

基于熵值修正的 G2 法的绿色施工节水措施效益综合评价

刘瑞, 鲍学英

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了衡量绿色施工过程中不同节水措施产生的综合效益, 构建了一套绿色施工节水措施综合效益评价体系。通过实地调查并结合相关文献, 建立了包括社会、经济、生态以及技术效益 4 方面共计 19 项指标的层次模型。考虑到施工现场环境条件复杂, 采用熵值修正的 G2 法对指标进行赋权, 化解了采用单一赋权方法不能同时反映决策者意图与数据自身所携信息的矛盾; 针对施工现场只有小样本数据的极端情况, 选取 TOPSIS 分析法, 能够快速准确地对施工现场选取的节水措施进行综合效益评价。最后选取西北某建设项目进行实例验证, 并将结果与熵权-TOPSIS 评价模型所得结果的对比, 验证了该模型的可靠性与可行性。

关键词: 绿色施工; G2 法; 熵权法; TOPSIS 决策法; 节水措施; 效益综合评价

中图分类号: TV512; TU991.64

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0169-06

Comprehensive evaluation of green construction water saving measures based on entropy corrected G2 method

LIU Rui, BAO Xueying

(Institute of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to measure the comprehensive benefit of different water-saving measures in the process of green construction, a comprehensive benefit evaluation system was proposed based on which, a hierarchical model with 19 indicators from aspects of social, economic, ecological and technical benefits was established considering the field survey and related literature. Due to the complexity of the construction site environment, the entropy modified G2 method was adopted to weight the indicators. This solved the contradiction that a single weighting method could not simultaneously reflect the intention of the decision maker and the information contained in the data. In view of the extreme situation that there were only a small amount of sample data on the construction site, the TOPSIS analysis method was selected to quickly and accurately evaluate the comprehensive benefits of water-saving measures adopted on the construction site. Finally, a construction project in northwest China was selected as the verification case. The field results were compared with those of the entropy weighted TOPSIS evaluation model, which verified the reliability and feasibility of the model.

Key words: green construction; G2 method; entropy method; TOPSIS decision method; water-saving measures; comprehensive benefit evaluation

1 研究背景

建筑行业在保证我国基础建设不断完善的同时, 也带来了环境污染及资源浪费等问题。为了解

决这一难题, 绿色施工应时而生^[1]。在建筑工程绿色施工过程中, 选取合理的节水措施, 不仅能提高用水效率, 缓解水资源短缺的问题, 同时也能促进经济的绿色健康发展, 因此, 如何合理选取节水措施成为

收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2019-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768034)

作者简介: 刘瑞(1995-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为工程管理。

通讯作者: 鲍学英(1974-), 女, 宁夏中卫人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为可持续建造。

绿色施工过程中的重点研究对象,得到了施工企业以及相关部门的重视^[2]。然而在建设项目施工过程中,由于现场复杂多变,且项目所在地区不同,其社会、经济、政策、环境等多种因素不尽相同,不同的节水措施给企业带来的经济效益有着云泥之别。因此,建立一个绿色施工节水措施效益综合评价体系不仅能帮助企业在特定的施工现场快速地对节水措施的选择做出决策,同时也可对特定工程以及选用的施工节水措施产生的效益作出综合评价。

