

基于方法集和 DEA 模型的黑龙江省 灌溉用水效率评价

梁静溪¹, 张安康¹, 许耀文², 李晨阳²

(1. 哈尔滨理工大学经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘 要: 为了讨论方法集模型对于灌区用水效率综合评价的可行性, 以 DEA 模型作为对比参照, 选取了渠系和田间两方面指标, 对黑龙江省 20 个灌区用水效率进行排序和计算, 得出的主要结论: 利用方法集模型评价的 20 个灌区的排序结果均通过 Spearman 检验, 解决了不同评价方法结果不一致的问题, 且与 DEA 模型得出的排序结果一致; 通过方法集模型和 DEA 模型结果可以看出: 富裕、永发、安邦河、龙头桥和石龙灌区效率值较低, 分别是 0.58、0.55、0.54、0.51、0.45, 且 20 个灌区灌溉用水效率与渠系效率平均关联度为 1.779, 与田间效率平均关联度为 1.229, 受渠系水利用效率影响较大, 受田间水效率影响较小, 可采取渠道衬砌, 合理规划渠系布局等方式减少渠道输配水环节的灌溉水损失, 采取控制灌溉技术, 喷、滴灌溉等节水措施, 提高灌溉用水效率。

关键词: 方法集模型; DEA 模型; 灌溉用水效率; 综合评价; 黑龙江省

中图分类号: S273.2; F327 **文献标志码:** A

Evaluation of irrigation water use efficiency based on method set and DEA model in Heilongjiang Province

LIANG Jingxi¹, ZHANG Ankang¹, XU Yaowen², LI Chenyang²

(1. College of Economics Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150000, China

2. College of Water Resources and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

Abstract: In order to comprehensively and scientifically evaluate the utilization of agricultural irrigation water in irrigation areas, using DEA model as a comparative reference, two indicators, canal system, and field, were selected to rank and calculate the water use efficiency in 20 irrigation areas in Heilongjiang Province. The main conclusions were as follows: The sequencing results of 20 irrigation districts evaluated by the method set model were all tested by Spearman test, which solved the problem of inconsistent results of different evaluation methods and was consistent with the sequencing results obtained by DEA model. The results of method set model showed that the efficiency values of Fuyu, Yongfa, Anbang River, Longtou Bridge, and Shilong irrigation districts were lower and their efficiency values were 0.58, 0.55, 0.54, 0.51, and 0.45. The average correlation between irrigation water use efficiency and canal system efficiency was 1.779, and the average correlation between irrigation water use efficiency and field efficiency was 1.229, which was greatly affected by the water use efficiency of canal system, but the field water efficiency was less affected. In order to reduce the loss of irrigation water in the water supply and distribution links of canals, measures such as lining of canals, rational planning of canal system layout and water saving measures such as controlling irrigation technology, spraying and dripping irrigation can be adopted to improve the efficiency of irrigation water use.

Keywords: method set model; DEA model; irrigation water use efficiency; comprehensive evaluation; Heilongjiang Province

灌溉用水效率是评价灌区灌溉水利用情况的重要依据,是指真正被作物利用的水量与用于灌溉的水量之比。正确评价灌溉区的用水效率能够为节水灌溉发展提供科学合理根据^[1-2]。对于灌溉用水效率的评价方法众多,如人工神经网络、主成分分析方法、SBM、DEA 等。方琳等^[3]运用非期望产出 SBM 模型,对 31 个省农业灌溉用水效率进行评价,分析了灌溉用水效率的差异性、变化趋势和发展潜力。张泽等^[4]运用模糊评价法对灌溉用水效率进行测算。杨丹等^[5]运用欧氏贴进度对农业灌溉用水效率进行排序。孙付华等^[6]运用 DEA-Malmquist 指数对 32 个省农业用水效率进行测算^[6]。综上所述可以看出,以往关于灌溉用水效率评价的研究都具有一定局限性,学者关于评价灌溉用水效率方法选择上存在单一性,无法避免单一方法自身的缺陷,进而增大计算误差。例如模糊评价法无法评价指标之间相关性、人工神经网络容易陷入局值、主成分分析解决非线性结果问题不理想、集对分析模型确定与否关系不清晰等。因此,为了提高计算准确性,缩小单一评价方法误差,本文运用由人工神经网络、主成分分析、模糊综合评价、集对分析构成的方法集模型对 2016 年黑龙江省 20 个大型灌区进行评价,且用 DEA 模型的评价结果作为参照,进一步突出方法集模型可行性,从而为科学评价灌溉用水效率提供一个新的思路。

1 研究区域概况

黑龙江省位于中国东北地区北部,占地 47.3 万 km²,地势西北、东南高,东北、西南低,由山地、平原和水面构成,为温带季风气候,夏季雨热同期,冬季冰冷霜雪,具有四季分明的特点。黑龙江省也是我国重要粮食产区之一,主要盛产大豆、玉米、水稻。截止到 2016 年,黑龙江省共有水库 1 156 座,水库总容量 2.75×10¹⁰ km²,有效灌溉面积 5 194 万 hm²,农业灌溉区 317 830 个,包括大(20 000 hm²以上)中(667~20 000 hm²)小(667 hm²以下)灌区,考虑到数据的可获得性,本文主要选取黑龙江省 20 个大型灌区进行灌溉用水效率评价。

