

DOI: 10.13671/j.hjkxb.2023.0409

贺玉晓, 杨璐, 杜颖, 等. XXXX. 基于改进组合赋权-TOPSIS模型的农村污水处理设施效果评价[J]. 环境科学学报, XX(X): 1-8

HE Yuxiao, YANG Lu, DU Ying, et al. XXXX. Effect evaluation of rural sewage treatment facilities based on improved combination weighting-TOPSIS model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, XX(X): 1-8

# 基于改进组合赋权-TOPSIS模型的农村污水处理设施效果评价

贺玉晓<sup>1</sup>, 杨璐<sup>1</sup>, 杜颖<sup>2</sup>, 任玉芬<sup>3,\*</sup>, 徐华山<sup>2</sup>, 韩旭<sup>2</sup>, 孙常磊<sup>2</sup>, 隋英丽<sup>2</sup>

1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000

2. 北京市排水管理事务中心, 北京 100195

3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京京津冀区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站, 北京 100085

**摘要:** 农村生活污水处理设施运行效果的优劣关系农村环境综合整治、乡村振兴战略规划目标的实现。为分类评价农村污水处理设施运行效果, 从经济、技术和管理3个层面确定了12项评价指标, 建立了农村污水处理设施效果评价指标体系; 并利用多准则决策理论, 构建了基于模糊层次分析法(FAHP)、改进熵权法和逼近理想解排序法(TOPSIS)的农村污水处理设施效果评价模型, 对农村污水处理设施效果进行评价研究。选取15座农村污水处理设施作为评价对象, 分规划设计和运行管理两阶段, 开展设施效果评价, 对评价对象进行优劣排序, 验证该方法的可行性。结果表明, 建立的农村污水处理设施评价指标体系和构建的评价方法具有较高实践可行性和较强实际适用性; 评价方法较好地地区分了规划设计阶段和运行管理阶段重要的考量指标; 实际案例验证中规划设计阶段和运行管理阶段均是XBT污水处理站排名最高(相对贴近度分别为0.9137、0.8961), DYZ污水处理站排名最低(相对贴近度分别为0.2759、0.2961), 计算结果与实际情况一致。研究结果可为本区域农村污水处理设施规划和运行管理提供技术支持, 为同类地区农村污水处理设施评价提供技术参考。

**关键词:** 农村污水处理设施; 组合赋权; 模糊层次分析法; 改进熵权法; TOPSIS法; 效果评价

文章编号: 0253-2468(XXXX)XX-0001-08

中图分类号: X820

文献标识码: A

## Effect evaluation of rural sewage treatment facilities based on improved combination weighting-TOPSIS model

HE Yuxiao<sup>1</sup>, YANG Lu<sup>1</sup>, DU Ying<sup>2</sup>, REN Yufen<sup>3,\*</sup>, XU Huashan<sup>2</sup>, HAN Xu<sup>2</sup>, SUN Changlei<sup>2</sup>, SUI Yingli<sup>2</sup>

1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000

2. Beijing Drainage Management Center, Beijing 100195

3. Research Center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing-Tianjin-Hebei Urban Megaregion National Observation and Research Station for Eco-Environmental Change, Beijing 100085

**Abstract:** The operation effect of rural domestic sewage treatment facilities is crucial in the comprehensive improvement of the rural environment and realizing the strategic planning goal of rural revitalization. In order to classify and evaluate the operation effect of rural sewage treatment facilities, a set of 12 evaluation indexes covering the levels of economy, technology, and management was established. The evaluation index system of rural sewage treatment facilities was established. Based on the theory of multi-criteria decision-making, the effect evaluation model of rural sewage treatment facilities based on the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), improved entropy weight method, and the method of approximation of the ideal solution ordering (TOPSIS) was constructed to evaluate the effect of rural sewage treatment facilities. Fifteen rural sewage treatment facilities were selected as the evaluation objects, and the facility effect evaluation was carried out in two stages: planning and design and operation and management. The results showed that the established evaluation index system and evaluation method for rural sewage treatment facilities have highly practical feasibility and practical applicability. The evaluation method better distinguished the important consideration indexes in both stages. In the actual case verification, the XBT sewage treatment station ranked the highest in the planning and design stage and the operation and management stage (relative closeness was 0.9137 and 0.8961, respectively). The DYZ sewage treatment station ranked the lowest (relative closeness was 0.2759 and 0.2961, respectively), and the calculation results were consistent with the actual situation. The research results can provide technical support for the planning,

收稿日期: 2023-09-22

修回日期: 2023-12-01

录用日期: 2023-12-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.32271627)

作者简介: 贺玉晓(1976—), 女, 副教授(博士), E-mail: heyuxiao@hpu.edu.cn; \* 责任作者, E-mail: yfren@rcees.ac.cn

design, and operation management of rural sewage treatment facilities in this area and provide a technical reference for evaluating rural sewage treatment facilities in similar areas.