近年来,国内外的学者对绿色施工节水措施的选取与效益评价做了大量的研究,取得了可喜的成果。张银平^[3]率先将系统动力学方法引入到建筑工程节水管理中,并对其展开系统仿真验算。张裕洁^[4]结合自身的工程实践及经验,对施工过程中用水管理、中水循环使用、雨水以及再生水合理利用等数种节水措施案例进行分析,计算出采用不同节水措施能够给工程项目带来的经济贡献率。魏慧娇等^[5]在充分分析研判已经通过我国绿色认证的绿色建筑节水技术措施后,提出应当在建筑工程节水措施方案的设计之前,充分研判项目所在地区的年降雨量、施工技术的经济性及操作的可行性等问题,不可死板地按照规范选择节水措施。李正焜等^[6]以层次分析法结合模糊综合评分法理论,分别建立绿色建筑几种常用节水措施的节水优化模型。上述这些研究都可作为选择高效节水措施时的重要参考,但是都过于依赖各评价指标的数据内容以及决策者的主观偏好,结果主观性较强,且不能准确地反映出各节水措施对于社会以及国民经济发展所带来的影响,宏观效益评价有一定的欠缺。柴乃杰等^[7]选用熵权-TOPSIS 模型从多个角度对施工过程中的节水措施进行了效益评价,弥补了宏观效益评价的不足,但是对于各评价指标的权重确定只考虑评价指标所携的客观信息,未考虑到权重分配会受样本随机性的影响。

针对目前建筑施工节水研究中存在的过于依赖指标数据以及决策者主观偏好的问题,本文在综合考虑社会、经济、生态及技术 4 个方面因素的基础上,对 5 种国内常用的建筑工程绿色施工节水措施,即中水处理与回用、绿化灌溉、节水器具、雨水收集利用以及节水管理进行研究。力求克服指标权重受到主客观因素影响而不够精确、评价指标模糊不够准确的问题,最后将甘肃某工程的实例评价结果与熵权-TOPSIS 模型得出的评价结果作对比,证明了此方法的可行性与准确性。

2 构建综合评价指标体系

针对建筑工程施工中影响节水措施效益指标的复杂性与多样性,同时考虑到目前绿色施工节水措施宏观效益评价的不足,经过查阅相关文献[8-11]及实地踏访,最终选定了包括社会效益、经济效益、生态效益以及技术效益 4 方面共计 19 项指标,构建出如表 1 所示的多层次综合评价指标体系。

表 1 节水措施效益评价指标层次分析体系

目标层	准则层	方案层
社会效益 B_1	社会	绿色施工规范契合度 C_1
		推动国内施工节水措施变革发展的程度 C_2
		促进业内水资源管理体制革新的程度 C_3
		建筑节水发展趋势的契合度 C_4
		促进建筑工程绿色协调可持续变革的水平 C_5
		促进生产过程管理体系变革的程度 C_6
经济效益 B_2	经济	采用节水措施的投入与产出比 C_7
		节水措施促进企业增收减支水平 C_8
		提高企业 EIRR(经济内部收益率)的程度 C_9
		推动提升企业水资源二次利用率的程度 C_{10}
		关联产业经济效益提升度 C_{11}
		改善区域水体污染的程度 C_{12}
生态效益 B_3	生态	推动区域水体资源二次利用的程度 C_{13}
		提升区域内水体环境承载力的程度 C_{14}
		区域内水资源紧缺的缓解程度 C_{15}
		推动局部自然环境健康发展的程度 C_{16}
		节水措施的可靠性 C_{17}
		节水措施的可行性与推广度 C_{18}
技术效益 B_4	技术	企业推行实施的困难度 C_{19}

3 熵值修正的 G2 赋权-TOPSIS 综合评价模型的建立

在选定的 19 个节水措施评价指标里,大部分为定性指标。后续评价中,对这 19 项指标进行科学合理地权重分配将是一个不可避免的难题。目前,研究中对于指标权重常用的确定方法主要可分为主观、客观以及组合赋权法 3 类。主观赋权方法结果带有很强的主观性,忽略了指标观测值等客观信息。客观赋权方法虽然有较强的数学理论依据但过于依赖数据本身,只能反映出数据所包含的信息,无法反映专家或决策者的主观意向。为了突破主客观赋权方法的局限,本文采用一种新的主客观本质融合的熵值修正

G2的交叉赋权法,同时为解决利用小样本数据来准确评价节水措施的难题,综合评价选取TOPSIS优劣解距离模型,通过计算得到特定条件下待评价节水措施与最优理想对象的贴近度^[12],借此对采用的各节水措施所产生的效益作出优劣评价并排序。

