

高密度住区碳锁定效应形成机理与规划响应

吴玥玥, 郑屹, 杨俊宴, 刘佳蕾, 方遥

【摘要】高密度住区作为承载居民日常生产、生活的基本空间单元,是我国城镇碳排放的重要来源。通过解析高密度住区碳锁定效应的基本内涵,构建基于“空间(S)—活动(A)—能耗(E)”的SAE关联模型,明确住区的碳源构成与碳排放测算指标,并结合遥感和多元数据,采用多维要素模拟方法对南京中心城区下关街道3类5个代表性的高密度住区样本进行碳排放测算,分析住区碳排放的时空固化特征,探讨碳锁定效应的形成机理,由此提出低碳导向下高密度住区更新规划应对策略,为后续住区更新规划提供学理支持。

【关键词】高密度住区;碳排放;碳锁定效应;低碳城市规划;碳中和

【文章编号】1006-0022(2025)08-0056-08 **【中图分类号】**TU984.12、X24、F293.3 **【文献标志码】**B

【引文格式】吴玥玥,郑屹,杨俊宴,等.高密度住区碳锁定效应形成机理与规划响应[J].规划师,2025(8):56-63.

Formation Mechanism of Carbon Lock-in Effect in High-density Community and Planning Responses/
WU Yueyue, ZHENG Yi, YANG Junyan, LIU Jialei, FANG Yao

【Abstract】High-density communities, serving as the fundamental spatial units for residents' daily production and life, are a significant source of carbon emissions in China's urban and rural areas. By analyzing the fundamental connotation of the carbon lock-in effect in high-density communities, a conceptual model of "Space (S)-Activity (A)-Energy consumption (E)" is constructed. This aims to clarify the carbon source composition and carbon emission measurement indicators of high-density communities. By integrating remote sensing and multi-source data, a multi-dimensional elemental simulation approach is employed to calculate carbon emissions in five representative samples of three types of communities. This reveals the spatio-temporal solidification characteristics of carbon emissions in high-density communities. The formation mechanism of the carbon lock-in effect is explored, and based on this, coping strategies for the renewal planning of high-density communities under a low-carbon orientation are proposed, providing theoretical support for subsequent renewal planning of communities.

【Keywords】high-density communities; carbon emissions; carbon lock-in; low-carbon urban planning; carbon neutrality

0 引言

高密度住区是城市快速发展过程中为平衡土地稀缺性与人口增长需求关系而形成的居住空间,具有人口和建筑高密度集聚的典型特征^[1]。作为城市人口生产、生活最基本的空间单元,高密度住区直接或间接产生的CO₂排放量占全球CO₂排放总量的70%^[2]。统计数

据显示,近10年城镇居民建筑增量占全国新建总建筑面积的65%,运行阶段能耗为4.1亿tce,间接产生的CO₂排放量达9.01亿t,占全国总碳排放量的42%。可见,高密度住区已成为我国碳排放增长的主要来源^[3]。因此,推进城市高密度住区的控碳减碳工作,是实现“2030年前城乡建设领域碳排放达到峰值”“2060年前城乡建设方式全面实现绿色低碳转型”目标的关键抓手^[4-5]。

【基金项目】国家自然科学基金重大项目(52394224)、中国科学技术协会第八届青年人才托举工程项目(YESS20220569)、高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室开放基金课题项目(20240110)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242024RCB0034)

【作者简介】吴玥玥,东南大学建筑学院硕士研究生。wy_y_hyacinthus@163.com

郑屹,通信作者,博士,东南大学建筑学院、东南大学中华民族视觉形象研究基地讲师、硕士生导师,并任职于高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室。Zhengyi17_seu@163.com

杨俊宴,国家级人才特聘教授,东南大学建筑学院教授、博士生导师。

刘佳蕾,东南大学建筑学院硕士研究生。

方遥,南京工业大学建筑学院副院长、教授、硕士生导师。

碳锁定效应最早由西班牙学者乌恩鲁在能源与环境领域提出,其基础定义为:高碳技术长期主导现代经济社会发展路径,导致低碳技术的应用与推广受阻,使碳锁定效应成为温室气体大量产生的根源^[6]。在城乡规划学科语境下,高密度建成环境中的碳锁定效应指对城市基础设施、技术路径和生活习惯的长期依赖^[7],导致城市居民不愿或无力调整既有能耗行为,形成高能耗、高碳排的系统内在惯性,进而出现高碳排放模式固化且难以改变的现象^[8]。

高密度住区碳锁定效应是长期存在的高碳排放模式固化现象。由于高密度住区日常的生产、生活、商业等活动具有高强度、多时段、多类型的特征,且其空间功能组织和活动具有长期性、稳定性,短时间内难以改变高能耗模式依赖和高值碳排放现象,最终形成了显著的碳锁定效应。解析高密度住区碳锁定效应的关键在于明确碳源构成并准确测算碳排放,从空间、居民活动和能耗3个基本构成因素出发,厘清三者之间的作用关系,进而解析碳锁定效应的形成机理。然而,既有研究在高密度住区碳排放测算方面多聚焦于由建筑运行、交通出行、废弃物处理等直接或间接产生的碳排放^[9-10],通过社区调查、问卷调查、入户调查或城市能源系统建模方法获取数据,再基于IPCC碳排放系数及其衍生方法测算碳排放^[11-12]。此类研究多立足于能源消费视角,其测度指标与规划关联较弱,且测算结果多为碳源静态排放值,缺乏对碳排放时空属性的考虑,难以解析高密度住区碳锁定效应产生的原因。同时,学界普遍认为,建筑运行、城市微气候和用户用能行为是高密度住区高碳排放模式固化进而产生碳锁定效应的原因^[13]。相关研究通过选取高密度住区建成环境中的各种形态要素,建立包含开