**Keywords:** rural sewage treatment facilities; combination weighting; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); improved entropy weight method; TOPSIS method; effect evaluation

## 1 引言(Introduction)

农村生活污水治理是农村人居环境整治的重要内容,是美丽乡村建设的重要组成部分,也是实施乡村振兴战略的重要举措(史世强等, 2022).近年来,农村生活污水治理受到地方政府部门高度重视,大量农村污水处理设施规划和建成运行,取得了良好的环境效益和社会效益,但受技术和管理水平制约,部分设施运行效果不佳(袁平, 2020;孟庆义等, 2022).如何对规划和建成投产运行的农村污水处理设施实施科学评价,提升规划运行管理水平,最大发挥财政资金效益,受到各级政府管理部门热烈关切.构建科学合理的农村生活污水治理设施运行效果评价方法,选取客观、经济、实用的评价指标体系是实现农村污水处理设施评价的基础.目前常用的农村生活污水治理设施效果评价指标赋权方法主要有层次分析法(张杰, 2021)、熵权法(袁平, 2020)、变异系数法(王军民, 2018)、主成分分析法(陈莹等, 2021)等.张杰(2021)选取13个评价因子建立了广东省清城区农村污水处理效果评价体系,采用层次分析法对清城区1656个农村污水治理效果进行评估,明确了该区域农村污水治理的成果和存在问题.袁平(2021)采用熵权法与变异系数法对浙江省300个农村生活污水治理设施运行现状进行评价,明确了设施站点的改造内容及区域的改造重点.然而,层次分析法属于主观赋权法,具有一定的主观性;熵权法、变异系数法和主成分分析法属于客观赋权法,依赖原始数据,变化幅度较大的指标必然占较大权重,部分情况下不符合决策要求,不能分阶段体现指标之间的相对重要程度,如作为农村污水处理厂站评价的常用指标污水收集管网建设投资,规划设计阶段其权重要高于运行管理阶段权重,但采用模糊层次分析法和熵权法赋值时,无法区分该指标在这两个阶段的相对重要性,没有考虑决策者的主观意向,其权重可能与实际重要程度相差较大.因此,单独的主观赋权法或者客观赋权法均不能准确反映评价指标的真实权重,采取主客观相结合的组合赋权能够有效的避免单独主客观赋权法的缺陷,使评价方法更合理.

逼近理想值排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)是由Hwang和Yoon提出的一种适用于有限方案多目标决策的综合评价方法,主要借助于决策问题的“正理想解”和“负理想解”进行排序优选(张军等, 2009).TOPSIS法作为定量评估方法在多个领域中都有应用,如系统评估(Huang *et al.*, 2018)、优化选择(Santos *et al.*, 2016)以及质量综合评价(苏吉凯等, 2023)等.Meng等(2018)采用熵权法-TOPSIS法评价雅安市丘陵区水资源生态风险的时空变化特征,为丘陵区水资源生态风险管控提供了科学依据;严梦帆等(2023)采用德尔菲法和TOPSIS法综合评价垃圾焚烧发电厂,为现行生活垃圾焚烧厂评价工作提供新的评分思路;Santos等(2016)采用AHP-TOPSIS法优选出农村污水处理最佳方案;赵泞等(2021)构建了基于熵权法和TOPSIS法的海水淡化原水预处理工艺筛选评估模型,筛选评估出了最适宜的预处理工艺方案.张德彬等(2018)提出将模糊层次分析法和熵权法确定的权重进行线性加权确定组合权重,结合改进TOPSIS模型确定了德阳市地下水水源水质等级.在当前国内外的研究中,鲜少有将TOPSIS法应用于农村污水处理设施效果评价.

