

“社区减碳”：计量方法、排放特征及其实现路径*

李晓江 吕晓蓓 邵玲 余妙 肖颖禾 胡京京 周游 史帅

提要 “双碳”背景下我国全面展开减碳行动，城市作为碳排放主要场所承担了重要的减碳责任，如何有效推进社区减碳是城市面临的又一难题。从居民行为视角提出城市社区碳计量模型，对上海、深圳、重庆、衢州的5个社区进行碳排放计量和特征分析，得出居民收入水平、居民行为方式、居住模式等经济社会因素以及社区功能混合度、建筑技术、建筑布局设计等物质空间因素均对社区碳排放量有显著影响。据此提出改善社区微环境、推行适用的绿色建造技术、绿色化交通出行、引导低碳生活消费方式以及加强政策支撑等社区减碳路径建议。

关键词 社区减碳；碳排放；碳计量；绿色更新

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202405006
文章编号 1000-3363(2024)05-0040-07

作者简介

- 李晓江，中国城市规划设计研究院原院长、教授级高级城市规划师，全国工程勘察设计大师，3468869874@qq.com
- 吕晓蓓，中国城市规划设计研究院深圳分院副院长、教授级高级规划师，中国城市规划学会国外城市规划学术委员会委员
- 邵玲，中国城市规划设计研究院上海分院规划研究室主任工、高级工程师
- 余妙，中国城市规划设计研究院西部分院城市设计所副所长、高级城市规划师
- 肖颖禾，中国城市规划设计研究院上海分院工程师，通信作者，669224456@qq.com
- 胡京京，自然资源部国土空间规划研究中心高级城市规划师
- 周游，中国城市规划设计研究院深圳分院规划设计一所规划师
- 史帅，中国城市规划设计研究院上海分院工程师

Community Carbon Reduction: Measurement Methods, Emission Characteristics, and Implementation Pathways

LI Xiaojiang, LÜ Xiaobei, SHAO Ling, YU Miao, XIAO Yinghe, HU Jingjing, ZHOU You, SHI Shuai

Abstract: Achieving the goal of carbon neutrality requires active promotion of carbon reduction actions. Cities, as primary contributors of carbon emissions, bear significant responsibility in carbon reduction. However, effectively effective urban carbon reduction strategies remain unresolved. This paper introduces a carbon measurement model for urban communities based on human activities. It analyzes carbon emission characteristics across five communities in Shanghai, Shenzhen, Chongqing, and Quzhou based on the application of the measurement model. The study concludes that socioeconomic factors such as income, lifestyles, types of residence, and spatial factors such as land-use mix, building technology, and design, exert a significant impact on carbon emissions. Building on these insights, the paper proposes strategies to achieve carbon reduction goals, including improving the community microenvironment, adopting green construction technologies, supporting green transportation, promoting low-carbon lifestyles, and strengthening policy support.

Keywords: community carbon reduction; carbon emission; carbon measurement; green community renewal

2020年9月习近平主席承诺中国将于2060年之前实现碳中和，再次明示我国以生态文明理念引领绿色发展的决心。研究^[1]表明碳达峰时的城镇化率在74%左右，我国在进一步推进城镇化的同时，碳达峰路径的选择极为重要。城市作为承担重大战略发展任务的地区，是实现低碳发展的“牛鼻子”和重要路线样本^[2-3]。城市是能源消费的主要场所，消费占比达85%左右，国际经验表明人均GDP达到1万美元以后能源消费增长加快（图1），城市生活领域的能源需求持续增长，以生产为主的能源消费将随着经济转型而转变为生活消费为主。中国城市居民消费与欧美发达国家差距很大，未来需求增长仍将带来更多的能源消耗和碳排放。因此从城市居民行为视角下促进兼具空间和社会双重属性的社区低碳更新，是我国居民生活部门和建筑部门实现“双碳”目标的重要着力点^[4]。