敞空间特征、住区布局形式、开发强度等要素的空间形态指标体系,解析空间形态对高密度住区高碳排放模式固化的影响机制。但此类研究对高密度住区碳排放与住区空间、居民活动、能源消耗的关联机理解释不足,对碳锁定效应的形成机理也缺乏科学解释。

在我国快速城镇化背景下,高密度住区呈现高密度环境、人口高度集聚和高活动频率的典型特征,其碳排放特征与空间及居民日常活动密切相关,存在动态交互与转化关系。这一关系包含空间、活动、能耗三者间的隐性关联机理,而这种机理最终导致高密度住区呈现高碳排放量和高能耗特征。然而,既有研究不同程度地忽视了高密度住区的居住模式分异,以及居民日益多元的日常活动和用能行为^[14-15],难以深入剖析“空间(S)—活动(A)—能耗(E)”影响下的高密度住区碳锁定效应。为了突破当前难以准确揭示高密度住区高碳排放模式固化现象以及科学解析其碳锁定效应的现实瓶颈,本研究选取南京中心城区下关街道3类5个具有代表性的高密度住区样本,对住区高能耗、高碳排路径的依赖性和自我强化现象进行科学解析,探讨不同住区的碳锁定效应形成机理。

在方法层面,本研究以IPCC碳计量体系为基础,结合高密度住区碳源与碳汇的空间影响要素,综合考虑住区的直接与间接碳排放,采用能耗、建筑、人口、植被等多源数据,对不同类型住区进行碳排放子系统测算并进行“自下而上”叠合,构建基于“空间(S)—活动(A)—能耗(E)”的关联模型,即SAE关联模型。通过对典型案例样本的分析,揭示碳锁定效应的形成机理及分异特征,为城市更新中高密度住区的低碳规划与改造提供参考,助力城乡领域碳达峰、碳中和目标的实现。

1 高密度住区 SAE 关联模型构建与碳源指标构成

1.1 碳锁定效应下的高密度住区 SAE 关联模型

高密度住区碳锁定效应是空间、活动与能耗三者在一定时空范围内交互作用的结果。其中,能耗是住区碳排放的直接来源,居民的日常生产、生活等活动是水、电、气、油等用能行为产生的前提,空间及其业态功能则是住区各类活动的载体。高密度住区建成环境具有相对稳定的空间与功能,这使居民的日常活动对空间要素形成路径依赖,进而形成居民活动方式的内在惯性。由这种内在惯性产生的稳定的用能方式,使得住区的能源配置与能耗方式难以改变,最终形成住区碳锁定效应。据此,通过构建SAE关联模型(图1),对高密度住区碳锁定效应的产生逻辑进行解释,并明确住区内的碳源与碳汇构成,进而测算住区碳排放,揭示其形成机理,理清碳锁定效应的特征。

依据SAE关联模型,空间不仅包括道路、绿地等碳源与碳汇要素,还是居民日常活动与用能行为的载体。高密度住区的空间结构一旦形成,其物理结构与功能短期内难以改变。因此,空间要

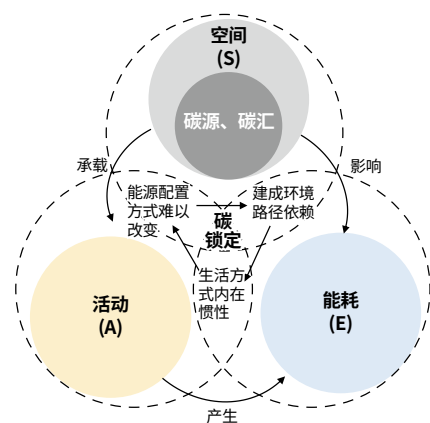


图1 高密度住区 SAE 关联模型

素从根本上决定了住区运行中的能源配置与能耗方式,会固化基本碳排放模式。在空间载体影响下,居民日常活动包括基于需求产生的稳定碳排放(如休闲、餐饮、社交)和因惯性行为带来的碳排放(如通勤、垃圾处理)^[16]。这种受空间影响的活动行为具有时空稳定性,是碳锁定效应产生的直接原因。能耗是高密度住区碳排放的直接来源,受空间要素与活动行为的双重影响。具体表现为空间的结构和布局在很大程度上决定居民的用能需求,同时影响居民的活动方式,受居民惯性行为及住区空间稳定性的共同作用,住区的能耗方式进一步固化,形成碳锁定效应。