2 评价指标选取

2.1 方法集模型的评价指标

灌溉水经过渠系输配水环节、田间用水环节,最后被作物所吸收利用,因此,渠系水和田间水综合影响灌溉用水效率^[7-8]。基于数据获取的难易程度及评价指标选取的科学性、代表性原则,本文建

立了图 1 所示的灌溉用水效率指标体系,其中,上面 4 个为渠系环节相关指标,下面 4 个为田间环节相关指标,各项评价指标的含义见表 1^[9-13]。

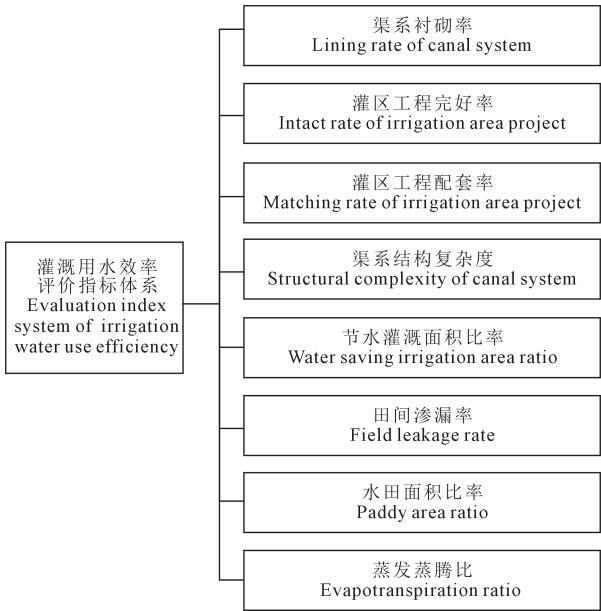


图 1 灌溉用水效率评价指标体系图
Fig.1 Evaluation indicator system of irrigation water use efficiency

表 1 灌溉水利用率评价指标含义
Table 1 Meanings of evaluating indicators for irrigation water use efficiency

影响因素 Influence factor	含义 Meaning
渠系衬砌率 Lining rate of canal system	衬砌渠道占总输水渠道的比例 Proportion of lined canal to total water conveyance canal
灌区工程完好率 Intact rate of irrigation area project	正常运作的工程占所有的比率 Proportion of projects in normal operation
灌区工程配套率 Matching rate of irrigation area project	现有工程占配套工程的比率 Ratio of existing projects to supporting projects
渠系结构复杂度 Structural complexity of canal system	渠道等级数和渠道总长度的乘积与主干渠总长度的比值 Ratio of the product of the number of channel grades and the total length of the channel to the total length of the main channel
节水灌溉面积比率 Water saving irrigation area ratio	采取节水技术的灌溉面积占总灌溉面积的比率 Ratio of irrigation area adopting water saving technology to total irrigation area
田间渗漏量 Field leakage	灌溉期田间渗漏总水量 Total amount of field leakage during irrigation
水田面积比率 Paddy area ratio	水田灌溉面积占总灌溉面积的比率 Ratio of irrigated area of paddy field to total irrigated area
蒸发蒸腾比 Evapotranspiration ratio	棵间蒸发量与作物蒸腾量之比 The ratio of evaporation between trees to crop transpiration

2.2 DEA 模型的评价指标

根据生产要素理论,本文选用农作物灌溉面积、农业机械总动力、农业劳动投入、农业灌溉用水量作为投入指标,农业总产值作为产出指标,如表 2 所示。且根据表 3 中变量之间的相关系数,反映出灌溉用水量与总产值之间具有很大的相关性,其相关系数为 0.5428,说明水资源在农业生产中的重要性。

本文数据均来自《黑龙江省统计年鉴》(2017)、黑龙江省水资源公报(2017)。其中,农业灌溉用水量用农业用水总量的 90%替代^[14],且本文数据经过归一化处理,保证了数据的平稳性。

3 研究方法

3.1 方法集模型

方法集模型是指在能单独完成对一个问题评价方法的基础上,根据相应的原则从中选择若干方法,并利用这些方法对所研究问题进行评价,进而通

表 2 农业灌溉用水效率评价指标

Table 2 Indicators for evaluation of agricultural irrigation water efficiency	
指标类别 Index category	指标名称 Index name
投入指标 Input indicators	农业灌溉用水量/ 10^7 m^3 Agricultural irrigation water consumption/ 10^7 m^3
	农作物灌溉面积/ 10^8 m^2 Irrigation area of crops/ 10^8 m^2
	农业机械总动力/ 10^5 kW Total power of agricultural machinery/ 10^5 kW
	农业劳动投入/ 10^5 people Agricultural labor input/ 10^5 people
	农业总产值/ 10^9 yuan Total agricultural output value/ 10^9 yuan
产出指标 Output index	

