

# 基于可变模糊评价模型的玉米膜下滴灌质量评价体系研究

于海荣<sup>1</sup>, 叶楠<sup>1\*</sup>, 司昌亮<sup>1,2</sup>, 陈永明<sup>1</sup>, 张蔚<sup>1,2</sup>, 尚学灵<sup>1</sup>, 张生武<sup>1</sup>

(1. 吉林省水利科学研究院, 长春 130022; 2. 吉林省灌溉试验中心站, 长春 130022)

**摘要:**玉米膜下滴灌质量评价是一个比较复杂的多指标、多级模糊评价问题。可变模糊集原理是评价玉米膜下滴灌质量的方法之一,通过变换参数建立不同的分级特征值计算模型,可以提高评价结果的可靠性。该文在介绍可变模糊模型原理的基础上,对吉林省西部玉米膜下滴灌质量等级进行评价。结果表明,连续4个试验年的质量等级均为“中等”以上,两年达到“良好”等级,评价结果呈逐年上升趋势。评价结果符合实际情况,证明了该评价体系具有可靠性、便捷性和适应性,填补了玉米膜下滴灌质量评价体系的空白。

**关键词:**可变模糊集;评价模型;玉米;膜下滴灌;质量评价体系

中图分类号:S513;S275.6 文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2019)06-0091-05

## Research on Quality Evaluation System of Drip Irrigation under Maize Film Based on Variable Fuzzy Evaluation Model

YU Hairong<sup>1</sup>, YE Nan<sup>1\*</sup>, SI Changliang<sup>1,2</sup>, CHEN Yongming<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, SHANG Xueling<sup>1</sup>, ZHANG Shengwu<sup>1</sup>

(1. Jilin Institute of Water Conservancy Research, Changchun 130022; 2. Jilin Irrigation Test Central Station, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on the principle of variable fuzzy set, the quality evaluation system of drip irrigation maize under-film was established. According to the experimental data from 2015 to 2018 of Xiangyang Village, Tongyu County, the quality evaluation index system of "one target, three layers and 20 indicators" was constructed. Using Delphi programming language, the system was proved to be efficient and accurate by means of extreme value method and case method. The quality evaluation of drip irrigation under maize film was a complicated multi-index and multi-level fuzzy evaluation problem. The principle of variable fuzzy set was one of the methods to evaluate the quality of drip irrigation maize under film. The reliability of evaluation results could be improved by changing parameters and establishing different hierarchical eigenvalue calculation models. On the basis of introducing the principle of variable fuzzy model, the quality grade of drip irrigation maize under film in western Jilin Province was evaluated in the paper, and the results showed that the quality level in 4 years was above "medium", among which, the quality level reached "good" in last two years, and the evaluation results showed an upward trend year by year. The evaluation results were in line with the actual situation, which proved that the evaluation system was reliable, convenient and adaptable, which filled the blank in the quality evaluation system of drip irrigation under maize film.

**Key words:** Variable Fuzzy Set; Evaluation model; Maize; Drip irrigation under film; Quality evaluation system

玉米膜下滴灌是一项重要的高效节水灌溉方式,结合覆膜种植技术滴灌灌溉技术于一体,实现水肥一体化,使玉米能够精准吸收水分和肥

料。近年来,玉米膜下滴灌技术在吉林省西部的广泛推广应用,对于缓解吉林省西部干旱地区的水资源短缺问题,促进农业可持续发展和水资源保护具有重大意义。

玉米膜下滴灌质量评价体系的研究,可以有效利用影响玉米膜下滴灌质量的多种因素,进行量化综合评价,是玉米膜下滴灌效果评价及其发展规划决策的重要依据。当前,可用于实现质量评价的方法有很多,如模糊综合评判法、层次

收稿日期:2019-04-10

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0400109);国家科技支撑计划课题(2014BAD12B02)

作者简介:于海荣(1969-),女,高级工程师,主要从事农田水利及节水灌溉研究工作。

通讯作者:叶楠,男,高级工程师,E-mail: 44734370@qq.com

分析法、综合评判物元模型、经验指数和法、极限条件法等,诸多方法均各有利弊<sup>[1]</sup>。极限条件法以某个单项评价结果最低值作为评价结果,过于简单和谨慎;经验指数法综合考虑了各参评因子的作用,但指数加和过程中较多的参评因子削弱了重要因子的作用<sup>[1]</sup>;综合评判物元模型存在着缺陷<sup>[1-2]</sup>。