当我们把视野转向城市社区低碳减排时，发现社区碳排放的计量手段和核算方法尚未形成共识。本文作者借参与国合会《“双碳”目标下的社区绿色更新研究——重大绿色技术创新及其实施机制（二期）》重大课题研究的机会，系统构建城市社区碳排放核算模型，进一步跟踪国内五个典型社区碳排放数据，综合分析影响社区更新碳排放的影响因素，

* 本论文是中国环境与发展国际合作委员会（CCICED）2020年至2021年专题政策研究项目（SPS）《重大绿色技术创新及其实施机制（二期）》的主要成果。专题政策研究项目主持单位是中国城市规划设计研究院和世界经济论坛（WEF），参加单位有深圳市建筑科学研究院、德国联邦环境署（UBA）、中国可持续工商理事会等多个国际机构。专题政策研究成果于2021年由“中国环境与发展国际合作委员会、联合国开发计划署（UNDP）、联合国环境署（UNEP）”联合发布

并在社区层面探索具有针对性、实效性、可负担的绿色减排策略与绿色技术应用,为更高质量地实现国家“双碳”承诺提供社区层面的解决方案。

1 碳中和目标下社区减碳研究的重要性

1.1 社区减碳研究对城市减碳和社区绿色更新至关重要

随着人民美好生活需求的增长,未来社区碳排还将进一步提升。十九大报告重新定义了中国社会的主要矛盾,从过去“人民日益增长的物质文化需要与落后的社会生产力之间的矛盾”,表述为今天“人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾”。美好生活意味着更多的物质享受、物质消耗和能源消耗。统计国内消费水平高(人均可支配 ≥ 5 万元)的10个城市人均生活能耗在过去20年中增长了2—3倍(图2)。这意味着未来如果不进行系统干预,城市社区领域的资源能源消耗与碳排放还将大幅度增长,很可能成为中国实现“双碳”目标的巨大阻力。

通过社区绿色更新改造推进社区减碳具有广阔应用场景。2020年起国家开始将老旧小区改造定义为重大民生工程和发展工程^[5],提出到“十四五”期末,力争基本完成2000年底前建成需改造城镇老旧小区改造任务,涉及约22万个小区。2020年7月,住房和城乡建设部、国家发展改革委等6部门共同印发了《绿色社区创建行动方案》,倡导将绿色发展理念贯穿社区设计、建设、管理和服务等活动的全过程,以简约适度、绿色低碳的方式,推进社区人居环境建设和整治。随着未来中国城市碳中和战略的逐步落地,社区低碳化改造工作将获得更多的政府政策与财政支持,但也急需更可靠的社区减碳研究提供科学支撑。

1.2 社区减碳的研究需求与进展

1.2.1 社区碳排放精准化测算需求

基于《IPCC国家温室气体清单编制指南》,我国编制并发布了省级和城市级宏观尺度单元的温室气体清单编制指南,包括能源、农业、土地利用和林业、工业过程和产品使用、废弃物等5个大类,

