

基于用户画像的建筑运行阶段碳排放特征分析

包西勇¹ 路振伟² 赵航¹ 薛玮¹ 马树亮¹

BAO Xiyong LU Zhenwei ZHAO Hang XUE Wei MA Shuliang

摘要

评估建筑运行阶段碳排放水平、挖掘碳排放影响因素是制定节能减排策略的基础。利用用户画像技术并通过多维度聚类的方式进行建筑运行阶段碳排放特征分析。首先,考虑影响建筑碳排放的关键因素,构建了多维度建筑运行阶段碳排放画像模型;进而采用基于高斯混合模型的多维度聚类算法对碳排放画像模型进行求解,得到多建筑运行阶段综合特征画像;最后,从总体与个体角度对综合特征画像进行分析,挖掘减排潜力,给出契合园区的减排建议。

关键词

建筑碳排放;特征分析;用户画像;高斯混合模型

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.07.022

0 引言

实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和被列为我国“十四五”时期着力推进的一项重点工作^[1]。2020年全国建筑全过程碳排放总量为50.8亿吨,占全国碳排放的比重为50.9%^[2]。我国在2019年发布的《建筑碳排放计算标准 GB/T 51366—2019》将建筑全生命周期拆分为建材生产及运输阶段、运行阶段、建造及拆除阶段^[3],其中运行阶段碳排放占比可达70%^[4],且建筑全生命周期碳排放量一般与运行阶段碳排放量呈线性相关^[5]。因此,开展建筑运行阶段碳排放的分析是建筑行业节能减排工作的基础,具有十分重要的意义。

现阶段,一方面由于建筑规划设计阶段提交的碳排放报告仅为方案估算,与实际运行情况偏差较大。另一方面,国内外研究多关注建筑全生命周期的评价^[6-8],对建筑运行阶段的碳排放评价研究较少,并且尚缺乏统一、科学的评价指标体系,导致排放数据分析缺乏科学依据,不利于建筑业节能减排工作的深化。

近年来,用户画像在电力等能源行业广泛应用。从画像模型的目的性来看,可将其分为两类。一类为行为特征研究,此类文献通过用户画像实现行为特征挖掘^[9-11]。文献[9]通过构造兼顾集聚度和分离度的聚合回报指标以自动确定最优分类数,结合K-means聚类算法的方式进行用电行为特征画像;文献[10]提出一种基于用电行为数字特征画像的电力用户两阶段分类算法,构建以日负荷模式发生概率为数字特征的用

户用电行为画像;文献[11]采用模糊聚类算法进行客户用电模式分析,实现不同类型客户的用电行为模式画像。另一类为评估型研究,此类文献通过画像与评估体系实现水平与能力评估^[12-14]。文献[12]构建了园区用户成熟度评价模型,分别从负荷水平、用电行为、互动能力三个维度对用户的用电特性进行评价;文献[13]通过建立指标评估体系的方式,完成用户负荷业扩报装需求、光伏业扩报装需求及需求响应能力的分析;文献[14]采用模糊聚类算法判定指标分界,采用熵权法对用电平顺度进行综合评分。

综上,本文利用用户画像并通过多维度聚类的方式进行建筑运行阶段碳排放特征分析。针对建筑运行阶段碳排放评估问题,综合考虑行业内的关注指标及关键影响因素,建立科学可行的指标体系,用于衡量建筑运行阶段的碳排放水平以及能源结构等因素的影响程度。在此基础上,综合考虑季节、用能行为等,构建了多维度建筑运行阶段碳排放画像模型。采用基于高斯混合模型(gaussian mixture model, GMM)的多维度聚类算法对碳排放画像模型进行求解,得到多建筑运行阶段综合特征画像。最后,从总体与个体角度对综合特征画像进行分析,挖掘减排潜力,给出契合园区的减排建议。

1 画像模型的建立

1.1 碳排放特征标签

本文从影响建筑碳排放的因素及评估指标出发,构建园区建筑运行阶段多维度碳排放画像模型,如表1所示。从四个维度建立运行阶段碳排放特征画像,建筑碳排放水平是衡量建筑行业整体碳排放的重要关注点,故将排放水平作为首要标签。气候的冷暖更迭会导致能源需求的波动,从而影响