3.1 熵值法

熵值法最先由申农引入信息论之中,目前已经广泛应用于工程技术、社会经济等领域中^[13]。熵值法根据待评方案各指标值之间的差异来区分各指标的相对重要性,分配指标权重,基本思想如下^[14]:

(1) 构建由 m 个待评价节水措施,即5种国内常用的建筑工程绿色施工节水措施, n 个评价指标,即评价指标体系准则层中选取的19项评价指标组成的特征矩阵 $X = (x_{ik})$,其中 $i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 对得到的特征矩阵 X 进行无量纲处理,得到归一化之后的矩阵 Y ,即 $Y = (y_{ik})_{m \times n}$,其中 $i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$ 。

(3) 按照熵的概念,定义第 k 个指标的熵 H_k 为:

$$H_k = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \left[\left((1 + y_{ik}) / \sum_{i=1}^m (1 + y_{ik}) \right) \cdot \ln \left((1 + y_{ik}) / \sum_{i=1}^m (1 + y_{ik}) \right) \right] \quad (1)$$

(4) 根据第 k 个指标的熵值,确定其熵权为:

$$w_k^1 = \frac{1 - H_k}{n - \sum_{k=1}^n H_k} \quad (2)$$

3.2 G2法

G2法是一种主观赋权法,又被称为唯一参照物比较判断法^[14]。其基本思路如下:首先专家从所有的指标 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中挑选出1个他认为最不重要的指标,在本文中由专家从19个节水措施评价指标中选择1个最不重要的指标记为 x_{j_n} ,此时评价集可以记为 $\{x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_n}\}$,然后将最不重要的指标 x_{j_n} 作为唯一参照物,由专家赋予其余指标 $x_{j_k} (k = 1, 2, \dots, n-1)$ 相对于 x_{j_n} 的重要性比值;最后,通过重要程度之比计算出各评价指标的权重。

令 $r_{kn} = a_k (k = 1, 2, \dots, n-1)$ 为 x_{j_k} 相对于 x_{j_n} 的重要程度之比,为某一确定的数值,显然 $a_k \geq 1$,取 $a_n = 1$ 。此时,评价指标 x_{j_k} 的权重为:

$$w_k = a_k / \sum_{i=1}^n a_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

G2法相较于其他赋权方法,直观易懂且计算量小,有利于推广使用。但是凭借专家主观经验及偏

好来给定各指标之间的相对重要性比值,导致赋权结果不可避免地具有一定的主观性。为了解决这一问题,可将G2法与熵值法融合,用客观的熵值来修正各指标之间的相对重要性比值,得到主客观信息有机结合的赋权结果。

3.3 熵值修正的G2法

(1) 确定最不重要指标。在评价指标集 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中,专家结合自身经验挑选出1个他认为相较于其他指标而言最不重要的指标,记作 x_{j_n} ,此时新的评价指标集可重新记作 $\{x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_n}\}$ 。

(2) 指标重要程度的定量刻画。将最不重要的指标 x_{j_n} 作为唯一参照物,将专家的经验与指标熵值 e_{j_k} 结合起来确定各指标 $x_{j_k} (k = 1, 2, \dots, n-1)$ 与最不重要的指标 x_{j_n} 之间的重要程度比值,具体计算思路如下:

若 $e_{j_k} < e_{j_n}$,则与指标 x_{j_n} 相比,各评价对象在指标 x_{j_k} 上的差异更大,这样 x_{j_k} 对于比较各评价对象的作用就更大。同时专家的主观经验表明指标 x_{j_k} 的重要程度高于指标 x_{j_n} 。结合以上所述信息,本文将两个指标间重要性的比值确定为 e_{j_n}/e_{j_k} ,显然其比值大于1。

反之若 $e_{j_k} > e_{j_n}$,则说明指标 x_{j_k} 对于比较各评价对象而言,起到的作用小。但不可忽略的是专家认为指标 x_{j_k} 的重要程度较高。为了在专家的主观经验信息与数据所反映的客观信息之间取得平衡,可以认为两个指标对评价对象具有相同的重要性,即 x_{j_k} 与 x_{j_n} 的重要程度比值为1。

