

关中地区清洁能源供暖综合效益评价 ——西安某商业建筑的案例实证

丁月清¹, 洪增林^{1,2,3}, 金光⁴, 张亚鸽⁴, 薛旭平², 杨建华¹

(1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072; 2. 陕西省地质调查院, 西安 710054;
3. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 4. 陕西省水工环地质调查中心, 西安 710054)

摘要: 随着中国发展方式转变与能源结构转型的深入推进, 能源消耗“双控”与燃煤替代供热清洁化、集中化成为必然趋势。清洁供暖效益评价研究是一个动态的系统性问题, 涉及技术、财务、经济和社会评价等方面。目前, 有关供热模式评价一般集中在经济和技术视角, 难以系统反映经济社会、环境资源等深层次问题。以空气源热泵、燃气锅炉和浅层地热能为主多能互补的供暖方案为评价对象, 采用系统评价的方法, 基于DPSIR模型构建清洁能源供暖综合效益评价指标体系, 利用AHP-POS灰色关联度模型定量评价西安市商业建筑清洁能源供暖方案综合效益和D-P-S-I-R子系统的影响作用。结果表明: 在经济、技术和投资环境等条件允许情况下, 应优先实施以浅层地热能为主的多能互补供暖方案, 依次实施煤改电和煤改气方案。进而提出关中地区清洁能源供暖监管体系对策建议, 以供决策者和投资者参考。

关键词: 清洁能源; 综合效益; 灰色关联度评价; 多能互补

当前, 世界能源格局深刻调整, 新一轮能源革命蓬勃兴起^[1]。新时期, 我国经济已由高速增长转向高质量发展阶段, 能源资源消耗强度大幅下降, 能源供应质量显著提升, 能源结构持续优化升级, 正处在转变发展方式、推动经济社会发展和碳减排的攻关期^[2-4]。从中国国情出发, 给社会经济发展留有能源消耗空间, 积极倡导节能型生产生活方式, 是保障国家能源安全、积极应对全球气候变化的现实需要^[5]。坚持“节约与开源并重”的能源方针, 积极推进供暖绿色化, 准确系统评价清洁能源供热模式优劣, 针对能源供给能力、能源技术水平及经济环境等实际差异选择适宜的清洁能源供热模式, 成为当前亟需解决的问题之一。我国北方大部分地区的清洁能源供暖项目还处于前期阶段, 对清洁能源供暖设施设计、建设和管理进行科学全面的绩效评价成为一项重要工作, 以科学方法评估清洁能源供暖设施运行状况, 并提出有效的跟踪措施及应对方案具有重要意义。

随着供热技术和热科学等相关理论不断发展, 国内外供热评价理论方法也日趋完善, 逐步由技术、经济评价理论, 兼顾经济、社会效益的综合理论向评价主体多元化、评价程序规范化、社会评价指标全面化等方面深入扩展。国外供热评价方法体系由三种构成, 最初的评价是单纯财务评价, 侧重对直接经济成本与直接经济利润的分析。二战以后, 尤其是20世纪50年代之后, 更加注重对公共利益等宏观效益的影响作用, 逐渐形成了以影子价格衡量工程经济效益与费用的社会费用效益评价方法。在20世纪60年

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2020-04-07

基金项目: 陕西省公益性地质工作项目(20170201)

作者简介: 丁月清(1979-), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究方向为系统工程等。

E-mail: 342129843@qq.com

通讯作者: 洪增林(1963-), 男, 甘肃陇西人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境、系统工程、地学工程等。Email: lhqzhl@163.com

代社会评价法逐渐兴起,这是一种将效用理论、经济增长论、综合发展观及可持续发展观等评价理念纳入工程效益的评价方法。从20世纪80年代开始,项目评价由单一经济分析发展到技术、财务、经济和社会等综合评价^[6]。国内城市基础设施工程评价从投资项目评价发展而来,具体包括财务评价、国民经济评价和社会评价等。目前,国内学者对于供热模式的技术、经济评价方法已基本成熟,其中,供热模式优化评价方法利用总费用年值法和环境等级评价法综合考虑了经济、环境评价和能源技术评价这三方面的综合影响^[7,8]。近三十年来,国内外综合评价研究不断深入,将系统科学、决策科学引入评价领域应用到综合评价实践中,产生了一系列新的评价方法,比如将人工网络技术、灰色关联法、数据包络法和可拓评价法等应用于综合评价^[9,10]。针对供热模式评价,国内学者较多地运用层次分析法和模糊综合评价法对城市供热模式进行优化研究。

从目前研究来看,国内外学者对城市供热评价理论和方法尚有许多需要发展完善之处。突出问题主要表现在两个方面:一是没有形成统一的学科体系和学科结构,评价系统目标层综合性体现了采暖设备更新改造在环境、经济和社会效益的综合,如何从经济社会、环境资源等方面对供热模式综合绩效展开系统评价,还有待深入研究;二是在供热应用中至今尚未形成较为完整的指标评价体系,针对影响因素进行全面评价相对较少,且评价体系的各指标内在逻辑关联性不强,尚未形成较为系统和完整的评价体系,未能体现供热模式综合绩效间影响要素的因果关系,使得评价体系的实用性、操作性不强。