1.2 基于 SAE 关联模型的高密度住区碳源构成

依据 SAE 关联模型探讨高密度住区碳锁定效应形成机理,需先理清住区内居民的时空活动、碳源要素构成与碳排放特征之间的关联(图2)。

在城市规划背景下探讨高密度住区碳锁定效应形成机理,重点在于理清住区为满足居民生活需求和维持正常运作直接或间接产生的碳排放。从能源消费角度看,居民在高密度住区的日常活动

可分为居家生活、购物餐饮、公共文化、交通出行和休闲娱乐等5类。这些活动涉及采光照明、制冷取暖、沐浴清洁、炊事、私家车出行等行为^[17],其能耗是碳排放的主要来源。对能耗的分析显示,居民生活终端消费能源涵盖电力、热力、煤炭、天然气、液化石油气和汽油等类型。

1.3 基于碳源构成的高密度住区碳排放测算指标

高密度住区的净碳排放是建筑、交通、人类活动与植被等子系统多重作用的结果。住区碳排放主要包括人类活动的直接与间接碳排放,碳汇则主要来自蓝绿空间。直接碳排放指居民直接使用能源产生的碳排放,间接碳排放则包括废弃物处理及外部输入电力能源等产生的碳排放^[18-19]。由于住区的能源活动规律及其碳排放构成比工业区和农牧区简单,本研究仅考虑测算住区的CO₂排放量,核算范围包括日常活动及温室气体核算体系中的范围1、范围2和范围3^①。

本研究从建筑运行碳排放、废弃物处理碳排放和生态植被碳汇3个子系统出发,选取碳排放测算指标。因交通出行碳排放是否纳入碳排放测算范围在学界尚存争议,本研究未将其纳入。测算

指标注重相对独立性、可量化性与可拓展性。其中:建筑运行碳排放包括住区建筑运行中电力和天然气消耗产生的碳排放,如建筑用电和用气碳排放等;废弃物处理碳排放指垃圾填埋、燃烧等处理过程产生的碳排放,本研究选取垃圾燃烧碳排放作为测算指标;生态植被碳汇覆盖绿地和水面等碳吸收来源,包括公园绿地、河湖水体、行道树及小型绿地等的碳汇测算。

2 基于 SAE 关联模型的高密度住区碳排放测算技术路线

2.1 高密度住区测算样本选取

本研究选择南京中心城区下关街道作为研究案例,以建筑密度、容积率、建筑高度和人均居住面积等为指标进行统计,分析高密度住区的概况。下关街道是南京滨江开发的核心区段,80%以上为居住建筑,其余为办公、商业和公共服务建筑。研究区具有人口密度大、家庭活动复杂、能耗高等高密度特征,住区碳排放模式具有显著的碳锁定效应。研究区内的高密度住区具有多时期建设年代叠合特征,反映出空间、活动与能耗之间的复杂关系。根据主要密度指标,本研究遴选出3个类型的高密度住区:A型住区为20世纪60—90年代建成的混合式老旧住区,建筑密度高、容积率低、功能复杂;B型住区建成年代较近,以高层和超高层建筑为主,建筑密度低、容积率高;C型住区以公寓类建筑为主,通常以建筑综合体为空间载体。

2.2 测算模型与技术路线

高密度住区碳锁定效应贯穿碳排放与碳固汇全过程,同时也是碳排放与碳固汇相互作用的结果,涵盖建筑运行碳排放、废弃物处理碳排放和生态植被碳

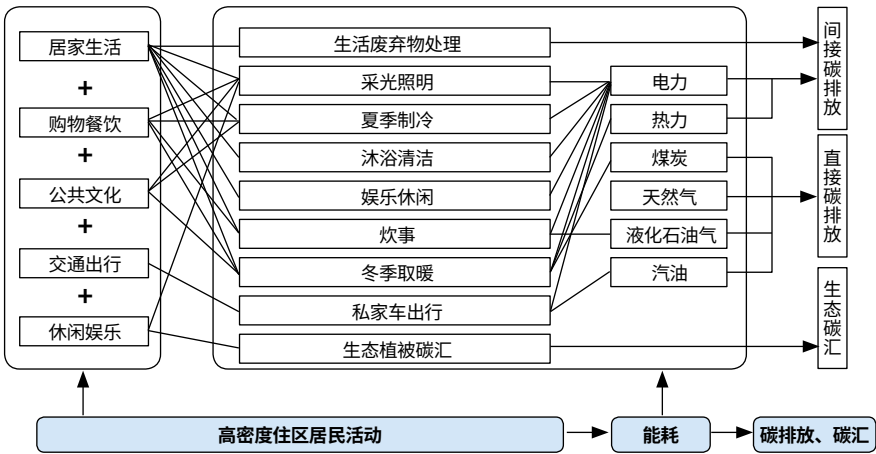


图2 高密度住区碳源、碳汇要素构成

汇3个子系统。本研究整合能源、建筑及遥感等多源数据,采用 UMI 建筑能耗模拟、K-means 家庭数字画像及植被类型反演技术,分别测算建筑运行碳排放、废弃物处理碳排放和生态植被碳汇,通过实地调研校核,分析南京下关街道的碳锁定效应特征(图3)。主要测算内容如下:

(1) 基于城市建筑能耗建模的建筑运行碳排放测算。考虑到高密度住区规模与碳排放测算的精细度和可操作性,本研究采用城市建筑能耗建模测算建筑运行碳排放,通过采集住区建筑数据(外轮廓、高度、窗墙比等),模拟电力、天然气的使用场景,结合碳排放因子法测算建筑运行碳排放。

