

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-389-06

# 基于灰色关联-聚类分析的 办公建筑分类与能耗基准线研究

欧雪梅<sup>1</sup> 王亮<sup>1</sup> 王曦<sup>2</sup> 马立<sup>1</sup> 邹秋生<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 绵阳 621010;

2. 四川省建筑设计研究院有限公司 成都 610094)

**【摘要】** 依据建筑能耗影响因素的特性,采用灰色关联-聚类分析方法,对办公建筑进行了分类及影响因素分析,最后采用聚类分析法对建筑能耗基准线进行了研究。结果表明,分类后的每一类建筑都代表了各自的特点,不同类建筑的能耗影响因素对能耗影响程度不同,运用聚类分析法得到了成都地区办公建筑高、低能耗基准线,并将其与国家标准进行了对比分析,可为办公建筑能耗定额制定提供参考。

**【关键词】** 办公建筑分类;灰色关联分析;聚类分析;影响因素;能耗基准线  
中图分类号 TU201.5 文献标识码 A

## Research on Office Building Classification and Energy Consumption Baseline Based on Grey Correlation Clustering Analysis

Ou Xuemei<sup>1</sup> Wang Liang<sup>1</sup> Wang Xi<sup>2</sup> Ma Li<sup>1</sup> Zou Qiusheng<sup>2</sup>

(1.Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010;

2.Sichuan architectural design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610094)

**【Abstract】** According to the characteristics of the influencing factors of building energy consumption, the paper uses the grey correlation-cluster analysis method to classify office buildings and analyze the influencing factors of office buildings, finally the cluster analysis is used to study the building energy consumption baseline. The results show that each type of building after classification represents its own characteristics, and the energy influencing factors of different types of buildings have different effects on energy consumption. the cluster analysis method is used to obtain the high and low energy consumption baselines of office buildings in Chengdu, and compare them with national standards, which can provide a reference for the formulation of office building energy consumption quotas.

**【Keywords】** office building classification; grey correlation analysis; cluster analysis; Influencing factors; energy consumption baseline

作者简介: 欧雪梅 (1995.09-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1553693784@qq.com

通讯作者: 王亮 (1983.12-), 男, 博士, 副教授, E-mail: wangliangmy83@163.com

收稿日期: 2021-01-07

## 0 引言

建筑能耗基准线是进行建筑节能计算和精细化节能管理的基础,可作为衡量建筑用能水平合理与否的基准<sup>[1-3]</sup>。建筑的能耗特性不断变化,同

一类建筑不同建筑之间的能耗情况差异明显。为提高基准线准确度一般需要先对建筑进行细化分类,使得某一类建筑其负荷值更加接近、特征更相似。目前我国在确定建筑能耗基准线时使用的建筑分

类方法主要有建筑功能划分法和建筑规模划分法,如按建筑面积指标将建筑划分为小、中、大型建筑,按能耗高低将建筑分为高能耗、中能耗、低能耗建筑<sup>[4]</sup>。朱彩侠、李国帅和丁勇根据公共建筑的许多特征之一对建筑物进行分类<sup>[5-7]</sup>,无法同时考虑多个影响因素对能耗的影响,可能导致不同建筑在其他特征上存在巨大差异。同时,进行分类时主观性较强,建筑分类指标、界限、阈值以及不同影响因素的分类顺序没有统一的标准。针对上述缺陷,一些研究提出了改进方法,如基于建筑要素的多维域而不是使用类型的单一维度对建筑物进行分类,影响能耗的特征最相似的建筑物被分类为同一个聚类。Gao 和胡宾分别针对商业建筑和建筑用户提出利用聚类分析对建筑、样本用户进行细化分类<sup>[8,9]</sup>。该方法能够同时考虑多个影响因素对能耗的影响合理划分建筑,但忽略了不同特征参数对分类的影响程度大小。

因此,提取合理的能耗影响因素并综合考虑其对建筑能耗的影响情况,利用合适的分类方法,将建筑进行细化分类,有助于制定更为精准的建筑能耗基准。灰色关联分析可分析出多个不同影响因素对能耗的影响程度大小,在确定分类参数阈值时避免主观性的影响。采用聚类分析技术对样本建筑进行分类,可在考虑不同影响因素的同时将建筑合理分类。本文按照影响因素对能耗影响程度的相似性,引入灰色关联-聚类分析对建筑进行分类及相应影响因素分析,在此基础上进行了能耗基准线的确定,为评价办公建筑的能耗水平提供了参考依据以及为办公建筑能耗定额的制定提供了参考。