1. 山东省交通规划设计院集团有限公司 山东济南 250101

2. 积成电子股份有限公司 山东济南 250100

[基金项目] 山东省交通规划设计院集团科技创新项目(项目编号: KJ-2023-SJYJT-06)

碳排放,因此建立季节排放特征标签挖掘建筑碳排放的季节特性。建筑碳排放也与所用能源类型紧密相关,因此建立排放偏好特征标签用于评估和优化建筑能源使用结构。可再生能源的利用比例等因素也会影响建筑的整体碳排放水平,因此建立减排水平标签用于挖掘建筑的减排潜力。

表1 建筑运行阶段碳排放特征画像

标签名称	标签维度	标签指标
排放水平	建筑总体排放水平	年碳排放强度
		年强度标准差
季节排放特征	夏季碳排放特征	夏季碳排放占比
		夏季碳排放强度
	冬季碳排放特征	冬季碳排放占比
		冬季碳排放强度
排放偏好特征	电排放特征	年电排放占比
		年电排放强度
	冷排放特征	年冷排放占比
		年冷排放强度
	热排放特征	年热排放占比
		年热排放强度
减排水平	可再生能源减排水平	可再生能源减排占比
		可再生能源减排强度

排放水平标签从建筑总体排放水平这一维度出发,将年碳排放强度与强度标准差作为建筑总体排放水平指标。年碳排放强度是评估建筑碳排放的关键指标之一,年碳排放标准差是衡量建筑年度碳排放波动程度的重要指标。由于空调系统与集中供暖系统的投入使用,建筑碳排放量与增长率波动明显,特征具有代表意义,故选择夏冬排放特征代表建筑的季节排放特征。选取季节排放占比与季节排放强度指标挖掘季节影响程度。

建筑运行阶段碳排放主要来源于建筑能源消耗,其中电、冷、热负荷为主要能耗,建筑能源结构的不同及碳排放因子的差别对碳排放造成不同程度的影响,故选取电、冷、热排放特征维度挖掘建筑排放偏好特征。用能类型排放占比与强度可精确评估不同用能类型对建筑排放水平的贡献程度,故将其作为此标签各维度指标。为衡量建筑可再生能源利用水平与减排潜力,选取可再生能源减排占比与强度为指标,挖掘建筑减排潜力和提升空间。

1.2 指标计算

根据《建筑碳排放计算标准》,运行阶段碳排放应按照以下公式计算:

$$C_M = \sum_{i=1}^n E_i \square F_i \quad (1)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - R_{i,j}) \quad (2)$$

式中: C_M 为运行阶段年碳排放量; E_i 为第 i 类能源年消耗量; F_i 为第 i 类能源的碳排放因子; $E_{i,j}$ 为 j 类系统的第 i 类能源年消耗量; $R_{i,j}$ 为 j 类系统年消耗由可再生能源系统提供的第 i 类能源量; i 为建筑消耗终端能源类型,包括电力、市政热

力等; j 为建筑用能系统类型,包括空调、照明等。各指标计算公式如表2所示,碳排放强度单位为 $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,公式编号为(3)~(10)。

表2 指标计算公式

指标名称	计算公式	公式说明	编号
年碳排放强度	$P_1 = \frac{C_M}{A}$	P_1 为年碳排放强度; A 为建筑面积。	(3)
年碳排放标准差	$P_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{r=1}^{12} (M_r - V)^2}$	P_2 为年碳排放标准差; M_r 为 r 月碳排放强度。 V 为月平均碳排放强度。	(4)
季节碳排放占比	$S_k = \frac{O_k}{C_M}$	S_k 为季节排放占比; O_k 为季节总排放量; k 为季节类型。	(5)
季节碳排放强度	$D_k = \frac{O_k}{A}$	D_k 为季节排放强度。	(6)
年能源排放占比	$X_i = \frac{E_i \cdot F_i}{C_M}$	X_i 为年能源排放占比。	(7)
年能源排放强度	$Y_i = \frac{E_i \cdot F_i}{A}$	Y_i 为年能源排放强度。	(8)
减排占比	$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{i,j} \cdot F_i}{C_M}$	R_1 为可再生年减排占比。	(9)
减排强度	$R_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{i,j} \cdot F_i}{A}$	R_2 为可再生减排强度。	(10)