(2) 基于住区人均生活垃圾估算的废弃物处理碳排放测算。采用人均生活垃圾估算法,通过贝壳网获取住区户数,并结合户均人口数据计算总人口数量。结合垃圾处理方式、年度人均清运量,耦合测算废弃物处理碳排放。

(3) 基于遥感影像反演和植被识别的住区生态植被碳汇测算。高密度住区内的绿地及植物,以及邻近住区的水体等是发挥碳固汇效能的主要空间要素。因此,本研究采用植被分类固碳系数法测算住区碳汇。首先,采集 SenoLC-1 的 1 m 分辨率土地覆盖数据,通过图像要素识别算法提取用地覆被中不同的植被的生态用地,包括树林、灌木、水体、草地;其次,通过碳汇计算公式计算住区碳汇(表1)。

此外,考虑到高密度住区内居民家庭情况对碳锁定效应的影响,本研究在测算的基础上通过实地调研及问卷调查校核结果。在不同类型住区中共发放问卷 142 份,回收有效问卷 131 份,样本置信率达 92.2%。问卷内容涵盖家庭结构、住房、活动及能耗等信息。

2.3 高密度住区碳排放测算结果

测算 A 型、B 型、C 型 3 类高密度住区的碳排放及碳汇,结果显示,不同类型住区的碳排放类型占比趋于一致,但具体碳排放模式存在差异。在类型占比中,建筑用电碳排放均为首位,

其次为废弃物处理碳排放和建筑用气碳排放。通过对比分析发现,A 型住区受住宅形式及布局影响,建筑用电碳排放占比较高,为 54.40%;废弃物处理碳排放占比相对较低,为 35.70%。B 型住区建筑用电碳排放占比最高,达

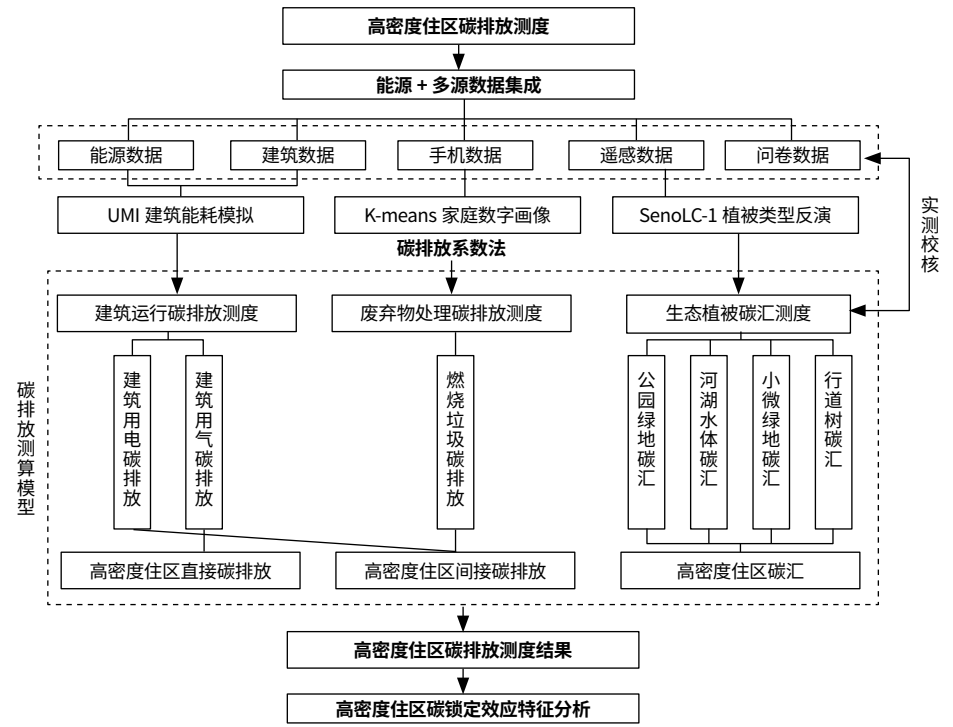


图3 高密度住区碳排放测算分析框架

表1 测算指标、测算公式与数据选取

子系统	测算指标	测算公式	公式解释	数据选取
建筑运行碳排放	建筑用电碳排放	$Be = \sum_{i=1}^n E_i \times F_f$	Be 为建筑用电碳排放, E_i 为第 i 个建筑的电力能源消费活动水平, F_f 为电力能源消费碳排放系数	居住建筑外轮廓、高度、窗墙比等数据
	建筑用气碳排放	$Bg = \sum_{i=1}^n G_i \times G_f$	Bg 为建筑用气碳排放, G_i 为第 i 个建筑的天然气能源消费活动水平, G_f 为天然气能源消费碳排放系数	
废弃物处理碳排放	燃烧垃圾碳排放	$C_{Wi} = W \times \sum W_{Fi} \times d_i \times C_{Fi} \times F_{FSC,i} \times O_i \times 44/12$	C_{Wi} 为生活垃圾碳排放, W 为 C_{Wi} 焚烧量, W_{Fi} 为 i 组分的比例, d_i 为 i 组分干物质质量的比, C_{Fi} 为 i 组分干物质中总碳质量的比, $F_{FSC,i}$ 为 i 组分总碳中 FSC 质量的比, O_i 为 i 组分完全燃烧效率	住区户数数据、统计年鉴数据
生态植被碳汇	生态植被碳汇	$V_e = \sum V_i = \sum S_i \times \alpha_i$	V_e 为植被或生态用地的碳汇量; V_i 为树林、草地、水体或灌木的碳汇量; S_i 为树林、草地、水体或灌木的面积; α_i 为树林、草地、水体或灌木的碳汇因子	1 m 分辨率土地覆盖数据