## 1 建筑分类分析

### 1.1 灰关联分析

建筑能耗影响因素较多,包括气候参数、建筑围护结构、室内热扰等,不同参数对建筑能耗的影响程度不同,通过灰色关联分析研究可确定各影响因素与建筑能耗之间的灰色关联系数,得到不同影响因素对建筑能耗的影响程度。灰色关联分析基本思想是根据因素之间几何变化趋势的相似程度判断其关联程度是否紧密,相似程度大小的量度称为关联度<sup>[10]</sup>。对各项因素的关联系数分别取平均值,即可得关联度,它反映了第*i*项影响因素对样本空间建筑的整体影响程度。灰关联系数可反映建筑之

间各项因素对建筑能耗影响程度的差异,故采用灰关联系数作为能耗影响程度的量化指标来进行聚类分析,进而对建筑进行合理分类。

灰色关联分析的具体计算步骤如下:

参考序列和比较序列的确定:设*X*为序列集合,  $X_i = \{X_i(j); i, j \in I; i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 0, 1, 2, \dots, m\}$ 。建筑运行能耗构成参考序列为  $X_0$ , 建筑能耗的不同影响因素构成比较序列为  $X_i$ , 则参考序列和比较序列的数据构成一个  $m \times (n+1)$  阶矩阵, 见下式:

$$\begin{bmatrix} X_0(1) & X_1(1) & \dots & X_n(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_0(j) & X_1(j) & \dots & X_n(j) \end{bmatrix} \quad (1)$$

参考序列和比较序列的无量纲化, 计算公式如下所示:

$$X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中,  $X'_i$ 、 $X_i$ 、 $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为某一变量的转换值、原始值、最小值和最大值。

差值的绝对值序列

$$\Delta_{0i}(j) = |X'_0(j) - X'_i(j)| \quad (3)$$

灰色关联系数: 设  $r_{ij}$  表示  $X_i$  相对与  $X_0$  在  $j$  点间的灰色关联度系数, 计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \alpha \times \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(j) + \alpha \times \Delta_{\max}} \quad (4)$$

式中,  $\Delta_{\min}$ 、 $\Delta_{\max}$  为最小差值、最大差值;  $\alpha$  为分辨系数, 且  $\alpha \in [0, 1]$ , 通常取  $\alpha=0.5$ 。

相对关联度计算公式为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m r_{ij} \quad (5)$$

式中,  $n$  为样本个数

### 1.2 聚类分析

聚类分析是根据研究对象的空间距离将大的数据集划分为几个小的数据集, 在每一类中, 数据的相似度高, 不同类中各元素差距明显。目前, 聚类分析常用的算法有  $k$  均值算法、 $k$  中心点算法和层次聚类算法等<sup>[11]</sup>。层次聚类又称系统聚类, 事先

无须确定要分多少类, 最后根据产生的树状聚类图决定需要的类别。因此本次采用层次聚类算法, 选择差异平方和法为度量标准对各建筑进行聚类分析, 相似测度采用欧式距离。

## 2 研究对象

利用建筑能耗模拟软件对办公建筑进行能耗计算分析, 得到各类建筑模型的能耗值, 建立相应的办公建筑能耗数据库。灰色关联-聚类分析研究的数据来源于模拟所建立的数据库。

将位于成都地区的大型办公建筑作为研究对象, 建立典型办公建筑分析模型。采用核心筒式办公建筑楼作为典型办公建筑模型, 地上二十层为办公用, 地下一层为汽车库。层高为 3.5m, 外区近深 5m, 建筑高度 70m, 标准层形状为正方形, 中间为核心筒。办公建筑的空调面积占建筑面积的

0.2, 且核心区不设置空调。空调运行时间为 8:00~18:00。采暖季为 12 月 1 日~3 月 11 日, 空调季为 6 月 1 日~9 月 30 日 过渡季 10 月 1 日~11 月 30 日和 3 月 12 日~5 月 31 日。