2 基于 GMM 的运行阶段多维度碳排放特征分析方法

2.1 GMM 聚类算法

GMM 算法因其软聚类能力与对异常值的鲁棒性广泛应用于数据挖掘、模式识别、图像处理等领域^[15-17]。GMM 是单高斯模型(SGM)的延伸,GMM 利用 k 个 SGM 对样本数据进行精准量化,并通过期望最大算法(EM)将样本数据分解为 k 个正态分布^[18]。假设已知样本集 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 则 GMM 的表达式为:

$$P_M(x) = \sum_{k=1}^k \alpha_k \square p(x | \mu_k, \sigma_k) \quad (11)$$

式中: α_k 为第 $\hat{k}$ 个单高斯模型的权值,且 $\alpha_k \geq 0, \sum_{k=1}^k \alpha_k = 1$; $p(x | \mu_k, \sigma_k)$ 为第 $\hat{k}$ 个单高斯混合模型的概率密度, μ_k 为第 $\hat{k}$ 个单高斯模型的均值, σ_k 为第 $\hat{k}$ 个单高斯模型的标准差。

赤池信息量准则(AIC)与贝叶斯信息量准则(BIC)确定的公式如下:

$$\text{AIC} = -2\log L(\hat{\theta}) + 2P \quad (12)$$

$$\text{BIC} = -2\log L(\hat{\theta}) + P\log(N) \quad (13)$$

式中: $L(\hat{\theta})$ 为 GMM 参数估计的极大似然函数; N 为样本数量; P 为参数的数量。

2.2 方法总体流程

该方法主要由指标计算、多维聚类、单维聚类分析以及综合画像分析四个过程构成,流程图如图1所示。

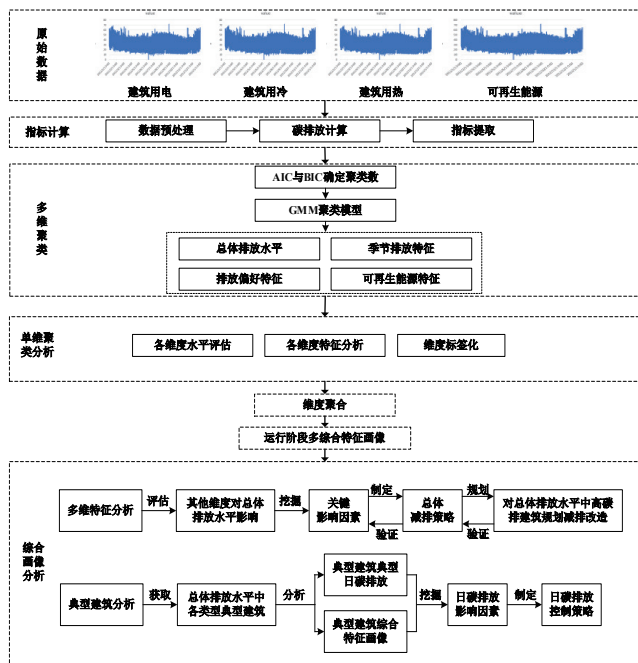


图1 建筑运行阶段特征分析方法总流程图

指标计算包括三个主要步骤：数据预处理、碳排放计算，以及指标提取。首先，使用四分位法对建筑的电、冷、热能耗数据以及可再生能源的产能数据进行清洗，确保数据的可靠性。其次，应用公式（1）和（2）计算出原始的碳排放数据。最后，结合公式（3）~（10）进行指标计算。

多维聚类过程旨在根据标签指标结合聚类方法生成各维度聚类结果，为避免过拟合或欠拟合的问题，采用AIC与BIC确定最佳聚类簇数，聚类算法选用GMM算法。单维聚类分析一方面根据各维度聚类结果与标签指标进行单维度的碳排放评估与特征分析，另一方面根据评估与分析结果，对不同维度聚类结果中的各簇进行标签语义化处理。

将各维度聚类结果聚合后得到园区建筑运行阶段综合特征画像，综合画像分析包含多维特征分析与典型建筑分析。多维特征分析根据综合特征画像结果，评估其他维度对总体排放水平的影响，挖掘总体碳排放的关键影响因素，进而制定契合的减排策略。进一步，利用策略对总体排放水平中高碳排放建筑规划减排改造，验证关键因素的合理性与减排措施的可行性。典型建筑分析旨在挖掘园区日碳排放影响因素，制定日碳排放控制策略。通过在建筑总体排放水平聚类结果中挖掘各类型的典型建筑，结合各类型典型建筑的综合特征画像对其进行典型日碳排放分析，得出日碳排放影响因素，并制定日碳排放控制策略。

