

李晓航, 盛 坤, 蒋志凯, 等. 基于多层次模糊评判法对小麦调亏沟灌方式的分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3) : 635-641.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.03.008

基于多层次模糊评判法对小麦调亏沟灌方式的分析

李晓航^{1,2}, 盛 坤^{1,2}, 蒋志凯¹

(1. 河南省新乡市农业科学院, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002)

摘要: 为选择适宜的冬小麦农田沟灌方式实现水分高效利用, 本研究运用多层次的模糊综合评判法, 通过构建多层次多因素的指标体系对不同沟灌方式进行评价。在主观求取权重的基础上, 运用熵权法进行修正, 使得权重结果更符合实际情况, 提高评判结果的准确性。本研究设置隔沟交替灌溉和常规沟灌 2 种沟灌方式, 同时设置 60%、70%、80% 3 个水分控制下限, 研究不同处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响, 筛选出兼顾冬小麦产量和水分利用效率的调亏沟灌方式。结果表明, 随着水分控制下限的增加, 冬小麦在 2 种沟灌方式下产量亦随之增加, 但水分利用效率和经济系数在水分控制下限为 80% 时降低。常规沟灌和隔沟交替灌溉 2 种沟灌方式下, 水分控制下限为 70% 时冬小麦水分利用效率最大(分别为 1.86 kg/m³ 和 1.90 kg/m³)。说明, 适度水分亏缺有利于水分利用效率的提高, 隔沟交替灌溉可大幅降低灌溉耗水总量, 因此在灌溉水充足的地区推荐采用常规沟灌, 在水资源紧缺的地区则适合使用隔沟交替灌溉方式。

关键词: 小麦; 调亏沟灌; 水分利用效率; 模糊综合评判; 熵权法

中图分类号: S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2022)03-0635-07

Analysis of regulated deficit furrow irrigation mode of wheat based on fuzzy evaluation

LI Xiao-hang^{1,2}, SHENG Kun^{1,2}, JIANG Zhi-kai¹

(1. Xinxiang Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: In order to select appropriate furrow irrigation methods for winter wheat and achieve efficient water use, the multi-level fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate different furrow irrigation modes by constructing a multi-level and multi-factor index system. On the basis of subjective weighting, the entropy weight method was used to make corrections, so that the weighting results were more in line with the actual situation, and the accuracy of evaluation results was increased. In this study, two furrow irrigation methods were applied, including the conventional furrow irrigation and alternative furrow irrigation. Meanwhile, three lower limits of soil moisture (60%, 70%, 80%) were set. Effects of different treatments on winter wheat yield and water use efficiency were studied to screen out the regulated deficit furrow irrigation method considering the yield, and water use efficiency. The results showed that the winter wheat yield increased with the increase of irrigation amount under two irrigation methods, but the water use efficiency and economic coefficient decreased when the lower limit of soil moisture was 80%. When the lower limit of soil moisture

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 国家小麦产业技术体系建设专项(CARS-3-2-35); 国家重点研发计划项目(2018YFD0300700)

作者简介: 李晓航(1987-), 女, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事作物节水栽培技术研究。(E-mail): li.xiaohang@163.com

通讯作者: 蒋志凯, (E-mail): 13598613170@126.com

tion method considering the yield, and water use efficiency. The results showed that the winter wheat yield increased with the increase of irrigation amount under two irrigation methods, but the water use efficiency and economic coefficient decreased when the lower limit of soil moisture was 80%. When the lower limit of soil moisture

was 70% , the water use efficiency of winter wheat was the highest under conventional furrow irrigation and alternative furrow irrigation (1.86 kg/hm³ and 1.90 kg/hm³ , respectively). The moderate water deficit is beneficial to the improvement of water use efficiency , and the alternative furrow irrigation can greatly reduce the total irrigation water consumption . Therefore , conventional furrow irrigation is recommended in areas with sufficient irrigation water , and alternative furrow irrigation is suitable in areas with scarce water resources .