针对上述问题,本文以西安市某商业建筑为例,以空气源热泵、燃气锅炉和以浅层地热能为主多能互补的三个供暖方案作为评价对象,借助DPSIR模型确定评价模型中各个子系统的因素指标,构建清洁能源供暖综合效益评价指标体系,为克服层次分析法专家打分矩阵不一致或漏填问题,利用AHP-POS的灰色关联度分析评价方法,综合评价该系统的经济、环境和社会等多方面的效益和各影响要素间的关系及其相互作用机理,探讨建立一套科学客观、全面系统的评价方法,使得评价更加实用、便于操作,以供决策者和投资者参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

陕西关中地区地处潼关以西、宝鸡以东的平原地带。区内经济发达,人口稠密,冬季供暖和夏季制冷负荷都较大。当前,关中地区清洁能源供暖方式主要有热电联产、天然气、电能和地热能等等。其中,热电联产现有13处、供热面积8022万 m^2 ;天然气是目前城镇集中供热的主要热源,供热面积27654.4万 m^2 ;地热资源丰富,区域开发优势突出、发展潜力巨大,主要有浅层地热能和中深层地热能(水热型)两种类型,其中浅层地热能现有开发利用工程127处,供热(制冷)面积812.6万 m^2 ,中深层(水热型)现有地热井490余眼,供热面积2200万 m^2 ^[11]。以上方式中电能和浅层地热能相比热电联产、天然气,在供暖基础上还可满足制冷需求。西安市位于关中平原,属于典型的口袋性地貌,受汾渭谷地两山夹一谷的地形挟制,面临秋冬季大气污染加剧,雾霾锁城不易扩散等问题。选择适宜的清洁能源供热模式,推进能源结构向绿色低碳转型优化、防治“供暖式雾霾”,构建清洁、高效、节能的供暖体系,以科学方法评估西安市清洁能源供暖综合效益水平具有一定的代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 基于AHP-POS的灰色关联分析法

清洁能源供暖效益是一个涉及环境、经济和社会领域等诸多要素构成的多维多层次复杂大系统^[12,13]，受设备运行效率、本体能耗、热损失等因素以及经济水平、气候条件、能源条件和居民习惯等不可预知偶然情况影响，具有复杂性、非线性和不确定性等明显的灰色特性^[14]。灰色关联分析法适用于区域经济优势分析、国民经济各部门投资收益等多领域^[15]。采取基于AHP-POS的灰色关联分析法，经过层次单排序、层次总排序一致性检验、专家打分矩阵不一致或漏填修正，用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序，可以较好地解决因素指标值样本量少、数据离散和主观偏好等问题，更准确地反映决策的客观真实性，具体步骤如下：

首先，设决策论域有 n 种备选方案 X_i ($i=1, 2, \dots, n$)，对于每种方案有 k 个影响因素，构成关于 k 个因素指标条件下清洁能源供暖系统设计方案的笛卡尔乘积集。

备选方案的指标特征量矩阵 D 为：

$$X_{ij} = (X_{ij})_{n \times k} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

式中： n 为评价对象的个数（个）； k 为评价指标的个数（个）。以 X_{ij} 表示第 i 种方案的第 j 个因素值。由 i 个评价方案中指标最优值确定最优指标集，相对最佳方案的第 j 因素指标构造的最优参考序列为 X_{0j} ，即 $X_{0j} = (X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0j})$ ，对 D 中元素进行归一化处理，得：

$$D': X_{ij} = (X_{ij})_{n \times k} \quad D'_{ij} = \begin{cases} X_{ij}/X_{0j} & \text{正指标} \\ X_{0j}/X_{ij} & \text{负指标} \\ 1 - X_{ij}/X_{j\max} & X_{0j} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

进一步对标准化处理的指标数据求绝对值差 Δ ，记作：

$$\Delta = |y_o(k) - y_i(k)| \quad (3)$$

式中： $y_o(k)$ 为规范化后的最优指标集并作为参考序列； $y_i(k)$ 为规范化后的各指标集并作为比较序列。确定最小绝对值 Δ_{\min} 和最大绝对值 Δ_{\max} ，计算各方案序列及参考序列关联系数 ζ_{ij} ，给出 $n \times k$ 个 ζ_{ij} 构成清洁能源供暖系统设计方案的多元灰色关联度判断矩阵：

$$\zeta: \zeta_{ij} = (\zeta_{ij})_{n \times k} \quad (4)$$

式中： ζ_{ij} 是第 n 个方案第 k 个指标与第 k 个最优指标的关联系数。评定指标间的相对优先级，向从事地质调查、城市热力工程、环保和高校等机构的专家发放调查问卷，考虑生态优先、社会发展和经济效益评估重要程度，采取 1~9 打分模式，1 分表示此项优势（或重要性）最差，9 分则最强。运用 AHP-POS 定权法^[16,17]，构建确定指标权重，对数据指标进行赋权，计算公式如下：

$$V_i = V_i + c_1 \times \text{rand}(0 \sim 1) \times (pbest_i - X_i) + c_2 \times \text{rand}(0 \sim 1) \times (gbest_i - X_i) \quad (5)$$

$$X_i = X_i + V_i$$

式中： $i=1, 2, \dots, M$ ， M 是该群体中粒子的总数（个）； V_i 是粒子的速度； $pbest_i$ 为个体最优值； $gbest_i$ 为全局最优值； $\text{rand}(0 \sim 1)$ 为介于 (0, 1) 之间的随机数； X_i 是粒子的当前位置。 c_1 和 c_2 是学习因子，通常取 $c_1 = c_2 = 2$ ，在每一维粒子最大限制速度为 V_{\max} 。