72.50%；碳汇量占比最低，为 2.18%。C 型住区因能源使用特性，建筑用气碳排放占比最低，仅为 2.55%。

在以上测算结果的基础上，进一步对各类住区碳排放指标进行 Z-score 标准化处理，对碳综合值和碳均值进行分级排序，进而归纳高密度住区碳锁定效应的类型特征。在 A 型住区中，主要存在单位建筑面积作用下的碳锁定效应，这表明该类型住区碳锁定效应主要体现在建筑能源利用效率、节能水平和环保性能方面。在 B 型住区中，净碳排放和人均碳排放占据主导地位，该类型住区的能源消耗能力强，整体碳锁定效应明显，居民的活动及生活方式对碳锁定效应有较大影响。C 型住区的单位面积碳锁定效应明显，其碳锁定效应的空间集聚程度相对较高，表现出明显的锚固性。

3 高密度住区碳锁定效应形成机理解析

高密度住区的碳锁定效应是由空间、活动与能耗共同作用形成的。空间碳锁定效应指空间特征对碳排放行为和碳排放强度产生影响，进而形成建成环境路径依赖的现象；活动碳锁定效应指居民的生活、生产活动在时间和空间上复杂交织，形成碳密集型生活方式；能耗碳锁定效应指由于能耗与碳排放规律形成负荷峰谷差，能源结构和能源配置导致的高碳排放模式难以改变。

3.1 住区类型分异下的空间碳锁定效应

不同类型高密度住区的空间碳锁定效应具有分异性，具体表现在建筑运行碳排放和生态植被碳汇的分布上。作为居民生活的重要空间载体，高密度住区的住宅形式、住区布局、绿地系统和混

合功能对碳锁定效应具有影响。

(1) 住宅形式分异。A 型住区多为中小户型的多层住宅，B 型住区的住宅套型面积和空间进深相对较大，而 C 型住区通常为一厅一室或一厅两室的小户型。既有研究表明，随着住房面积的增加，房屋体积也随之增大，制冷和供热的能耗增加，导致建筑运行碳排放增加，同时人均能耗的边际增加也更多。

(2) 住区布局分异。A 型住区多为行列式或混合围合式布局，建筑间距小、密度高；B 型住区为行列式高层建筑，容积率大但密度较小；C 型住区多采用单点式布局。实测发现，A 型住区由于高密度与空间杂物的叠加效应，建筑热量积聚和制冷能耗增加，加剧了热岛效应。此外，A 型和 B 型住区的住宅遮挡较多，房屋采光不足，从而增加了照明用电量。

(3) 绿地系统分异。A 型住区绿地分布零散，单块面积小；B 型住区绿地集中，覆盖率大，植被层次丰富；C 型住区大多无公共绿地，仅有少量屋顶绿化。总的来说，住区越开敞，留给绿地的空间越多，越有利于通风和生态植被碳汇的增加。尽管绿地空间的碳汇效益对减缓碳锁定效应的作用有限，但其提供的休闲功能对高密度住区至关重要，有助于降低能耗和碳排放。

(4) 混合功能分异。A 型住区的商铺沿街底商分布，各类居住服务设施的可达性强；B 型住区的商业功能分布于外围裙房；C 型住区综合体的三维空间包含商业、居住、商务、酒店等多种功能。高密度住区的功能类型和组合方式的差异，实际上影响了碳锁定效应。

3.2 偏好惯性作用下的活动碳锁定效应

高密度住区居民的日常生活、生产

活动及其关联的生活方式是产生能耗和碳排放的根源，一方面，居民活动受空间及基础设施影响；另一方面，居民活动直接影响用能行为和能耗，是影响碳锁定效应的重要因素。

(1) 户外休闲偏好分异。相较于室内居家活动，居民的户外休闲活动在一定程度上有助于减缓碳锁定效应。然而，不同高密度住区居民的休闲活动选择偏好不同。具体而言，A 型住区居民的日常户外活动时间较长，主要集中在街道与服务设施周边；B 型住区居民更倾向于在社区内的绿地广场、公共服务设施和社区公园进行户外休闲活动，户外活动时间较短；C 型住区居民缺乏合适的户外活动时间，休闲活动主要集中在周边公园和住宅楼前后的空地，户外活动时间较为有限。

(2) 外出活动偏好分异。居民外出活动的频率、距离和偏好可从侧面反映其日常生活方式。通过大数据分析及实测，分析典型住区周边公益性活动、生产性活动和生活性活动的密度分布。结果发现，A 型住区居民的外出活动需求基本可在 5 分钟生活圈范围内得到满足；B 型住区居民的外出活动需求往往无法在 5 分钟生活圈内得到满足，进而造成额外的碳排放，使居民实现绿色低碳生活方式更为困难。