Key words: wheat ; regulated deficit furrow irrigation ; water use efficiency ; fuzzy comprehensive evaluation ; entropy weight method

作为中国小麦主产区之一的华北平原,每年约有 50% 的小麦从该地区产出^[1],然而该区域降水相对较少的阶段正好与小麦生育期重合,造成小麦发育阶段无法单纯依靠降水满足其生长需要,因此需通过多次补充灌溉以实现小麦的稳产和高产。以小麦为原料的食物制品在国民饮食生活中有着举足轻重的地位,故实现小麦生产的可持续发展具有重要的战略意义。现阶段通常采用高效节水技术和提高小麦的水分利用效率的方法来缓解水资源供需紧张的矛盾^[2]。近年来很多学者针对小麦栽培措施改进进行研究,用小麦垄作沟灌取代传统地面灌溉,有利于提高水分利用效率。同时,小麦垄作沟灌后,土壤结构得以改善,有利于提高降水和灌溉水的利用效率和降低小麦的耗水量。前人研究结果^[3]表明,传统畦田种植小麦在灌溉过程中水流进程快慢会受到畦田长度及地面平整度的影响,造成灌溉耗时多,严重浪费灌溉水等问题。在采用机械田间开沟起垄种植作物时不仅可以提高灌溉的工作效率,而且有利于降水在沟内汇集,这些自然降水更加接近作物根部,田间土壤的水分含量随之增加,外界的水分供应得到改善,有效减少干旱对作物生长发育的胁迫,在提高作物产量的同时有效地提高水分利用效率^[4]。在垄台上种植作物时,采用垄沟灌水的灌溉方式,灌水沟内水分在水势差的作用下向垄体侧渗以满足作物生长对水分的需要。因此改变传统平作种植模式为垄上种植可以有效协调小麦群体与个体之间的关系,促使小麦个体健壮,群体大小适中,边行优势显著,最终实现亩穗数、穗粒数、千粒质量三因素协调发展,在此种植模式下小麦可增产约 10%^[5]。Wang 等^[6]的研究结果显示,起垄沟灌比传统畦灌可减少用水量约 30%。马丽等^[7]的研究结果表明,在栽培作物生育期内采用垄作方式总耗水量有显著降低且水分利用效率得到提高。

将交替灌溉与沟灌种植模式结合即为隔沟交替

灌溉^[8-12]。隔沟交替灌溉过程中的未进行灌水的沟由于其土壤含水量低对作物产生干旱胁迫促使其根系生长以提高水分利用效率。作物本身有特定的感知和信号传递系统,可以迅速感知土壤含水量的变化,并传递给位于叶片上的保卫细胞,促使气孔的导度降低,进而降低植物的蒸腾作用^[13-17]。其中,气孔导度的变化与蒸腾作用和耗水作用的变化趋势是不一致的,前者为线性关系,而后者为渐趋饱和关系。气孔导度适当降低,可出现蒸腾耗水显著减低,而对光合作用几乎没有影响^[18-23]。常规沟灌技术的缺点可通过隔沟交替灌溉实现重大改善,具有显著减少棵间蒸发、降低作物蒸腾耗水和提高作物水分利用效率的显著效果^[24-28]。研究结果显示,采用隔沟交替灌溉方式可大幅度降低叶片蒸腾的水分耗失而不会显著降低光合速率^[29-31]。

不同的沟灌方式对小麦的生长发育、籽粒产量、水分利用效率等的影响不同,通过对这些重要指标的分析可以选择出适宜的沟灌方式,实现水分经济效益和生态效益协调发展。目前一般采用综合分析法作为评价方法,该方法用指标之间的相关性或因果性比较从而得出分析结论^[32-33]。综合分析法容易受到研究者自身主观思维的影响,造成评价结果的不确定性^[34]。因此,借助数学原理建立科学的评价模型,进而明确最佳沟灌方案具有重要意义。模糊综合评判算法融合定性与定量分析,通过构建多因素和多层次的指标体系,得到综合评价结果,解决了不确定性的问题。因其具有多指标的优越性,模糊综合评判法在气候变化模拟研究、农业机械结构优化和精密齿轮制造等评价分析中取得了很好的应用效果^[35-40]。本研究旨在通过多层次模糊评价方法对小麦的产量三要素和水分利用效率等指标进行科学评价,根据此评价,可得出适合华北井灌区较好的节水高效沟灌方式,并为实现小麦的科学灌溉及高产优质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2016–2017 年在新乡市农业科学院辉县试验基地(36°9'N,113°7'E) 进行。小麦播种前土层(0~20 cm)土壤有机质 14.14 g/kg、全氮 1.08 g/kg、速效磷 11.39 mg/kg、速效钾 111.20 mg/kg、pH 8.16,0~200 cm 土层容质量 1.45 g/cm³,田间持水率为 32%(饱和质量含水率)。