最后，根据群决策全局权重向量 W^* ，得到由各方案 X_i 与相对最佳方案 X_0 的加权关联度组成的总目标层关联矢量 ζ 。

$$W^* = (w_1, w_2, \dots, w_k)^T \quad (6)$$

$$\zeta_i = \zeta_i \times W^* = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n) (w_1, w_2, \dots, w_k)^T \quad (7)$$

$$\zeta_i = \sum_{j=1}^n \zeta_{ij} \times w_j, i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中： ζ_i 为第*i*种方案的综合关联度； ζ_i 为单层次灰色关联度值； w_j 为第*j*项指标的权重。 ζ_i 越大说明清洁能源供暖系统设计方案*X_i*越接近相对最佳方案*X₀*，因此，当 $\zeta_i = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)$ 时方案*X_i*最优，即 ζ_i 的最大值对应的方案为最优方案，据此可以给出清洁能源供暖效益值的优劣顺序^[18]。

1.2.2 评价指标体系构建

DPSIR 概念框架由“压力—状态—响应模型”（PSR）、“驱动力—状态—响应模型”（DSR）发展而来，该模型在资源能源、生态安全和环境污染评价方面取得了理想的应用效果。借鉴有关研究成果^[19-21]，满足经济发展正效应、资源节约与环境友好型社会建设的必然需要，分别从社会属性（*S*）、经济属性（*Ec*）、生态属性（*En*）三个方面划分各类效益，分析识别影响综合效益水平的影响因子，构建基于DPSIR模型系统指标因果与传递关联的清洁能源供暖综合效益评价体系，系统要素间相互作用、相互影响的整体性，其因果闭合循环结构如图1所示。

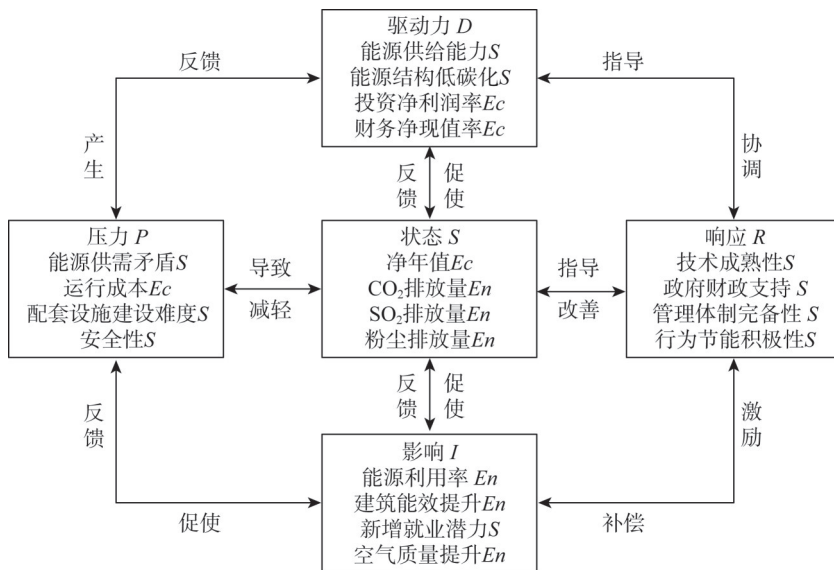


图1 清洁能源供暖综合效益评价模型框架

Fig. 1 Framework of comprehensive benefit evaluation model for clean energy heating

该体系选取驱动力、压力、状态、影响和响应五大类、二十个小类指标。其中驱动力指标表征促进清洁能源供暖项目快速发展和推动供暖方式多样化的潜在因素或关键因子；压力指标表征在“驱动力”作用下直接促进供暖方式多元化发展压力，供暖方式选择必须注重投入与产出的平衡，考虑能源供需矛盾、运行成本、安全性等因素对整个清洁能源供暖综合效益的影响；状态是在驱动力和压力性要素作用下产生的结果和状态表现，包括净年值等经济效果和CO₂排放量、SO₂排放量和粉尘排放量等环境质量等要素；影响指标是指在状态变化下，清洁能源供暖应用对社会经济状态产生影响，具体表现为能源利用率、建筑能效和空气质量提升以及新增就业需求等要素；响应为清洁能源供暖

应用在技术保障、财政支持、管理体制等所采取的对策措施等。在系统内部正负调节机制的作用下，信息在系统内子系统间传递，一方面，在驱动力（*D*）系统推动作用下寻找合适的清洁能源供暖形式，激励响应（*R*）采取一系列改善措施，加快清洁能源供给能力建设，统筹协调浅层地热能、气电代煤等多种清洁能源形式，确保区域清洁能源供暖系统效能最优。另一方面，在管理体制、资金支持、科学技术投入等方面采取的积极响应（*R*）作用于驱动力系统（*D*），对压力（*P*）和状态（*S*）会带来更好的系统影响。以此往复形成清洁能源供暖系统起源与结果之间因果链和闭合循环结构。