过合理的综合算法将它们进行优化组合。通过方法的集成,一方面可以弥补单一方法所带来的随机误差和系统偏差,另一方面,为解决一些问题提供了新思路^[15-17]。针对黑龙江省农业灌溉用水现状,我们提出了基于方法集计算的灌溉用水效率模型,如图 2 所示,基于方法集模型的评价体系步骤如下:

第一:分别利用单一的评价方法对黑龙江省灌溉区的用水效率做出评价,得出每种评价方法的排序结果。

第二:运用 Kendall 方法对每一种评价方法进行一致性事前检验,如果结果具有一致性,则进入步骤四,如果结果没有一致性,则进入步骤三。

第三:如果结果没有一致性,我们则针对不同的方法进行两两一致性检验,将具有一致性的归类到一起,然后再对样本进行分析,选择出客观实际具有一致性的方法,返回步骤二。

表 3 变量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between variables					
名称 Name	灌溉用水量 Irrigation water consumption	灌溉面积 Irrigated area	机械总动力 mechanical power	劳动投入 Labor input	总产值 Total output value
灌溉用水量 Irrigation water consumption	1				
灌溉面积 Irrigated area	0.3120	1			
机械总动力 Total mechanical power	0.1264	0.8650	1		
劳动投入 Labor input	0.1250	0.6828	0.8601	1	
总产值 Total output value	0.5428	0.7835	0.7543	0.5087	1

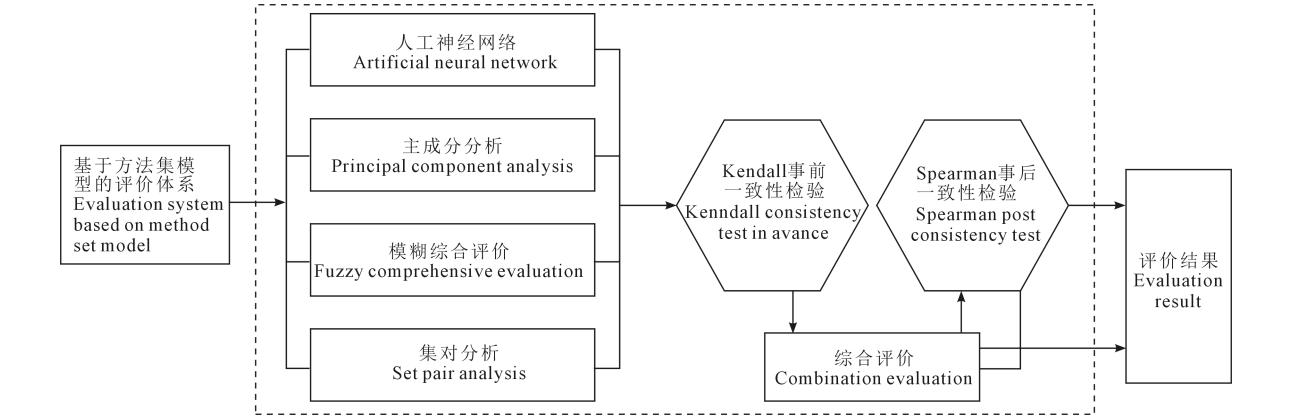


图 2 基于方法集模型的评价体系

Fig.2 Evaluation system based on method set model

第四:运用组合评价模型,即算数平均值法、Borda 法和 Copeland 法对单一评价方法进行综合评价,进而得出结果并进行排序。

第五:运用 Spearman 方法进行事后检验,对组合排序结果和步骤二的结果进行检验,如果没有通过检验,对步骤三和步骤四进行循环。

3.1.1 单一评价方法简介 对于农业灌溉用水效率评价问题,在综合考虑各种方法和现状后,选取人工神经网络模型、主成分分析模型、模糊综合评价和集对分析模型作为一个方法集进行评价灌溉用水效率,下面对这 4 种方法进行简单介绍。

(1)人工神经网络模型:由于针对农业灌溉用水评价时会涉及到很多影响因素,并且他们之间都有一定的相关性,然而人工神经网络能够强有力解决这类问题。

(2)主成分分析模型:主成分分析模型的原理简单且操作方便。首先对数据进行标准化处理,计算变量之间的相关系数,形成矩阵。其次,计算相关系数矩阵的特征值和特征向量,一般认为贡献率在 85%以上的为对应的主成分,进而计算主成分载荷量,最后根据特征向量和载荷量计算主成分得分。

(3)模糊综合评价模型:由于针对农业灌溉用水效率做出一个全面综合的评价,因此我们要建立一个全面的评价体系,并确定每个指标对应的权重,然而指标的权重都是来源于各个专家对于指标的主观判断,其具有模糊性,因此我们选取模糊综合评价模型进行构建方法集。