1.2 试验设计

本试验设置了常规沟灌和隔沟交替灌溉 2 种节水灌溉方式。采用沟灌方式和水分控制下限的双因子裂区试验设计,沟灌方式为主区,水分控制下限为副区,3 次重复,随机排列,小区面积 20 m×3 m,每个小区包含 4 个垄台和垄沟,利用 2BFL-3 型多功能小麦起垄播种机起垄,种植。垄台上种植 3 行小麦,垄台宽为 45 cm,垄沟宽为 30 cm,垄沟深度为 18 cm,垄上小麦小行距为 15 cm,大行距为 45 cm(图 1),基本苗约 1 hm² 3.00×10⁶。不同垄作小区间设 1.5 m 平作隔离区,防止不同处理小区间水分测渗的影响。

表 1 不同沟灌模式的沟灌方案

Table 1 Irrigation schemes for different furrow irrigation modes

沟灌方式	处理	灌水量(mm)									灌水总量 (mm)
		10-15	10-30	11-20	12-26	03-01	04-05	04-19	05-06	05-16	
隔沟交替灌溉	T1	30		30	30		30	30			150
	T2	30	30		30		30	30		30	180
	T3	30	30	30	30	30	30	30	30	30	270
常规沟灌	T4	60			60			60			180
	T5	60		60			60		60		240
	T6	60		60			60	60		60	300

T1:隔沟交替灌溉下水分控制下限为 60%;T2:隔沟交替灌溉下水分控制下限为 70%;T3:隔沟交替灌溉下水分控制下限为 80%;T4:常规沟灌下水分控制下限为 60%;T5:常规沟灌下水分控制下限为 70%;T6:常规沟灌下水分控制下限为 80%。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 耗水量和水分利用效率测定 在小麦播种前和成熟期用土钻取土,烘干法测定 0~200 cm 土层水分含量,按 20 cm 深度为 1 个土壤层次进行取土。作物生育期耗水量计算则采用水量平衡公式计算:

$$ET= P+U-R-F+\Delta W+I^{[31]}$$
 (1)

ΔW :土壤贮水消耗量; P :该时段降水量(mm); U :地下水通过毛管作用上移补给作物水量(mm); R :地表径流量(mm); F :补给地下水量(mm); I :灌水量(mm)。

该试验地块地势平坦,地下水埋深 5 m 以下,降

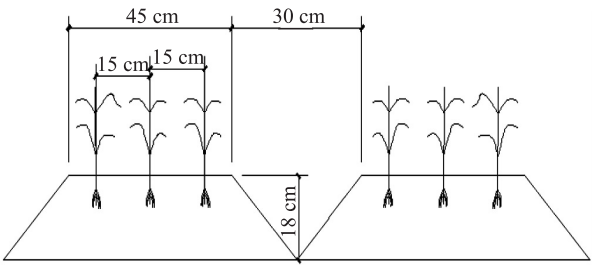


图 1 小麦垄作种植示意图

Fig.1 Schematic diagram of wheat ridge planting

设置 2 种沟灌方式:常规沟灌和隔沟交替灌溉(表 1),前者每个小区的 4 个灌水沟全部灌水;后者一个沟灌水,隔一个沟再灌,下次灌水则对上次未灌水的沟进行灌水,轮流交替进行。常规沟灌和隔沟交替灌溉设置水分控制下限分别为 60%、70%、80%,根据不同生育时期小麦 100 cm 计划湿润层土壤水分含量为标准,当土壤水分含量降低到水分控制下限时进行灌水,常规沟灌每次灌水量是 60 mm,隔沟交替灌溉每次灌水量是 30 mm。小麦品种为新麦 26。

水入渗深度不超过 2 m,因此 U 、 R 、 F 均为 0。

1.3.2 水分利用效率 籽粒产量水分利用效率计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$
 (2)

Y :籽粒产量(kg/hm²), ET :作物全生育期总耗水量(m³/hm²)。

1.3.3 产量及产量构成 在小麦收获时期,利用 Wintersteiger 小区联合收割机全区收获,考种时测定其穗数、穗粒数、千粒质量等,籽粒风干后称质量,折算为含水量 13%的每公顷产量。