2 结果分析

2.1 方案选择及设备选型

清洁能源供暖系统是一个典型的多元化系统，由不同动力设备系统构成不同的清洁能源供暖（制冷）热源方案。考虑不同系统设备选型对系统运行特性、经济性和节能环保性影响作用，选择西安市某典型商业建筑作为建筑模型（层高8层），总面积为88840.11 m²，冬季热负荷和夏季冷负荷分别为5740.08 kW、7648.16 kW，利用清洁能源解决该商场夏季制冷、冬季制热的问题。现有三种冷热源方案的动力设备选型，即煤改电（空气源热泵）、煤改气（天然气）和浅层地热能供暖方案，分别称为“煤改电”“煤改气”和浅层地热能为主的多能互补供暖（制冷）方式（表1）：

表1 西安市商业建筑冷热源选择方案及设备选型表

Table 1 Selection of cold and heat sources and equipment for commercial buildings in Xi'an

| 方案 | 动力设备 | 型号及规格 | 备注 |
|-------------------|--------------------|--|--|
| 方案 A ₁ | 煤改电 空气源热泵机组 | 型号：TASD440AH 制热量：475 kW 制热性能系数：3.28 制冷量：440 kW 制冷性能系数：3.02 | 冬季+夏季 |
| | | 方案 A ₂ | 煤改气 天然气锅炉 |
| 方案 A ₃ | 浅层地热能 螺杆式地源热泵机组 | 型号：WPS405.2CFFST-B 制热量：1416.7 kW 制热性能系数：4.76 制冷量：1440.8 kW 制冷性能系数：6.81 | 冬季+夏季 |
| | | 竖井 | 井深：120 m 孔径：200 mm 孔间距：4.5 m |
| | 空气源热泵机组 | 型号：LSQWRF520M/A 制热量：552 kW 制热性能系数：3.29 制冷量：520 kW 制冷性能系数：3.02 | 冬季+夏季 |
| | | 冷水机组 | 型号：30HXC-350AH 制冷量：1218 kW 制冷性能系数：5.21 |
| | 冷却塔 | 型号：DFT350 进出水温度：35/30 °C 流量：275 m ³ /h | |
| | 蓄能池 | | |

2.2 优先评价与分析

清洁能源供暖方案综合效益评价具有涉及领域广、不确定性因素多等特点^[22]。该系统的决策论域有煤改电、煤改气和浅层地热能三种备选方案, 即 X_i ($i=1, 2, 3$)^[23]。从系统分析的角度看, 每个方案由驱动力、压力、状态、影响和响应5个准则因子, 即 K_n ($n=1, 2, 3, 4, 5$), 以及对应的二十个指标因子组成, 即 X_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 20$), 通过整体各方案指标评判、综合性评价与分析得到较优方案。

2.2.1 数据来源

在构造特征值向量时, 对于确定性指标数据采用《关中地区清洁能源供暖经济环境效益研究报告》等相关文献公开资料中所确定的实际数值表示。为便于分析评估, 本文运用多因素方差分析法, 对报告中西安市办公、商业和居住三个典型建筑之间的清洁能源供暖指标数据做显著性差异判定, 由于 levene 的 sig 值为 $0.156 > 0.05$, 方差不存在显著性差异, 办公建筑和居住建筑三种方案排序同商业建筑, 故将建筑物供暖面积、建筑热传系数等影响误差忽略不计, 以商业建筑类型为例给出清洁能源供暖(制冷)方案综合效益的评价过程。

对于不确定指标, 采用模糊数学中的五级划分法评定, 以问卷调查形式收集地质、环保相关专业专家和从事城市热力工程管理人员的评价意见, 建立评价备择集 $V = \{\text{优秀, 良好, 中等, 较差, 极差}\}$, 备择集分值 $VC: (9, 8, 7, 6, 5)$, 对定性指标进行单因素模糊评判^[24], 确定各个评价因素分值。西安市商业建筑三种清洁能源供暖方案综合效益指标的比较数列和最优参考数列特征值, 见表2所示。

2.2.2 关联度分析模型评价

将三个方案层次结构中各指标特征值和最优参考序列 X_0 进行归一化处理, 得到规范化特征值, 代入式(3)、式(4)计算各方案序列及参考序列关联系数 ζ_{ij} , 见表3所示。