(4)集对分析模型:主要针对集对中两个集合确定与不确定性进行分析,由于农业灌溉用水效率评价中存在许多不确定性,因此我们选取集对分析模型构建方法集。

3.1.2 Kendall 事前检验

(1)提出假设: H_0 : m 种评价方法没有一致性; H_1 : m 种评价方法有一致性。

(2)统计量 X 的构建:

$$X = m(n - 1)W \tag{1}$$

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n r_i^2}{m^2 n (n^2 - 1)} - \frac{3(n + 1)}{n - 1} \tag{2}$$

$$r_i = \sum_{j=1}^m y_{ij} \tag{3}$$

其中, m 表示评价方法的个数; n 表示灌溉区的个数, y_{ij} 表示第 i 个灌区在第 j 种方法下的排序数值。

(3) 检验: 给出显著性水平 α , 如果 X 大于 $X_{\alpha/2}^2(n - 1)$, 则拒绝 H_0 , 接受 H_1 , 即各种方法在显

著性水平为 α 上具有一致性^[18]。

3.1.3 组合评价方法简介 如果各个评价方法结果均通过事前检验,则运用算数平均值法、Borda 模型和 Copeland 模型进行组合评价,得出评价结果^[19-20]。

(1) 算数平均值组合评价方法: 该方法将单一评价方法的排序转换为分数 R_{ik} , 即第 1 名得 n 分, 第 n 名得 1 分, 如果有一样的名次, 则取它们的平均分, 再计算不同得分均值, 计算公式为:

$$\bar{R}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R_{ik} \tag{4}$$

其中, m 表示评价方法的个数, k 表示组合评价方法个数。如果出现平均值相等的情况, 按照式 (5) 计算标准差, 其越小排序的结果越靠前。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (R_{ik} - \bar{R}_i)^2} \tag{5}$$

(2) Borda 组合评价方法: 此方法按照少数服从多数的准则, 如果评价结果 y_i 优于 y_j 的数量比 y_j 优于 y_i 的数量多, 可以表示为 $y_i > y_j$, 如果数量相等, 表示为 $y_i = y_j$ 。

Borda 矩阵的定义 $B = \{b_{ij}\}_{n \times n}$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & y_i > y_j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

y_i 的得分定义为 $b_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$, 如果根据得分 b_i 重新进行排序, 如果 b_i 和 b_j 分数相等, 则标准差小的排序结果靠前。

(3) Copeland 组合评价方法: 此方法能够充分考虑“次于”和“相等”的情形, 弥补了 Borda 模型的不足之处, 公式为:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & y_i > y_j \\ 0, & \text{其他} \\ -1, & y_i < y_j \end{cases} \tag{7}$$

y_i 的得分定义为 $c_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}$, 依据 c_i 的大小重新进行排序, 如果 $c_i = c_j$, 则标准差小的排序结果在前面。

(4) Spearman 事后检验: 运用 Spearman 法检验组合方法的评价与单一方法的评价结果之间的密切程度, 从而选择最优的组合评价结果。计算过程如下:

构造统计量 $t_k (k = 1, 2, 3)$

$$t_k = \rho_k \sqrt{\frac{n - 2}{1 - \rho_k^2}} \quad \rho_k = \frac{1}{m} \rho_{jk} \tag{8}$$

$$\rho_{jk} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_{ik} - x_{ij})^2}{n(n^2 - 1)} \tag{9}$$

式中, n 为灌区对象的数量; m 为单一评价方法的数量; ρ_{jk} 为第 k 种组合评价方法和 j 种评价方法的等级相关系数; x_{ik}, x_{ij} 分别为第 i 个灌区在第 j 种评价方法的排序值和在第 k 种组合评价方法下的排序值。假设 H_0 : 第 k 种组合方法与原 m 种单一评价方法没有关系, H_1 : 第 k 种组合方法与 m 种单一评价方法有关系; 给定的显著性水平 α 下, 查表对应临界值 C_α , 当 $t_k > C_\alpha$ 时, 拒绝原假设 H_0 , 接受 H_1 , 说明两种评价方法之间具有相关性^[21]。

3.1.4 关联度分析 关联度分析是系统量化比较的一种方法, 该方法能够分析系统内各因素间相互关系的密切程度, 能够较好地解决样本容量小且线性关系不明显的相关性问题。关联的计算公式如下:

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(t_k) + \xi \Delta_{\max}} \tag{10}$$

其中, n 为灌区个数; r_{0i} 为灌溉用水效率与渠系水利用效率、田间水利用效率的关联度 ($i = 1, 2$); ξ 为分辨系数, 一般取值 0.5; $\Delta_{\min}$ 为各灌区灌溉用水效率与渠系水利用效率、田间水利用效率的最小绝对值差值; $\Delta_{\max}$ 为各灌区灌溉用水效率与渠系水利用效率、田间水利用效率的最大绝对值差值; $\Delta_{0i}(t_k)$ 为灌区灌溉用水效率与渠系水利用效率、田间水利用效率的绝对值差值。