鉴于传统层次分析法确定指标权重过于主观的局限性和鲜有多目标分类综合评价农村污水处理设施效果的现状,构建了一种基于FAHP法、改进熵权法和TOPSIS法的农村污水处理设施效果评价方法.该法采用模糊层次分析法确定主观权重,解决AHP法因评价指标过多,很难保证思维一致性的问题,利用改进熵权法对主观权重进行修正,与传统熵权法相比,改进熵权法可以克服在所有熵值趋近于1时熵值微小的差距将引起熵权成倍地变化的问题(王玉梅等, 2021),两种方法结合可以克服单一赋权缺陷,得到更客观的组合权重值.将组合权重值和TOPSIS法应用于某省(市)15个农村污水处理厂站处理设施效果分类评价,验证该方法的适用性,相关结果可为同种类型地区的农村污水处理设施规划和运行管理规划提供技术支撑,具有重要的理论和现实意义.

2 农村污水处理设施效果评价体系 (Effect evaluation system of rural sewage treatment facilities)

2.1 农村污水处理设施效果评价指标体系

参考文献(刘天舒, 2021;刘璐等, 2023),结合区域农村污水处理设施规划设计和运行管理现状,构建农村污水处理设施运行效果评价指标体系(图1).指标体系由经济、技术和管理3个系统层的4个准则层的12项指标构成.12项指标中除运行管理制度完善率属于定性指标外,其余指标均属于定量指标.其中,经济指标系统层包括工程投资和运行维护费用2个准则层,由设备设施建设购置费、污水收集管网建设投资、运行费用和维护费用4项指标组成;技术指标系统层包括污染物去除率1个准则层,由COD去除率、SS去除率、氨氮去除率、总氮去除率和总磷去除率5项指标组成;管理指标系统层包括技术操作和运行维护管理1个准则层,由运行负荷率、设备在线率和运行管理制度完善率3项指标组成.

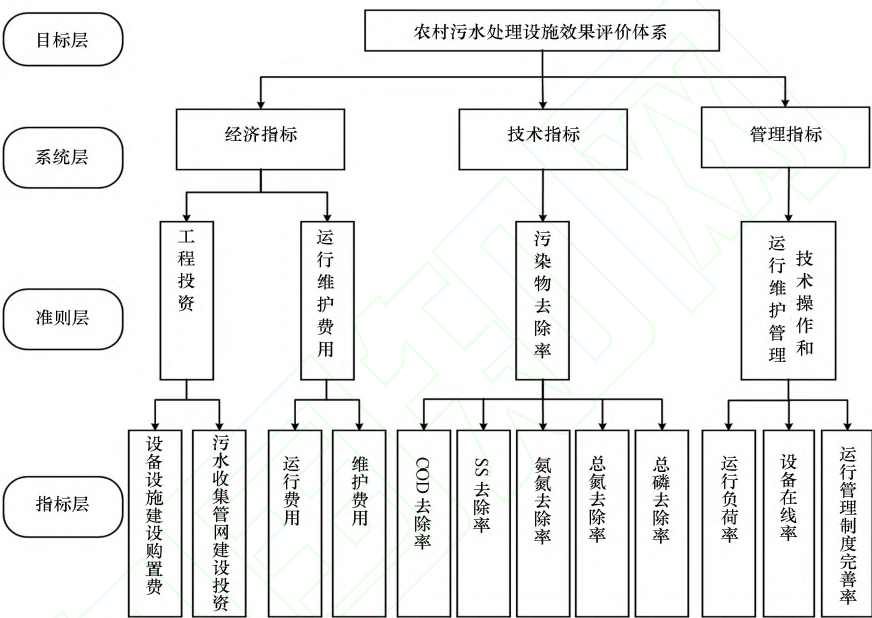


图1 农村污水处理设施运行效果评价指标体系

Fig. 1 Rural sewage treatment facilities operation effect evaluation index system

2.2 评价指标权重确定

2.2.1 模糊层次分析法 模糊层次分析法(FAHP)

是一种计算主观权重的方法,与层次分析法相比,FAHP根据模糊数学理论,构造了更符合人类思维模式的模糊一致判断矩阵(Liu *et al.*, 2021),主要步骤如下:

(1)建立模糊互补判断矩阵.模糊层次分析法通过将同一层级的指标以上一级指标为准则进行两两比较,通过0.1~0.9数量标度法(范英等, 2014)

对各指标的重要程度进行量化,从而建立模糊互补判断矩阵,见表1.