根据 AHP-POS 定权法确定综合效益影响因素各层次指标权重, 见式(5)。

$$W_{A-K} = (0.2048, 0.1924, 0.2052, 0.1922, 0.2053) \quad (9)$$

$$W_{K_1-C} = (0.0519, 0.0488, 0.0521, 0.052) \quad (10)$$

$$W_{K_2-C} = (0.0496, 0.0466, 0.0466, 0.0497) \quad (11)$$

$$W_{K_3-C} = (0.049, 0.0521, 0.0521, 0.052) \quad (12)$$

$$W_{K_4-C} = (0.0464, 0.0487, 0.0475, 0.0496) \quad (13)$$

$$W_{K_5-C} = (0.0502, 0.0524, 0.0534, 0.0493) \quad (14)$$

首先分别对准则层五个因子指标, 即 K_1, K_2, K_3, K_4 和 K_5 进行单层次综合评判。其中, 准则层驱动力因子 K_1 的四个分指标的单层次灰色关联度值, 即为影响该清洁能源供暖效益综合评判的一个分量 ζ_{A-K_1} 。同理, 可确定准则层中压力因子 K_2 、状态因子 K_3 、影响因子 K_4 和响应因子 K_5 各指标的单层次综合评判结果 $\zeta_{A-K_2}, \zeta_{A-K_3}, \zeta_{A-K_4}$ 和 ζ_{A-K_5} (表4)。

分别对次目标层指标按经济效益、环境效益和社会效益进行单层次综合评判, 将评判结果加权得总目标层的关联矢量 ζ_i , 即为三个方案综合效益的关联度评判结果(表4)。从整体评价上来看, 西安市商业建筑清洁能源供暖方案综合关联度值的排序为 $\zeta_3 > \zeta_1 > \zeta_2$, 即三个备选清洁能源供暖方案中 A_3 所构成的数列曲线与理想曲线所构成的曲线最为接近。方案 A_3 优于方案 A_1 , 方案 A_1 优于方案 A_2 , 即以浅层地热能为主的多能互补供

表2 方案原始数据
Table 2 Original data of the scheme

| X_{ij} | K_1 | | | | | K_2 | | | | | K_3 | | | | | K_4 | | | | | K_5 | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | X_{i1} | X_{i2} | X_{i3} | X_{i4} | X_{i5} | X_{i6} | X_{i7} | X_{i8} | X_{i9} | X_{i10} | X_{i11} | X_{i12} | X_{i13} | X_{i14} | X_{i15} | X_{i16} | X_{i17} | X_{i18} | X_{i19} | X_{i20} | X_{i21} | X_{i22} | X_{i23} | X_{i24} | X_{i25} |
| X_{1j} | 7.46 | 8.33 | 17.86 | 971.8 | 7.54 | 375.33 | 7.95 | 8.58 | 106.06 | 0 | 0 | 0 | 7.38 | 7.54 | 7.38 | 8.64 | 8.78 | 8.85 | 8.24 | 8.29 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 |
| X_{2j} | 7.23 | 7.74 | 6.56 | 203.27 | 6.87 | 148.32 | 7.52 | 7.32 | 42.15 | 62.95 | 62.95 | 151.08 | 7.96 | 8.35 | 7.13 | 7.29 | 8.35 | 8.85 | 8.18 | 7.74 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 |
| X_{3j} | 8.68 | 8.63 | 17.98 | 1399.7 | 8.93 | 175.12 | 7 | 8.86 | 166.1 | 0 | 0 | 0 | 8.79 | 8.87 | 8.45 | 8.95 | 8.56 | 8.7 | 8.47 | 8.46 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 |
| X_{4j} | 8.68 | 8.63 | 17.98 | 1399.7 | 8.93 | 148.32 | 7.95 | 8.86 | 166.1 | 0 | 0 | 0 | 8.79 | 8.87 | 8.45 | 8.96 | 8.78 | 8.85 | 8.47 | 8.46 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 | 8.56 |

表3 关联系数计算结果
Table 3 Calculation results of correlation coefficient

| ξ_{ij} | K_1 | | | | | K_2 | | | | | K_3 | | | | | K_4 | | | | | K_5 | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | X_{i1} | X_{i2} | X_{i3} | X_{i4} | X_{i5} | X_{i6} | X_{i7} | X_{i8} | X_{i9} | X_{i10} | X_{i11} | X_{i12} | X_{i13} | X_{i14} | X_{i15} | X_{i16} | X_{i17} | X_{i18} | X_{i19} | X_{i20} | X_{i21} | X_{i22} | X_{i23} | X_{i24} | X_{i25} |
| ξ_{1j} | 0.3727 | 0.5973 | 0.9794 | 0.5829 | 0.4256 | 0.3333 | 1 | 0.7333 | 0.5079 | 1 | 1 | 1 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3815 | 0.7316 | 1 | 1 | 0.3867 | 0.6792 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 |
| ξ_{2j} | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 1 | 0.5249 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.4593 | 0.5612 | 0.3333 | 0.3373 | 0.3333 | 1 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 |
| ξ_{3j} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6639 | 0.3333 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.4942 | 0.3333 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

表4 关联度计算结果
Table 4 Calculation results of correlation degree

| ξ_i | DPSIR 影响因素 | | | | | 效益属性因子 | | | | | ξ_i |
|---------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|---------|
| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | Ec | En | S | | | |
| A_1 | 0.1298 | 0.1197 | 0.1812 | 0.0861 | 0.1267 | 0.1324 | 0.1721 | 0.3801 | 0.6435 | | |
| A_2 | 0.0682 | 0.1042 | 0.0683 | 0.0812 | 0.1034 | 0.0974 | 0.0735 | 0.2543 | 0.4254 | | |
| A_3 | 0.2048 | 0.1458 | 0.205 | 0.0922 | 0.1449 | 0.1834 | 0.203 | 0.5063 | 0.7927 | | |