3.2 DEA 模型

数据包络分析方法 (DEA) 是经济学与运筹学知识相互交叉的一个方法, 根据多投入和多产出的指标, 运用线性规划进行相对效率评价的一种方法。该模型包含投入型和产出型两种, 且根据规模报酬是否可变, 分为纯技术效率 (BCC)、规模效率和总技术效率 (CCR), 本文主要运用投入型的总技术效率进行灌溉用水评价。

假设有 n 个决策单元, m 个投入要素和 s 个产出要素, 对于第 p 个决策单元, $X^p = \{X_{1p}, X_{2p}, X_{3p}, \dots, X_{mp}\}^T$ 为 DMU_i 的投入要素, $Y_p = \{Y_{1p}, Y_{2p}, Y_{3p}, \dots, Y_{sp}\}^T$ 为 DMU_i 的产出要素, 则投入导向的 CCR 模型如下:

$$\max \frac{\sum_{k=1}^s u_k Y_{kp}}{\sum_{j=1}^m v_j X_{jp}}$$

约束条件:

$$\frac{\sum_{k=1}^s u_k Y_{ki}}{\sum_{j=1}^m v_j X_{ji}} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n$$
$$u_k, v_j \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, s \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{11}$$

其中, y_{ki} 表示 DMU_i 对第 k 种输出的产出量, x_{ji} 表示 DMU_i 对第 j 种输入的投入量, u_k 表示对 k 种输出的度量, v_j 表示对 j 种输入的度量。由于本文评价的是灌溉用水效率, 只考虑水资源投入的灌溉用水量, 因此构建分向量 DEA 模型, 则上述分式方程式可以根据 C^2 转换及对偶过程转变为如下模型:

$$\min \theta$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ji}^w - \theta x_{jp}^w \leq 0$$
$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ji}^{n-w} - x_{jp}^{n-w} \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{12}$$
$$\sum_{j=1}^n \lambda_i y_{ki} - y_{kp} \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, s$$
$$\lambda_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中, θ 表示效率值, λ_i 表示对偶变量, x_{ji}^w 和 x_{jp}^w 表示农业灌溉用水投入, x_{ji}^{n-w} 和 x_{jp}^{n-w} 表示灌溉水资源以外的其他农业投入。

4 实例分析

本文以黑龙江省的样点灌区作为评价对象, 选取兴北、朝阳、红旗岭、讷南、宋集屯、团山子、新城、新安、中和、河东、小河口、华炉、联丰、星火、双阳、富裕、永发、安邦河、龙头桥、石龙共计 20 个灌区, 用方法集和 DEA 两种模型对灌区的灌溉用水效率进行评价。

4.1 方法集模型的结果

利用单一评价方法对黑龙江省 20 个灌区用水效率进行评价, 如表 5 所示。

运用 Kendall 模型对表 5 结果进行一致性检验, 计算出, $W = 0.99, X = 75.16$, 当显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, 查表得 $X^2_{\alpha/2}(19) = 36.20$, 即 $X > X^2_{\alpha/2}(19)$, 所以拒绝 H_0 , 接受 H_1 , 即在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的情况下, 说明 4 种评价方法的结果具有一致性, 通过事前检验, 可进行组合评价。

基于表 5 分别运用算数平均值法、Borda 模型和 Copeland 模型进行组合评价, 且经过 2 次迭代修正, 得到结果如表 6 所示。

表 5 各单一方法评价得分

Table 5 Evaluation score of single evaluation method

灌区名称 Name of irrigation district	人工神经网络 Artificial neural network		主成分分析 Principal component analysis		模糊综合评价 Fuzzy comprehensive evaluation		集对分析模型 Set pair analysis model	
	得分 Score	排序 Sort	得分 Score	排序 Sort	得分 Score	排序 Sort	得分 Score	排序 Sort
兴北 Xingbei	92.89	1	335.39	1	83.71	1	22.99	1
朝阳 Zhaoyang	91.02	2	326.02	2	82.11	3	22.45	2
红旗岭 Hongqiling	90.85	3	318.83	3	82.77	2	20.81	3
讷南 Nenan	90.42	4	310.62	5	82.01	4	20.33	4
宋集屯 Songjitun	86.24	5	311.36	4	81.55	5	19.55	5
团山子 Tuanshanzi	84.36	6	240.63	6	81.33	6	19.15	6
新城 Xincheng	81.88	7	240.23	7	81.11	8	15.33	9
新安 Xinan	80.21	8	237.56	8	81.12	7	17.33	8
中和 Zhonghe	80.01	9	231.46	9	81.10	9	18.88	7
河东 Hedong	78.74	10	220.02	11	80.66	10	14.77	10
小河口 Xiaohekou	76.77	11	227.18	10	80.66	11	13.99	11
华炉 Huahu	76.52	12	196.87	12	79.01	15	13.22	12
联丰 Lianfeng	76.04	13	195.20	13	80.12	12	12.88	13
星火 Xinghuo	74.72	14	178.15	14	79.88	13	12.66	14
双阳 Shuangyang	69.02	15	131.87	16	79.77	14	12.11	15
富裕 Fuyu	66.65	16	111.77	17	78.12	16	5.66	17
永发 Yongfa	66.58	17	161.86	15	78.11	17	11.33	16
安邦河 Anbanghe	65.23	18	100.36	18	76.71	20	4.89	18
龙头桥 Longtouqiao	64.98	19	94.78	19	77.10	18	4.78	19
石龙 Shilong	63.72	20	79.99	20	77.02	19	1.66	20