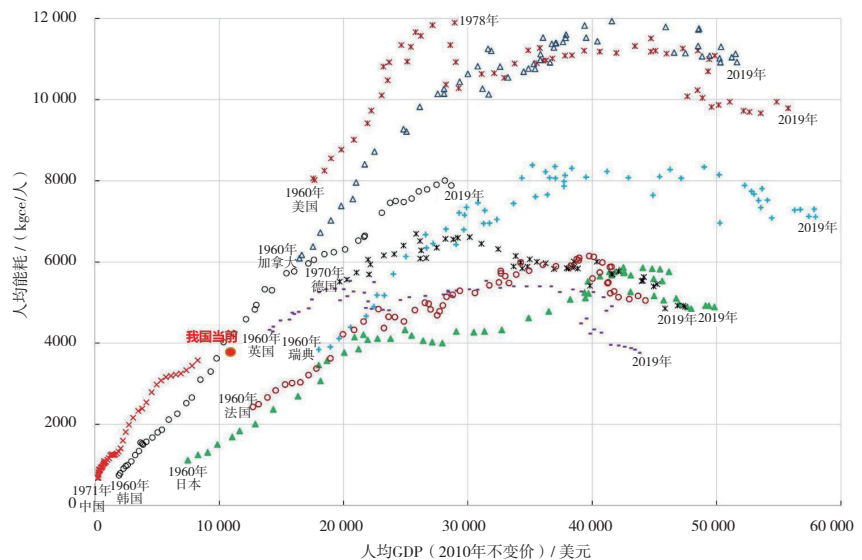


图1 部分发达国家人均总能耗与人均GDP关系趋势图

Fig.1 Relationships between total energy consumption per capita and GDP per capita in selected developed countries
资料来源:中国环境与发展国际合作委员会《“双碳”目标下的社区绿色更新研究:重大绿色技术创新及其实施机制研究》课题,2021

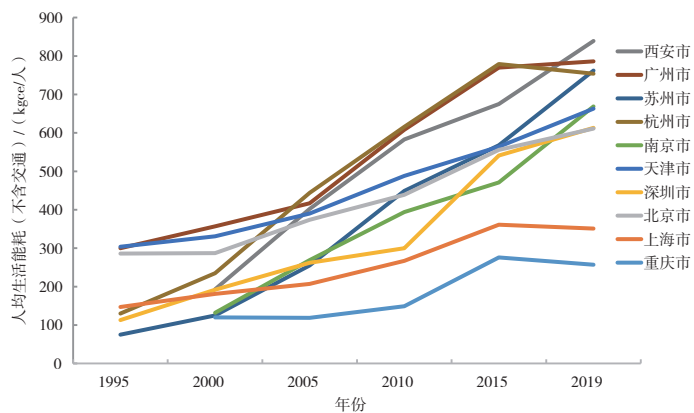


图2 10个城市人均生活能耗统计

Fig.2 Statistics of energy consumption per capita in 10 cities
资料来源:中国环境与发展国际合作委员会《“双碳”目标下的社区绿色更新研究:重大绿色技术创新及其实施机制研究》课题,2021

通过总消费量和分部门统计方式进行估算,而社区作为应对全球气候变化的重要行动单元,尚未建立统一的碳排放测算体系。

社区碳排一般包含三部分,一是社区地理边界内温室气体的直接排放;二是社区所消耗的电力、热力等在运输过程中的间接排放;三是跨边界交通和废弃物处理产生的移动排放。专家学者们构建了多种社区碳排放水平计算模型,主要测算指标包括社区能源消耗、交通出行、废弃物^[6],也有研究增加了居民呼吸、食物衣物消耗、水资源利用^[7],以及

公共绿地碳补偿指标^[8]。由于碳排放测算标准体系的缺位,国内还未形成一套公认的社区低碳水平的评价体系和标准,无法衡量社区的低碳水平和长期跟踪社区碳排变化与建设进展^[9]。

1.2.2 多因素影响下的低碳社区差异化建设需求

在社区尺度进行碳排放影响因素研究不多,多以单个城市为案例,往往受限于社区差异,研究结果不尽相同。杨选梅等^[6]对南京1000个家庭碳排放情况的研究,发现常住人口数量、交通出行和住房面积为影响家庭碳排放的三大显

著因素。朱雪梅等^[10]对广州2045个家庭的碳排放研究,发现居住区类型、收入群体、住房面积在家庭碳排放上具有显著差异。因此,基于统一的研究方法和评价标准,对不同城市、不同类型的社区进行比较研究并揭示影响因素差异的内在原因很有必要。

1.2.3 绿色技术和低碳生活的多元化引导需求

近年,国内对城市街区减碳技术研究已逐步形成基于效能平衡遴选兼顾可实施性的减碳技术体系与实施策略^[11],对社区减碳策略的研究仍处于起步阶段:一是对国外低碳社区先行实践案例的总结,形成了包括建造节能建筑、利用新能源、采用环保材料、优化社区用地、倡导绿色交通、倡导公众参与等具体减碳措施建议^[12-13];二是对国内低碳社区试点建设的行动和典型做法归纳,包括低碳管理方式、建筑低碳化改造、低碳基础设施、低碳文化和生活方式、社区环境优美宜居等^[14],总体包括绿色技术和低碳生活两大方面。但现阶段也存在国外经验与国内实践衔接不足,国内试点工作缺少减碳效果评估检验等现实问题,低碳策略的科学性和有效性还有待研究。