陈守煜从20世纪90年代提出用数的相对连续统概念来表示模糊现象、事物、概念的相对隶属度,建立以动态变化的相对隶属度概念为基础的工程模糊集理论<sup>[3]</sup>,建立可变模糊聚类、模式识别、优选、评价的统一理论与模型,是可变模糊集理论通向实际应用的桥梁<sup>[4-7]</sup>。陈守煜运用该方法对淮河流域水资源承载能力进行综合评价,计算便捷,评价结果可信度高<sup>[8]</sup>。周惠成等基于可变模糊集理论,确定样本指标对各级标准区间的相对隶属度,并将评价结果与模糊综合评价结果进行比较,为山东省旱涝灾害的评价提供参考<sup>[9]</sup>。冀晓东等运用可变模糊集模型,对安徽合肥市、巢湖市、六安市及巢湖流域的生态环境质量进行评价和排序,评价结果可靠<sup>[10]</sup>。苏艳娜等运用该模型对江苏省常熟市农业生态环境质量进行了评价,为常熟市生态环境维护提出了建议<sup>[11]</sup>。本文将可变模糊评价模型应用于膜下滴灌质量评价,综合考虑各项评价指标的优劣关系对评价结果的影响,采用可变的计算模型,从而提高评价的可靠性。

### 1 可变模糊评价模型原理

设有n个待评价样本组成的样本集 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,每个样本按m个指标特征值对其进行综合评价,则有待评样本特征值矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \dots\dots(1)$$

$x_{ij}$ 为样本j指标i的特征值, $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

样本按c个级别指标标准值区间进行综合评价,设级别指标标准值区间矩阵为:

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [a_{11}, b_{11}] & [a_{12}, b_{12}] & \dots & [a_{1c}, b_{1c}] \\ [a_{21}, b_{21}] & [a_{22}, b_{22}] & \dots & [a_{2c}, b_{2c}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [a_{m1}, b_{m1}] & [a_{m2}, b_{m2}] & \dots & [a_{mc}, b_{mc}] \end{bmatrix} = ([a_{ih}, b_{ih}]) \dots\dots(2)$$

$i=1, 2, \dots, m; h=1, 2, \dots, c$ 。1级为优级;c级为劣级。

矩阵 $I_{ab}$ 即为各级指标标准值区间矩阵,它是已知矩阵;对于级别h指标i的范围值区间 $[c_{ih}, d_{ih}]$ ,可根据矩阵 $I_{ab}$ 中各级指标标准值区间两侧相邻区间的上下限值确定。即矩阵:

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [c_{11}, d_{11}] & [c_{12}, d_{12}] & \dots & [c_{1c}, d_{1c}] \\ [c_{21}, d_{21}] & [c_{22}, d_{22}] & \dots & [c_{2c}, d_{2c}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [c_{m1}, d_{m1}] & [c_{m2}, d_{m2}] & \dots & [c_{mc}, d_{mc}] \end{bmatrix} \dots\dots(3)$$

$$= ([c_{ih}, d_{ih}])$$

式中 $c_{ih}, d_{ih}$ 不必确定。

根据矩阵 $I_{ab}$ ,确定区间 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 中相对隶属度等于1即 $\mu_A(x_{ij})_h = 1$ 的点值矩阵M:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1c} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \dots & M_{mc} \end{bmatrix} = (M_{ih}) \dots\dots(4)$$

根据待评样本j指标i的特征值 $x_{ij}$ 与级别h指标i的 $M_{ih}$ 值进行比较,若 $x_{ij}$ 落在 $M_{ih}$ 值的左侧,其相对隶属函数为:

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5[1 + (\frac{x_i - a_{ih}}{M_{ih} - a_{ih}})^\beta] \quad x_i \in [a_{ih}, M_{ih}] \dots\dots(5)$$

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5[1 - (\frac{x_i - a_{ih}}{c_{ih} - a_{ih}})^\beta] \quad x_i \in [c_{ih}, a_{ih}] \dots\dots(6)$$

若 $x_{ij}$ 落入 $M_{ih}$ 值的右侧,其相对隶属函数为

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5[1 + (\frac{x_i - b_{ih}}{c_{ih} - a_{ih}})^\beta] \quad x_i \in [M_{ih}, b_{ih}] \dots\dots(7)$$

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5[1 - (\frac{x_i - b_{ih}}{c_{ih} - a_{ih}})^\beta] \quad x_i \in [b_{ih}, d_{ih}] \dots\dots(8)$$