综上,令 $r_{kn} (k = 1, 2, \dots, n-1)$ 为 x_{j_k} 相对于 x_{j_n} 的重要程度之比,则:

$$r_{kn} \triangleq a_k = \begin{cases} e_{j_n}/e_{j_k} & (e_{j_k} < e_{j_n}) \\ 1 & (e_{j_k} \geq e_{j_n}) \end{cases} \quad (4)$$

显然 $a_k \geq 1$,取 $a_n = 1$ 。

(3) 指标权重的确定。由 r_{kn} 的定义可知, a_k 越大意味着指标 x_{j_k} 对于评价对象的重要性就越大,那么应当赋予该项指标较大的权重。故指标 x_{j_k} 的权重可以通过下式给出^[15-18]:

$$w_k^2 = a_k / \sum_{i=1}^n a_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

3.4 TOPSIS模型

结合TOPSIS评价模型可以反映多目标方案和考虑社会、经济、生态、技术效益在内的理想最优水平的一致性,广泛应用在工程决策的多方案选择中^[19],并取得了理想的结果,运用此模型可充分反映绿色施工中节水措施效益的水平。具体的计算思路如下:

(1) 根据上文赋权法得出各指标对目标层的加权权重向量为 $W = (k_j)_{1 \times n}$, k_j 为第 j 个评价指标对目标层的加权重^[20];

(2) 考虑权重后指标属性矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x_{11} & k_2 x_{12} & \cdots & k_n x_{1n} \\ k_1 x_{21} & k_2 x_{22} & \cdots & k_n x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_1 x_{m1} & k_2 x_{m2} & \cdots & k_n x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(3) 在计算得出各项评价指标不同的属性值后, 计算各评价对象相对于最优值的贴近程度。其中正最优解 A^+ 与负最优解 A^- 的求法通过公式(7) 给出^[21]:

$$\begin{cases} A^+ = \{(\max_i(a_{ij}) \mid j \in J_1), (\min(a_{ij}) \mid j \in J_2)\} \\ A^- = \{(\min_i(a_{ij}) \mid j \in J_2), (\max(a_{ij}) \mid j \in J_1)\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: J_1 为效益型指标集, 越大越优; J_2 为费用型指标集, 越小越优。

(4) 各评价对象与正负最优解的距离 d_i^+ 和 d_i^- 的计算公式如下:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - a_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - a_j^-)^2} \end{cases} \quad (8)$$

则所评价方案与最优解的贴近度 E_i^+ 为^[21]:

$$E_i^+ = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-), 0 \leq E_i^+ \leq 1 \quad (9)$$

最后可根评价方案与最优解的贴近度 E_i^+ , 确定出最优方案。

4 熵值修正的 G2 赋权与 TOPSIS 模型的实例应用

选取目前我国绿色建筑中最常用的绿色施工节水措施 A、B、C、D、E 共 5 项, 分别为中水处理与回用系统、雨水收集利用、节水型器具、绿化灌溉及节水管理。通过熵值修正的 G2 赋权法与 TOPSIS 模型对某一大型建设项目进行实例验证, 将所得结果与采用熵权 - TOPSIS 评价模型所得结果进行对比, 以此来说明此模型的科学性与可行性。为简化计算, 可采用 MATLAB 等软件辅助解算。

现邀请 20 位专家, 均来自满足参评条件的绿色

建筑科研机构, 以打分方式对本文构建的绿色施工节水措施效益综合评价指标体系进行精确定量评估。首先, 专家从 19 项指标中挑选出一个他认为最不重要的指标, 然后将其作为唯一参照物, 由专家赋予其余指标相对于最不重要的指标的重要性比值; 然后以百分制方式对所选取的评价指标进行打分, 并对 20 份专家打分结果以及各指标相对重要性比值取平均值。最后, 对所得评价按本文所提出的方法进行数据处理。