总体来看,我国社区减碳研究尚处于起步阶段,还无法从社区碳计量、碳排放特征及影响因素、减碳策略等零星碎片化的研究中找到系统可靠的更新路径。本文从居民行为视角出发,围绕居民用能、出行、衣食生活等典型碳消费行为计算碳排放,结合绿地固碳部分,构建评估社区碳排放水平的全口径核算模型。分析五个案例社区碳排放特征,并通过社区横向比较,揭示社区碳排放与社会影响因素、建成环境影响因素的内在关系。这一研究将为社区绿色更新提供关键的绿色技术与低碳生活方式引导支撑。

1.3 城市社区绿色更新的研究路径

本文从居民行为视角,对城市社区碳计量、特征及影响因素进行实证研究。首先,围绕居民用能、出行、衣食生活等典型碳消费行为计算碳排放,减去绿地固碳部分,构建综合评估社区碳排放水平的全口径核算模型。选取四个城市

的五个典型社区,分析案例社区碳排放特征,并通过社区横向比较,揭示社区碳排放与社会影响因素、建成环境影响因素的内在关系。这一研究将为社区绿色更新提供关键的绿色技术与低碳生活方式引导支撑。

2 居民行为视角下的社区碳排放核算模型建构

2.1 居民行为视角下社区碳排放量测算的四个维度

社区碳排放量测算维度的选取一方面借鉴既有社区碳排放研究,另一方面从居民行为视角出发,考虑实地调研居民活动数据可获得性,最终明确为社区用能、居民出行、衣食生活和绿化固碳等四个维度。社区用能方面统计社区内消耗的主要能源在生产和运输途中释放的碳排放量;居民出行方面统计社区内居民出行过程碳排放量,出行活动不一定发生在街区范围内;衣食生活方面统计社区废弃物处理的全过程碳排放量;绿化固碳方面统计社区绿地的碳吸收量。

2.2 社区碳排放核算模型建构与参数选取

借鉴各类研究中碳排放核算方法,根据社区可获取数据进行模型构建,并依据相关研究更正参数,最终形成本次研究的社区碳排放核算模型:

$$E = E_e + E_m + E_l - E_g$$

E 指街区碳排放总量, E_e 指社区用能碳排放总量, E_m 指居民出行碳排放总量, E_l 指衣食生活碳排放总量, E_g 指绿化固碳总量。

2.2.1 社区用能碳排放计算方法

社区用能碳排放总量(E_e)包括社区消耗的电能、燃气、水等三大主要能源在生产、运输、使用过程中的全过程碳排放。计算公式为:

$$E_e = E_{电} + E_{燃气} + E_{水}$$

其中:

$$E_{电} = Q_{电} \times f_{电}$$

$$E_{燃气} = Q_{燃气} \times f_{燃气}$$

$$E_{水} = Q_{水} \times f_{水}$$

Q 指各类用能总量, f 指各类用能的碳排放因子。 $f_{燃气} = 2.2\text{kg}/\text{m}^3$ ^[15], $f_{水} = 0.3\text{kg}/\text{t}$ ^[16]。各区域电网排放因子差别较大, $f_{电}$ 采用社区所属

区域电网的排放因子计算^①。

2.2.2 居民出行碳排放计算方法

居民出行碳排放总量(E_m)为每人每次始于社区范围的出行碳排放量总和。计算公式为:

$$E_m = \sum_k A_k \cdot L_k \cdot GHG_k$$

A_k 指交通方式k的出行频次, L_k 指交通方式k的出行距离,出行信息通过居民出行调查获得,出行距离通过手机信令数据获取。 GHG_k 指交通方式k的碳排放因子,具体如表1。