在对办公建筑能耗建模过程中, 主要考察以下 16 个能耗因子<sup>[12,13]</sup>, 具体参数及分类如表 1 所示。为减少试验次数, 并保证试验的全面性, 采用正交试验方法获取数据样本集。各类影响因素的取值, 主要参考《公共建筑节能设计标准》(GB 50189-2015) 等设计标准规范及相关文献, 每个因子选取 4 个水平值, 选用 L 64 (4<sup>16</sup>) 正交表进行试验计算。经能耗模拟软件动态计算, 获得建筑物全年能耗结果。

根据模拟数据依次对影响因素和能耗进行标准化处理, 然后采用灰色关联-聚类方法进行建筑分类及其影响因素分析。

表 1 办公建筑影响因素的选择

Table 1 Selection of influencing factors of office buildings

序号	能耗影响因素	单位	简写	序号	能耗影响因素	单位	简写
1	建筑面积	m <sup>2</sup>	BA	9	设备功率密度	W/m <sup>2</sup>	EQ
2	外墙传热系数	W/(m <sup>2</sup> ·K)	WT	10	夏季室内设定温度	°C	SIT
3	屋面传热系数	W/(m <sup>2</sup> ·K)	RT	11	冬季室内设定温度	°C	WIT
4	外窗传热系数	W/(m <sup>2</sup> ·K)	OT	12	新风指标	m <sup>3</sup> /(h·人)	OA
5	窗墙比	—	WR	13	风机效率	—	FE
6	遮阳系数	—	SC	14	制冷机 COP	—	COP
7	人均占有面积	m <sup>2</sup> /人	OC	15	水泵效率	—	PE
8	照明功率密度	W/m <sup>2</sup>	LL	16	锅炉效率	—	BE

## 3 结果分析

### 3.1 分类结果分析

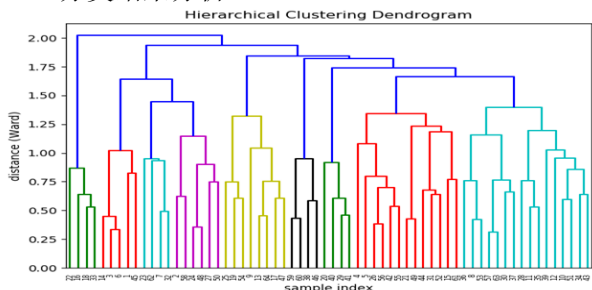


图 1 聚类分析结果树状图

Fig.1 Dendrogram of cluster analysis results

以影响因素对能耗影响程度相近为原则, 采用灰色关联系数对建筑进行聚类分析。上图是借助 Python 软件进行层次聚类得到的聚类树形图, 利用树形图可确定分类个数, 图中横坐标数字表示依据实验次数对建筑以 1 为基准至 64 依次编号。