暖综合效益最优,其次为煤改电和煤改气,在经济、技术和投资环境等条件允许的情况下,应优先实施方案A₃,依次实施方案A₁和A₂。

2.2.3 结果分析

根据综合效益原始数据及生态、经济和社会效益三个子系统单层次关联度的比较判别,所选清洁供暖(制冷)三种备选方案均以浅层地热能的三个分项效益和总关联度值最大,分别为0.1834、0.203、0.5063和0.7927,表明浅层地热能供暖(制冷)单层次和总目标层的综合效益水平均高于煤改电和煤改气方案。

经过深入分析发现浅层地热能供暖效益的主要优势在于它的社会效益、环境效益和经济效益均显著,其中社会效益关联度达到0.5063,远远超过了气电改煤供暖方案。由于浅层地热能分布广泛,可就地利用,适宜分散和集中开采,可以解决热电联产、天然气覆盖不到地方的供暖问题,浅层地热能供暖的未来发展前景较气电改煤方案更有优势。但是,浅层地热能供暖方案目前在国内的应用规模仍然有限,造成了投资成本较高的困局,这也是浅层地热能供暖发展受限的主要原因。

另外,三种清洁能源供暖方案的环境效益差异较大,煤改气污染环境效益关联度为0.0735,评价价值偏低,虽然煤改气用电量小,天然气用量却很大,有一定的二氧化碳、二氧化硫和粉尘排放,且气源的持续性和稳定性不能得到保障。浅层地热能和煤改电方案污染物零排放,具有良好的环境效益。其中,浅层地热能方案比煤改电方案具有更好的节能性,相对煤改电方案的节能率高达32%;相比之下,浅层地热能具有稳定性高、储藏量高、可再生和无污染等优点,节能减排效能显著,可以最大程度地缓解气候变化压力,维持对环境最低水平的影响。

从经济可行性看,三个方案的财务净现值大于零,实际报酬率均高于所期望的最低报酬率,符合预期经济效果。其中,浅层地热能供暖方案的回报率虽然比煤改电方案低,周期也长,但项目规模较大。对于净现值而言,浅层地热能方案最大,具有最大的盈利总量,其次为煤改电和煤改气,与三种方案总投资收益率、投资净利润率和净年值的排序相同。从投资角度看,项目均能获利,可以大大节省节能减排的投资成本,满足目前行业基准收益率的要求和投资者的心理预期。

根据D-P-S-I-R影响子系统的单层次关联度值,状态指标占比最高,其次为驱动力指标和压力指标,响应和影响体系指标占比相对较低。总体上看,受天然气用气结构不平衡、热电机组供热覆盖范围、地热资源勘查精度、深度以及各自特性差异等因素影响,清洁能源供能系统压力对清洁能源供能系统驱动力产生一定程度的负影响,同时,长期以来缺乏统筹规划管理、相关技术标准不完善、市场化调节不足和社会整体认知度低等因素影响,存在替代脱节、推进力度不足和协调联动无力等问题,不利于能源节约、供暖成本降低、供热系统质量和安全保障,一定程度上制约了关中地区清洁能源替代提升改造的有序推进。

3 结论

本文将DPSIR理论模型引入到不同类型清洁能源供暖综合效益影响要素评价,系统反映并识别了经济、社会、环保属性指标的因果传递关联因素,同时结合AHP-POS灰色关联度评价方法,以粒子群优化算法对专家打分进行修正,在一定程度上保证了方案评

价的可靠性与科学性，具有较好的实用性、可行性和借鉴性。

加快推进清洁供热系统转向绿色低碳可持续转型升级，是未来区域清洁能源供热规划亟需解决的关键问题，对关中地区清洁能源供暖监管体系进行系统谋划十分必要。

(1) 发挥国家战略引导作用，完善规划体系，推动清洁能源供暖多元化合理布局

科学合理地利用煤改清洁能源取暖，要从单一供热“一刀切”问题着手处理，把优化区域能源功能作为先导，制定并实施科学的多能互补清洁供暖发展战略。科学定位清洁能源供暖未来发展目标，解决持续增长的热力需求、热力供需平衡不足、供暖布局不科学及供热管网投资大等问题，是推动煤改清洁能源取暖的关键。在解决供应能力、系统效率、建筑供暖效能水平等问题上，要转变发展观和发展理念，将绿色发展理念融入到清洁能源供暖工程设计中，综合运用经济、行政、法律等手段，优化能源低碳化结构布局，强化清洁能源供给能力建设。在解决冷热源清洁化改造问题上，建立节能改造统筹管理体制，以浅层地热能集中供暖为主，气电代煤分散供暖为辅，面向多种用能需求，因地制宜、灵活组合多能互补的供暖方式，逐渐摆脱对燃煤供暖系统的依赖，完善城区供暖集中化、城郊及县城供暖多样化的清洁能源供暖多元化格局统筹规划和建设。