3.3 周期性节律下的能耗碳锁定效应

根据上述分析，高密度住区的能耗受空间特征和居民活动的双重影响，呈现出能耗波动特征，形成了碳锁定效应的时空属性，具体表现为趋近稳定的季节性变化和多元的昼夜性变化。

(1) 高密度住区全年能耗的双峰型周期性节律。总体而言，高密度住区碳排放随季节呈双峰型波动。冬季为住区用电高

峰，经春季低值平稳期后，夏季达到次高峰，而后随冬季气温下降用电量再次上升。这种周期性变化的差异取决于住区的功能组织和业态类型。具体来看，A型住区的碳排放总量较小、波动较小，因居住功能与餐饮、零售等生活服务功能融合，碳排放行为主要集中在采光照明、娱乐休闲和炊事等方面，受季节变化影响较小。B型住区的碳排放总量最大、波动较大，空调装机量大且冬季取暖方式多样，导致冬季能耗波动曲线斜率显著增大。此外，B型住区以居住功能为主，主要碳排放行为为夏季制冷和冬季取暖，整体用能波动受季节性变化影响较大。C型住区的碳排放总量最小、波动最小，因涵盖购物、商务办公、酒店住宿、居住等混合功能，碳排放行为复杂，受气候及季节变化影响小，全年能耗波动曲线更为平稳。

(2) 高密度住区昼夜能耗的多元周期节律。根据样本住区居民家庭结构、规模及生活方式的调研结果，不同住区的碳排放时间分布与家庭能源活动存在关联。A型住区家庭类型多样，能耗波动模式更多样；B型住区以双职工和核心家庭为主，表现为相对规律的双峰型波动；C型住区家庭类型较年轻化，波动频率较快，谷值不稳定。总体而言，碳排放的昼夜变化与住区家庭类型有关。

4 低碳导向下的高密度住区更新规划响应

随着“双碳”战略的全面推进，高密度住区面临从“高消耗、高排放”的传统模式向“低能耗、低污染、低排放、高效能”主导的低碳发展场景转型。这一转型需从碳锁定效应的根源入手，通过空间优化、活动调控和能效提升进行全面更新。其关键在于运用低碳技术与

绿色生活方式的双向“解锁”逻辑，从技术革新和居民行为优化两个层面实现整体低碳转型。

低碳技术提供了缓解碳锁定效应的基础手段，如通过节能建筑技术、能源调节技术，以及构建分布式能源体系和可再生能源利用等，从根本上解决建筑运行高碳排放问题。绿色生活方式则通过倡导居民改变用能行为，增强低碳意识，践行节约能源、简约生活、资源循环利用等理念，选择可持续发展的生活方式。二者协同作用，通过技术与行为的双向交互路径，结合建筑运行碳排放、废弃物处理碳排放和生态植被碳汇等测算结果开展低碳更新，为达成整体碳减排目标奠定基础，具体包括空间碳解锁、活动碳解锁和能耗碳解锁多个层面的规划响应。见图4。

4.1 空间碳解锁

空间碳解锁围绕高密度住区的空间形态、建筑设计及绿地生态系统优化展开，通过物理空间的合理调整和低碳化设计，减缓土地利用和空间布局中的碳锁定效应。在空间形态层面，通过整合冗余的零散空间提升空间利用效率，同

时优化停车场布局和交通规划，缓解公共空间的碳锁定效应。在建筑设计层面，应对维护结构（如外墙、屋顶等）实施低碳化改造，优先采用高性能节能材料，减少建筑运行能耗；优化采用自然采光与通风设计，显著降低住区对人工能源的依赖。在绿地生态系统优化方面，需在住区更新中协同规划高品质景观以提升在地碳汇效能，充分发挥景观生态植被的碳汇功能。通过对废弃院落和未充分利用区域进行绿化覆盖，增加碳汇要素规模，强化直接碳排放固汇能力；推广屋顶绿化和立体绿化技术，将碳中和理念融入垂直空间的生态改造（图5）。通过整合公共活动区域与完善绿色基础设施，促进公共空间的生态化建设，提高整体生态效能。

4.2 活动碳解锁

活动碳解锁以优化居民活动模式与生活方式为核心，通过调整功能配置与行为导向，显著降低人均碳排放水平。首先，在功能复合性上可增加生活服务设施、公共服务设施和商业场所的分布密度，提升居民生活便利度，减少长距离交通出行需求；其次，以步行优先、

