



移动扫码阅读

杨俊兰,韩一飞,王林秀,等.典型城市的农村清洁取暖技术性能综合评价[J].能源环境保护,2022,36(6):118-126.

YANG Junlan, HAN Yifei, WANG Linxiu, et al. Comprehensive evaluation of rural clean heating technical performance in typical cities[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(6):118-126.

典型城市的农村清洁取暖技术性能综合评价

杨俊兰,韩一飞,王林秀,张鑫,杜雨帆

(天津城建大学 能源与安全工程学院,天津 300384)

摘要:为了比较供暖装置在不同气候条件下的性能,建立了能耗、经济和环保性模型,分析了CO₂跨临界空气源热泵(ASHP_{CO₂})、R410A空气源热泵(ASHP_{R410A})、燃气壁挂炉(WGH)以及电加热取暖器(DEH)4种供暖装置。结果表明:ASHP_{CO₂}的能耗较低,相比DEH的能耗最大减少了81.2%;ASHP_{R410A}和WGH的经济性较好,相比DEH的运行总成本分别最大减少了60%和52.1%;WGH的环保性最佳,其次是ASHP_{CO₂},ASHP_{CO₂}在上海的PM_{2.5}排放量比DEH低75.2%;除长沙以外,4种供暖装置的能耗、运行成本及污染物排放量均随地区纬度的降低而降低;ASHP_{CO₂}在上海地区的能耗比哈尔滨降低64%;ASHP_{R410A}在上海地区15a内运行总成本比哈尔滨减少41%;WGH在上海的SO₂、NO_x和PM_{2.5}排放量比北京分别下降17.4%、34.3%和34.3%;按照综合性能排序,依次为WGH、ASHP_{R410A}、ASHP_{CO₂}、DEH;哈尔滨等严寒地区采用WGH具有优势,其他地区可采用ASHP_{R410A},ASHP_{CO₂}在西安地区的综合指数高于其他地区。

关键词:清洁取暖技术;CO₂跨临界空气源热泵;性能评价;层次分析法;熵权法

中图分类号:X382

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)06-0118-09

Comprehensive evaluation of rural clean heating technical performance in typical cities

YANG Junlan, HAN Yifei, WANG Linxiu, ZHANG Xin, DU Yufan

(School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to compare the performance of heating devices under different climatic conditions, the energy consumption, economic and environmental performance models were established. Four kinds of heating devices were analyzed, including CO₂ transcritical air source heat pump (ASHP_{CO₂}), R410A air source heat pump (ASHP_{R410A}), gas wall hanging furnace (WGH) and electric heating heater (DEH). The results show that ASHP_{CO₂} has the lower energy consumption, which is 81.2% lower than that of DEH. ASHP_{R410A} and WGH have better economy, and their minimum total operating costs are 60% and 52.1% lower than that of DEH. WGH has the best environmental performance, followed by ASHP_{CO₂}. The PM_{2.5} emission of ASHP_{CO₂} in Shanghai is 75.2% lower than that of DEH. The energy consumption, operation costs and pollutant emissions of the four heating devices reduce with the decrease of regional latitude in all the typical cities except Changsha. The energy consumption of ASHP_{CO₂} in Shanghai is 64% lower than that in Harbin. The total operating cost of ASHP_{R410A} in Shanghai for 15 years is 41% less than that in Harbin. The SO₂, NO_x and PM_{2.5} emissions of WGH in Shanghai are 17.4%, 34.3% and 34.3% lower than those in Beijing, respectively. The four devices ranked from best to worst comprehensive performance are WGH, ASHP_{R410A}, ASHP_{CO₂} and DEH. WGH is suit-

收稿日期:2022-09-28;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:天津市自然科学基金项目(17JCZDJC31400);天津市科技特派员项目(22YDTPJC00020);天津市教委项目(2019KJ113)

第一作者简介:杨俊兰(1971—),女,河北石家庄人,博士研究生,教授,主要从事二氧化碳制冷与热泵技术研究。E-mail: yjlf@163.com

able for cold regions such as Harbin. ASHP_{R410A} can be used in other regions. The comprehensive index of ASHP_{CO₂} in Xi'an is higher than that in other cities.

Key Words: Clean heating technology; CO₂ transcritical air source heat pump; Performance evaluation; Analytic hierarchy process; Entropy weight method

0 引言

目前我国北方农村地区,传统供暖方式正被逐步替代,加之传统制冷剂的限制,以自然工质CO₂为制冷剂的跨临界空气源热泵受到广泛关注。由于空气源热泵在实际应用中受环境影响较大,部分学者探究了空气源热泵在不同纬度城市的适应性和可行性。李正^[1]对CO₂空气源热泵在我国北方的应用进行了可行性研究,发现CO₂热泵的环境效益比电加热和燃煤锅炉低,但高于燃气锅炉。刘东岳^[2]开发了一种CO₂热泵热水系统,分析在不同季节下运行参数对实验系统的影响。李恩腾^[3]搭建了超低温工况下CO₂跨临界热泵试验台,并对系统进行多目标优化,分别得到了环境性、经济性和综合性最好的3种优化方案。寇宏侨^[4]等设计了一种应用于寒冷地区的大功率CO₂热泵供暖系统,其运行费用与电锅炉相比可大幅度降低。Ma^[5]等研究了CO₂太阳能热泵在多伦多地区的供暖性能,发现CO₂双级压缩循环比R410A循环在寒冷地区更具优势。