(2) 立足可持续发展，强化绿色供暖技术创新引领，着力供暖系统全面升级

我国北方采暖地区清洁能源供暖行业仍处于市场化运作转变过程中，加之清洁能源供应存在短板，相关技术应用标准和规范仍不完善，依然存在建筑节能水平较低、取暖消费方式落后等问题。未来应以遏制环境大气污染继续恶化、维护人类生存空间为着力点，加大绿色建筑和节能技术研发投入力度，强化区域化、网格化能源供应技术创新和绿色供暖信息共享服务，从热电联产机组灵活性改造、地热资源勘查精度与深度及多能组合调蓄技术等方面加大科技创新^[25]，引领能源供暖系统从电力、天然气等单一能源向地热能源为主的多能互补模式转变，规模化使用浅层地热资源，克服热电联产、天然气覆盖不到等问题，加快城镇集中供热管网建设，推进城乡结合部、周边小城镇及周边农村新型社区供热管网的布置和敷设，从而实现关中地区供热系统的全面优化升级，从根本上解决关中地区多数县城和广大村镇的供暖问题。

(3) 多举措保驾护航，重视民生服务发展，提高清洁能源供暖综合管理水平

按照“安全绿色、清洁高效”的理念，着力创新管理服务模式，从统筹规划、体制机制、能源保障等方面，系统谋划清洁能源供暖综合管理措施。首先是科学规划清洁能源供暖体系，重视清洁能源供暖系统规模效应和集成效应，突出系统优化，加强浅层地热能供热管网、电网建设、燃气管网等基础设施建设，对城乡建筑节能综合改造提升，实现供暖与区域生态效益、经济效益与社会效益协同，从而带来社会就业、环境保护及气候变化治理等多赢效应。其次是强化政府引导推动，突出市场主导作用，从投资补贴、税收优惠等提升项目经济性，全面满足关中地区供暖制冷的市场需求，鼓励社会资本进入清洁取暖领域，降低供能系统的运行成本，调动企业和用户选择绿色低碳的供暖方式。借鉴德国供热经验，系统谋划清洁能源供暖综合管理解决方案，灵活利用行政、经济杠杆，实行一次能源消耗的最高限制值和地热能等可再生能源供热技术的最低要求措施组合，适时引进碳价机制，形成合力，有效提高清洁取暖率和能效水平，大力推动关中地区供热能源转型，加速用能结构明显优化，缓解能源消耗、环境空气污染的的压力，为新旧动能转换提供发展新引擎，切实提升居民生活品质 and 幸福感。

参考文献(References):

- [1] 国家发展改革委和国家能源局. 能源发展“十三五”规划. 能源研究与利用, 2017, (2): 10. [National Development and Reform Commission and National Energy Administration. The 13th Five-Year Plan for Energy Development. Energy Research and Utilization, 2017, (2): 10.]
- [2] 发展改革委科技部. 关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见, 发改环资[2019]689号. [Ministry of Science and Technology, Development and Reform Commission. Guidance on building a market-oriented green technology innovation system, development and reform environmental resources [2019] No. 689.]
- [3] REN J Z, BENJAMIN K. SOVACOOOL. Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. Energy Conversion and Management, 2015, 92: 129-136.
- [4] 习近平在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告. 新华网, http://www.xinhuanet.com/photo/2017-10/27/c_1121868728.htm. [XI Jin-ping's report at the 19th national congress of the communist party of China. XINHUANET, http://www.xinhuanet.com/photo/2017-10/27/c_1121868728.htm.]
- [5] 沈镭, 刘立涛, 王礼茂, 等. 2050年中国能源消费的情景预测. 自然资源学报, 2015, 30(3): 361-373. [SHEN L, LIU L T, WANG L M, et al. Forecast of China's energy consumption in 2050. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 361-373.]
- [6] BENJAMIN K, SOVACOOOL, ISHANI M. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy, 2011, 36(8): 5343-5355.
- [7] 中华人民共和国国家计划委员会, 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建设项目经济评价参数与方法(第二版). 北京: 中国计划出版, 2006: 43-52. [National Development and Reform Commission, State Planning Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Economic Evaluation Parameters and Methods for Construction Projects (Second Edition). Beijing: China Planning Press, 2006: 43-52.]
- [8] 刘冉. 清洁能源供暖经济成本核算与比选方案研究探析. 墙材革新与建筑节能, 2018, (4): 65-69. [LIU R. Economic cost accounting and comparative analysis of clean energy heating. Wall Material Innovation and Building Energy Saving, 2018, (4): 65-69.]
- [9] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选. 北京: 清华大学出版社, 2015: 53-61. [DU D, PANG Q H, WU Y. Modern Comprehensive Evaluation Methods and Case Selection. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 53-61.]
- [10] 张欣莹, 解建仓, 刘建林, 等. 基于熵权法的节水型社会建设区域类型分析. 自然资源学报, 2017, 32(2): 301-309. [ZHANG X Y, XIE J C, LIU J L, et al. Analysis of regional types of water-saving society construction based on entropy weight method. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 301-309.]
- [11] 陕西省地质调查院. 关中地区清洁能源供暖经济环境效益研究报告. 2019, (3): 1-2. [Shaanxi Geological Survey Institute. Research report on economic and environmental benefits of clean energy heating in guanzhong region. 2019, (3): 1-2.]
- [12] 梁洪杰. 创新思路先行先试积极推进清洁能源供暖. 价格理论与实践, 2017, (10): 11-12. [LIANG H J. Innovative ideas, first try and actively promote clean energy heating. Price Theory and Practice, 2017, (10): 11-12.]
- [13] “新时代中国清洁能源与可持续发展”学术研讨会在浙江大学举办. 浙江大学学报: 人文社会科学版, 2018, 48(6): 95. ["Clean Energy and Sustainable Development in China in the New Era" Academic Seminar was Held in Zhejiang University. Journal of Zhejiang University: Humanities and Social Sciences Edition, 2018, 48(6): 95.]
- [14] MA Y F, YAN J J, SHA J H, et al. Dynamic simulation of the atmospheric environment improved by a focus on clean energy utilization of resource-based cities in China. Journal of Cleaner Production, 2018, 192: 15.
- [15] 罗党. 灰色决策理论与方法. 北京: 科学出版社, 2012: 65. [LUO D. Grey Decision Theory and Method. Beijing: Science Press, 2012: 65.]
- [16] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. [DENG X, LI J M, ZENG H J, et al. Analytic hierarchy process weight calculation method analysis and application research. Practice and Understanding of Mathematics, 2012, 42(7): 93-100.]
- [17] 梁望, 高媛, 刘小利. 粒子群优化算法基础研究. 科技经济导刊. 2016, (21): 149. [LIANG W, GAO Y, LIU X L. Basic research on particle swarm optimization. Science and Technology Economic Guide. 2016, (21): 149.]
- [18] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 2014: 71-86. [LIU S F, YANG Y J, WU L F, et al. Grey System Theory and Its Application. Beijing: Science Press, 2014: 71-86.]
- [19] 王建波, 刘芳梦, 有维宝, 等. 基于DPSIR与物元分析的城市轨道交通PPP项目绩效评价. 隧道建设: 中英文, 2018, 38(7): 1100-1107. [WANG J B, LIU F M, YOU W B, et al. Performance evaluation of urban rail transit PPP project based on DPSIR and matter element analysis. Tunnel Construction: Chinese and English, 2018, 38(7): 1100-1107.]