1.3.4 经济系数 在小麦成熟期,在每个小区选定样

方面积 1 m^2 , 获取所有植株样品, 风干后称量生物产量, 然后脱粒称量籽粒质量, 计算经济系数。

$$\text{经济系数} = \text{籽粒产量} / \text{生物产量} \quad (3)$$

1.4 研究方法

模糊综合评判使用隶属度模糊矩阵对各种相关因素进行模糊综合评价。因素较少时, 可以使用一层指标体系。由于沟灌模式筛选是一种多因素多层次的评价方式, 需要使用 2 到 3 层指标体系。本研究使用 2 层指标体系来评价不同沟灌方式的优劣。

1.4.1 建立多层次的指标体系 筛选不同沟灌方式, 公式为 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$ 。需要建立一级指标体系和二级指标体系。

1.4.2 确定评价因素集 建立评判因素集: $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$ 。本研究使用 3 个水分处理作为评价集。

1.4.3 建立单因素评判矩阵 每个因素 $[u_i (i \leq n)]$ 都可以对结果进行评估。不同的评价水平, 每个因素的评价集都可以用模糊向量 $[R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i4}, \dots, r_{im}), i = 1, 2, \dots, n, R_i \in u(V)]$ 来表示。所有的单因素评判由模糊关系组成。模糊关系如下:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

1.4.4 确定指标权重 评估系统的核心是如何求权重, 权重表示每个因素的重要程度, 各因素权重的确定对综合评判模型来讲, 是非常关键的一步。权重确定的方法分为主观和客观 2 种方式, 二级指标中的部分指标, 人们无法主观判定, 故而需要用客观的方法求权重。本研究结合主观和客观的方式求得权重, 结合专家智慧的同时, 判定也比较客观。

1.4.4.1 专家预测确立权重 基于专家的知识经验或者偏好, 对各个指标的重要程度进行比较, 赋值和计算各个指标权重, 如专家调查法, AHP 法等^[41]。

1.4.4.2 熵权法 熵权法是根据指标变异性的大小来确定客观权重。由于底层的部分指标难以通过专家确定指标权重, 在此情况下需要通过客观的方式求出指标的权重, 来减少人为因素的影响。具体步骤参考文献^[41]中的算法。

1.4.5 计算评价结果 评价结果由隶属度矩阵和权重计算求得, 公式为:

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) \quad (4)$$

B 是所有因素指标体系的评价结果。 W 是指模糊权重, R 是指单因素评判矩阵, b 是指模糊评判指数。

2 结果与分析

2.1 基于多层次模糊评判的不同沟灌方式的综合评价

2.1.1 模糊评判因素集及所属子因素集构成 本研究对不同沟灌方式, 不同水分处理的小麦进行模糊综合评判, 其中隔沟交替灌溉水分控制下限为 60%、70%、80% 的处理分别用 T1、T2、T3 表示, 常规沟灌水分控制下限为 60%、70%、80% 的处理分别用 T4、T5、T6 表示, 将沟灌灌溉方式和水分控制下限作为一级指标。将穗数、穗粒数、不孕穗粒数、千粒质量、产量、经济系数、总耗水量、水分利用率作为二级指标。

2.1.2 隶属函数的确定 采用 Excel 整理大田试验数据, 得到关于小麦产量和耗水量指标的数据 (表 2)。依据试验数据建立隶属函数和评判矩阵, 根据模糊数学中数据标准化的适当方法^[38], 将表 2 中的原始数据标准化, 结果见表 3。

表 2 小麦产量和耗水量的指标数据

Table 2 Index data of wheat yield and water consumption

处理	穗数 ($\times 10^4$ 穗, 1 hm^2)	穗粒数 (粒)	不孕穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	产量 (kg/hm^2)	经济系数	总耗水量 (mm)	水分利用效率 (kg/m^3)
T1	527.21	33.6	5.4	40.58	6 683.40	0.38	367.25	1.82
T2	555.83	34.5	3.5	43.70	7 880.72	0.45	415.16	1.90
T3	570.15	35.1	3.8	44.90	8 401.25	0.35	481.16	1.75
T4	528.14	33.9	4.7	43.15	7 496.65	0.37	415.49	1.80
T5	560.06	34.7	3.2	44.72	8 280.05	0.39	444.53	1.86
T6	573.57	34.2	2.9	45.13	8 370.70	0.31	488.68	1.71