4.1 准则层至目标层的权重计算

5 种节水措施在准则层 4 项指标下的得分及专家给出的相对重要程度如表 2 所示。

表 2 不同节水措施准则层各指标得分及其相对重要性比值

节水措施	B_1	B_2	B_3	B_4
A	76	89	68	73
B	86	90	75	83
C	88	96	81	66
D	74	85	72	78
E	79	90	79	91
相对重要性比值	1.05	1.06	1.00	1.04

对表 2 各指标得分无量纲化可得矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} 0.1429 & 0.3636 & 0.0000 & 0.2800 \\ 0.8571 & 0.4545 & 0.5385 & 0.6800 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.3077 & 0.4800 \\ 0.3571 & 0.4545 & 0.8462 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

根据公式(1)、(2)计算出准则层 4 个指标的熵值以及熵权, 见表 3。

表 3 准则层各评价指标的熵值、熵权与相对重要性

项目	B_1	B_2	B_3	B_4
熵值	0.9779	0.9851	0.9824	0.9835
熵权 w_k^1	0.3108	0.2095	0.2479	0.2318
相对重要性比值	1.0500	1.0600	1.0000	1.0400

根据公式(4)、(5)对表 3 中的熵值与相对重要性数据计算, 可以得出准则层各指标对目标层的权重, 如表 4 所示。

表 4 准则层指标对目标层的权重

项目	B_1	B_2	B_3	B_4
熵值	0.9779	0.9851	0.9824	0.9835
相对重要性比值	1.0500	1.0600	1.0000	1.0400
a_k	1.0046	1.0000	1.0000	1.0000
权重 w_k^2	0.2509	0.2497	0.2497	0.2497

4.2 方案层至准则层权重的计算

专家给出的相对重要程度如表 5 所示。

5 种节水措施在方案层 19 项指标下的得分及

表 5 不同节水措施方案层各指标得分及其相对重要性比值

节水措施	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}
A	66	75	73	89	83	79	89	87	67	88	82	88	56	77	80	68	87	66	78
B	82	77	73	70	68	76	84	70	54	73	74	91	77	83	73	56	90	71	75
C	80	90	87	76	88	73	92	74	79	90	88	74	66	84	78	66	82	58	64
D	69	89	78	91	85	83	89	89	66	79	64	85	69	60	85	75	79	69	83
E	79	74	64	78	80	76	94	69	70	87	81	79	71	73	90	57	91	76	89
相对重要性比值	1.12	1.10	1.00	1.09	1.08	1.02	1.12	1.07	1.00	1.09	1.03	1.12	1.14	1.07	1.05	1.00	1.06	1.00	1.11

同理,对表 5 各指标得分无量纲化可得矩阵 C :

$$C = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.06 & 0.39 & 0.90 & 0.75 & 0.60 & 0.50 & 0.90 & 0.52 & 0.88 & 0.75 & 0.82 & 0.00 & 0.71 & 0.41 & 0.63 & 0.67 & 0.44 & 0.56 \\ 1.00 & 0.19 & 0.39 & 0.00 & 0.00 & 0.30 & 0.00 & 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.42 & 1.00 & 1.00 & 0.96 & 0.00 & 0.00 & 0.92 & 0.72 & 0.44 \\ 0.88 & 1.00 & 1.00 & 0.29 & 1.00 & 0.00 & 0.80 & 0.25 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.00 & 0.48 & 1.00 & 0.29 & 0.53 & 0.25 & 0.00 & 0.00 \\ 0.19 & 0.94 & 0.61 & 1.00 & 0.85 & 1.00 & 0.50 & 1.00 & 0.48 & 0.35 & 0.00 & 0.65 & 0.62 & 0.00 & 0.71 & 1.00 & 0.00 & 0.61 & 0.76 \\ 0.81 & 0.00 & 0.00 & 0.38 & 0.60 & 0.30 & 1.00 & 0.00 & 0.64 & 0.82 & 0.71 & 0.29 & 0.71 & 0.54 & 1.00 & 0.05 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{pmatrix}$$