按照0.1~0.9数量标度法得到的模糊互补判断矩阵如式(1)所示.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & a_{ij} & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

(1)

表1 0.1~0.9标度法

Table 1 0.1 ~ 0.9 scale method

标度	含义
0.5	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 同样重要
0.6	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 相比较,因素 <i>i</i> 稍微重要
0.7	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 相比较,因素 <i>i</i> 明显重要
0.8	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 相比较,因素 <i>i</i> 强烈重要
0.9	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 相比较,因素 <i>i</i> 极端重要
0.1,0.2,0.3,0.4	为因素 <i>i,j</i> 之间的反比

式中,矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$ ,  $0 \leq a_{ij} \leq 1$  且  $a_{ij}+a_{ji}=1$ ,  $n$  代表矩阵的阶数.

(2)建立模糊一致判断矩阵.对模糊互补矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  按行求和得对模糊互补矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  按行求和得  $r_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}$ ,  $i, k = 1, 2, \dots, n$ , 再作以下数学变换,如式(2)所示.

$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \quad (2)$$

从而得到模糊一致判断矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times n}$ . 由公式(2)可知,实施简单数学变换后可满足  $r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5$ ,  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ , 根据参考文献(丁斌等, 2009)定义5可知,矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times n}$  为模糊一致矩阵,它满足一致性检验,无需进行一致性检验.

(3)计算权重.基于模糊一致判断矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times n}$  计算各指标的权重  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 如式(3)所示.

$$\omega_i = \frac{2 \sum_{j=1}^n r_{ij} - 1}{n(n-1)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中,  $\omega_i$  为各指标的权重.

记向量  $W_{FAHP}$  作为FAHP法求得的权重.

**2.2.2 改进熵权法** 熵权法(EWM)是一种计算客观权重的方法,可以消除指标权重的主观性,有利于得到符合客观事实的评价结果.据信息熵定义,对于某项指标,可用熵值来判断其离散程度,信息熵值越小,指标离散程度越大,则该指标对综合评价的影响就越大(熊鸿斌等, 2018).其主要步骤包括数据标准化、信息熵计算,最终确定指标权重.

(1)数据标准化.对于给定的  $n$  个评价指标和  $m$  个评价对象,建立原始信息矩阵  $X=(x_{ij})_{m \times n}$ , 其中  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价对象在第  $j$  个评价指标下的评价值.将原始矩阵标准化处理,得到标准化信息矩阵  $Y=(Y_{ij})_{m \times n}$ , 对数据进行标准化处理,如式(4)所示.

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}, & \text{正向指标} \\ \frac{\min(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $Y_{ij}$  为标准化处理后数据,  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价对象第  $j$  个指标值.

(2)定义特征权重.计算第  $i$  个评价对象的第  $j$  个指标值的比重  $p_{ij}$ , 如式(5)所示.

$$p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (5)$$

式中,  $p_{ij}$  为第  $i$  个评价对象的第  $j$  个指标值的比重.

(3)计算信息熵.计算各评价指标的信息熵  $E_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), 如式(6)所示.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (p_{ij} \times \ln p_{ij}) \quad (6)$$

式中,  $k = 1/\ln m$ ,  $m$  为评价对象的个数,  $E_j$  为各评价指标的信息熵.

(4)确定指标权重.计算评价指标的客观权重  $\beta = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , 其中  $\beta_j$  为第  $j$  个指标对应的权重, 如式(7)所示.

$$\beta_{ij} = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (7)$$

式中,  $n$  为评价指标的个数,  $\beta_{ij}$  为传统熵权法的熵权值.

但传统的熵权法作为最客观的权重计算方法之一,仍存在一定缺点.参考文献(王玉梅等, 2021; 欧阳森等, 2013)对上述式子进行改进,修正公式如式(8)所示.

$$\beta_j = \begin{cases} \left( (1 - \overline{E_j}^{35.35}) \beta_{1j} + \overline{E_j}^{35.35} \beta_{2j} \right) & E_j < 1 \\ 0 & E_j = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\overline{E_j}$  为所有不为1的熵值的平均值, 且  $\beta_{2j}$  计算如式(9)所示.



$$\beta_{2j} = \frac{1 + \overline{E}_j - E_j}{\sum_{k=1, H_k \neq 1}^n (1 + \overline{E}_j - E_k)} \quad (9)$$

该改进熵权法分配的指标权重之间的差距能够较好的对应与熵值之间的差距.记向量  $W_{EMW}$  作为改进熵权法求得的权重.