目前的研究主要集中于单一指标下对不同系统的分析评价及其参数优化。本文分别从能耗、经济和环保性,对CO₂跨临界空气源热泵、R410A

空气源热泵、燃气壁挂炉以及电加热取暖器进行比较,探究了4种供暖装置在严寒、寒冷、夏热冬冷3个气候分区中农村地区的适用性,并采用层次分析法结合熵权法,构建科学的综合评价体系,更加全面地对4种供暖设备进行分析,为不同应用背景下供暖装置的选择提供理论指导。

1 数据来源与模型方法

1.1 选取典型城市

我国地域广、差异大,针对不同地区的气候差异,《民用建筑设计统一标准》对我国不同地域划分为5个气候分区^[6]。对于空气源热泵而言,外部气候条件是影响热泵设备运行的重要参数,故本文选择严寒地区的哈尔滨、寒冷地区的北京和西安、夏热冬冷地区的上海和长沙作为典型城市,对4种供暖装置进行性能评价。

目前,绝大多数农村地区尚未实现集中供暖。考虑到我国农村住宅的围护结构相对简陋,结合相关规定^[7-8],本文在不同气候分区内统一选用14℃作为室内计算温度,假设农村地区的建筑采暖热指标为城市地区的2/3进行计算,并根据Energy Plus 9.6.0统计出的年平均供热小时数,得到5座典型城市的冬季设计供暖参数见表1。

表1 5座典型城市的冬季设计供暖参数

Table 1 Heating parameters designed for five typical cities in winter

参数	哈尔滨	北京	西安	上海	长沙
供热面积/m ²	/	/	150	/	/
室内设计温度/℃	/	/	14.0	/	/
室外设计温度/℃	-26.0	-9.0	-5.0	-2.0	0.3
采暖能耗降低50%建筑采暖热指标/ (W·m ⁻²)	28.93	26.87	27.40	26.67	29.80
热泵制热能力安全系数	1.000	1.087	1.084	1.300	1.300
年平均供热小时数/h	5 759	4 657	4 263	3 556	3 640
结霜-除霜平均损失系数	1.000	0.965	0.954	0.890	0.703
气候分区	严寒地区	寒冷地区	寒冷地区	夏热冬冷地区	夏热冬冷地区

1.2 热负荷模型的建立与计算

住宅热负荷在供暖季随环境温度的改变而变化,设定当环境温度低于14℃时,需要向农村住宅供暖以满足居民舒适性要求^[6]。供暖装置在其

运行年限内向农村住宅提供的总供热负荷详见式(1)。

$$E_h = L \cdot A_h \cdot \sum_{i=1}^n q_{h,bin}(i) \cdot t_{bin}(i) \quad (1)$$

式(1)中: A_h ——建筑供热面积, m^2 ; L ——设备使用年限, 空气源热泵一般取 15 a; $t_{bin}(i)$ —— i 温度下对应的小时数, h; $q_{h, bin}$ ——单位面积供热负荷, W/m^2 。

根据温度区间分布法, 计算其中单位面积供热负荷详见式(2)^[9]。

$$q_{h, bin} = q_{h, desi} \left[\frac{HLET - T_{ambi}(i)}{HLET - T_{desi}} \right] \quad (2)$$

式(2)中: $q_{h, desi}$ ——采暖热指标, W/m^2 ; $HLET$ ——房间零热负荷的对应温度, 取 14 $^{\circ}C$; $T_{ambi}(i)$ ——室外环境温度, $^{\circ}C$; T_{desi} ——室外设计温度, $^{\circ}C$ 。

通过计算得到 5 座城市的农村地区在各温度区间内的总供热负荷, 如图 1 所示。通过统计得到 CO_2 跨临界空气源热泵在 5 座城市的农村地区 15 a 内总供热负荷分别为: 哈尔滨 174 846.59 kW、北京 129 208.19 kW、西安 128 624.61 kW、上海 84 925.61 kW、长沙 105 943.89 kW。

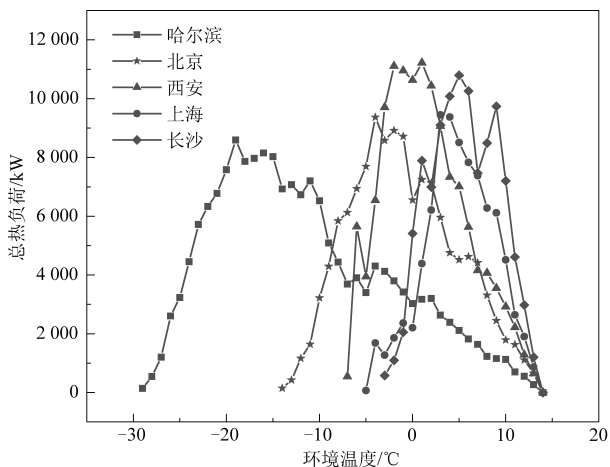


图 1 不同环境温度下总热负荷分布图

Fig.1 Distribution diagram of total heat load at different ambient temperatures

1.3 性能评价模型的建立

1.3.1 能耗模型的建立

对于 CO_2 跨临界空气源热泵和 R410A 空气源热泵, COP_h 随环境温度的变化而变化, 故引入一个评价标准来分析其在整个供暖季的性能指标。Yang^[10] 等分析全年性能系数 (APF) 和综合部分负荷系数 (IPLV) 在不同热泵产品上的适用情况, 建议空气-空气热泵和空气-水热泵使用全年性能系数 (APF) 作为评价标准。本文的 CO_2 跨临界空气源热泵和 R410A 空气源热泵只用于冬季供暖, 故将全年性能系数简化成供暖季节性能系数 (SPF), 公式如式(3)。

$$SPF = \frac{HSTL}{HSTE} \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^n (COP(i) \times a)$$