根据公式(5)至(8)计算样本j指标i对各个级别的相对隶属度矩阵:

$${}_jU = (\mu_A(x_{ij})_h) \dots\dots(9)$$

根据可变模糊评价模型,则有样本j对级别h的综合相对隶属度 ${}_jU'_h$ 为:

$${}_jU'_h = \left\{ 1 + \left[ \frac{\sum_{i=1}^m [W_i (1 - \mu_A(X_{ij})_h)]^\alpha}{\sum_{i=1}^m [W_i \mu_A(X_{ij})_h]^\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \right\}^{-1} \dots\dots(10)$$

式中: $w_i$ 为指标权重; $\alpha$ 为优化准则参数, $\alpha=1$ 为最小一乘方准则, $\alpha=2$ 为最小二乘方准则;p

为距离参数,  $p=1$  为海明距离,  $p=2$  为欧氏距离。 $\alpha$ 、 $p$  称为可变模型参数, 通常有四种组合: (1)  $\alpha=1, p=1$ ; (2)  $\alpha=1, p=2$ ; (3)  $\alpha=2, p=1$ ; (4)  $\alpha=2, p=2$ 。

根据参数的四种不同组合均可得到一个相应的非归一化综合相对隶属度矩阵:

$${}_jU' = ({}_j u'_h) \dots\dots\dots (11)$$

对式(11)进行归一化, 得到样本  $j$  对级别  $h$  的归一化综合相对隶属度矩阵

$${}_jU = ({}_j u_h) \dots\dots\dots (12)$$

$${}_j u_h = {}_j u'_h / \sum_{h=1}^c {}_j u'_h \dots\dots\dots (13)$$

应用级别特征值公式, 计算样本  $j$  的级别特征值向量:

$$H_j = (1, 2, \dots, c) \dots\dots\dots {}_jU \quad (14)$$

根据  $H_j$  对样本进行综合评价。

根据文献[3], 级别特征值  $H(u_0)$  是一个描述级别的数, 且不作为公式  $1 \leq H(u_0) \leq c$  通常不是一个整数。根据  $H(u_0)$  可反馈得到相应的级别, 据此可对  $u_0$  做出属于何种级别的判断。为了更细致地应用级别特征值进行判定, 给出判断准则公式:

$$\begin{cases} 1.0 \leq H(u_0) \leq 1.5, & \text{属于一级} \\ h - 0.5 \leq H(u_0) \leq h, & \text{属于} h \text{级, 偏}(h - 1) \text{级} (h = 2, 3, \dots, c) \\ h \leq H(u_0) \leq h + 0.5, & \text{属于} h \text{级, 偏}(h - 1) \text{级} (h = 2, 3, \dots, c) \\ c - 0.5 \leq H(u_0) \leq c, & \text{属于} c \text{级} \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

## 2 实例分析

### 2.1 指标选取及分级

采用吉林西部节水增粮高效灌溉技术集成研

表 1 吉林西部玉米膜下滴灌质量运行体系评价指标分级标准

指标分级	I 级(优秀)		II 级(良好)		III 级(中等)		IV 级(合格)		V 级(不合格)	
级别特征值	1.0	1.5	1.5	2.5	2.5	3.5	3.5	4.5	4.5	5
亩均灌溉用水量(m <sup>3</sup> )	120	80	80	60	60	40	40	20	20	0
电力配套程度(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
灌水均匀度	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0
农田灌溉水有效利用系数	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.5	0.5	0
残膜回收率(%)	100	85	85	70	70	55	55	30	30	0
提水效率(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
水分生产率(kg/m <sup>3</sup> )	4.5	4	4	3	3	2	2	1	1	0
玉米容重(g/L)	800	720	720	685	685	650	650	620	620	590
增产率(%)	140	90	90	70	70	50	50	30	30	0
节水率(%)	200	90	90	70	70	50	50	30	30	0
农药用量(元/亩)	5	10	10	16.7	16.7	23.3	23.3	30	30	36.7
化肥用量(元/亩)	266.7	166.7	166.7	133.3	133.3	100	100	66.7	66.7	33.3
耗能(kW·h/亩)	0	20	20	40	40	60	60	80	80	120
亩均省工量(工日/亩)	0.53	0.33	0.33	0.27	0.27	0.2	0.2	0.13	0.13	0
管理模式(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
农民接受程度(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
滴灌工程使用率(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
规章制度完善度(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
操作人员熟练度(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0
工程完好率(%)	100	90	90	70	70	50	50	30	30	0

究与规模化示范项目向阳村玉米膜下滴灌万亩核心示范区 2015 ~ 2018 年原始数据, 构建一个标准一致、指标全面、高效灵活、操作性强、参考性广的玉米膜下滴灌质量评价体系, 含目标层、单元