T1、T2、T3、T4、T5、T6 处理见表 1 注。

表3 小麦各个单因素评判集

Table 3 Single factor evaluation set of winter wheat

处理	穗数	穗粒数	不孕穗粒数	千粒质量	产量	经济系数	总耗水量	水分利用效率
T1	0.300 9	0.328 8	0.263 2	0.306 4	0.257 9	0.296 6	0.376 0	0.295 9
T2	0.345 9	0.326 8	0.383 5	0.344 5	0.366 5	0.381 4	0.327 8	0.365 4
T3	0.353 2	0.344 4	0.353 3	0.349 1	0.375 6	0.322 0	0.296 2	0.338 7
T4	0.300 6	0.319 7	0.210 7	0.304 6	0.254 3	0.313 7	0.382 6	0.296 7
T5	0.343 8	0.338 2	0.375 3	0.346 9	0.373 9	0.382 4	0.323 9	0.370 0
T6	0.355 6	0.342 1	0.414 1	0.348 5	0.371 8	0.303 9	0.293 5	0.333 3

T1、T2、T3、T4、T5、T6 处理见表1注。

2.2 二级评判

在对不同沟灌处理冬小麦的农艺性状指标(穗数、穗粒数、千粒质量、不孕穗粒数)进行评价时,采用熵权法进行权重确定。产量、经济系数、总耗水

量、水分利用率等采用专家预测确定权重。经过计算,权重为0.067、0.051、0.051、0.035、0.150、0.046、0.250、0.350,即:

$$W_1 = \{0.067, 0.051, 0.051, 0.035, 0.150, 0.046, 0.250, 0.350\}$$

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.318\ 9 & 0.325\ 6 & 0.252\ 3 & 0.314\ 1 & 0.272\ 0 & 0.322\ 0 & 0.377\ 7 & 0.332\ 7 \\ 0.336\ 2 & 0.334\ 3 & 0.389\ 2 & 0.338\ 3 & 0.352\ 4 & 0.381\ 4 & 0.334\ 1 & 0.347\ 3 \\ 0.344\ 9 & 0.340\ 1 & 0.358\ 5 & 0.347\ 6 & 0.375\ 6 & 0.296\ 6 & 0.288\ 3 & 0.319\ 9 \end{pmatrix}$$

$$\tilde{R}_1 = W_1 \cdot R_1 = (0.328\ 3, 0.346\ 8, 0.324\ 9)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.317\ 8 & 0.329\ 8 & 0.244\ 5 & 0.324\ 4 & 0.310\ 5 & 0.345\ 8 & 0.359\ 1 & 0.335\ 2 \\ 0.337\ 0 & 0.337\ 5 & 0.359\ 2 & 0.336\ 2 & 0.342\ 9 & 0.364\ 5 & 0.335\ 6 & 0.346\ 4 \\ 0.345\ 2 & 0.332\ 7 & 0.396\ 3 & 0.339\ 3 & 0.346\ 7 & 0.289\ 7 & 0.305\ 3 & 0.318\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\tilde{R} = W_2 \cdot R_2 = (0.333\ 8, 0.333\ 7)$$

采用模糊综合评判获得小麦二级评判结果,结果表明,对于采用隔沟交替灌溉的小麦,T2处理评价指数(0.346 8)最高,T3处理评价指数最低,常规沟灌处理得出与隔沟交替灌溉相同的评价结果。由表1、表2和表3可知,在隔沟交替灌溉和60%水分下限条件下,由于受低水分胁迫严重,导致小麦产量较低,减产严重,不能仅通过水分利用效率高低来评价灌溉方式,在水分供应过少的情况下,势必会影响产量,因此实际生产过程中该沟灌方式并不具有推广价值;在70%水分下限条件下,水分利用效率和经济系数最高,灌溉效果最佳;在80%水分下限条件下,产量并未随着灌水量增多而增加,增产效果不明显,水分利用效率低,过多的水分供应使得小麦营养生长过剩,消耗大量养分,导致经济系数较低。在常规沟灌和水分下限60%时,由于水分限制,产量位于3个水分控制下限的最低水平,但是与水分下限60%时的隔沟交替灌溉相比,灌水量增加30 mm,

