年：0.145 865，2020 年：0.145 659)，说明在向日葵生长发育过程中，苗期轻度或中度+成熟期轻

度水分调亏较能促进其综合生长,这与李建军^[30]和王璐等^[31]取得的研究结果相同。

物元分析理论和模糊量值耦合的向日葵调亏灌溉效应多层次多属性综合评价方法克服了单一评价模型可靠性受限的问题,而博弈论组合确权法均衡了由主观或客观法赋权法的优劣,从而提升了向日葵膜下滴灌节水灌溉方案优选的合理性,此方法在同类作物的灌溉效应分析与评判上同样适用。该评价模型亦有不足之处,如未将成本、收益、单方水效益、农民喜好度等经济及社会评价指标纳入综合评价体系,这对评价结果存在一定的影响,今后可在上述基础上进一步统筹考虑拓展评价模型,以期为该方法在节水灌溉领域的决策或优选提供相应的科学借鉴。

4 结论

1) 基于向日葵形态、产量、品质、水资源利用 4 个方面 9 个指标构建了多层次评价体系,在 AHP 法和 CRITIC 法求得主观和客观权重的基础上借助博弈论的均衡思想,最终确定各项参评指标的组权重值。其中 2019 年株高权重最大,为 0.141,粗蛋白量最小,为 0.083,2020 年权重最大是粗脂肪,为 0.162,最小是水分利用效率,为 0.065。

2) 基于博弈论组合赋权而改进的模糊物元模型对向日葵水分调亏效应进行综合评判,由赋予组合权重的欧氏贴近度可知,其中,T1 处理的贴近度最大,其次为 T3 处理,T6 处理最小,表明苗期轻度或中度+成熟期轻度处理对向日葵多类指标综合促进最优。

参考文献:

- [1] 赵轩微,赵雅杰,田振东,等.向日葵干物质转运及产量对播种期和栽培密度的响应[J].作物杂志,2021(3): 185-189.
ZHAO Xuanwei, ZHAO Yajie, TIAN Zhendong, et al. Response of dry matter transportation and yield to sowing date and planting density on sunflower[J]. Crops, 2021(3): 185-189.
- [2] NISAR M, HUSSAIN S, KHAN N, et al. Chemical composition of open pollinated and hybrid population of sunflower (*Helianthus annuus* L.)[J]. Pakistan Journal of Botany, 2011, 43(1): 157-164.
- [3] 贾晓军,丁变红,杨芬,等.食用向日葵主要农艺性状与产量的多元分析[J].中国农学通报,2019,35(4): 1-6.
JIA Xiaojun, DING Bianhong, YANG Fen, et al. Multivariate analysis of main agronomic traits and yield of edible sunflower[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(4): 1-6.
- [4] 郭树春,李素萍,孙瑞芬,等.世界及我国向日葵产业发展总体情况分析[J].中国种业,2021(7): 10-13.
GUO Shuchun, LI Suping, SUN Ruifen, et al. Analysis of the overall situation of sunflower industry development in the world and China[J]. China Seed Industry, 2021(7): 10-13.
- [5] 陈谢田.河西绿洲冷凉灌区膜下滴灌食用向日葵水分调控效应研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
CHEN Xietian. Effect of drip irrigation under mulch on water regulation of edible sunflower in cold irrigation area of Hexi oasis[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.