根据 Demirmen 提出的利用树形图确定分类个数的准则<sup>[11]</sup>, 聚类距离  $D=1.50$  时, 研究对象可分为八小类。

同类建筑之间能耗影响因素灰关联系数分布规律如下, 图中曲线序号为依据实验次数对建筑以 1 为基准至 64 依次编号。

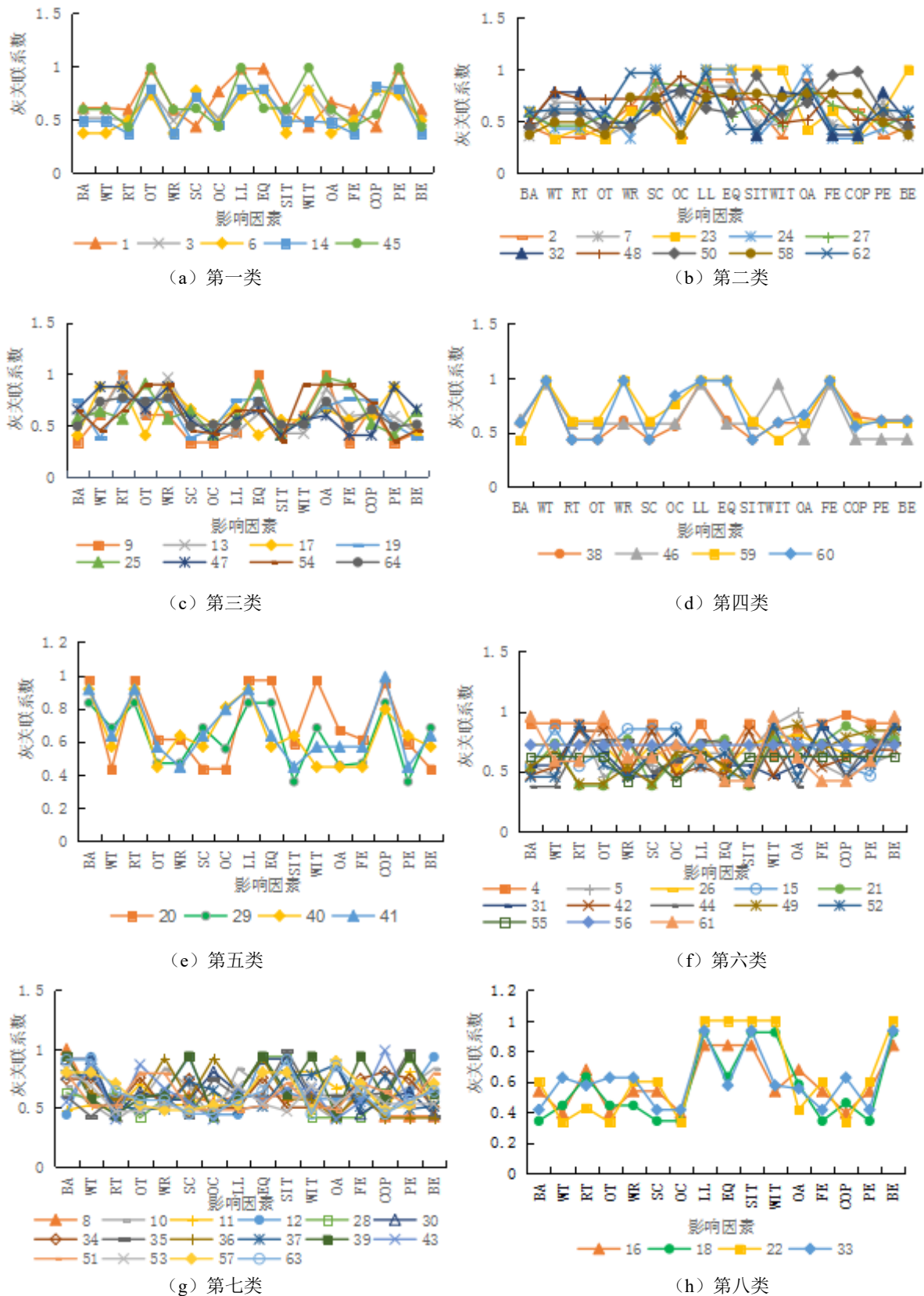


图2 各类建筑能耗影响因素灰关联系数曲线图

Fig.2 Grey correlation coefficient curve of influencing factors of building energy consumption

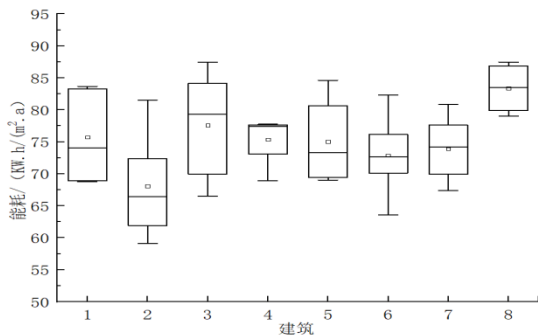
由图 2 可知:

(1) 同小类中绝大多数建筑的各能耗影响因素对建筑能耗的影响程度具有相似的分布规律, 各小类间的各个能耗影响因素对建筑能耗的影响程度大小的差异性较明显。同类建筑特征相似主要表现为其影响因素对能耗的影响程度变化趋势在同类建筑中较为接近, 因而建筑之间更具有可比性。

(2) 从各小类建筑的能耗影响因素灰关联系数分布规律结果来看, 聚类分析能够依据建筑的各个影响因素对能耗的影响程度大小对建筑进行较好的分类, 说明灰色关联-聚类分析对建筑分类结果具有一定的代表性。

### 3.2 用能分析

一个分类中集合了影响因素对能耗的影响程度非常相似的样本建筑, 因此, 其影响因素引起的能耗差异应较小。下图给出了八类建筑能耗水平的箱线图, 比较不同类之间能耗分布差异。



注: 横坐标轴含义如下, 1-8 依次为分类的 8 类建筑

图 3 各类建筑能耗箱线图

Fig.3 Various types of building energy box line diagram

由图3可得, 第八类建筑单位面积能耗中位数最高, 为83.383kWh/(m<sup>2</sup>·a), 其次是第三类建筑、第一类建筑、第四类建筑、第五类建筑、第七类建筑、第六类建筑, 最低的是第二类建筑, 为68.074kWh/(m<sup>2</sup>·a)。