式(3)中: $HSTL$ ——供热季内热泵供热总量, kW; $HSTE$ ——供热季内耗电总量, kW; a —— i 温度下热负荷占总热负荷的比重。

为在相同的基准下对 4 种不同供热装置在使用年限内进行能耗比较, 采用一次能源消耗量 (PEC) 作为评价标准。

对于 CO_2 跨临界空气源热泵, 其消耗的总能量一般用平均年能耗 (AEC) 乘以热泵运行年限 (L), 详见式(4)。

$$E_{CO_2} = L \cdot AEC \quad (4)$$

平均年能耗 AEC 计算公示如式(5)。

$$AEC = \frac{\sum_{i=1}^n W_{com, bin(i)} t(i)}{D_{fros, m}} \quad (5)$$

式(5)中: $W_{com, bin(i)}$ ——对应温度下的压缩机耗功, kW; $D_{fros, m}$ ——结霜-除霜平均损失系数。

因此, CO_2 跨临界热泵的一次能源消耗量 PEC_{CO_2} :

$$PEC_{CO_2} = \frac{E_{CO_2} \cdot p_e}{\eta_{grid, trans}} \quad (6)$$

式(6)中: p_e ——电转换成标准煤的系数, 取 0.4 kgce/(kW · h)^[11]; $\eta_{grid, trans}$ ——电网传输效率, 取 9%^[12]。

用同样方法可得到 R410A 空气源热泵的一次能源消耗量 PEC_{R410A} 。另外, 燃气壁挂炉 (WGH) 和电加热取暖器 (DEH) 的一次能源消耗量分别为:

$$PEC_{WGH} = \frac{E_{WGH} \cdot p_{NG}}{\eta_{WGH}} \quad (7)$$

$$PEC_{DEH} = \frac{E_{DEH} \cdot p_e}{\eta_{DEH} \cdot \eta_{grid, trans}} \quad (8)$$

式(7)中: η_{WGH} ——燃气壁挂炉的热效率, 取 90%; η_{DEH} ——电加热取暖器的热效率, 取 99%^[13]; p_{NG} ——燃气转换成标准煤的系数, 取 1.214 3 kgce/(kW · h)^[11]。

1.3.2 经济性模型的建立

通过总投资成本 (LCC) 的比较, 可直观的分析不同供热设备的技术经济性。装置运行年限内的 LCC 一般包括初投资 (ICC)、运行年限内消耗燃料成本 (PV) 和设备运行维护成本 (OMC), 其中

运行维护费用取初投资的 1%^[12]。

总投资成本的计算公式如式(9)^[14]。

$$LCC = ICC + \sum_{i=0}^L PV_{FC}(i) + OMC \quad (9)$$

供暖装置初投资包含设备主要部件的投资(C_i)和附加设备的投资(C_{Add})。公式详见式(10)。

$$ICC = \sum_{i=1}^n C_i + C_{Add} \quad (10)$$

CO₂跨临界空气源热泵各部件投资成本的计算公式见表2。

表2 CO₂跨临界空气源热泵各部件投资成本^[12,15]

Table 2 Investment costs of components of CO₂ transcritical air source heat pump^[12,15]

部件名称	部件投资成本
压缩机	$C_{com} = 17\,547 P_{com}^{0.448\,8}$
蒸发器	$C_{eva} = 331.7 A_{eva}^{0.938\,99}$
气冷器	$C_{gc} = 1\,874.4 A_{gc}^{0.983\,54}$
节流阀	$C_{cv} = 817\,m$

注: P_{com} ——压缩机功率, kW; A_{eva} ——蒸发器换热面积, m²; A_{gc} ——气冷器换热面积, m²; m ——通过节流阀的制冷剂流量, kg/h

CO₂跨临界空气源热泵设备中的其他部件按照初投资的 15% 计算^[16]。由于不同城市的农村地区气候条件不同, CO₂跨临界空气源热泵的初投资也有所不同, 本文以北京地区的 CO₂跨临界空气源热泵初投资费用为基础, 根据参考文献^[9]中的比例计算出其他 4 座城市的农村地区 CO₂跨临界空气源热泵初投资, 具体如下: 哈尔滨 48 147.06 元、北京 43 770.06 元、西安 43 332.36 元、上海 43 332.36 元、长沙 52 086.37 元。

对于其他 3 种供暖装置, 考虑到市场上已有成熟的装置, 故参考市场价格, 满足 150 m²农村用户取暖需求, 选定装置的初投资。选定 R410A 空气源热泵初投资为 22 500 元、燃气壁挂炉初投资为 12 000 元、电加热取暖器 9 000 元。

年平均燃料费用(FC_{annual})一般用燃料的单价乘以年平均消耗量计算, 其中 CO₂跨临界空气源热泵、R410A 空气源热泵和电加热取暖器消耗的能源是电能, 燃气壁挂炉消耗的燃料是天然气。