依次计算各评价指标的熵值以及对准则层的权重,并以此为基础计算各评价指标对方案层的加权重,如表 6 所示。

表 6 方案层各指标的熵值及对准则层的权重

项目	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
熵值	0.9787	0.9717	0.9848	0.9802	0.9849	0.9832	0.9847	0.9732	0.9858	0.9819
熵权 w_k^1	0.1826	0.2432	0.1306	0.1696	0.1295	0.1444	0.1701	0.2979	0.1584	0.2011
相对重要性	1.1200	1.1000	1.0000	1.0900	1.0800	1.0200	1.1200	1.0700	1.0000	1.0900
权重 w_k^2	0.1670	0.1682	0.1659	0.1667	0.1659	0.1662	0.1995	0.2018	0.1992	0.2000
G2 法对目标层加权重 k_j	0.0419	0.0422	0.0416	0.0418	0.0416	0.0417	0.0498	0.0504	0.0497	0.0499

项目	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}
熵值	0.9845	0.9824	0.9854	0.9837	0.9832	0.9789	0.9804	0.9852	0.9849
熵权 w_k^1	0.1725	0.2036	0.1686	0.1891	0.1945	0.2441	0.3951	0.2992	0.3057
相对重要性	1.0300	1.1200	1.1400	1.0700	1.0500	1.0000	1.0600	1.0000	1.1100
权重 w_k^2	0.1995	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.3344	0.3328	0.3329
G2 法对目标层加权重 k_j	0.0498	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0835	0.0831	0.0831

4.3 TOPSIS 距离计算与综合评价结果

在 4.2 节基础上,根据公式(6)计算出方案层加权属性指标矩阵 C' :

$$C' = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.02 & 0.04 & 0.03 & 0.03 & 0.02 & 0.05 & 0.03 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.00 & 0.04 & 0.02 & 0.03 & 0.06 & 0.04 & 0.05 \\ 0.04 & 0.01 & 0.02 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.02 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.08 & 0.06 & 0.04 \\ 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.01 & 0.04 & 0.00 & 0.04 & 0.01 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.00 & 0.02 & 0.05 & 0.01 & 0.03 & 0.02 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.04 & 0.03 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.02 & 0.05 & 0.02 & 0.02 & 0.00 & 0.03 & 0.03 & 0.00 & 0.04 & 0.05 & 0.00 & 0.05 & 0.06 \\ 0.03 & 0.00 & 0.00 & 0.02 & 0.02 & 0.01 & 0.05 & 0.00 & 0.03 & 0.04 & 0.04 & 0.01 & 0.04 & 0.03 & 0.05 & 0.00 & 0.08 & 0.08 & 0.08 \end{pmatrix}$$

然后,在对各指标的社会、经济、生态、技术效益综合考虑后,根据公式(8)~(9)分别计算与正、负最优解所对应的欧氏距离及其贴近度,具体结果见表 7。

表 7 不同节水措施两种方法综合评价结果

节水措施	d_i^+		d_i^-		E_i^+	
	熵值修正 G2 法	熵权法	熵值修正 G2 法	熵权法	熵值修正 G2 法	熵权法
A	0.7988	0.8063	0.8160	0.8160	0.5053	0.5030
B	0.8226	0.8250	0.8103	0.8159	0.4962	0.4972
C	0.8267	0.8240	0.8146	0.8165	0.4963	0.4977
D	0.8096	0.8082	0.8206	0.8279	0.5034	0.5060
E	0.7948	0.8121	0.8371	0.8303	0.5130	0.5055