籽粒产量增加明显,原因在于其灌水均匀性高于隔沟交替灌溉;在70%水分下限条件下,评价指数为0.343 2,该水分下限条件下灌溉效果最好,实现产量、水分利用效率、经济系数的协调增加;在80%水分下限条件下,由于灌水量过多,其对籽粒产量贡献率下降,水分利用效率降低。

2.3 一级评判

在一级指标中,由于指标数量较少并且业内专家对此层指标体系的确定经验丰富,故采用专家预测的模式确定指标权重,得出:

$$W = \{0.35, 0.35, 0.30\}。$$

一级指标评价结果表明,隔沟交替灌溉评价指数为0.333 8,与常规沟灌评价指数(0.333 7)差距不大。但隔沟交替灌溉灌水量较少,水分利用效率高。在一级指标评价中,隔沟交替灌溉方式在70%水分下限条件下,经济系数、籽粒产量、水分利用效率是最优组合。对照表2中T2处理,结果显示与模糊

评判一致的结果,水分利用效率最高,且实现沟灌高效的新型节水灌溉方式。同时由表 2 可知,在同一水分控制下限下,隔沟交替灌溉的 3 个水分控制下限处理的水分利用效率虽然均高于常规沟灌,但在实际生产过程中会根据水源供应条件来具体分析,选择适宜的沟灌方式,不仅仅局限于水分利用效率高低这一单因素。

3 讨论

在模糊综合评判的框架模式下,建立多因素多层次的评价指标体系。通过模糊集理论求得产量和耗水量等相关指标的隶属度和隶属函数。由于在综合评判中,权重的获取是至关重要的一步,本研究融合主观和客观两方面求取权重的方法,在主观求取权重的基础上,运用熵权法进行修正,使得权重结果更加贴合实际情况,增加评判结果的准确性。本试验将常规沟灌与隔沟交替灌溉作比较,初步得出不同沟灌方式下不同水分控制下限对小麦产量三因素(穗数、穗粒数、千粒质量)、耗水量和水分利用效率的影响,结果如下:

(1) 本研究运用改进后的模糊综合评判方法研究不同沟灌方式对小麦产量与耗水量的影响,结果表明,隔沟交替灌溉方式下 3 个不同水分控制下限处理的小麦水分利用效率要高于逐沟沟灌方式下相对应的 3 个水分控制下限处理。这表明隔沟交替灌溉更有利于提高水分利用效率,隔沟交替灌溉时存在于垄体两侧的水势差有利于水分向垄体侧渗,与逐沟沟灌相比更为节水。

(2) 逐沟沟灌和隔沟交替灌溉 2 种灌溉方式下,小麦水分利用效率最大值均出现在水分控制下限为 70% 的处理;而在水分控制下限为 80% 时小麦水分利用效率为最低值。综合模糊评判亦得出相同的结果。

(3) 在水分控制下限为 70% 的隔沟交替灌溉和逐沟沟灌处理下,隔沟交替灌溉处理灌水频率较高,逐沟沟灌处理灌水量较大,两者分别从时间和水量满足冬小麦中后期对水分的要求。由此可见,在水资源充足的情况下,可以利用水分控制下限 70% 的逐沟沟灌进行冬小麦灌溉,当水资源缺乏的情况下,可以利用水分控制下限 70% 的隔沟交替灌溉进行冬小麦灌溉。

(4) 本研究在充分保留模糊综合评判优点的同

时,改进权重的求取方法,让模型能够与计算程序结构化思想充分结合。本研究在计算过程中运用 python 语言编写了一套计算程序,使得多种学科进行融合,进而为未来农业的智能化、流程化做准备。

参考文献:

- [1] 周宝元. 黄淮海冬小麦-夏玉米资源优化配置及其节水高产技术模式研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [2] 马文军, 程琴娟, 宇振荣. 试验站和农户管理水平下冬小麦水分利用效率比较[J]. 资源科学, 2010, 32(10): 1896-1901.
- [3] 刘俊明, 高阳, 司转运, 等. 栽培方式对冬小麦、耗水量、产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 32(1): 210-216.
- [4] 满建国, 王东, 于振文, 等. 不同带长微喷带灌溉对土壤水分分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2186-2196.
- [5] 张雪玲. 沟垄集雨种植和灌溉对关中灌区小麦产量及水肥利用效率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [6] WANG F H, WANG X Q, SAYRE K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China[J]. Filed Crops Research, 2004, 87(1): 35-42.
- [7] 马丽, 刘天学, 韩德果, 等. 垄作对冬小麦、夏玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 1062-1067.
- [8] DU T S, KANG S Z, SUN J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. Agr Water Manage, 2010, 197(1): 66-74.
- [9] 张新民, 孙克翠, 高雅玉, 等. 春小麦垄作沟灌灌水质量评价指标的改进与应用[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 39-43, 65.
- [10] 陈伟. 小麦垄作高产栽培技术[J]. 农技服务, 2007, 24(7): 16-17.
- [11] 张友昌, 张教海, 王孝纲, 等. 垄作的生理生态效应研究进展[J]. 棉花科学, 2012, 34(6): 3-8.
- [12] 谢建明. 垄作小麦栽培优势分析[J]. 农业工程技术, 2017, 37(14): 75.
- [13] 康绍忠. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1-6.
- [14] 刘永贤, 李伏生, 农梦玲. 烤烟不同生育时期分根区交替灌溉的节水调质效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 16-20.
- [15] 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 1982-1990.
- [16] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26-32.
- [17] DAVIES W J, ZHANG J H. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42: 55-76.

- [18] SHAHNAZARI A, LIU F, ANDERSEN M N, et al. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions[J]. Field Crops Research, 2007, 100: 117-124.
- [19] DU T S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China[J]. Irrigation Science, 2008, 26(2): 147-159.
- [20] 武永军, 刘红侠, 梁宗锁, 等. 分根区干湿交替对玉米光合速率及蒸腾速率的影响[J]. 西北植物学报, 1999, 19(4): 605-611.
- [21] 段爱旺, 肖俊夫, 张寄阳, 等. 控制交替沟灌中灌水控制下限对玉米叶片水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(6): 766-771.
- [22] 刘小飞, 李彪, 孟兆江, 等. 隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶生理特性与产量形成的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 320-328.
- [23] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 64-68.
- [24] 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.
- [25] BLACKMAN P G, DAVIES W J. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying[J]. Journal of Experimental Botany, 1985, 36: 39-48.
- [26] 唐立松, 张建龙, 李彦, 等. 植物对土壤水分变化的响应与控制性分根交替灌溉[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 90-93.
- [27] BOAST C W, ROBERTSON T M. A 'micro-lysimeter' method for determining evaporation from bare soil; description and laboratory evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 689-696.
- [28] 张永胜, 成自勇, 张芮, 等. 控制性交替隔沟灌溉对甜椒农田蒸散特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 223-227.
- [29] KANG S Z, HU X T, DU T S, et al. Transpiration coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of pear tree (*Pyrus communis* L.) under alternative partial rootzone drying condition[J]. Hydrol Processes, 2003, 17(6): 1165-1176.
- [30] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 17-22.
- [31] 董志强, 张丽华, 吕丽华, 等. 不同灌溉方式对冬小麦光合速率及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 1-7.
- [32] 杨慧, 曹红霞, 李红峥, 等. 基于空间分析法研究温室番茄优质高产的水氮模式[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 896-905.
- [33] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552-556.
- [34] 龚雪文, 刘浩, 刘东鑫, 等. 基于模糊算法的温室番茄调亏滴灌制度综合评判[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 144-151.
- [35] 胡文泽, 何珂, 金诚谦, 等. 基于模糊综合评判的农业机械 FMECA 方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 332-337.
- [36] 李强, 谢里阳, 李海洋, 等. 基于模糊综合层次评判法的精密齿轮制造工艺优化优先度分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 750-757.
- [37] HUANG G H, COHEN S J, YIN Y Y, et al. Incorporation of inexact dynamic optimization with fuzzy relation analysis for integrated climate change impact study[J]. Journal of Environmental Management, 1996, 48(1): 45-68.
- [38] 汪顺生, 刘东鑫, 孟鹏涛, 等. 不同种植模式冬小麦产量与耗水量的模糊综合评判[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 161-166.
- [39] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 279-287.
- [40] 李峰, 孙波, 王轩, 等. 层次分析法结合熵权法评估农村屋顶光伏系统电能质量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 159-166.
- [41] 薛会琴. 多属性决策中指标权重确定方法的研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2008.

(责任编辑: 陈海霞)