3 算例分析

3.1 数据源介绍

本文使用的数据来自 Campus Metabolism 项目^[19]，该项目在线、实时地提供美国亚利桑那州立大学所有主要建筑的冷、热、电用能负荷以及可再生能源数据。建筑的用电负荷

主要包括照明、电子设备和通风机，选取亚利桑那州立大学 Downtown、Polytechnic、Temp、West 四个校区，涵盖教学、行政、艺术、体育、科研以及公寓等建筑类型的 46 栋建筑 2022 年用能数据用于进行算例分析，数据采样频率为 1 h。

计算建筑用冷碳排放时，考虑到冷由电能产生，按照 Campus Metabolism 项目网站提供的单位转换方法将冷负荷转换为和电负荷相同的量纲（kW）。电力碳排放因子选用 0.334 29 kgCO₂e/kW·h；热力排放因子为 55.3 kgCO₂e/MMBtu^[20]，来源于美国 emissions & generation resource integrated database（eGRID）提供的数据库。

3.2 单维聚类结果算例分析

3.2.1 排放水平

建筑总体排放水平聚类结果如图2所示，分析得出亚利桑那州立大学园区内建筑的总体排放水平可分为四类：L1~L4类，分别代表碳排放强度由低至高，且波动性由低至高。从数量上看，该园区建筑典型排放水平类别为L1类，约占总数的46%，但因用能行为习惯及能源结构等因素影响，亦会导致某些建筑的碳排放水平较高。

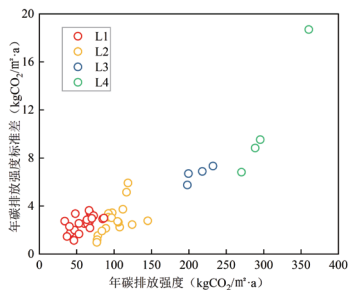


图2 建筑总体排放水平聚类结果

为得出碳排放强度的明确分界，对建筑碳排放进行硬性评估，进一步对园区建筑碳排放强度进行一维聚类，所有建筑年碳排放强度的聚类结果及年度碳排放曲线如图3所示。

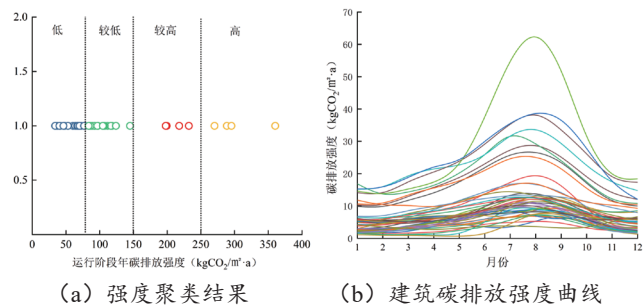


图3 园区建筑碳排放强度

由图3(a)可得到强度划分的边界，划分结果如表3所示。

表3 园区碳排放强度区间

类别	区间	说明
1	(0,80]	低排放强度
2	(80,150]	较低排放强度
3	(150,250]	较高排放强度
4	(250,+∞)	高排放强度

3.2.2 排放偏好特征

此园区碳排放来源于电、冷、热等能源的使用，且亚利桑那州处于较炎热的气候带，对制冷的需求较大，用热需求对此园区碳排影响甚微，故只对电、冷碳排进行偏好分析，并认为某类能源排放占比超 50% 时具有此类能源的偏好特性。