- [6] 杨黎,魏占民,徐大为,等.膜下滴灌不同水氮组合对向日葵生长及水氮利用的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(3): 50-55.
YANG Li, WEI Zhanmin, XU Dawei, et al. Growth and water-nitrogen use efficiency of sunflower under mulched drip fertigation with different water-nitrogen ratios[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 50-55.
- [7] 贾腾月,姬宝霖,李仙岳,等.微润灌溉定额及微润带埋深对农田水盐动态及向日葵水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2019,33(3): 283-291.
JIA Tengyue, JI Baolin, LI Xianye, et al. Effects of moisture-irrigation quota and buried depth on soil water and salt dynamics of farmland and water use efficiency of sunflower[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 283-291.
- [8] 徐文静,王翔翔,施六林,等.中国节水灌溉技术现状与发展趋势研究[J].中国农学通报,2016,32(11): 184-187.
XU Wenjing, WANG Xiangxiang, SHI Liulin, et al. Current condition and developing tendency of water-saving irrigation technology in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(11): 184-187.
- [9] 单玉芬,王立坤,马永胜,等.不同水分亏缺对向日葵产量、水分利用效率及经济效益的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(7): 70-74.
SHAN Yufen, WANG Likun, MA Yongsheng, et al. Effect of different water deficit on yield, water use efficiency and economic benefit of sunflower[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(7): 70-74.
- [10] MILA A J, ALI M H, AKANDA A R, et al. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic return of sunflower[J]. Cogent Food & Agriculture, 2017, 3(1): 1 287 619.
- [11] 王柏,张忠学,李芳花,等.基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价[J].农业工程学报,2012,28(2): 84-89.
WANG Bai, ZHANG Zhongxue, LI Fanghua, et al. Comprehensive evaluation of regulated deficit irrigation using projection pursuit model based on improved double chains quantum genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 84-89.
- [12] 贺新,杨培岭,任树梅,等.基于主成分分析的油菜微咸水调亏灌溉灌水效果评价[J].农业机械学报,2014,45(S1): 162-167, 132.
HE Xin, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Evaluation of regulated deficit irrigation performance with saline water based on principal component analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 162-167, 132.
- [13] LI F Q, DENG H L, WANG Y C, et al. Potato growth, photosynthesis, yield, and quality response to regulated deficit drip irrigation under film mulching in a cold and arid environment[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 15 888.
- [14] 张超,郑恩楠,张忠学.基于灰色关联投影模型大豆高产栽培调亏灌溉制度评价[J].节水灌溉,2017(6): 38-40, 45.
ZHANG Chao, ZHENG Ennan, ZHANG Zhongxue. Evaluation of high yield cultivation and regulated deficit irrigation system of soybean based on grey relation projection model[J]. Water Saving Irrigation, 2017(6): 38-40, 45.
- [15] CUI Y, JIANG S M, JIN J L, et al. Decision-making of irrigation scheme for soybeans in the Huaibei plain based on grey entropy weight and grey relation-projection pursuit[J]. Entropy, 2019, 21(9): 877.
- [16] 王泽义,滕安国,张恒嘉,等.基于模糊综合评价模型的绿洲马铃薯调亏灌溉制度评价[J].中国水运(下半月),2021,21(9): 45-47, 50.
WANG Zeyi, TENG Anguo, ZHANG Hengjia, et al. Evaluation of regulated deficit irrigation system of oasis potato based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. China Water Transport, 2021, 21(9): 45-47, 50.
- [17] XIU W Y, 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.
- [18] 秦海霞,张玉顺,张昆,等.基于TOPSIS黄淮海平原井灌区冬小麦调亏灌溉的多目标优化[J].作物杂志,2021(3): 202-209.
QIN Haixia, ZHANG Yushun, ZHANG Kun, et al. Multi-objective