(5)修正指标权重.FAHP法具有一定的主观局限性,忽略了实际数据信息.而EWM法具有一定的客观局限性,忽略了主观偏向,因此需要将主客观评估方法进行组合赋权.设修正后最终权重为  $W$ ,计算方法见式(10)(赖莉飞, 2022).

$$W = \frac{W_{FAHP} \times W_{EMW}}{\sum_{j=1}^n (W_{FAHP} \times W_{EMW})} \quad (10)$$

式中,  $W_{FAHP}$  为FAHP法的权重,  $W_{EMW}$  为改进熵权法的权重,  $W$  为组合权重.

**2.2.3 基于TOPSIS法的排序** 逼近理想值排序法(TOPSIS)是一种适用于多目标、多指标决策的综合评价方法(魏国海等, 2022),于1981年首次提出(Qi et al., 2016),它计算评估对象与理想目标之间的接近程度,并根据理想解与理想目标之间的相近贴度进行优化和排序.本文采用逼近理想解排序法对各评价对象与理想值的接近程度进行排序,该方法用于多属性决策分析中,操作性强,评估结果更为客观全面.

(1)构建归一化决策矩阵.对指标值进行归一化处理得到  $x'_{ij}$ ,如式(11)所示.

$$x'_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (11)$$

式中,  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, x_{ij}$  为指标值,  $x'_{ij}$  为经过归一化处理的指标值.

(2)构建加权决策矩阵.使得每项评价指标权重  $W$  与每项评价指标下的所有评价对象的观测值  $x'_{ij}$  相乘得到  $x''_{ij}$ ,如式(12)所示.

$$x''_{ij} = W \times x'_{ij} \quad (12)$$

(3)确定正理想解和负理想解.计算各指标的正理想解  $A^+$  和负理想解  $A^-$ .如式(13)和(14)所示.

$$A^+ = (x''_{1+}, \dots, x''_{j+}, \dots, x''_{n+}) \quad (13)$$

$$A^- = (x''_{1-}, \dots, x''_{j-}, \dots, x''_{n-}) \quad (14)$$

式中,  $A^+$  为评价对象各指标中的最优值,  $A^-$  为评价对象各指标中的最劣值.

(4)计算各评价指标与正负理想解的距离.计算每个污水处理厂站到正理想解和负理想解的距离  $d_i^+, d_i^-$ ,如式(15)和(16)所示.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x''_{ij} - x''_{j+})^2} \quad (15)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x''_{ij} - x''_{j-})^2} \quad (16)$$

式中,  $d_i^+$  为第  $i$  个评价对象与最大值的距离,  $d_i^-$  为第  $i$  个评价对象与最小值的距离.

(5)计算相近贴进度.计算各评价对象与最优方案的接近程度,使用最优向量和最差向量计算相近贴度可以更好地比较污水处理厂站运行效率的优劣,按照  $C_i$  值从大到小排列,  $C_i$  值越大,表明与最优方案的相对距离越近,即厂站运行效率越高.如式(17)所示.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (17)$$

式中,  $C_i$  越大,表明待评价对象越优.在得到所有评价项目的综合  $C_i$  后,按照从高到低的顺序进行排序,则可以得到最终的优劣排名.

### 3 基于改进组合赋权-TOPSIS模型的农村污水处理设施效果实证分析(Empirical analysis of the effect of rural sewage treatment facilities based on improved combination weighting-TOPSIS model)

以北方某地农村污水处理设施为例,选取15座农村污水处理厂站采用改进组合赋权-TOPSIS模型综合评价模型对其分别进行计算评价,15座农村污水处理厂站设计规模为  $24 \sim 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,10座采用膜处理工

艺,3座活性污泥法,2座生物膜法,均委托第三方运营.数据序列为2018—2022年5年数据,得出各污水处理厂站的综合排序.

3.1 FAHP赋权计算

根据上述FAHP的步骤,分别对规划设计阶段和运行管理阶段各项指标进行相对重要度比较,计算得到主观权重,见表2.

3.2 改进熵权法赋权计算

基于数据,根据改进熵权法的计算步骤,先对数据进行标准化处理,然后计算信息熵,确定指标权重,得到客观权重.其中,规划设计阶段和运行管理阶段两阶段的权重相同,见表3.

3.3 组合赋权

根据式(10),对FAHP和改进熵权法两者权重进行耦合计算,得到2种赋权方法组合赋权之后的组合权重(表4和表5).