表 6 组合评价得分及排序

Table 6 Scorings and rankings of combinational evaluation method

评价方法 Evaluation method	兴北 XB	朝阳 ZY	红旗岭 HQL	讷南 NN	宋集屯 SJT	团山子 TSZ	新城 XC	新安 XA	中和 ZH	河东 HD	小河口 XHK	华炉 HL	联丰 LF	星火 XH	双阳 SY	富裕 FY	永发 YF	安邦河 ABH	龙头桥 SLQ	石龙 SL
算数平均 Arithmetic average	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	13	12	14	15	16	17	18	19	20
Borda	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	13	12	14	15	16	17	18	19	20
Copeland	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	13	12	14	15	16	17	18	19	20

如表 6 所示,组合评价最终得出的排序结果一致,进而利用 Spearman 法对三种组合评价模型的结果与单一模型的结果进行事后检验,得出 $t_a = 33.59, t_b = 33.59, t_c = 33.59$,经查表,在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下, $C_{\alpha} = t_{\alpha/2}(18) = 2.878$,显然 $t_a = t_b = t_c > t_{\alpha/2}(18)$,表明组合评价方法与单一评价方法的排序结果有关,且证明方法集模型可以有效解决不同排序结果不一致的问题。

为进一步分析灌溉用水效率受不同灌溉环节的影响程度,同样利用方法集模型对渠系水利用效率及田间水利用效率进行排序分析,并灌溉用水效率排序结果与渠系水利用效率、田间水利用效率的关联度,结果见表 7。

从表 7 可以得出,20 个灌区灌溉用水效率与渠系效率平均关联度为 1.779,与田间效率平均关联度为 1.229,说明灌溉用水效率受渠系水效率大于田间水效率。其中,富裕灌区受渠系影响最大,关联度为 3,兴北最小,为 0.71;龙头桥受田间水效率影响最大,关联度为 1.97,团山子受影响最小,为 0.50。

表 7 灌溉用水效率关联度排序

Table 7 Sorting of correlation degree of irrigation water use efficiency

灌区名称 Name of irrigation district	渠系水效率关联度 Correlation degree of water efficiency of canal system	田间水效率关联度 Correlation degree of field water efficiency
河东 Hedong	2.33	1.29
新安 Xinan	1.40	1.29
星火 Xinghuo	1.80	1.77
龙头桥 Longtouqiao	2.04	1.97
安邦河 Anbanghe	2.11	1.40
宋集屯 Songjitun	2.00	1.22
兴北 Xingbei	0.71	0.60
富裕 Fuyu	3.00	1.19
双阳 Shuangyang	2.16	1.67
团山子 Tuanshanzi	0.87	0.50
永发 Yongfa	2.56	1.59
中和 Zhonghe	2.33	0.87
新城 Xincheng	1.55	1.08
讷南 Nenan	1.00	1.15
联丰 Lianfeng	1.18	1.30
石龙 Shilong	2.68	0.76
红旗岭 Hongqiling	1.67	1.40
华炉 Huahu	1.26	1.48
朝阳 Zhaoyang	1.00	0.71

4.2 DEA 模型的结果

基于公式和 DEA-SOLVER 软件,对 2016 年黑龙江省 20 个灌区进行了评价,如表 8 所示,发现灌区效率值处于中等水平,其均值为 0.78,还存在提升的空间,且排序结果与方法集模型的结果一致,值得一提的是,因为效率值有重复的,所以可能会存在一定的误差。

表 8 DEA 模型效率值及排序

地区 Region	效率值 Efficiency value	排序 Order
兴北 Xingbei	1	1
朝阳 Zhaoyang	1	2
红旗岭 Hongqiling	1	3
讷南 Nenán	1	4
宋集屯 Songjitun	0.96	5
团山子 Tuanshanzi	0.94	6
新城 Xincheng	0.91	8
新安 Xinan	0.92	7
中和 Zhonghe	0.82	9
河东 Hedong	0.76	10
小河口 Xiaohekou	0.74	11
华炉 Hualu	0.7	13
联丰 Lianfeng	0.72	12
星火 Xinghuo	0.69	14
双阳 Shuangyang	0.67	15
富裕 Fuyu	0.58	16
永发 Yongfa	0.55	17
安邦河 Anbanghe	0.54	18
龙头桥 Longtouqiao	0.51	19
石龙 Shilong	0.45	20
均值 Mean value	0.78	-