对于 3 种耗电装置:

$$FC_{annual} = c_e \cdot \frac{E}{L} \quad (12)$$

对于燃气壁挂炉:

$$FC_{annual} = c_{NG} \cdot \frac{M_{NG}}{L} \quad (13)$$

式中: c ——燃料的单价, 其中单位电价和单位体积天然气价格均来自中国建筑能效年度报告^[13], 详见表 3。对于 4 种供暖装置的燃料而言, 每年的价格和用量都不一样, 一般是逐年小幅度递增, 故对于第 i 年的燃料费用(PV_{FC}), 一般用系数进行修正, 公式如下^[14]:

$$PV_{FC} = \frac{FC_{annual}}{(1 + ESC)^i} \cdot (1 + DISC)^i \quad (14)$$

式(14)中: ESC——燃料价格的增长率, 取 0.8%; DISC——燃料用量的增长率, 取 4%^[14]。

1.3.3 环保性模型的建立

CO₂跨临界空气源热泵、R410A 空气源热泵、电加热取暖器和燃气壁挂炉在运行过程中对环境的影响主要是由于氮化物和硫化物等污染物的排放。虽然 PM_{2.5} 在空气中的含量很少, 但却是影响环境质量的重要指标, 故在 4 种供暖装置的污染物评价中, 采用 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 3 种污染物的排放量作为指标, 分析其对环境的影响。

对于燃气壁挂炉需要计算出运行过程中消耗的燃气的量:

$$M = \frac{E_h}{\eta_{WGH} \cdot LHV} \quad (15)$$

式(15)中: LHV——燃气的低热值, kJ · m⁻³。

对于另外 3 种耗电装置需要计算出其运行过程中的耗电量:

$$E = \frac{E_h}{\eta_{DEH} \cdot \eta_{grid,trans}} \quad (16)$$

CO₂跨临界空气源热泵、R410A 空气源热泵和电加热取暖器的污染物排放量的计算公式如式(17)。

$$m_e = \mu_e \cdot E \quad (17)$$

燃气壁挂炉的污染物排放量计算公式如式(18)。

$$m_e = \mu_e \cdot M \quad (18)$$

式(18)中: m_e ——某一项污染物排放量, kg; μ_e ——某一项污染物的排放系数, 见表 3。

1.4 综合评价模型的建立

本文采用层次分析法(AHP)综合考虑能耗、经济以及环保 3 方面对系统性能的影响, 并结合熵权法确定权重因子, 在一定程度上避免 AHP 中

表 3 4 种供热装置部分评价系数^[17-19]Table 3 Part of evaluation coefficients of four heating devices^[17-19]

参数	电	燃气
燃料费	0.488 3 元 · (kW · h) ⁻¹	2.05 元 · m ⁻³
μ_{SO_2}	0.997 kg · (kW · h) ⁻¹	1.24 × 10 ⁻³ kg · m ⁻³
μ_{NO_x}	0.015 kg · (kW · h) ⁻¹	4.96 × 10 ⁻³ kg · m ⁻³
$\mu_{\text{PM}_{2.5}}$	0.203 5 × 10 ⁻³ kg · (kW · h) ⁻¹	0.284 4 × 10 ⁻³ kg · m ⁻³

人为确定指标权重的主观性。

计算得到:

(1) 指标数据预处理

以 4 种设备的 5 个评价指标 (PEC、LCC 以及 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 3 种污染物的排放量) 构成矩阵 $X = (x_{ij})_{4 \times 5}$, 其中 x_{ij} 表示第 i 个设备中第 j 项指标, 5 个评价指标均为负向指标, 值越小越好。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{41} & x_{42} & \cdots & x_{45} \end{bmatrix} \quad (19)$$

由于各项指标的计量单位并不统一, 因此要对各指标进行标准化处理, 对于不同性质的指标需采用不同算法进行处理。负向指标的标准化公式为:

$$x'_{ij} = 0.998 \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.002 \quad (20)$$

(2) 综合评价指数的确定

每种供暖设备的综合评价指数 ξ 由公式 (21)

$$\xi = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P_{ij} \quad (21)$$

式 (21) 中: P_{ij} ——数据归一化处理后的元素值; w_j ——第 j 项指标归一化处理后的权重因子。

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad j=1, 2, 3, 4, 5 \quad (22)$$

经过数据预处理后, 采用熵权法确定各指标权重 w 。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (23)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (24)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \cdot \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (25)$$

上式中: g_j ——第 j 项指标的差异性系数; e_j ——第 j 项指标的信息熵值。

按式 (19) ~ (25) 进行计算, 可得到各评价指标在 5 座城市农村地区的信息熵及其权重, 见表 4。

表 4 各评价指标在 5 座城市农村地区中的信息熵与权重

Table 4 The information entropy and weight of each evaluation index in rural areas of five cities

项目	哈尔滨		北京		西安		上海		长沙	
	信息熵	权重	信息熵	权重	信息熵	权重	信息熵	权重	信息熵	权重
PEC	0.795	0.190	0.796	0.192	0.795	0.198	0.796	0.183	0.796	0.188
LCC	0.780	0.204	0.773	0.214	0.788	0.204	0.724	0.248	0.745	0.234
SO ₂ 排放量	0.781	0.203	0.788	0.199	0.793	0.200	0.788	0.190	0.790	0.193
NO _x 排放量	0.783	0.201	0.790	0.197	0.794	0.199	0.790	0.189	0.791	0.192
PM _{2.5} 排放量	0.781	0.202	0.789	0.198	0.793	0.199	0.789	0.190	0.791	0.193

2 评价结果分析

2.1 能耗评价

图 2 给出了 CO₂跨临界空气源热泵和 R410A 空气源热泵在 5 座城市的农村地区供暖季节性能系数变化情况。从整体上看, CO₂跨临界空气源热泵在供暖季的平均 SPF 值基本保持在 2.75 左右,