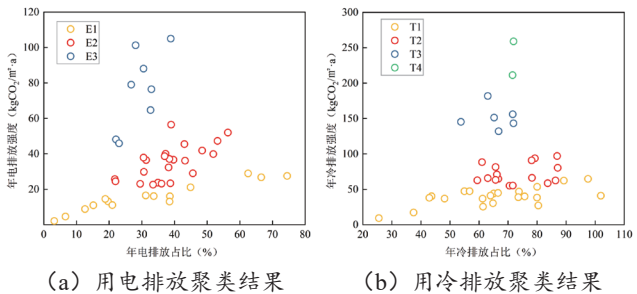


图 4 排放偏好聚类结果

由图4(a)可见，此园区用电排放占比基本都在 50% 以下，无用电排放偏好特性。用电排放强度形成三个聚类结果：E1 至 E3 依次为用电碳排放强度低、较低、较高。从图 4 (b) 的用冷排放来看，占比基本都在 60% 以上，具有用冷排放偏好特性且可分为四类，T1 至 T4 依次为用冷排放强度低、较低、较高和高。以上分析说明影响该园区碳排放强度的能耗主要为用冷。

3.2.3 季节排放特征

当季节排放占比超过全年的 25% 时，可认为具有季节排放特征。季节排放偏好聚类结果如图 5 所示，对于亚利桑那州立大学，46 栋建筑中约 98% 的建筑夏季占比在 25% 以上，具有夏季排放特征；约 98% 的建筑冬季占比在 25% 以下，无冬季排放特征。结果表明，影响该地区全年碳排放强度的季节为夏季。从强度上夏季排放特征形成四个聚类结果，S1 至 S4 分别代表低、较低、较高和高；同理，W1 至 W4 为冬季排放强度由低到高。

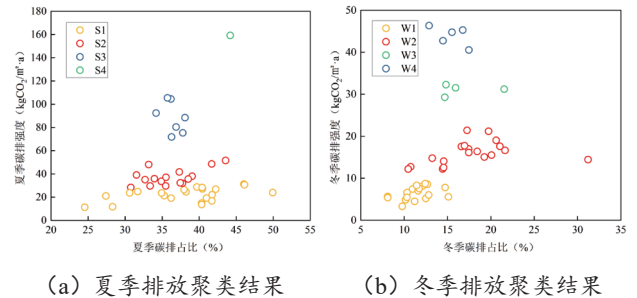


图 5 季节排放特征聚类结果

3.2.4 减排水平

减排水平聚类结果如图 6 所示，结果可分为四类。R1 类无可再生能源，为低减排水平；R2 类可再生能源减排占比与强度都较低，为较低减排水平；同理，R3 与 R4 分别为较高减排水平与高减排水平。其中 R1 类为典型簇，约占总数的 57%，说明此园区光伏的覆盖率较低，且可再生能源的利用率较低。

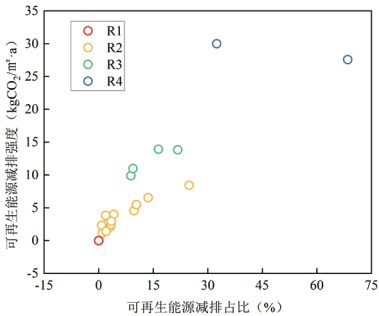


图 6 减排水平聚类结果

3.3 多维特征分析

通过对上述四个维度指标进行聚合后得到此园区 46 栋建筑的综合特征画像，如表 4 所示。L、E、T、S、W、R 分别代表不同维度，1~4 代表强度水平由低到高。选取占比最大的综合特征画像为典型行为画像，选取排放水平为 L1 类且占比最大的画像为低碳行为画像。因可再生能源覆盖率低，在不考虑减排水平的情况下，此园区的典型行为画像为 [L1，E1，T1，S1，W1] 与 [L2，E2，T2，S2，W2]，且前者为低碳行为画像，各维度指标都为低水平。