2.2.3 衣食生活碳排放计算方法

衣食生活碳排放总量(E_l)主要统计社区排放的固废和污水处理全过程碳排放,以及居民消耗的食物全过程碳排放。计算公式为:

$$E_l = E_{固废} + E_{污水} + E_{食物}$$

其中:

$$E_{固废} = W_{固废} \times f_{固废}$$

$$E_{污水} = W_{污水} \times f_{污水}$$

$$E_{食物} = P \times f_{食物}$$

$W_{固废}$ 指固废产生量, $W_{污水}$ 指污水产生量, $f_{固废}$ 指固废处理碳排放因子,固废处理碳排放因子取当地数值,垃圾分类地区参考欧美国家系数 $0.62\text{kg}/\text{kg}$, $f_{污水}$ 指污水处理碳排放因子 $6.7 \times 10^{-4}\text{kg}/\text{k}$ ^[14], P 指人口密度, $f_{食物}$ 指年人均食物消耗碳排放量 $62.8\text{kg}/(\text{人} \cdot \text{年})$ ^[3]。

2.2.4 绿化固碳的计算方法

绿化固碳总量(E_g)主要计算社区成规模的绿化空间碳吸收量。计算公式为:

$$E_g = O \times T \times S$$

O 指绿地 CO_2 吸收量,取 $62\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[17], T 指各市光合作用有效天数, S 指绿地面积。

3 社区碳排放的实证研究与特征分析

3.1 基于社会 and 物质两方面因素的案例社区选择

3.1.1 多类型案例社区选取

研究案例选取综合考虑了社区的社会条件和物质条件。社区碳排放影响因素多样,总体可分为社会因素和物质因素两大类。研究案例的选择考虑了不同经济水平、家庭结构、居住形态等社会因素,以及区位条件、建筑布局形态、建筑质量和绿色技术等物质因素,以期对多类社区碳排放进行全面讨论。研究

案例选择了位于4座城市的5个社区，分别为上海世博家园社区、上海景江苑社区、深圳和一社区、衢州江山东塘社区以及重庆红育坡社区。

3.1.2 案例社区经济社会及物质空间现状条件

5个案例社区建设物质条件及居民社会条件都存在差异，特征明显（表2）。上海世博家园和景江苑社区属于标准的城市生活社区，两者区位相近、条件相似，距中心城15 km，周边有轨道交通和完善的社区生活圈覆盖，住户以核心家庭为主。两者主要区别在于建筑技术，世博家园住宅使用了保温隔热墙体和双层玻璃窗两项绿色技术。深圳和一社区是近年新建于工业园区旁的城中村租赁型年轻社区，住户多为年轻制造工人，人均居住面积小，公服配套不足。衢州江山东塘社区是低收入的私有产权社区，受教育水平及收入水平相较最低，紧邻市中心公共服务设施，建筑质量较差，市政配套较落后。重庆红育坡社区是老龄化明显的老旧社区，位于城市中心区，轨道交通条件便利，但社区公共环境和配套设施品质较差。

3.2 社区居民生活碳排放计量与特征分析

3.2.1 社区居民生活数据采集与计量

居民生活数据采集与碳计量方法相关，包括自上而下和自下而上两种。本次研究主要通过自下而上抽样收集5个社区居民2020年家庭电、水和燃气的月均使用量，居民出行频次及出行距离数据通过手机信令数据获得，出行方式参考优势出行距离的交通方式分担率的相关研究，固废排放和食物消费数据通过社区和物业获取。根据社区碳排放核算模型计算可得各社区居民2020年的人均碳排放量、单位居住面积碳排放量以及4个维度的碳排放结构。

3.2.2 社区居民生活碳排放量与碳排结构分析

案例社区碳排放总量及结构均存在明显差异，整体呈现3个层次碳排放水平和两类碳排放结构特征（图3）。从人均碳排放总量来看，5个社区碳排放量差距较大，呈现3个层级。上海两个社区高碳排特征明显，是其他社区的两倍左