由表4和表5可知,3种方法计算的权重大致一致,但在规划设计阶段,污水收集管网建设投资指标权重略有不同,说明在污水处理厂建设前期,人们主观上更偏重于经济方面;在运行管理阶段,设备设施建设购置费、COD去除率和运行负荷率有所不同,说明在污水处理厂运行后期,人们主观上更偏向于技术和管理方面.

评价指标通过模糊层次分析法和改进熵权法组合赋权,在规划设计阶段,经济指标权重为0.3926,技术指标权重为0.3281,管理指标权重为0.2793.其中,污水收集管网建设投资、运行负荷率、设备设施建设购置费和运行费用是影响排序结果的主要因素,其中3个指标属于经济指标,可以看出,经济依然是衡量处理设施规划设计的重要考量部分.由表5可知,在运行管理阶段,经济指标权重为0.2792,技术指标权重为0.391,管理指标权重为0.3298.其中,运行负荷率、COD去除率、设备在线率和管理制度完善率是影响排序结果的主要因素,可以看出,COD去除率和运行负荷率均是污水处理设施运行的重要因素,这些指标均对污水处理设施排序有关键作用.

3.4 农村污水处理设施效果评价结果分析

将FAHP和改进熵权法组合赋权之后,联合TOPSIS法进行评价.按照TOPSIS的步骤,原始数据经归一化和标准化之后,计算得到各指标与理想解的相对贴近度,根据结果分别对规划设计阶段和运

表2 FAHP权重

Table 2 Weight of FAHP

指标	规划设计阶段权重	运行管理阶段权重
设备设施建设购置费	0.0977	0.0515
污水收集管网建设投资	0.1349	0.0673
运行费用	0.0876	0.0887
维护费用	0.0797	0.0776
COD去除率	0.0862	0.1029
SS去除率	0.0548	0.0654
氨氮去除率	0.0687	0.0820
总氮去除率	0.0553	0.0668
总磷去除率	0.0756	0.0903
运行负荷率	0.1051	0.1246
设备在线率	0.0771	0.0913
管理制度完善率	0.0772	0.0915

表3 改进熵权法权重

Table 3 Weight of improved entropy method

指标	规划设计阶段权重	运行管理阶段权重
设备设施建设购置费	0.0871	0.0871
污水收集管网建设投资	0.0778	0.0778
运行费用	0.0827	0.0827
维护费用	0.0811	0.0811
COD去除率	0.0807	0.0807
SS去除率	0.0802	0.0802
氨氮去除率	0.0806	0.0806
总氮去除率	0.0833	0.0833
总磷去除率	0.0775	0.0775
运行负荷率	0.0909	0.0909
设备在线率	0.0924	0.0924
管理制度完善率	0.0855	0.0855

表4 各指标的组合权重值(规划设计阶段)

Table 4 Combination weights value of each index (planning and design stage)

指标	FAHP权重	改进熵权法权重	组合权重
设备设施建设购置费	0.0977	0.0871	0.1021
污水收集管网建设投资	0.1349	0.0778	0.1260
运行费用	0.0876	0.0827	0.0869
维护费用	0.0797	0.0811	0.0776
COD去除率	0.0862	0.0807	0.0834
SS去除率	0.0548	0.0802	0.0527
氨氮去除率	0.0687	0.0806	0.0664
总氮去除率	0.0553	0.0833	0.0552
总磷去除率	0.0756	0.0775	0.0703
运行负荷率	0.1051	0.0909	0.1147
设备在线率	0.0771	0.0924	0.0854
管理制度完善率	0.0772	0.0855	0.0792

行管理阶段进行排序,如表 6 所示.

根据 TOPSIS 原理,接近程度  $C_i$  的值越接近于 1,表明结果越接近最优值.结果显示,规划设计阶段污水处理厂站排序为  $XBT>BSW>ZJT>HFK>NW>MST>CS>QQH>XFY>YF>TZT>YL>SSY>MZ>DYZ$ ;运行管理阶段污水处理厂站排序为  $XBT>TZT>BSW>CS>HFK>MST>NW>ZJT>YF>QQH>XFY>SSY>YL>MZ>DYZ$ .