(1) 同类建筑之间能耗差异不大, 如第六类建筑、第七类建筑、第八类建筑的能耗分布均匀且基本对称。在所有分类建筑中, 第二类建筑能耗极差最大, 为22.432kWh/(m<sup>2</sup>·a), 但低于其建筑能耗平均值的1.5倍, 第八类建筑的能耗极差最小, 为8.45kWh/(m<sup>2</sup>·a)。可见同类建筑间的能耗差异均不大。

(2) 不同类建筑之间能耗分布不均且水平变化高低不同。第八类建筑的能耗整体偏高, 最低能耗为

79.0224kWh/(m<sup>2</sup>·a)。第二类建筑能耗整体偏低, 大部分建筑能耗低于73kWh/(m<sup>2</sup>·a), 且多集中在60-70kWh/(m<sup>2</sup>·a)之间。第三类建筑的最高能耗为87.421kWh/(m<sup>2</sup>·a), 最低为66.546kWh/(m<sup>2</sup>·a), 其极差仅次于第二类建筑的极差。第四类建筑的能耗分布均匀, 最低能耗为68.922kWh/(m<sup>2</sup>·a), 其余能耗均分布在77kWh/(m<sup>2</sup>·a)左右。第五类建筑、第六类建筑、第七类建筑的最高能耗分别为84.628kWh/(m<sup>2</sup>·a)、82.326kWh/(m<sup>2</sup>·a)、80.844kWh/(m<sup>2</sup>·a), 其他能耗分布相似, 大部分位于79-69kWh/(m<sup>2</sup>·a)之间。

### 3.3 建筑能耗基准线

目前, 根据单位面积能耗指标确定能耗基准线常用的方法是四分位法、聚类分析法、中位数法、多元回归分析和累计概率法等<sup>[14-16]</sup>。聚类分析法是近几年发展起来用于确定能耗基准线的数据挖掘方法, 应用效果良好<sup>[17]</sup>, 具有一定的科学性, 且简单易行, 直观反映各类建筑能耗的分布情况。因此采用聚类分析法, 确定办公建筑能耗基准线并将其与国家标准进行对比分析。

根据办公建筑按聚类法划分为8类时确定的聚类中心, 以相邻2个聚类中心为界来确定能耗基准线<sup>[18]</sup>, 取整后作为办公建筑最终的能耗基准线。建筑能耗的相邻聚类中心分别为68.07、72.87、73.91、75.07、75.37、75.73、77.61、83.38kWh/(m<sup>2</sup>·a), 则相邻2个聚类中心的边界为70.47、73.39、74.49、75.22、75.55、76.67、80.49kWh/(m<sup>2</sup>·a), 按聚类分析法得到的建筑低能耗基准线为70kWh/(m<sup>2</sup>·a), 高能耗基准线为80kWh/(m<sup>2</sup>·a)。

根据2016年发布的《民用建筑能耗标准》的规定, 本文所选取的样本均属于A类建筑。夏热冬冷地区商业办公建筑的约束值及引导值如表2所示。

表 2 夏热冬冷地区能耗标准

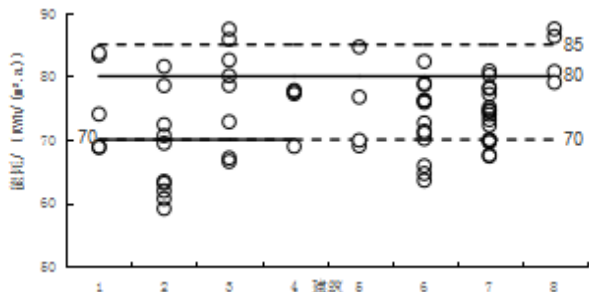
Table 2 Energy consumption standards in hot summer and cold winter areas

建筑分类	约束值/ kWh/(m <sup>2</sup> ·a)	引导值/ kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
商业办公 A	85	70

利用聚类分析法得到的建筑能耗基准线见图 4, 实线为聚类分析法得到的高、低能耗基准线, 虚线为国家标准制定得到的约束值、引导值线。聚类分析法得到的低能耗基准线与标准中的引导值