从表 7 中可明显看出这两种方法得出的优劣排序基本吻合,这 5 项节水措施的综合效益采用熵值修正 G2 法得到优劣排序依次为 $E > A > D > C > B$, 其相应综合优越度从高往低依次为: 51.3%, 50.53%, 50.34%, 49.63%, 49.62%。在常用的 5 项节水措施中,效益最佳的为节水管理与中水回用技术,因此可选作此大型建设项目的主要节水措施。雨水收集利用为效益最差的节水措施,不建议选用此节水措施。对比项目现场环境发现,项目所在地年降雨量较少,雨水收集利用所得效益不佳。此评价结果与施工现场环境相吻合,证明此方法适用于考虑采用文中 5 种常用节水措施作为施工过程中备选方案的房屋建筑工程。

5 结 论

由于施工现场各种节水措施的不确定性及各评价指标间的权重分配较为困难,采用传统评价方式往往得不到理想的评价效果。本文将熵值修正的 G2 赋权法与 TOPSIS 模型相结合构建出绿色施工节水措施效益综合评价体系,有助于在建筑工程施工现场快速地对节水措施的选择做出决策。根据对 5 项节水技术措施在某大型项目中的评价结果,可得结论如下:

(1) 建筑工程节水措施效益评价是一个涉及多因素的复杂问题,且不同的评价指标间存在着部分的相关性。通过将以往评价中遇到的复杂评价指标分解剖析,重新构建一个层次明晰的节水措施效益综合评价指标体系,在解决了上述问题的同时亦能大幅简化评价流程。

(2) 对于不同评价指标之间的赋权问题,本文采用了熵值修正的 G2 法,此方法将决策者的主观认识与各指标观测数据相结合,弥补了传统 G2 赋权法容易被主观因素干扰的缺陷,同时又巧妙规避

了 G2 法中的区间赋值情形,使得赋权结果更为科学合理。此外,传统组合赋权中困扰研究者的如何确定主、客观组合权重的难题也可迎刃而解。

(3) TOPSIS 相较于其他评价模型,数学计算简单、几何意义直观,对样本数据分布、样本数量与指标数量无特殊要求,能充分运用原始数据所携信息。综合社会、经济、生态和技术效益 4 个角度结合 TOPSIS 模型对建筑施工各节水措施进行效益综合评价,利用小样本数据快速准确地得出各节水措施优劣排序。

(4) 最后,以某大型项目中的节水措施为例进行实证分析,并将结果与熵权 - TOPSIS 模型得出的评价结果对比,验证了本文中所构建的评价指标体系与评价模型的可行性、科学性,可以为施工现场选择高效节水措施提供参考。

参考文献:

- [1] 邵高垒. 建筑工程绿色施工技术的应用研究[J]. 建材与装饰, 2019(20): 33 - 34.
- [2] 贾鼎元, 向 茂, 赵运铎, 等. 基于组合赋权 - 向量夹角余弦的绿色施工节水措施综合效益评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 182 - 187 + 195.
- [3] 张银平. 基于系统动力学的济宁市节水管理决策模型研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [4] 张裕洁. 浅谈节水措施在绿色施工中的应用[J]. 建筑施工, 2011, 33(7): 604 - 606.
- [5] 魏慧娇, 李丛笑. 我国绿色建筑节水技术措施调研分析[J]. 建筑, 2015(11): 28 - 30.
- [6] 李正焜, 叶 飞, 梁巧真. 基于价值工程的绿色施工节水措施研究[J]. 福建建设科技, 2017(1): 70 - 72.
- [7] 柴乃杰, 鲍学英, 张天奇, 等. TOPSIS - 熵权决策法在绿色施工节水措施综合效益评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 156 - 161.