由表 6 的排序结果可知,在规划设计阶段和运行管理阶段,3 种评价方法中均是 XBT 污水处理厂站为最优厂站,DYZ 为最劣厂站.XBT 污水处理厂站排名最高是由于该厂站各个指标都比较好,尤其是运行费用、维护费用和氨氮去除率具有很大优势,所以排名最高;DYZ 排名最低是由于该厂站污水收集管网建设投资最高,设备设施建设购置费很高,且总氮去除率和运行负荷率最低,没有优势指标,和其他污水处理厂产生了很大差距,因此排名最低.其中,规划设计阶段排名高,运行管理阶段排名低的厂站,大多是由于经济指标具有优势,技术指标污染物去除率较差导致的,应针对各厂站污水处理施工工艺参数进行优化,最大限度地提高厂站各类污水处理设施运行效果(胡明等, 2021);而规划设计阶段排名低,运行管理阶段排名高的厂站,大多是由于技术指标具有优势,经济指标支出较大的原因,可对现有处理设施运行参数优化,通过减少电力消耗,合理使用药剂(魏凯杰等, 2022)等方式减少运行费用,及时对设备做好巡检工作,对设备维修和使用的管理人员开展有效培训(肖旭, 2022),降低设备的事故发生率,延长其使用寿命,减少维护成本,也可以采用低成本、低消耗、资源可回收和易于维护的污水处理技术等,或者采用再生水回用的方式,实现环境效益,降低农村污水治理成本.

本文应用改进组合赋权-TOPSIS 模型所得评价结果与污水处理厂站实际运行状况相符,证明在处理设施效率评价问题中,基于该方法能够获得符合实际工程应用需求的评价结果.通过结合主观权重和客观权重,使权重分配更加科学合理,评价结果更加准确科学,提高了改进组合赋权-TOPSIS 模型的适用性.

4 结论(Conclusions)

- 1)从经济、技术和管理 3 个层面,建立了由 12 个指标组成的农村污水处理设施效果评价体系,引用模糊层次分析法确定主观权重,采用改进熵权法确定客观权重,确定了规划和运行管理两个阶段的指标权重,基于 TOPSIS 方法评价农村污水处理设施效果,形成完整的农村污水处理设施评价方法.
- 2)污水收集管网建设投资、运行负荷率和设备设施建设购置费是规划设计阶段重要考量指标;运行负荷率、设备在线率和 COD 去除率是影响运行管理阶段评价结果的主要因素.

表 5 各指标的组合权重值(运行管理阶段)

Table 5 Combination weights value of each index (operation and management stage)

指标	FAHP 权重	改进熵权法权重	组合权重
设备设施建设购置费	0.0515	0.0871	0.0536
污水收集管网建设投资	0.0673	0.0778	0.0626
运行费用	0.0887	0.0827	0.0877
维护费用	0.0776	0.0811	0.0753
COD 去除率	0.1029	0.0807	0.0992
SS 去除率	0.0654	0.0802	0.0627
氨氮去除率	0.0820	0.0806	0.0790
总氮去除率	0.0668	0.0833	0.0665
总磷去除率	0.0903	0.0775	0.0836
运行负荷率	0.1246	0.0909	0.1354
设备在线率	0.0913	0.0924	0.1008
管理制度完善率	0.0915	0.0855	0.0936

表 6 污水处理厂运行效果排序结果

Table 6 Ranking results of operation effect of sewage treatment plant

厂站名称	规划设计阶		运行管理阶	
	段相对贴近度	排序	段相对贴近度	排序
ZJT	0.7083	3	0.5238	8
MST	0.6891	6	0.5840	6
BSW	0.7644	2	0.6628	3
XBT	0.9137	1	0.8961	1
CS	0.6499	7	0.6420	4
QQH	0.6383	8	0.4849	10
YL	0.6168	12	0.4512	13
TZT	0.6280	11	0.6671	2
YF	0.6323	10	0.5033	9
MZ	0.4986	14	0.3909	14
HFK	0.6993	4	0.6064	5
SSY	0.6078	13	0.4694	12
DYZ	0.2759	15	0.2961	15
XFY	0.6368	9	0.4735	11
NW	0.6908	5	0.5457	7

3)基于构建的改进组合赋权-TOPSIS模型对15座污水处理厂站进行案例验证,规划设计阶段和运行管理阶段均为XBT污水处理厂站排名最高,DYZ排名最低,所得评价结果与实际情况相符,评价方法可为该地区农村污水处理设施规划和运行管理提供技术支撑,促进农村生活污水处理设施高质高效运行。