通过 DEA 模型的结果参照可以看出,方法集模型不仅可以解决不同方法排序结果不一致问题,而且计算排序结果准确。从表 6 和表 7 也可以看出,兴北、朝阳、红旗岭和讷南四个灌区用水效率最高,富裕、永发、安邦河、龙头桥、石龙五个灌区效率值较低,排序靠后。用水效率受渠系水利用效率影响较大,田间水效率影响较小,可采取渠道衬砌,合理规划渠系布局等方式减少渠道输配水环节的灌溉水损失,采取控制灌溉技术及喷、滴灌溉等节水措施。

5 结 论

本文运用方法集对黑龙江省 20 个灌区的灌溉用水效率进行评价,并参照 DEA 模型,比较两种模型的最终结果,得出的主要结论如下:

(1)根据数据获取的难易程度与指标评价的科学性、代表性原则,建立了灌溉用水效率评价指标体系,其中,方法集模型主要从渠系输配水环节和

田间用水环节两个方面进行综合考虑,DEA 模型主要从土地、劳动力、技术、用水量四个生产要素进行综合考虑,两种模型虽指标选取不同,但都综合考虑了灌溉用水的特点,符合实际情况。

(2)利用方法集模型进行灌溉用水效率评价,弥补了单一评价方法存在的局限,并通过 Kendall 事前检验与 Spearman 事后检验,保证各方法与组合评价结果一致,从而验证了方法集模型的有效性,达到取长补短的效果,但对于方法集模型测算具体效率值方面还值得进一步研究。

(3)运用 DEA 模型有效验证了方法集模型的准确性,且该模型不指定任何生产函数,只通过投入产出值来建立线性生产前沿,应用方便灵活,为后人对灌溉用水效率评价提供了借鉴,但 DEA 方法只是将决策单元与其他最佳生产状态的决策单元进行比较,容易受个别极端样本的影响,且没有将运气、随机误差等因素与效率值分开,也会产生一定测量误差。

(4)黑龙江省灌溉用水效率的提高是一个不断探索改进的过程,这就需要了解目前灌溉用水效率现状,以此针对薄弱环节采取相应措施,富裕、永发、安邦河、龙头桥、石龙五个灌区效率值较低,排序靠后,受渠系水利用效率影响较大,田间水效率影响较小,可采取渠道衬砌,合理规划渠系布局等方式减少渠道输配水环节的灌溉水损失,采取控制灌溉技术及喷、滴灌溉等节水措施。本文虽然对灌溉用水效率关联度进行了分析,但对于影响黑龙江省灌溉用水效率因素还需深入研究,以此更有针对性地促进黑龙江省灌溉用水效率的提升。

参 考 文 献:

[1] 贾宏伟,郑世宗.灌溉水利用效率的理论、方法与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[2] 茆智.灌溉用水有效利用系数测算分析有助于进一步明确农业节水的主攻方向[J].中国水利,2009(3):5-6.

[3] 方琳,吴凤平,王新华,等.基于共同前沿 SBM 模型的农业用水效率测度及改善潜力[J].长江流域资源与环境,2018,27(10):2293-2304.

[4] 张泽的,刘东,张皓然,等.基于 PSO-AHP 与粗集理论组合赋权的灌溉用水效率评价[J].节水灌溉,2018(10):59-63,67.

[5] 杨丹,唐彦,唐德善.基于熵权的模糊物元法在农业用水效率评价中的应用[J].节水灌溉,2018(10):64-67.

[6] 孙付华,陈汝佳,张兆方.基于三阶段 DEA-Malmquist 区域农业水资源利用效率评价[J].水利经济,2019,37(2):53-58,78.

[7] 冯保清.我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.

[8] 王小军,张强.广东省灌溉水有效利用系数影响因素的动静态分析[J].水利水电科技进展,2015,35(2):6-11.