相同,低能耗建筑比例均为31%。聚类分析法得到的高能耗基准线高于标准中的约束值,即采用聚类分析法将有更多的建筑被划分为高能耗建筑。采用聚类分析法得到的高能耗建筑比例均为22%,采用国家标准中的约束值得到的高能耗建筑比例为6.25%。

高能耗建筑存在不同程度的节能潜力,在办公建筑节能改造完成、各方面稳定阶段可采用聚类分析法的高能耗建筑基准线来划定高能耗建筑,约束建筑能耗,从而促进建筑能耗进一步降低。通过确定该建筑所属哪一分类,再与同类建筑中能耗低于低能耗基准值且与该建筑特征最相似的建筑进行对比分析,对可控建筑能耗影响因素进行调节,可有效改善建筑节能水平。



注:横坐标轴标值含义如下,1-8依次为分类的8类建筑

图4 各类办公建筑能耗散点及能耗基准线

Fig.4 Energy consumption points and baselines of various office buildings

#### 4 结论

(1)通过灰色关联分析确定各影响因素与建筑能耗之间的灰色关联系数,得到不同影响因素对建筑能耗的影响程度,以灰关联系数作为能耗影响程度的量化指标来进行聚类分析,基于能耗模拟数据将办公建筑合理地划分为8类。

(2)同类建筑之间能耗差异不大,第二类建筑能耗极差最大,为22.432kWh/(m<sup>2</sup>·a),但低于其建筑能耗平均值的1.5倍,第八类建筑的能耗极差最小,为8.45kWh/(m<sup>2</sup>·a);不同类建筑之间能耗分布不均且水平变化高低不同,第八类建筑的能耗整体偏高,第二类建筑能耗整体偏低,第四类建筑的能耗分布均匀。

(3)采用聚类分析法,确定了建筑能耗基准线并将其与国家标准进行验证分析,得到成都地区办公建筑的高、低能耗基准线值,分别为

80kWh/(m<sup>2</sup>·a)、70kWh/(m<sup>2</sup>·a),可为办公建筑能耗定额制定提供参考。

(4)在用能评价和分析时可基于灰色关联-聚类分析和基准线对办公建筑进行合理分类与评价,指导高能耗建筑进行节能改造,对可控建筑能耗影响因素进行调节,有效改善建筑节能水平。

#### 参考文献:

- [1] Ellis J, Winkler H, Corfee-Morlot J, et al. CDM: Taking stock and looking forward[J]. Energy Policy,2007,35(1): 15-28.
- [2] Kallbekken S, Flottorp L S, Rive N.CDM baseline approaches and carbon leakage[J]. Energy Policy, 2007, 35(8):4154-4163.
- [3] Ginestet S, Marchio D. Retro and on-going commissioning tool applied to an existing building: Operability and results of IPMVP [J]. Energy, 2010, 35(4):1717-1723.
- [4] 李郡,俞准,刘政轩,等.住宅建筑能耗基准确定及用能评价新方法[J].土木建筑与环境工程,2016,38(2):75-83.
- [5] 朱彩侠.公共建筑分类方法及冷负荷预测的研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [6] 李国帅.夏热冬暖地区公共建筑能耗定额分类模型及标准建筑的研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [7] 丁勇,王雨,刘学,等.重庆市公共建筑能耗限额标准编制研究[J].建筑科学,2018,34(6):56-64.
- [8] Gao X, Malkawi A. A new methodology for building energy performance benchmarking: An approach based on intelligent clustering algorithm[J]. Energy & Buildings, 2014,84:607-616.
- [9] 胡宾,俞准,李郡,等.建筑用户行为节能潜力评估新方法[J].土木建筑与环境工程,2018,40(2):103-108.
- [10] 谭学瑞,邓聚龙.灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J].统计研究,1995,12(3):46-48.
- [11] 何晓群.多元统计分析(第二版)[M].北京:中国人民大学出版社,2008.
- [12] 王永龙,潘毅群.典型办公建筑能耗模型中输入参数单因子敏感性的分析研究[J].建筑节能,2014,(2):9-14.
- [13] 刘菁,王芳.办公建筑能耗影响因素与数据标准化分析[J].暖通空调,2017,47(5):83-88,14.
- [14] 朱能,朱天利,仝丁丁,等.我国建筑能耗基准线确定方法探讨[J].暖通空调,2015,45(3):59-64.

(下转第460页)