层和指标层 3 层结构, 共 20 项指标。根据文献[3]提出的分级方法, 对应用级别(或类别)特征值进行判断或评定, 结合类似工程经验<sup>[9-17]</sup>, 给出如下判断准则, 分为 5 级标准(表 1)。

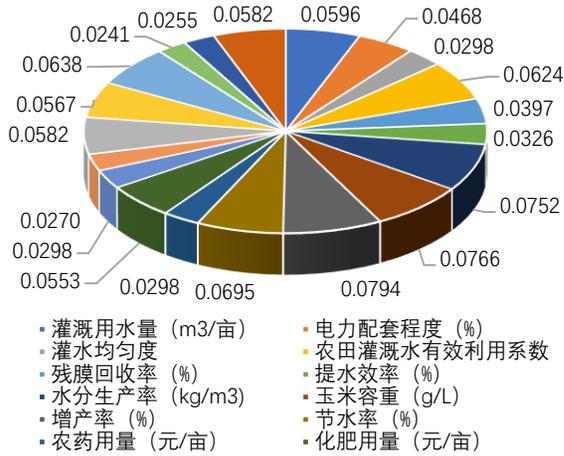


图1 指标权重分析图

### 2.2 指标权重确定

采用工程管理学中的“强制打分法(0-4评分法)”，邀请15名熟悉膜下滴灌工作的专业人员对每项指标一一对比，逐项打分，计算各项指标的累计分值与所有指标累计分值的总和的比值，并确保一致性满足要求后，作为该项指标对应的权重(图1)。

### 2.3 评价结果

根据示范区的2015~2018年实测数据(原始数据略)，运用可变模糊评价模型，建立4种可变计算模型，采用编制的“吉林省玉米膜下滴灌质量评价体系”计算程序，对实例数据的级别特征

表2 示范区玉米膜下滴灌质量评价结果特征值

评价年度	H(a=1,p=1)	H(a=2,p=1)	H(a=1,p=2)	H(a=2,p=2)	H平均值
2015年	2.9946	3.1742	2.9818	3.0736	3.0560
2016年	2.6433	2.7014	2.7246	2.6973	2.6917
2017年	2.1853	2.1069	2.3096	2.1908	2.1982
2018年	1.9801	1.8055	2.1818	1.9709	1.9846

值进行计算，各年度计算结果见表2。

(1)2015~2016这2年的评价结果均处于第3等级，综合评价为“中等”；2017~2018这2年的评价结果均处于第2等级，综合评价为“良好”。评价结果符合项目运行的实际情况，与现场调查的实际效果一致。从评价结果可以看出，随着a和p值组合的变换，2015年级别特征值H处于2.9818~3.1742之间，2016年级别特征值H处于2.6433~2.7246之间，基本稳定于“中等”级别的中部附近；2017年级别特征值H处于2.1069~2.3096之间，2018年级别特征值H处于1.8055~2.1818之间，均稳定在“良好”级别中部附近。评价得出的级别特征值H在4个年度内均处于一个较小的变动范围，因此，应用可变模糊评价模型的评价结果稳定性较高。

(2)从分年度的计算特征值来看，2015年最大，计算级别特征值H=3.0560，处于“中等”等级中部；2018年最小，计算级别特征值H=1.9845，结果处于“良好”等级的中部。从2015~2018年评价结果的趋势来看，级别特征值呈递减趋势，趋势回归方程接近乘幂形式， $y=3.1465x^{-0.316}$ ， $R^2=0.952$ ，相关性密切。可以看出，随着膜下滴灌技术指标、经济指标和运行管理指标的逐年优化，评价结果呈逐年向好的趋势，且趋势相对稳定。随着未来更多数据的积累，可以发现更稳定的趋

势，从而指导节水增粮工作朝着更好的方向发展，也可为节水增粮效果的预测起到积极作用。

(3)通过分析各项指标的权重分布，可以看出经济指标总体权重最大，占44.26%，运行管理指标略高于技术指标。经济指标单元层由8项指标组成，其中水分生产率、玉米容重、增产率、节水率、化肥用量等指标所占比重较大，处于0.055~0.080之间，然而这些比重又与技术指标单元层下的灌溉用水量、灌溉水利用系数及运行管理指标单元层下的管理模式、农民接受程度、工程完好率等密切相关。因此，为了提高未来运行质量，在技术指标层日趋成熟的前提下，应着重注意研究节水率、增产率和化肥用量等指标，同时提高膜下滴灌覆盖率，并积极采用先进的管理模式和经营模式。可以概括为如下十六字：“节水控肥，滴灌可为，注重经管，高效丰产”。