而 R410A 空气源热泵则平均维持在 2.3 附近。随着纬度的降低, 两种供暖设备的 SPF 值均逐渐升高, 且 CO₂跨临界空气源热泵性能提升效果明显, 最高可提升 30.3%, 而 R410A 空气源热泵只提升 22.4%。相较于 R410A 空气源热泵, CO₂跨临界空气源热泵在五座城市的农村地区 SPF 值提升幅度均不断增大, 其中在哈尔滨地区增幅最小, 只有 14.9%, 而

在长沙地区增幅最大,提升幅度有 22.4%。

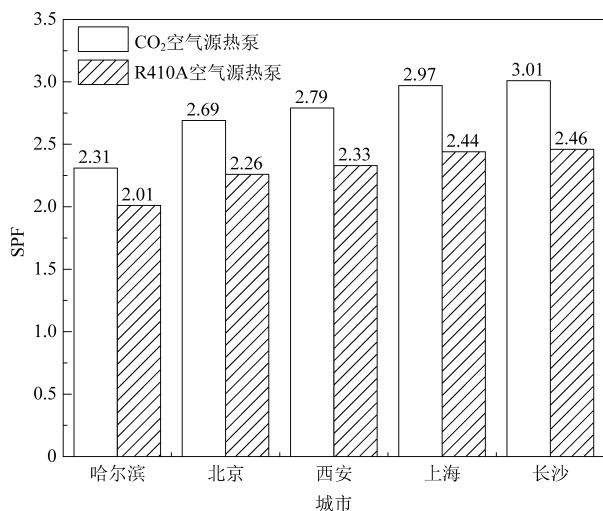


图2 空气源热泵在5座城市的SPF

Fig.2 SPF of air source heat pump in five cities

通过一次能源消耗量将4种供暖装置在不同城市的农村地区供暖季能量消耗转换成标准煤用量,其结果为图3所示。除长沙以外,4种供暖装置的PEC均随着纬度的降低而降低。采用CO₂跨临界空气源热泵的PEC比采用电加热取暖器降低63.7%~81.2%,比R410A空气源热泵低10%~16.1%,说明CO₂跨临界空气源热泵可节省大量的能源,其在哈尔滨比燃气壁挂炉高23.07%,而在另外4个城市中均低于燃气壁挂炉,原因是哈尔滨供暖季的环境温度大多在0℃以下,造成CO₂跨临界空气源热泵效率较低。随着纬度的降低,CO₂跨临界空气源热泵的优势得到体现,PEC值最低上海地区比哈尔滨降低64%。总体而言,CO₂跨临界空气源热泵是耗能最少的供暖装置,是一种极具潜力的清洁能源替代方案。

2.2 经济性评价

4种供暖装置在5座城市的农村地区运行总成本随运行年限的变化如图4所示。R410A空气源热泵和燃气壁挂炉的经济性较好,其运行总成本比电加热器最大可分别降低60%和52.1%。CO₂跨临界空气源热泵的运行成本较高,但相较于电加热取暖器,其运行成本最大可降低40%。图中线段的斜率代表了平均年燃料费用,可以看出图中CO₂跨临界空气源热泵的斜率均最小,说明其在运行过程中节能效果最佳,而电加热取暖器的斜率最大,则反映出其能源消耗较大的特点。

图4(a)中R410A空气源热泵在哈尔滨地区的运行成本比燃气壁挂炉平均高出29.11%。但随着纬度的降低,R410A空气源热泵的效率逐渐

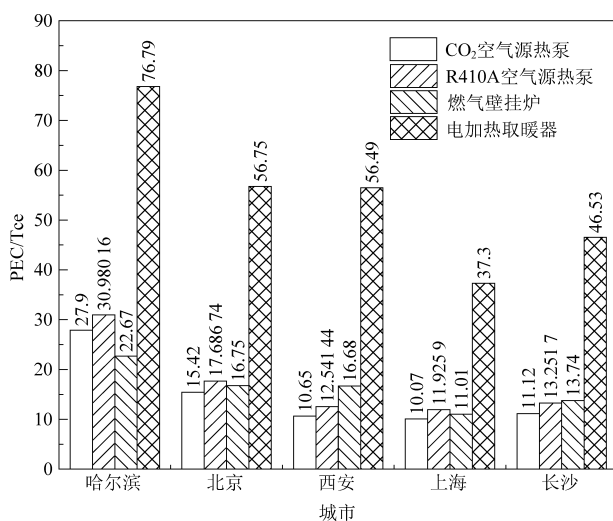


图3 4种供暖装置在5座城市的PEC

Fig.3 PEC of four heating devices in five cities

增大,运行成本逐渐降低,其上海地区15 a内运行总成本较哈尔滨减少41%,而燃气壁挂炉则只减少了29.6%。R410A空气源热泵在北京和长沙地区运行11 a时可低于燃气壁挂炉,而在西安和上海地区运行9 a左右时就可低于燃气壁挂炉。在西安、北京、上海和长沙地区运行15 a时,运行总成本分别比燃气壁挂炉低19.21%、14.79%、8.16%和4.33%。