(下转第 179 页)

- 尾水管最小压力分析[J]. 水电站机电技术, 2013, 36(5): 1-3+11+71.
- [12] 赵秀红, 朱满林, 张言禾, 等. 摩阻对压力输水管道水力过渡过程计算的影响[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 86-87.
- [13] 朱永忠. 水电站水击和调压室涌浪的随机数学模型及其求解[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [14] 孙万功. 输水管道设计中的糙率选取问题研究[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(3): 371-372+375.
- [15] 王洋, 王玲花. 水电站过渡过程研究历史及现状综述[J]. 吉林水利, 2014(9): 29-33.
- [16] 化卓, 张永良. 带有调压室的长距离引水系统水力特性研究[J]. 黑龙江大学学报, 2016, 7(4): 1-7+13.
- [17] 王康生, 熊涛, 杨建东, 等. 尾水支管长短对相继甩负荷尾水管进口最小压力的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 168-170+167.
- [18] 王刚, 史宝平, 王伟, 等. 大型水电站施工用电系统设计问题分析与预防措施[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(3): 91-93.
- [19] 穆祥鹏. 长距离输水系统的过渡过程数值计算及水力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [20] 魏媛媛. 长距离有压引水式电站过渡过程研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- [21] 黄昌清. 长距离高水头输水系统水力过渡过程分析与设计[J]. 小水电, 2019(5): 20-23+27.
- [22] 廖功磊, 钟林涛, 蒋辉霞, 等. 长距离输水管道水力过渡分析及水锤防护措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 177-180.
- [23] 郭宇. 盖孜水电站引水系统水力过渡过程分析[J]. 吉林水利, 2019(4): 30-33+46.
- [24] 王梦浩. 长有压引水电站过渡过程计算研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [25] 龙斌, 杨珉. 小型水电站施工阶段调压室的优化及水力过渡过程复核[J]. 小水电, 2019(1): 37-39+61.
- [26] 陆云才. 哈拉军水电站引水发电系统水力过渡过程分析[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(11): 72-78.
- [27] 孙江河, 范征. 长距离输水管道水力过渡过程中控制指标的探讨[J]. 水利规划与设计, 2018(8): 110-114.
- [28] 葛曦, 黄正财, 杨超, 等. 冗各水电站水力过渡过程研究[J]. 水利规划与设计, 2018(5): 97-100.
- [29] 刘启钊, 胡明. 水电站(第四版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [30] 宋方略. 有压引水式电站过渡过程仿真[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [31] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水力发电厂机电设计技术规范: DL/T 5186-2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

(上接第174页)

- [8] 王善龙. 绿色施工节水节电指标及控制措施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [9] 刘冰泉. 基于 Delphi 法的评价量表的研制[J]. 教育现代化, 2016, 3(8): 178-181.
- [10] 闫潇. 绿色建筑及绿色施工评价体系的研究与实践[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [11] HUBERMAN N, PEARLMUTTER D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert [J]. Energy & Buildings, 2008, 40(5): 837-848.
- [12] 罗党, 孙慧芳, 毛文鑫. 基于三角模糊数-TOPSIS 的绿色施工评标方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 73-77.
- [13] 汪妮, 方正, 解建仓. 改进的熵权法在再生资源价值评价中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 416-420.
- [14] 马纪, 刘希喆. 基于 G2-熵权法的低压配网台区状态特性评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 41-46.
- [15] 贾博婷, 赵天威, 祝志川, 等. 基于熵值修正 G2 赋权的综合评价方法及实证[J]. 统计与决策, 2019, 35(8): 30-35.
- [16] 裴鑫. 基于 G2 赋权 TOPSIS 法的第三方逆向物流服务商评价[J]. 物流技术, 2015, 34(3): 145-147+160.
- [17] 蒋诗泉, 刘思峰, 刘中侠, 等. 基于“功能驱动”和“差异驱动”原理的灰关联贴近度决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(1): 84-90.
- [18] 王义保, 杨婷惠, 王世达. 基于组合赋权和灰色关联的城市公共安全感评价[J]. 统计与决策, 2019, 35(18): 45-50.
- [19] 李远远, 黄兆炜. 绿色施工方案的选择与优化研究——基于综合赋权-TOPSIS-数据挖掘的系统模型[J]. 系统科学学报, 2020, 28(1): 78-82.
- [20] 刘东, 龚方华, 付强, 等. 基于博弈论赋权的灌溉用水效率 GRA-TOPSIS 评价模型[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 218-226.
- [21] 雷勋平, ROBIN Q, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.