表 4 建筑运行阶段综合特征画像

建筑编号	排放水平	排放偏好		季节排放		减排水平
		用电排放	用冷排放	夏季排放	冬季排放	
4	L2	E2	T2	S2	W2	R1
7	L2	E2	T2	S2	W2	R2
9	L1	E1	T1	S1	W1	R1
10	L1	E1	T1	S1	W1	R2
10E	L1	E2	T1	S1	W1	R1
11	L2	E2	T1	S2	W2	R1
11R	L2	E2	T2	S1	W2	R1
13	L3	E3	T3	S3	W3	R1
16	L2	E2	T2	S2	W2	R3
21	L1	E2	T1	S1	W1	R1
25	L2	E2	T2	S2	W2	R3
34	L1	E1	T1	S1	W1	R1
35	L2	E2	T1	S2	W2	R1
36	L1	E1	T1	S1	W1	R1
40C	L1	E2	T1	S1	W1	R1
40D	L2	E2	T2	S2	W2	R2
41	L1	E2	T1	S1	W1	R3
44	L1	E1	T1	S1	W1	R2
45	L1	E1	T1	S1	W1	R2
46	L2	E2	T2	S2	W2	R4
47	L2	E2	T2	S2	W2	R2
48	L1	E1	T1	S1	W1	R1
51F	L2	E2	T2	S2	W2	R1
53	L1	E1	T1	S1	W1	R1
57B	L3	E3	T3	S3	W3	R1
59B	L2	E2	T2	S2	W2	R2
61	L2	E1	T2	S1	W2	R1
63	L3	E3	T3	S3	W4	R1
65	L1	E1	T1	S1	W1	R2
69	L1	E2	T2	S2	W2	R3
72	L4	E3	T3	S3	W4	R1
75	L4	E3	T3	S3	W4	R1
84	L1	E1	T2	S1	W1	R2

表 4(续)

建筑编号	排放水平	排放偏好		季节排放		减排水平
		用电排放	用冷排放	夏季排放	冬季排放	
85	L3	E3	T3	S3	W3	R2
88	L1	E1	T1	S1	W1	R2
104C	L4	E3	T4	S4	W4	R1
127	L1	E2	T1	S1	W1	R1
136	L1	E2	T1	S2	W2	R2
160	L4	E3	T4	S3	W4	R2
169	L1	E1	T1	S1	W1	R4
173	L1	E1	T2	S1	W1	R2
178	L2	E2	T1	S1	W2	R1
900	L2	E2	T2	S2	W2	R1
903	L2	E2	T1	S2	W2	R1
904	L1	E1	T1	S1	W2	R1
905A	L2	E2	T2	S2	W3	R1

对建筑低碳行为和其他在低排放水平 L1 类的建筑进行分析得出,所有 L1 类的建筑用冷排放特性为 T1/T2 类,夏季排放特性为 S1/S2 类,即冷排放与夏季排放都处于较低排放水平。结合此园区具有用冷排放偏好特性及夏季排放特性,且用冷量与夏季存在正相关关系,得出影响此地区碳排放的关键因素为夏季用冷。对于此园区的减排策略,一方面可优化冷源设备的运行模式,提高其能效比,减少冷排放;另一方面可进行合理的用冷调度,预测建筑的用冷需求并调控冷源设备的制冷量,避免在高峰时段出现供冷不足或供过于求的情况。

此园区平均总碳排放强度为 $109.16 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中夏季用冷平均碳排放强度为 $32.22 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。为验证上述关键因素的合理性与减排策略的可行性,对排放水平维度为 L4 类的 72 号、75 号、104C 号、160 号建筑进行分析。四栋建筑夏季冷碳排放强度分别占总碳排放强度的 22.74%、27.14%、36.54%、29.43%。

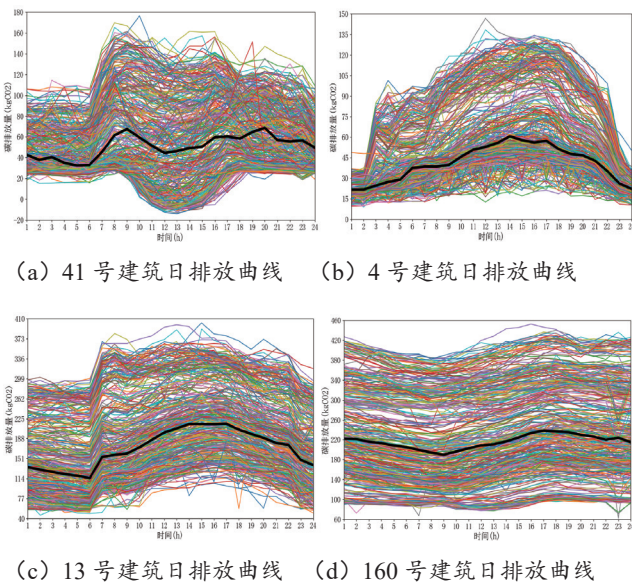


图 7 日排放曲线

若通过上述减排策略将这四栋建筑的冷碳排放强度降至

园区夏季用冷的平均碳排放水平,可使 72 号、75 号、104C 号、160 号建筑总碳排放强度分别降低 10.75%、15.98%、27.60%、18.51%。其中,使 72 号、75 号、160 号建筑总碳排放强度从园区“高碳排放强度区间”降至“较高碳排放强度区间”,104C 号建筑总碳排放也降低了 27.60%,验证了上述关键因素与减排策略的合理性与可行性。