2.3 环境性评价

图5和图6显示了4种供暖装置在5座典型城市的农村地区运行15 a SO₂和NO_x的排放量。可以看出采用电加热取暖器产生的SO₂和NO_x均是最高,而采用CO₂跨临界空气源和R410A空气源热泵时,污染物排放量可大幅度减少。以北京为例,CO₂跨临界空气源和R410A空气源热泵SO₂排放量比电加热取暖器可降低约75%和71.32%。CO₂跨临界空气源热泵的SO₂和NO_x的排放量在哈尔滨最高,在上海最低。与哈尔滨地区相比,在上海地区的SO₂和NO_x排放量均可降低64%。

图7为4种供暖装置在5座典型城市的农村地区PM_{2.5}排放量。使用CO₂跨临界空气源热泵时,PM_{2.5}排放量在哈尔滨最高,达到上海的2.77倍。在上海地区,CO₂跨临界空气源热泵的PM_{2.5}排放量比R410A空气源热泵和电加热取暖器分别降低15.6%和75.2%。燃气壁挂炉在上海地区SO₂、NO_x和PM_{2.5}排放量较北京地区分别下降17.4%、34.3%和34.3%。虽然燃气壁挂炉所产生的SO₂和NO_x排放量极低,但我国仍存在天然气供应不足和使用安全等问题。