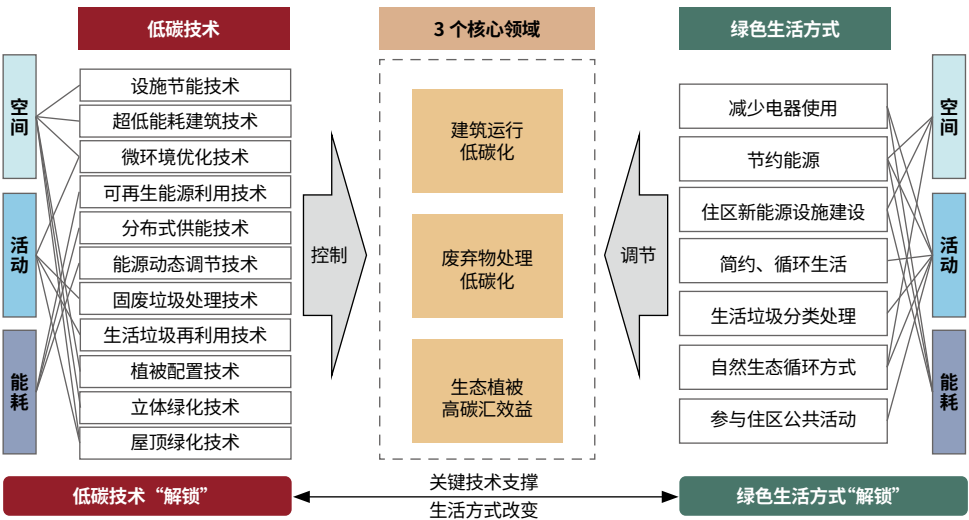


图4 低碳技术与绿色生活方式的双向“解锁”逻辑



图5 高密度住区空间绿色改造

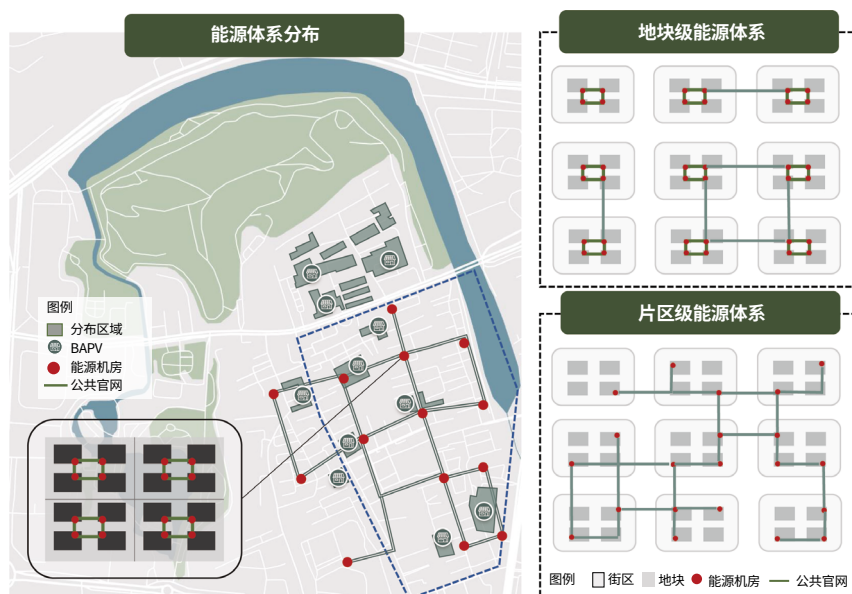


图6 高密度住区能源体系

5分钟生活圈等理念优化空间布局，可在实际规划中实现交通活动的低碳化转型。

居民行为调控是活动碳解锁的另一重要方面。通过开展社区教育，逐步普及垃圾分类、资源回收再利用、节能减排等生活理念，让居民更多地关注生活中的碳排放问题。同时，倡导简约、循环利用的低碳生活方式，减少生活垃圾的产生并提高废弃物处理的低碳化水平。此外，通过花园建设、公共活动空间打造等途径，提高居民对住区生态建设的参与度，形成既有利于增加生态植被碳汇，又能够减少室内能源需求的长效机制。

4.3 能耗碳解锁

能耗碳解锁聚焦高密度住区能源系统的优化与供能结构的升级，同时通过多能源的集成与高效利用实现对整体能耗的控制。

首先，引入可再生能源是减缓能耗碳锁定效应的重要途径。例如，通过推广太阳能光伏发电，大规模实施光伏建筑一体化(BIPV)或光伏附属材料(BAPV)，可逐步形成以建筑自发电为核心的供能

补充，降低对传统化石能源的依赖。风能、地热能等绿色能源也可住区能耗系统提供多元支撑。

其次，应构建住区微电网及智慧能源管理体系，通过多能源互联调控实现能源的智能化使用与多维效率提升，从而降低建筑运行能耗。

再次，需优化住区整体能源设施体系，如提升供暖、制冷系统的能效水平，推动供能设备的绿色化升级(图6)。

最后，通过节能设备与技术的结合，如高效照明设备、雨水收集及循环利用系统等，促进资源综合利用效率的全面提升，最终形成具有低碳标杆意义的住区能源解决方案。

4.4 小结

通过空间碳解锁、活动碳解锁与能耗碳解锁的联合“解锁”，高密度住区能够逐步消除碳锁定效应，实现从结构优化、行为调控到功能提升的综合性低碳更新。可见，高密度住区更新不仅是空间规划技术方案，还是实现绿色生活场景的全方位实践探索，为“双碳”战