- [20] 王浩文, 鲁仕宝, 鲍海君. 基于 DPSIR 模型的浙江省“五水共治”绩效评价. 上海国土资源, 2016, 37(4): 77-82, 88. [WANG H W, LU S B, BAO H J. Performance evaluation of "Five Water Co-Governance" in Zhejiang province based on DPSIR model. Shanghai Land Resources, 2016, 37(4): 77-82, 88.]
- [21] 汤健, 邓文伟. 基于 DPSIR 模型的资源型企业环境绩效评价. 会计之友, 2017, (1): 61-64. [TANG J, DENG W W. Environmental performance evaluation of resource-based enterprises based on DPSIR model. Friends of Accounting, 2017, (1): 61-64.]
- [22] 于景元. 系统科学和系统工程的发展与应用. 科学决策, 2017, (12): 1-18. [YU J Y. Development and application of system science and system engineering. Scientific Decision Making, 2017, (12): 1-18.]
- [23] 刘纪显, 周德玉, 李福安. 系统多目标决策解的思想方法. 系统辩证学学报, 1999, (2): 78. [LIU J X, ZHOU D W, LI F A. Thought and method of systematic multi-objective decision solution. Journal of Systematic Dialectics, 1999, (2): 78.]
- [24] ZHANG C M. Resources and environmental evaluation for heat treatment based on Fuzzy mathematics method. Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography, 2017, 20(5): 86.
- [25] 龙西亭, 袁瑞强, 皮建高, 等. 长沙浅层地热能资源调查与评价. 自然资源学报, 2016, 31(1): 163-176. [LONG X T, YUAN R Q, PI J G, et al. Investigation and evaluation of shallow geothermal energy resources in Changsha. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 163-176.]

Calculation and evaluation of the comprehensive benefit ratio of clean energy utilization:

Taking clean energy heating in Guanzhong Plain as an example

DING Yue-qing¹, HONG Zeng-lin^{1,2,3}, JIN Guang⁴, ZHANG Ya-ge⁴,
XUE Xu-ping², YANG Jian-hua¹

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710054, China)

Abstract: With the transformation of China's development mode and energy structure, "double control" of energy consumption and clean and centralized alternative heating by burning coal have become an inevitable trend. The study focuses on efficiency evaluation of clean heating, a dynamic and systematic problem, which involves technical, financial, economic and social evaluation. At present, the evaluation of heating mode generally focuses on the economic and technical perspectives, which, to a certain degree, cannot reflect the deep problems of economy, society, environment and resources. Taking Xi'an as an example, this paper evaluates the air source heat pump, gas-fired boiler and the multi-energy complementary heating scheme based on shallow geothermal energy. By adopting the method of systematic evaluation, based on the DPSIR model, we determined the factor indexes of each subsystem in the evaluation model, constructed the comprehensive performance evaluation index system of clean energy heating, and calculated the single-level and comprehensive evaluation values of each subsystem of clean energy heating by using the grey relational degree model of AHP-POS, and analyzed the relationship and interaction mechanism of the influencing factors.

Keywords: clean energy; integrative benefits; grey relational analysis; balanced energy mix