- [9] 付强,刘巍,刘东,等.黑龙江省灌溉用水效率指标体系空间格局研究[J].农业机械学报,2015,46(12):127-132.
- [10] 杨晓慧,黄修桥,陈震,等.基于 DSSAT 模拟的灌溉用水效率评价指标比较[J].农业工程学报,2015,31(24):95-100.
- [11] 谭芳,崔远来,王建漳.灌溉水利用率影响因素的主成分分析——以漳河灌区为例[J].中国农村水利水电,2009(2):70-73.
- [12] 王小军,张强,古璇清.基于分形理论的灌溉水有效利用系数空间尺度变异[J].地理学报,2012,67(9):1201-1212.
- [13] 闫昕.黑河中游灌区不同尺度灌溉水有效利用系数估算[D].北京:中国水利水电科学研究院,2015.
- [14] 翟浩辉.因地制宜,注重实效,坚持不懈开展农田水利基本建设[EB/OL].(2002-09-06)中国水利网. <http://www.chinawater.com.cn>
- [15] 陈国宏,李美娟.基于方法集的综合评价方法集化研究[J].中国管理科学,2004,12(1):101-105.
- [16] 于明洁,郭鹏,朱煜明,等.基于方法集的棕地再开发项目组合评价研究[J].运筹与管理,2011,20(3):119-126.
- [17] 陈衍泰.基于方法集的组合评价研究[D].福建:福州大学,2004.
- [18] 王刚,黄丽华,高阳,等.基于方法集的农业产业化综合评价模型[J].系统工程理论与实践,2009,29(4):161-168.
- [19] 李浩鑫,邵东国,何思聪,等.基于循环修正的灌溉用水效率综合评价方法[J].农业工程学报,2014,30(5):65-72.
- [20] 美娟,陈国宏,陈勃,等.基于方法集化的动态组合评价方法研究[J].中国管理科学,2013,21(2):132-136.
- [21] 罗晓玲,张萍,任鹏,等.非参数 Spearman 秩相关检验在油气识别中的应用[J].沈阳大学学报,2008,20(3):99-102.
- [22] 刘巍.黑龙江省灌溉水利用效率时空分异规律及节水潜力研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [23] Levine P, Pomerol J C. Priam, an interactive program for choosing among multiple attribute alternatives[J]. European Journal of Operational Research, 1986, 25(2):272-280.
- [24] Grabowski M, Wallace W A. An expert system for maritime pilots: Its design and assessment using gaming[J]. Management Science, 1993, 39(12):1506-1520.
- [25] Schierholt K, Dagli C H. Stock market prediction using different neural network classification architectures[C]// IEEE/IAFE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering, IEE Xplore, 1996:72-78.
- [26] Lu J. Economic entropy and its application to the structure of the transport system[J]. Quality & Quantity, 1996, 30(2):161-171.
- [27] Steiger N M, Wilson J R. An improved batch means procedure for simulation output analysis[J]. Management Science, 2002, 48(12):1569-1586.
- [28] Clemen R T, Fischer G W, Winkler R L. Assessing Dependence: Some experimental results[J]. Management Science, 2000, 46(8):1100-1115.

(上接第 123 页)

- [10] Pasternak D, Sagih M, Demalach Y, et al. Irrigation with brackish water under desert conditions XI. Salt tolerance in sweet-corn cultivars[J]. Agricultural Water Management, 1995, 28(4):325-334.
- [11] Eggleton M, Zegada-Lizarazu W, Ephrath J, et al. The effect of brackish water irrigation on the above- and below-ground development of pollarded Acacia salignashrubs in an arid environment[J]. Plant and Soil, 2007, 299(1-2):141-152.
- [12] 陈素英,张喜英,邵立武,等.微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):579-585.
- [13] 乔冬梅,吴海卿,齐学斌,等.不同潜埋深条件下微咸水灌溉的水盐运移规律及模拟研究[J].水土保持学报,2007,21(6):7-10.
- [14] 万书勤,康跃虎,王丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌番茄耗水量和土壤盐分变化[J].农业工程学报,2008,24(10):29-33.
- [15] 雷廷武,肖娟,王建平,等.地下咸水滴灌对内蒙古河套地区蜜瓜用水效率和产量品质影响的试验研究[J].农业工程学报,2003,19(2):85-89.
- [16] 李金刚,屈中义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.
- [17] 陶君,田军仓,李建设,等.温室辣椒不同微咸水膜下滴灌灌溉制度研究[J].中国农村水利水电,2014(5):68-72,80.
- [18] 苏莹,王全九,叶海燕,等.咸淡轮灌土壤水盐运移特征研究[J].灌溉排水学报,2005,24(1):50-53.
- [19] 毕远杰,王全九,雪静.微咸水造墒对油菜生长及土壤盐分分布的影响[J].农业工程学报,2009,25(7):39-44.
- [20] 陈艳梅,王少丽,高占义,等.基于 SaltMod 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):11-16.
- [21] 陈琳,田军仓,闫新房.微咸水不同灌溉方式对温室膜下滴灌黄瓜的影响[J].宁夏工程技术,2016,15(6):97-101.
- [22] 吴军虎,陶汪洋,赵伟,等.微咸水膜下滴灌不同灌水量对水盐运移和棉花生长的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):272-276,329.
- [23] 黄丹,王春霞,何新林,等.微咸水膜下滴灌时序对土壤盐分及作物产量的影响[J].灌溉排水学报,2014(1):7-11.
- [24] 刘婷娜,高艳明,李建设,等.不同矿化微咸水入渗下土壤水盐运移特征研究[J].灌溉排水学报,2014(3):68-72.
- [25] 何雨江,汪丙国,王在敏,等.棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2000,26(7):14-20.
- [26] 万书勤,康跃虎,王丹,等.微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J].农业工程学报,2007,23(3):30-35.
- [27] 栗涛,王全九,张振华,等.矿化度对紫花苜蓿发芽率和株高的影响[J].农业机械学报,2013,44(10):159-163.
- [28] 张艳红,焦艳平,刘为忠,等.微咸水灌溉对苹果、梨的产量和品质以及土壤盐分的影响[J].南水北调与水利科技,2012,12(6):118-122.