略的实施提供依据，同时引领城市可持续发展方向。

5 结束语

高密度住区作为城市生活、生产的重要载体，具有显著的高碳排放、高能耗特征，并在一定时空范围内形成碳锁定效应。在高密度住区碳锁定效应背后，存在空间、活动与能耗三者间的动态关联机理。理清这一机理，是面向城市更新典型应用场景制定高密度住区减碳控碳策略的关键。本研究在城乡规划学科语境下解析碳锁定效应的基本内涵，梳理了高密度住区的碳源构成与碳排放测算指标，提供了一种模拟与实测相结合的测算模型。在此基础上，通过构建基于“空间(S)—活动(A)—能耗(E)”的SAE关联模型，解析典型高密度住区的碳锁定效应特征与形成机理，并以南京中心城区下关街道为例进行实证分析，为住区低碳更新提供支撑。

实证结果显示，高密度住区存在3种不同的碳锁定效应，其在锁定程度、

结构分布和特征类型等方面存在差异。进一步研究发现,住区在住宅形式、空间布局、绿地系统和混合功能等方面存在碳锁定效应空间类型分异。此外,不同类型住区居民在休闲活动和外出活动的选择上存在行为惯性,这种行为惯性通过影响用能选择,提高生活能耗,构成解除碳锁定效应的潜在瓶颈。住区能耗受居住空间特征与居民活动的双重影响:全年能耗呈现双峰型波动,不同住区的波动模式差异与其功能组织和业态类型相关;住区昼夜能耗的波动模式则呈现多元化,与住区家庭规模及类型相关。

总体而言,本研究对城市更新背景下高密度住区的控碳减碳工作具有一定应用价值。然而,本研究仅探讨了高密度住区运行过程中的碳锁定效应,尚未考虑住区作为全生命周期系统的碳锁定强度和“解锁”代价。未来的研究可进一步深入探讨高密度住区在建设、运行和更新等各阶段的碳锁定效应特征,以全面理解高密度住区的碳锁定机理,为后续低碳导向的高密度住区城市更新提供参考。

[注 释]

①“范围1”碳排放指发生在地理边界内的直接碳排放,如生产过程中燃烧煤炭、城市供暖过程中燃烧天然气及内部交通出行产生的碳排放等;“范围2”碳排放指因地理边界内的活动所需而调入的电力和热力产生的间接碳排放;“范围3”碳排放则包括原材料异地生产、跨边界交通出行、购买的产品和服务产生的碳排放,以及跨边界废弃物处理和产品使用产生的碳排放等。

[参考文献]

[1] 杨俊宴,史宜.城市规划语境下密度研究的源流演化与展望[J].国际城市规划,2023(2):1-7.
[2] MI Z, ZHENG J, MENG J, et al. Carbon

emissions of cities from a consumption-based perspective[J]. Applied Energy, 2019, 235: 509-518.
[3] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会.2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告[R].2022.
[4] 住房和城乡建设部,国家发展改革委.城乡建设领域碳达峰实施方案(建标[2022]53号)[Z].2022.
[5] 丁仲礼.中国碳中和框架路线图研究[J].中国工业和信息化,2021(8):54-61.
[6] UNRUH G C. Escaping carbon lock-in[J]. Energy policy, 2002(4): 317-325.
[7] 牛鸿蕾,刘志勇.中国碳锁定效应的测度指标体系构建与实证分析[J].生态经济,2021(2):22-27.
[8] 李志刚.城市碳锁定研究进展与展望[J].地理科学进展,2023(1):171-183.
[9] 汪坚强,高学成,李海龙,等.基于科学知识图谱的城市住区低碳研究热点、演进脉络分析与展望[J].城市发展研究,2022(5):95-104.
[10] 邓雪媛,蒋灵德,刘超.国土空间详细规划碳排放测度与管控研究:以苏州太湖科学城核心区详细规划为例[J].规划师,2023(9):117-122.
[11] JOHARI F, PERONATO G, SADEGHIAN P. Urban building energy modeling: state of the art and future prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 128: 109902.
[12] 张丽莎,张赫,王雨涵,等.基于碳排放模拟的控规单元空间容量优化方法与策略:以天津市为例[J].规划师,2025(3):42-49.
[13] 冷红,肖雨桐.寒地城市居住区形态对住宅能耗影响[J].哈尔滨工业大学学报,2020(12):147-156,163.
[14] 王伟强,李建.住区密度与家庭能耗碳排放相关性研究:以上海曹杨新村为例[J].城市规划,2017(6):83-91.
[15] 吴巍.时空间行为视角下城市建成环境与居民生活能耗关系研究[D].天津:天津大学,2022.
[16] 池飞帆,刘名瑞,程俊溢,等.社区近零碳转型要求下控制性详细规划编制优化研究[J].规划师,2024(6):110-117.

[17] 王伟强,李建,岳雨峰.基于行为特征的住区模式与低碳效应关系研究:以上海曹杨新村为例[J].城市规划学刊,2015(3):36-43.
[18] CHRISTEN A, COOPS N C, CRAWFORD B R, et al. Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements[J]. Atmospheric Environment, 2011(33): 6057-6069.
[19] ZHU X H, LU K F, PENG Z R, et al. Spatiotemporal variations of carbon dioxide (CO₂) at urban neighborhood scale: characterization of distribution patterns and contributions of emission sources[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 78: 103646.

[收稿日期] 2025-04-27