表1 各类交通方式排放因子

Tab.1 Emission factors for different modes of transport

交通方式	排放因子(kg/km ²)			
	北京碳减排研究	广州碳减排研究	深圳道路交通碳减排研究	上海通勤碳减排研究
小汽车	0.250 0	0.233 1	0.240	0.163 0
轨道交通	0.028 6	0.020 9	0.026	0.007 3
常规公交	0.054 0	0.026 0	—	0.021 3
骑行	0.007 2	—	—	0.015 3
货车	—	—	0.388	—
班车	—	0.020 3	—	0.026 6

资料来源：中国环境与发展国际合作委员会《重大绿色技术创新及其实施机制研究》课题

表2 案例社区经济社会和物质空间条件信息一览表

Tab.2 Information on economic, social, physical, and spatial conditions of case communities

社区		世博家园	景江苑	和一社区	江山东塘社区	红育坡社区
基本情况	特征	有低碳技术的城市标准社区	无低碳技术的城市标准社区	城中村租赁型年轻社区	低收入的老旧社区	单位大院式老龄化社区
	位置	上海市闵行区浦江镇	上海市闵行区浦江镇	深圳市宝安区沙井街道	江山老城区核心	重庆市九龙坡区
	建设时间	2006年	2004年	2010年	1990年代	1970、1980年代
	居民数量/人	10 119	6268	约9000	1734	约16 000
经济社会条件	收入水平	中等偏高	中等	较低	较低	中等
	社区居民家庭结构	核心家庭	核心家庭	单双人租户	核心家庭	主干家庭
	老龄化率(60岁及以上)/%	35	22	1	13	60
	租赁比例/%	20	29	98	0	60
物质空间统计条件	产权情况	商品房	商品房	农村集体产权	私有产权	私有产权和商品房混合
	区位条件	距市中心15 km	距市中心15 km	紧邻产业园区	市中心	市传统商贸中心
	公共绿地	小区中心公园绿地及组团间绿地	小区中心公园绿地及组团间绿地	无绿地公园	零星绿地	组团间绿地
	建筑层数	多层与小高层	多层	多层	低层	小高层为主，少量多层
	建筑质量	良好	良好	良好	较差	较差
是否采用低碳技术	是	否	否	否	否	

右，重庆红育坡社区碳排放处于中间水平，深圳和一社区以及衢州江山东塘社区均为低碳排社区。从细分维度来看，3个层级的差距主要体现在社区用能，其次是居民出行。上海两案例的社区用能碳排放是其他社区的3至4倍，居民出行碳排放也显著较高。衣食生活方面主要统计了废弃物处理，上海因采用垃圾分类社区碳排更低。绿化固碳维度上，上海两社区及红育坡社区有一定规模社区集中绿地，但绿地总体面积不大、固碳量较小。

从单位居住面积碳排放来看，也大

致分为3个层级（图4）。上海两个社区和重庆红育坡社区单位居住面积碳排放量相近，高居住密度的和一社区显著较高，低收入老旧小区东塘社区则明显较其他社区低。

从碳排放结构来看，社区碳排放结构大致可分为社区用能主导型和衣食生活主导型。上海两社区以及重庆红育坡社区是社区用能主导型碳排放结构，社区用能约占总碳排40%—55%，出行碳排约占20%—30%，衣食生活碳排约占20%—40%。和一和东塘社区则是衣食生活主导型碳排放结构，衣食生活约占

50%—65%，社区用能仅占30%，居民出行碳排比重最低；东塘社区居民出行碳排比重不足5%。5个社区的绿化固碳量都相对较低，对社区整体碳排放结构影响轻微，红育坡社区因总碳排较少，绿地固碳影响稍大。

3.3 5个典型社区碳排放的影响因素辨析

3.3.1 社会因素

在现状经济水平条件下，居民收入水平越高，人均碳排放越多。研究表明经济增长和碳排放呈倒“U”关系^[18-19]，拐点出现在人均GDP 10—18万元^[13,20-21]，拐点前居民碳排放与人均GDP正相关。案例社区均未达到拐点，居民的生活需求仍随着收入水平的提升而增加。世博家园和景江苑两社区居民收入水平最高，人均居住面积大，家用电器使用更频繁，小汽车保有率和机动化出行率也更高，这些都会引发碳排放增加。东塘社区所处城市经济水平相对较低，深圳和一社区住户多为周边电子厂工人，两社区居民收入水平较低，消费水平低，人均碳排