- optimization of regulated deficit irrigation for winter wheat based on TOPSIS in Huang-Huai-Hai plain well irrigation area[J]. *Crops*, 2021(3): 202-209.
- [19] 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: 116-137.
- [20] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- ZHANG Zhi, YANG Zhi, LI Jinglai, et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- [21] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- CAI Wen. The elementary model and its applications[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1994.
- [22] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 316-322.
- HUANG Huiling, LUO Wenbin, WU Cifang, et al. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 316-322.
- [23] 王秀荣, 廖红, 严小龙. 应用近红外光谱分析法测定大豆种子蛋白质和脂肪含量的研究[J]. *大豆科学*, 2005, 24(3): 199-201.
- WANG Xiurong, LIAO Hong, YAN Xiaolong. Study on analyzing soybean protein and oil contents by near-infrared spectroscopy[J]. *Soybean Science*, 2005, 24(3): 199-201.
- [24] ALBAYRAK E, ERENSAL Y C. 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.
- [25] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(7): 763-770.
- [26] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 622-628.
- SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(6): 622-628.
- [27] 张斌, 雍歧东, 肖芳淳. 模糊物元分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- ZHANG Bin, YONG Qidong, XIAO Fangchun. Fuzzy element analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [28] 汪顺生, 薛红利. 基于熵权的模糊物元模型优选夏玉米沟灌方式[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(4): 362-368.
- WANG Shunsheng, XUE Hongli. Optimization of fuzzy matter element model based on entropy for summer maize in furrow irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(4): 362-368.
- [29] 孙继鹏, 魏永霞, 冯鼎锐, 等. 黑龙江西部玉米调亏灌溉评价-基于熵权的模糊物元模型[J]. *农机化研究*, 2016, 38(12): 149-154.
- SUN Jipeng, WEI Yongxia, FENG Dingrui, et al. Evaluation on regulated deficit irrigation of maize in western Heilongjiang Province with fuzzy matter element models based on entropy[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(12): 149-154.
- [30] 李建军. 深入分析不同水分亏缺对向日葵产量、水分利用效率及经济效益的影响[J]. *农家参谋*, 2019(11): 83, 107.
- LI Jianjun. The effects of different water deficit on sunflower yield, water use efficiency and economic benefits were deeply analyzed[J]. *The Farmers Consultant*, 2019(11): 83, 107.
- [31] 王璐, 张恒嘉, 巴玉春, 等. 河西绿洲膜下滴灌调亏对食用向日葵水特征、光合特性及品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 209-216.
- WANG Lu, ZHANG Hengjia, BA Yuchun, et al. Effects of drip irrigation deficit adjustment under mulch on water consumption, photosynthetic characteristics, and quality of edible sunflower in Hexi oasis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 209-216.

Using Fuzzy Matter-element Model and Weighted Game Theory to Optimize Deficit Irrigation Scheduling for Sunflower

TENG Anguo¹, WANG Zeyi²

(1. Minle Hongshui River Administration Office, Zhangye 734500, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】Sunflower is a cash crop grown in arid northwestern China. Improving its water use efficiency plays an important role in developing water-saving agriculture in that region. The aim of this paper is to find an optimal regulated and mulched deficit drip irrigation scheduling for it. 【Method】The experiment was conducted in 2019—2020 in a sunflower field at Hexi Oasis. Water deficit was imposed at seedling and maturity stages, with soil water in other growing stages kept sufficient for roots to extract. Overall, there were six treatments, with the water deficit induced by keeping the soil water content at 75%~65% (mild), 65%~55% (moderate) and 55%~45% (severe) of the field capacity, respectively. The control was sufficient irrigation with the soil water content kept at 75%~85% of the field capacity. Each treatment had three replicates, which were designed using the completely random block experiment arrangement. The experimental results were analyzed using an improved fuzzy matter-element model coupled with the weighted game theory to quantify the effect of different water deficits on yield and quality, as well as water productivity of the crop. 【Result】The effect of water deficit on the crop traits varied. A multi-level evaluation system revealed that in 2019, crop height had the highest weight (0.141) and the crude protein content had the least (0.083), while in 2020, crude fat content had the highest weight (0.162) and water use efficiency had the least (0.065). Comprehensive evaluation of the fuzzy matter-element model showed that the Euclidean degree was the best for a combination of mild or moderate water deficit at seedling stage and mild water deficit at maturity stage. 【Conclusion】When water is sufficient, a mild regulated deficit irrigation (RDI) at the seedling stage coupled with a mild RDI at the maturity stage produces the highest seed yield, while when water is insufficient, a moderate RDI at the seedling stage combined with a mild RDI at the maturity stage works the best. The proposed model for optimizing regulated deficit irrigation is applicable not only for sunflower watered by mulched drip irrigation, but also for other crops irrigated by other methods.

Key words: sunflower; water regulation deficit; game theory; fuzzy matter element; evaluation

责任编辑: 赵宇龙