3.4 典型建筑分析

为进一步研究建筑运行阶段碳排放特征,挖掘日碳排放影响因素,本文对此园区典型建筑进行分析。选取距离总体排放水平维度中 L1~L4 类聚类中心欧氏距离最近的建筑为典型建筑。L1~L4 类的典型建筑编号分别为 41、4、13、160,其中 41 号为典型低碳建筑,160 号为典型高碳建筑。使用典型日分析方法对四栋典型建筑进行日碳排放行为分析,典型日曲线为所有曲线对应时刻欧氏距离最短的曲线^[21]。各建筑一年 365 天的日排放曲线如图 7 所示,图中加粗曲线为典型日排放曲线。

由图 7 可知,41 号典型建筑的日碳排放具有明显的早晚高峰特征,其他典型类型建筑基本为单高峰特征,两者具有显著差异。典型低碳建筑在 9:00 ~ 16:00 时间段内的碳排放呈“凹”型趋势,谷值出现在 12:00 左右。其他典型建筑在此时间段内的碳排放呈“凸”型趋势或持续上升趋势,且峰值大都出现在 14:00 左右。分析得出,9:00 ~ 16:00 时间段内的“凹”型碳排放趋势可能是导致 41 号建筑与其他典型建筑相比碳排放较低的原因。为验证这一结论,进一步分析 41 号建筑的日排放曲线图,发现全年日排放中的大多日排放曲线在中午时段处于下降趋势。同时,41 号建筑的复合特征画像为 [L1, E2, T1, S1, W1, R3],可再生能源减排水平较高。由此推断,日排放曲线在中午时段处于下降的趋势与可再生能源减排水平有着密切的联系。为验证日排放曲线与可再生能源的联系,对 41 号建筑无可再生能源影响下的典型日碳排放曲线进行分析,由图 8 可知,在无可再生能源的情况下,41 号建筑与其他典型建筑的典型日排放曲线趋势基本相同。可再生能源的投入使得 41 号建筑典型日排放曲线在 9:00 ~ 16:00 时间段内由“凸”型转为“凹”型,且使得典型日总碳排放由 1585.58 kgCO_2 降至 1226.65 kgCO_2 ,降低了 22.64%。综上得出,可再生能源的投入使建筑日排放曲线在 9:00 ~ 16:00 时间段内呈“凹”型趋势,最终使建筑日碳排放量降低。

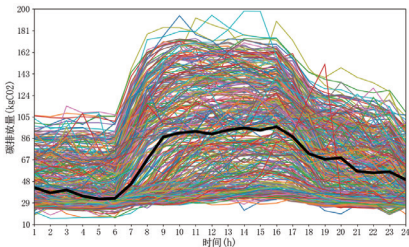


图 8 41 号建筑无可再生能源日排放曲线

对于此区域建筑的日碳排放量控制,一方面可增加太阳能等可再生能源的使用率,降低 9:00 ~ 16:00 时段的碳排放;另一方面,建筑类型绝大部分为教学楼和实验楼,通常缺乏基本用能管理,管理者可以采取一些节能措施来避免不必要的能源浪费。例如,实施人员离开时自动断电的措施,确保未被使用的设备不会消耗电力,从而进一步减少该时段的能耗和相关的碳排放。

4 总结与展望

本文基于建筑运行阶段碳排放行为分析与水平评估发展现状,建立了多维度碳排放指标评价体系,搭建了基于高斯混合模型的建筑运行阶段碳排放特征模型,实现了建筑运行阶段碳排放水平评估与特征画像。主要结论如下。

(1) 通过用户画像技术结合评价指标体系实现了园区级建筑运行阶段碳排放水平评估与特征分析。基于分析结果,可挖掘影响建筑碳排放的共同的關鍵影响因素,为建筑节能优化、技术改进指导等方面提供有针对性的减排策略。