放量也随之降低。

日常行为对碳排放影响效果显著。不同社区居民的年龄结构、家庭模式、租赁比例等都会影响居民日常行为习惯，从而影响碳排放量。红育坡为老龄化社区，用能行为较为节约，人均碳排放相对较低。深圳和一社区出租率高，住户早出晚归，社区用能低。同一社区内部，如世博家园，老人节能意识强，用能较普通家庭低15%。

居住模式对单位面积碳排放水平影响明显。世博家园、锦江苑和红育坡社区均为常规商品房小区或单位居住大院，以家庭居住为主，虽居民用能强度不同、出行差异大，但单位面积碳排放相近。和一社区是高出租率、高人口密度的城中村，人均居住面积不足上海1/3，即使租户个人能耗水平低，单位面积碳排放仍远超其他社区。东塘社区是私有住房，管网设施水平落后，居民倾向于利用天然水源、自然通风，单位面积碳排放相当于普通住区一半。当然，居住模式对于碳排放的影响是复杂的，包括人群结构的差异、用地混合度等。

3.3.2 物质因素

社区周边功能混合度越高，越有助于降碳。功能高度混合特别是近距离职住平衡可大幅缩短居民出行距离，降低出行碳排放量。和一社区位于工业区周边，职住相对平衡，75%居民出行距离不超过3 km，出行方式多为步行和电动车，绿色的短距离通勤有助低碳出行。红育坡和东塘社区均位于中心城，周边设施齐全、公交便捷，居民出行距离短，出行碳排占比低。相反，上海两社区位处郊区，社区周边的工作供给小于住房供给，居民通勤时间和距离远高于其他社区，平均出行距离超过10 km，出行碳排比重最大。可见，更好的职住平衡将有助于大幅缩减居民总碳排。

建筑节能技术的降碳效果明显，但在应用时需考虑技术成本及后续维护。应用绿色技术的低碳社区通常比普通社区人均建筑能耗更低，比如位于相同区位、人口结构类似的世博家园人均能耗较景江苑更低。但由于应用的低碳技术不成熟，需要定期对墙面和屋顶进行维修，造成后续的高维护成本。绿色技术

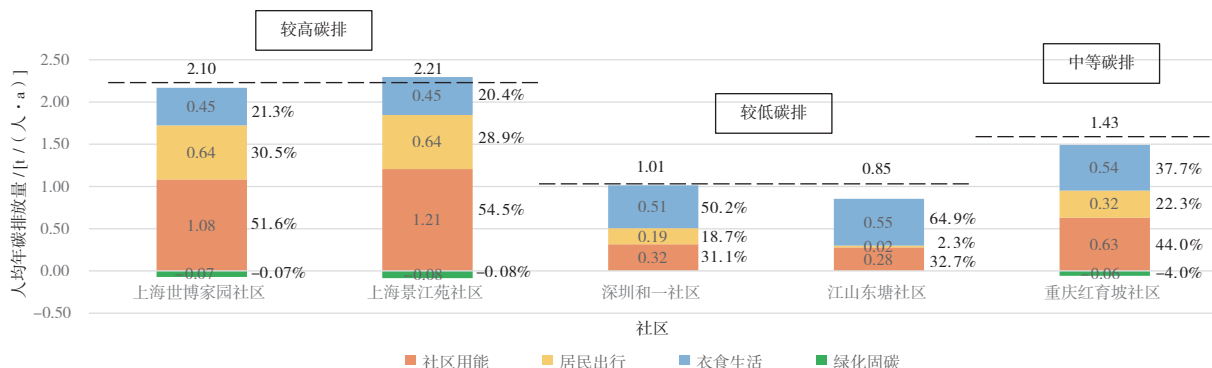


图3 案例社区人均年碳排放量结构图
Fig.3 Structure of annual per capita carbon emissions in the case communities