## 3 结 论

玉米膜下滴灌质量评价是为了便于对运行质量分级而设立的等级标准，属于多级模糊评价问题，评价关联到很多指标。可变模糊评价模型是对多指标模糊概念和事物进行识别和评价的模糊数学方法。本文采用可变模糊集方法，建立可变模糊评价模型对玉米膜下滴灌质量进行定量评价，丰富和发展了膜下滴灌质量评价的方法和手

段。通过对影响膜下滴灌运行质量的因素进行汇总和筛选,构建了“一个目标,三层单元,二十大指标”的质量评价指标体系;根据玉米膜下滴灌的各项指标,建立4种不同计算模型,对实例数据的级别特征值进行分析。结果表明,各计算年度,不同模型得到的结论基本一致,证明了基于可变模糊评价模型的玉米膜下滴灌质量评价体系的可靠性,可见该模型在玉米膜下滴灌质量评价中具有很好的适应性,且通过编程可大大提高评价效率。

### 参考文献:

- [1] 陈守煜,柴春岭,苏艳娜.可变模糊集方法及其在土地适宜性评价中的应用[J].农业工程学报,2007,23(3):95-97.
- [2] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005:194-240
- [3] 陈守煜.可变模糊集理论与模型及其应用[M].大连:大连理工大学出版社,2009,23(3):23-37.
- [4] 陈守煜.工程可变模糊集理论与模型—模糊水文水资源学数学基础[J].大连理工大学学报,2005,45(2):308-312.
- [5] 陈守煜.可变模糊集理论哲学基础[J].大连理工大学学报(社会科学版),2005,26(1):53-57.
- [6] 陈守煜.可变模糊集理论——兼论可拓学的数学与逻辑错误[J].大连理工大学学报,2007,47(4):620-624.
- [7] 陈守煜.可变模糊集理论与可变模型集[J].数学的实践与认识,2008,38(18):146-153.
- [8] 陈守煜,胡吉敏.可变模糊评价法及在水资源承载力评价中的应用[J].水利学报,2006,37(3):264-271.
- [9] 周惠成,张丹.可变模糊集理论在旱涝灾害评价中的应用[J].农业工程学报,2009,125(9):56-61.
- [10] 冀晓东,靳燕国,刘纲,等.基于可变模糊集模型的区域生态环境质量评价[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(9):148-154.
- [11] 苏艳娜,柴春岭,杨亚梅.常熟市农业生态环境质量的可变模糊评价[J].农业工程学报,2007,23(11):245-248.
- [12] 岳尧海,路明,张建新,等.玉米DH系规模化筛选、评价技术流程初探[J].东北农业科学,2016,44(2):13-15.
- [13] 闫伟平,边少锋,张丽华,等.半干旱区抗旱丰产玉米品种的评价及筛选[J].东北农业科学,2017,42(3):1-5.
- [14] 刘新卫.长江三角洲典型县域农业生态环境质量评价[J].系统工程理论与实践,2005(6):134-138.
- [15] 闫孝贡,胡楠,袁静超.不同培肥方式对玉米产量及其组分的影响[J].东北农业科学,2017,42(1):1-4.
- [16] 伍舒悦,吕小飞,李文莹,等.氮磷钾肥料配施对松玉419产量及其构成因素的影响[J].东北农业科学,2016,41(6):31-35.
- [17] 罗莎莎,甄江红,贺静,等.内蒙古呼包鄂地区生态环境质量评价研究[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2015,44(3):401-405.

(上接第19页)

### 参考文献:

- [1] 何中国,朱统国,李玉发,等.吉林省花生育种现状及发展方向[J].作物杂志,2018(4):8-12.
- [2] 任艳,石延茂,尹亮,等.花生新品种花育9801的选育[J].花生学报,2016,45(2):68.
- [3] 吴继华,范小玉,李可,等.高出仁率大果花生新品种国鉴商花6号的选育[J].河南农业科学,2015,44(11):38-40.
- [4] 王志龙.花生新品种康花1号的选育及栽培技术[J].辽宁农业科学,2016(1):87-88.
- [5] 牛海龙,刘红欣,李伟堂,等.灰色关联度分析法在花生品种综合评价上的应用[J].东北农业科学,2017,42(5):20-24.
- [6] 孙晓苹,陈小姝,吕永超,等.吉林省花生品种系谱分析[J].东北农业科学,2017,42(6):23-27.