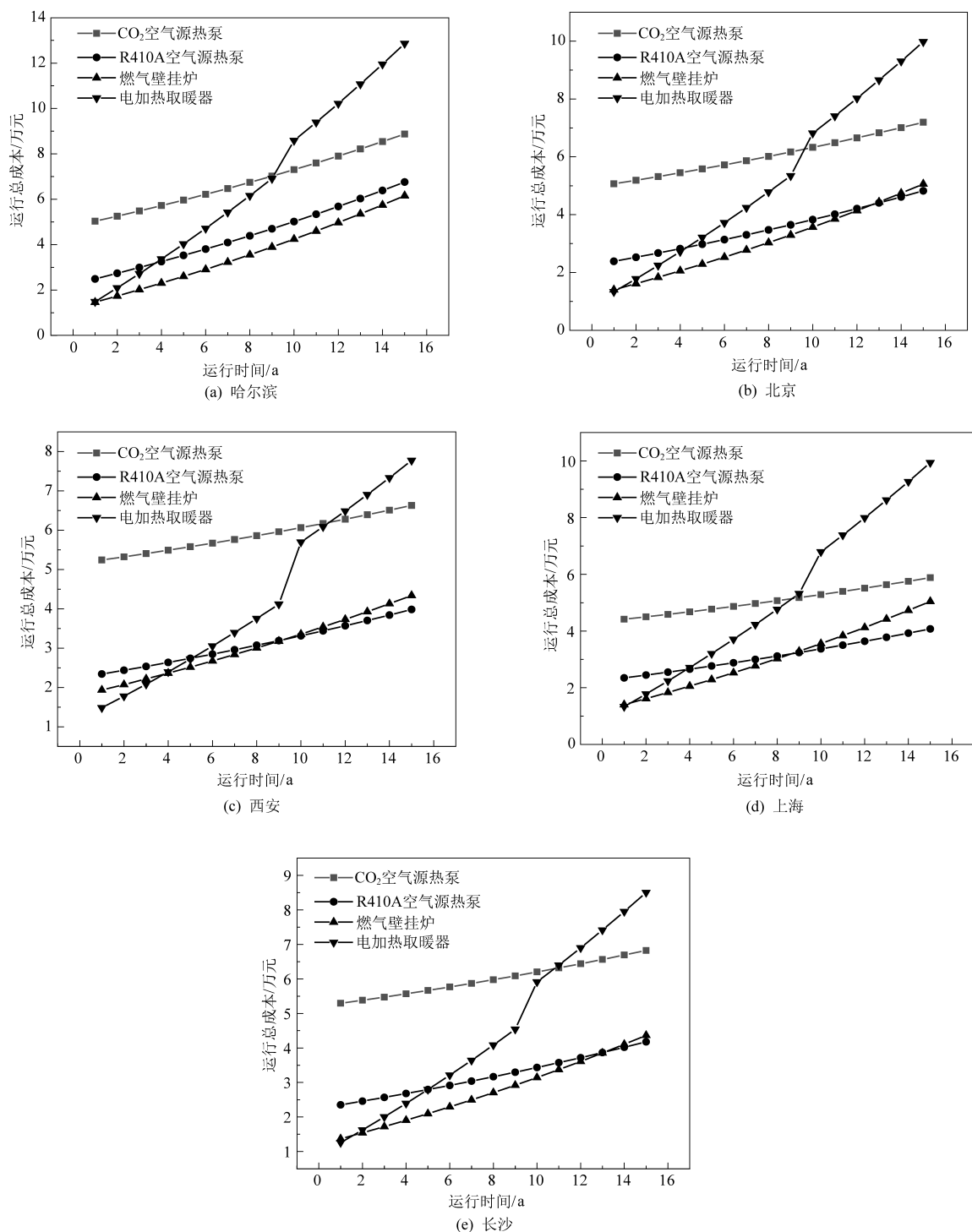


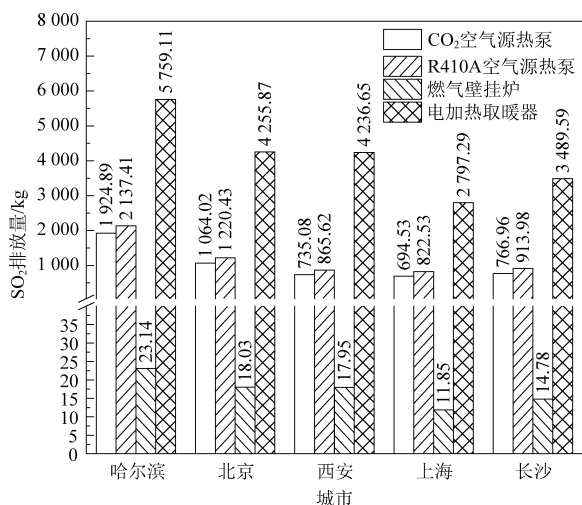
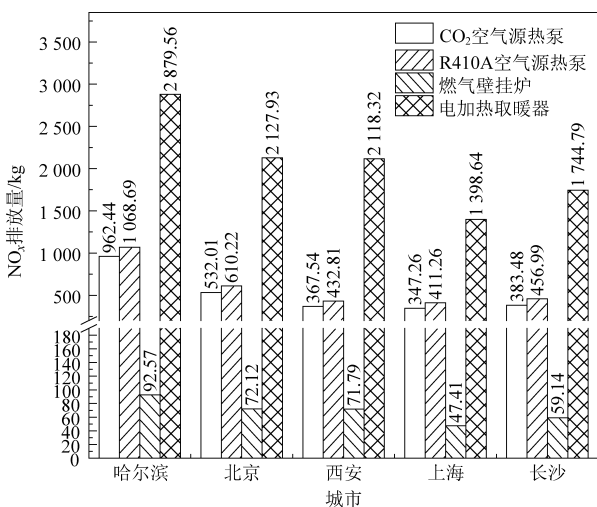
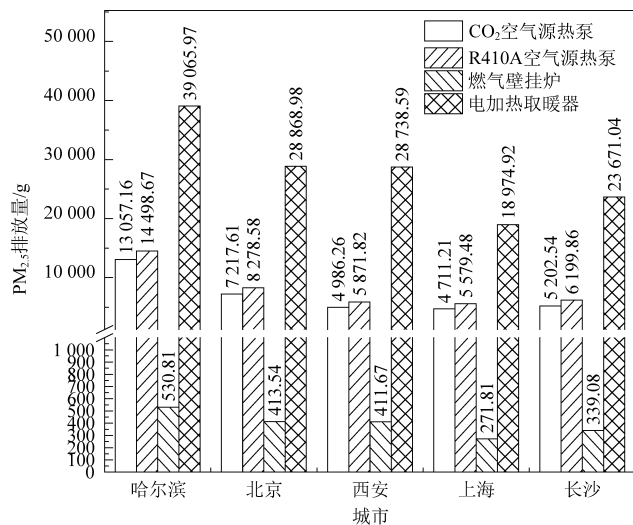
图 4 4 种供暖装置在 5 座城市的运行总成本

Fig.4 Total operating costs of four heating devices in five cities

2.4 综合指标评价

图 8 给出了 4 种供暖设备的综合评价指数 ξ 在不同城市农村地区的变化情况。整体来看,在 5 座城市中燃气壁挂炉的综合性能指数均最大,其次为 R410A 空气源热泵和 CO₂ 跨临界空气源热泵,而电加热取暖器的综合性能指数最小。

其中,燃气壁挂炉在哈尔滨的综合优势最为明显,其综合指数较 R410A 空气源热泵高出 37%。对于哈尔滨等北方农村地区而言,R410A 空气源热泵和 CO₂ 跨临界空气源热泵的综合性能指数相差 4%~9%,差距较小,而在上海等南方农村地区中,R410A 空气源热泵综合性能更好,其比

图5 4种供暖装置在5座城市中的SO₂排放量Fig.5 SO₂ emissions of four heating devices in five cities图6 4种供暖装置在5座城市中的NO_x排放量Fig.6 NO_x emissions of four heating devices in five cities图7 4种供暖装置在5座城市中的PM_{2.5}排放量Fig.7 PM_{2.5} emissions of four heating devices in five cities

CO₂跨临界空气源热泵高出16%~23%。电加热取暖器综合性能指数仅维持在7.52~8.23范围内。因此,权衡多方面指标综合评价,燃气壁挂炉综合性能最优,电加热取暖器较差,R410A空气源热泵整体优于CO₂跨临界空气源热泵,二者的综合性能差距随气候分区的选择而不同,R410A空气源热泵更适用于上海等南方地区。

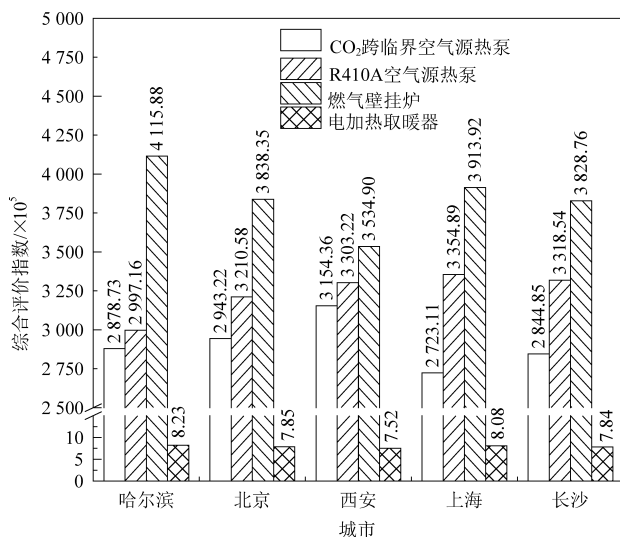


图8 4种供暖设备在5座城市的综合评价指数

Fig.8 Comprehensive evaluation indexes of four heating devices in five cities

3 结 论

本文选取哈尔滨、北京、西安、上海和长沙5座典型城市的农村地区,通过建立能耗、经济和环保3个方面的模型,对CO₂跨临界空气源热泵、R410A空气源热泵、燃气壁挂炉和电加热取暖器4种供暖装置进行评价,得到如下结论:

(1)在能耗方面,CO₂跨临界空气源热泵的能耗最小,与R410A空气源热泵和电加热取暖器相比最大可降低16.1%和81.2%。其在上海地区PEC比哈尔滨低64%,在长沙地区的SPF比R410A空气源热泵高出16.35%。哈尔滨地区更适合使用燃气壁挂炉进行取暖,而其余地区则更适合使用CO₂跨临界空气源热泵。

(2)在经济方面,R410A空气源热泵和燃气壁挂炉的经济性较好,其运行总成本比电加热取暖器最大可分别降低60%和52.1%,而CO₂跨临界空气源热泵仅比电加热取暖器有优势。哈尔滨地区使用燃气壁挂炉运行成本较低,而其余地区使用R410A空气源热泵则更加经济。

(3)在环保方面,燃气壁挂炉表现最好,其

SO₂、NO_x和 PM_{2.5}排放量远低于其他 3 种供暖装置。其次是 CO₂跨临界空气源热泵,其在北京地区的 SO₂排放量比电加热取暖器低 75%,上海地区的 PM_{2.5}排放量比电加热取暖器低 75.2%。考虑到我国天然气供应和安全问题,建议冬季取暖选择 CO₂跨临界空气源热泵。

(4)采用 AHP 结合熵权法综合评价表明,燃气壁挂炉综合性能明显优于其他三者。与 CO₂跨临界空气源热泵相比,R410A 空气源热泵综合评价指数提高了 16%~23%。综合考虑多方面因素,哈尔滨等严寒地区采用燃气壁挂炉具有优势,而其他地区可采用 R410A 空气源热泵,其中 CO₂跨临界空气源热泵在西安地区综合指数高于其他地区。

参考文献

- [1] 李正. 跨临界 CO₂ 空气源热泵供热特性研究 [D]. 天津: 天津商业大学, 2018: 37-56.
- [2] 刘东岳. 小型空气源二氧化碳热泵热水系统的开发与研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016: 26-42.
- [3] 李恩腾. 超低温跨临界 CO₂ 热泵实验与多目标优化研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020: 47-68.
- [4] 寇宏侨, 罗会龙, 杜鸿儒, 等. 大功率 CO₂ 热泵在寒冷地区的应用研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36 (5): 61-64.
KOU H Q, LUO H L, DU H R, et al. Research on application of high power CO₂ heat pump hot water system in cold regions [J]. Building Energy & Environment, 2017, 36 (5): 61-64.
- [5] Ma J, Fung A S, Brands M, et al. Performance analysis of indirect-expansion solar assisted heat pump using CO₂ as refrigerant for space heating in cold climate [J]. Solar Energy, 2020, 208: 195-205.
- [6] GB 50352—2019, 《民用建筑设计统一标准》[S].
- [7] GB/T 50824—2013, 《农村居住建筑节能设计标准》[S].
- [8] GB/T 50174—2015, 《城市供热规划规范》[S].
- [9] Dai B, Qi H, Dou W, et al. Life cycle energy, emissions and cost evaluation of CO₂ air source heat pump system to replace traditional heating methods for residential heating in China: System configurations [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 218: 112954.
- [10] Yang Z, Xiao H, Shi W, et al. Analysis and determination of a seasonal performance evaluation for air source heat pumps [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102574.
- [11] GB/T 2589—2008, 《综合能耗计算通则》[S].
- [12] Liu S, Li Z, Dai B, et al. Energetic, economic and environmental analysis of air source transcritical CO₂ heat pump system for residential heating in China [J]. Applied thermal engineering, 2019, 148: 1425-1439.
- [13] Zhang Q, Zhang L, Nie J, et al. Techno-economic analysis of air source heat pump applied for space heating in northern China [J]. Applied Energy, 2017, 207: 533-542.
- [14] Hakkaki-Fard A, Eslami-Nejad P, Aidoun Z, et al. A techno-economic comparison of a direct expansion ground-source and an air-source heat pump system in Canadian cold climates [J]. Energy, 2015, 87: 49-59.
- [15] Cui Q, Gao E, Zhang Z, et al. Preliminary study on the feasibility assessment of CO₂ booster refrigeration systems for super-market application in China: An energetic, economic, and environmental analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113422.
- [16] Fazelpour F, Morosuk T. Exergoeconomic analysis of carbon dioxide transcritical refrigeration machines [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 38: 128-139.
- [17] Kong S F, Bai Z P, Lu B. Comparative analysis on emission factors of carbonaceous components in PM_{2.5} and PM₁₀ from domestic fuels combustion. [J]. China Environmental Science, 2014, 34 (11): 2749-2756.
- [18] Huang X, Wu Y. Environmental aspects of wood residue combustion in forest products industry boilers [J]. World Pulp Paper, 2013, 2: 62-67.
- [19] 孙现伟, 邓双, 朱云, 等. 我国燃煤电厂 PM_{2.5} 减排潜力预测与分析 [J]. 环境科学研究, 2016, 29 (5): 637-645.
SUN Xianwei, DENG Shaung, ZHU Yun, et al. PM_{2.5} emissions reduction potential from coal-fired power plants in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29 (5): 637-645.