#### 参考文献(References):

- 陈莹, 张晨. 2021. 福建省农村生活污水处理设施的长效管理模式分析[J]. 给水排水, 57(S2): 61-67
- 丁斌, 陈殿龙. 2009. 基于粗糙集与FAHP-FCE的地方政府应急物流预案评价[J]. 系统工程, 27(4): 7-11
- 范英, 李辰, 晋民杰, 等. 2014. 三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 24(7): 70-74
- 胡明, 王培京, 邱彦昭, 等. 2021. 基于经济性评价的北京市平原区农村污水治理模式优化研究[J]. 环境科学学报, 41(1): 133-142
- Huang W C, Shuai B, Sun Y, *et al.* 2018. Using entropy-TOPSIS method to evaluate urban rail transit system operation performance: The China case [J]. Transportation Research Part a-Policy and Practice, 111: 292-303
- 赖莉飞. 2022. 基于层次分析法-熵权法的一流科技期刊编辑职业素质评价指标体系研究[J]. 中国科技期刊研究, 33(8): 1104-1111
- 刘璐, 张文强, 胡飞超, 等. 2023. 基于群决策和层次分析法的长江中游地区农村污水处理技术评价及优选[J]. 环境科学, 44(2): 1191-1200
- 刘天舒. 2021. 农村污水处理项目绩效评价案例研究[D]. 北京:北方工业大学
- Liu W T, Zheng Q S, Pang L F, *et al.* 2021. Study of roof water inrush forecasting based on EM-FAHP two-factor model.[J]. Mathematical Biosciences and Engineering: MBE, 18(5): 4987-5005
- 孟庆义, 王培京, 胡明, 等. 2022. 基于“人工智能”驱动农村生活污水系统治理专栏序言[J]. 环境科学学报, 42(5): 1-6
- Meng Y, Ni F Q, Deng Y, *et al.* 2018. Ecological risk assessment of water resources in Ya'an City based on EWM-TOPSIS[J]. Ekoloji, 27(106): 1765-1774
- 欧阳森, 石怡理. 2013. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 37(21): 156-159+164
- Qi X Y, Shen G X, Zhang Y Z, *et al.* 2016. Reliability distribution of numerical control lathe based on correlation analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 23(5): 32-38
- Santos J, Pagsuyoin S A, Latayan J. 2016. A multi-criteria decision analysis framework for evaluating point-of-use water treatment alternatives[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 18(5): 1263-1279
- 史世强, 王培京, 胡明, 等. 2022. 基于层次分析-灰色评价法的北京市农村污水处理技术评估[J]. 环境科学学报, 42(5): 13-21
- 苏吉凯, 董灼, 刘书越, 等. 2023. 南丹矿区周边农田土壤质量综合评价研究[J]. 环境科学学报, 43(8): 314-326
- 王军民. 2018. 财政投融资农村生活污水治理效益指标体系的构建与运用[D]. 厦门:厦门大学
- 王玉梅, 刘婧岩, 李自强. 2021. 基于改进熵权法的煤矿电能质量评估方法[J]. 电子科技, 34(7): 31-36+78
- 魏国海, 刘才玮, 曹永升, 等. 2022. 钢筋混凝土梁火灾损伤的多元信息融合模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 44(6): 153-161
- 魏凯杰, 白学斌. 2022. 污水处理厂节能降耗的有效措施探讨[J]. 工程技术研究, 7(2): 204-205
- 肖旭. 2022. 我国城镇污水处理厂运行成本控制评价[J]. 现代盐化工, 49(5): 111-112+121
- 熊鸿斌, 周凌燕. 2018. 基于水足迹-灰靶的安徽省水资源可持续利用评价[J]. 环境科学学报, 38(8): 3329-3338.
- 严梦帆, 龙吉生. 2023. 基于德尔菲法和TOPSIS法的垃圾焚烧发电厂综合评价方法[J]. 环境工程, 41(7): 229-234
- 袁平. 2020. 浙江省农村生活污水处理设施运行现状与诊断性评价研究[D]. 杭州:浙江大学
- 张德彬, 刘国东, 王亮, 等. 2018. 基于博弈论组合赋权的TOPSIS模型在地下水水质评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 35(7): 46-50+62
- 张杰. 2021. 清远市清城区农村污水治理效果评价研究[D]. 长沙:湖南农业大学
- 张军, 梁川. 2009. 基于灰色关联系数矩阵的TOPSIS模型在水环境质量评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 41(4): 97-101
- 赵泞, 朱昊, 祝榕婧, 等. 2021. 海水淡化原水预处理工艺筛选评估体系[J]. 中国环境科学, 41(10): 4624-4632