(2) 利用本文提出的方法对亚利桑那州立大学 46 栋建筑进行运行阶段碳排放特征分析,验证了本方法的可行性,并从总体到个体层面验证了本方法提供的园区减排策略的可行性。

最后,期望国内积累并开放更多的碳排放数据,用于建筑碳排放数据的深入挖掘和分析,发现建筑行业存在的能源浪费和碳排放问题,推动建筑行业的技术创新和绿色发展。

参考文献:

- [1] 潘家华,李萌,张坤.实现碳达峰碳中和的中国方案[N].中国社会科学报,2021-11-26(006).
- [2] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院.中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J].建筑,2023(2):57-69.
- [3] 中国建筑科学研究院.建筑碳排放计算标准(GB 51366-2019)[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [4] ANDRIEL E F, CHARLES J K, JUNGHOON W, et al. The carbon footprint of buildings: a review of methodologies and applications[J].Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 94: 1142-1152.
- [5] WU X, PENG B, LIN B. A dynamic life cycle carbon emission assessment on green and non-green buildings in China[J].Energy and buildings, 2017,149: 272-281.
- [6] LI X, XIE W, XU L, et al. Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM[J].Energy and buildings,2022, 266:112136.
- [7] 杨芯岩,于震,张时聪,等.近零能耗公共建筑示范工程全寿命期碳排放研究[J].建筑科学,2023,39(2):20-27.
- [8] 冯国会,崔航,常莎莎,等.近零能耗建筑碳排放及影响因

素分析[J].气候变化研究进展,2022,18(2):205-214.

- [9] 赵晋泉,夏雪,刘子文,等.电力用户用电特征选择与行为画像[J].电网技术,2020,44(9):3488-3496.
- [10] 王磊,刘洋,李文峰,等.基于用电行为数字特征画像的电力用户两阶段分类方法[J].电力建设,2022,43(2):70-80.
- [11] 王成亮,郑海雁.基于模糊聚类的电力客户用电行为模式画像[J].电测与仪表,2018,55(18):77-81.
- [12] 王利利,张琳娟,许长清,等.能源互联网背景下园区用户画像及成熟度评价模型研究[J].中国电力,2020,53(8):19-28.
- [13] 张琳娟,许长清,王利利,等.基于多维度能耗分析的园区用户画像模型[J].可再生能源,2021,39(8):1078-1086.
- [14] 陆晓,徐春雷,冷钊莹,等.基于数据驱动方法的疫情阶段电力用户负荷特性画像模型[J].电力建设,2021,42(2):93-106.
- [15] 严涛,江开忠,姜新盈,等.基于高斯混合聚类采样的不平衡数据处理方法[J].计算机应用与软件,2023,40(12):305-311.
- [16] 黄雨昂,李瑞贤,李勇祥.基于序贯稀疏自编码器和高斯混合模型的驾驶行为分析[J].工业工程与管理,2024,29(2):10-18.
- [17] 李丹,孔繁锸,朱德燕.基于局部高斯混合特征提取的高光谱图像分类[J].光学学报,2021,41(6):78-89.
- [18] LIU L, SHAO H. Study on neutron-gamma discrimination method based on the KPCA-GMM-ANN[J].Radiation physics and chemistry, 2023,203:110602.
- [19] Arizona State University. Campus Metabolism [EB/OL]. [2024-04-12]. <http://cm.asu.edu/>.
- [20] Emissions & Generation Resource Integrated Database (eGRID) [EB/OL]. [2024-04-21]. <https://www.epa.gov/eGRID>.
- [21] 万伟,刘红旗,杜单单,等.考虑负荷季节特性的电力用户用电行为画像[J].哈尔滨理工大学学报,2023,28(3):45-55.

【作者简介】

包西勇(1981—),男,山东蒙阴人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:建筑智能化、电气节能。

路振伟(1998—),男,山东济南人,硕士研究生,工程师,研究方向:建筑碳排放。

赵航(1991—),男,山东潍坊人,硕士研究生,工程师,研究方向:建筑智能化、新能源。

薛玮(1993—),女,山东青岛人,硕士研究生,工程师,研究方向:建筑智能化、电气节能。

马树亮(1990—),男,山东诸城人,硕士研究生,工程师,研究方向:建筑智能化、电气节能。

(收稿日期:2024-06-04)