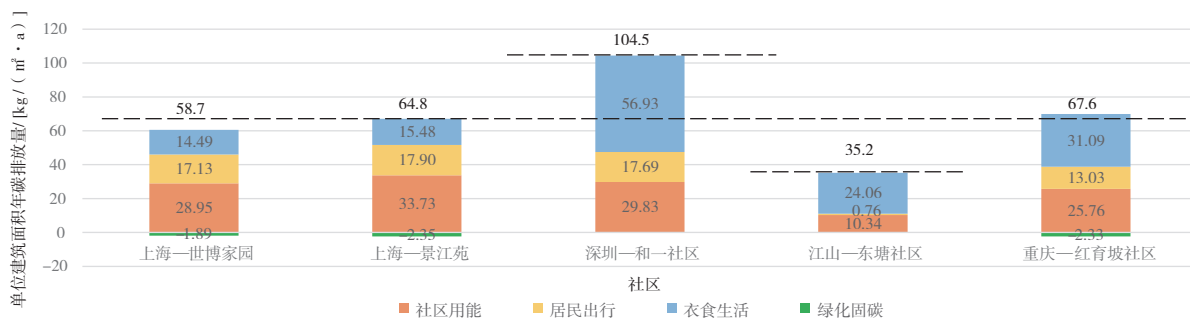


图4 案例社区单位面积年碳排放量结构图
Fig.4 Structure of annual carbon emissions per unit area of the case communities

成熟度及后续维护成本也应当纳入技术选择的考量。

建筑空间布局及设计对社区碳排放也存在影响。研究^[22-23]表明建筑布局、建筑密度、建筑高度等对住宅碳排放均存在影响，科学的建筑空间设计可实现更优良的居住环境，减少采光、控温需求，从而降低能耗。对比上海社区多层和高层建筑，高层建筑人均用电量是多层的1.3倍。

社区绿化的直接固碳能力有限，但对社区微气候以及居民生活方式有间接影响作用。较好的绿化空间布局结合良好的公共设施，可吸引居民进行更多户外活动，从而降低住宅内部能耗。世博家园社区内有小区中心公园绿地和广场，是老人、儿童常活动的室外空间。

4 城市社区减碳路径建议

根据国内外低碳社区减碳经验，社区减碳主要包括绿色低碳技术的应用和绿色生活方式的践行（图5）。绿色低碳技术从物质空间、设施工具等介入提升能源效率和绿能利用率，用能减碳包括社区微气候营造、绿色建筑更新、可再生能源利用等，出行减碳包括提升交通组织效率、使用低碳排的绿色交通工具等，生活减碳包括应用社区或家庭智慧节能系统、采用固废分类回收系统等，绿化固碳包括增加绿化面积、栽种高碳汇植物等。绿色生活方式通过引导居民行为方式转变助推社区碳排放的降低，倡导少用电器、亲近自然减少建筑用能，鼓励采用公共交通、共享出行、居家办公等降低出行能耗，引导居民节约资源、低碳饮食以减少消费碳排。总体而言，绿色低碳技术具有更大更稳定的减碳潜力，绿色生活方式需要通过制度设计等强化居民引导。

结合社区居民意愿调研和其他社区绿色更新经验，考虑社区减碳潜力，从社区空间规划、建筑技术、交通出行和生活消费方式提出可行有效的城市社区减碳措施。

4.1 改善社区微环境

社区形态影响居民的用能行为，最终影响到社区整体碳排放。改善社区微

环境的策略重点包括三个维度：第一，采用“中层中密度”的布局形式^[24]，在实现居住密度与人居环境品质相对平衡的同时，降低全生命周期维护成本和能耗；第二，采用小街区密路网的街道设计，增加连通度和公共界面，营造舒适、便捷的步行环境，减少私人小汽车的使用；第三，绿化采用公交导向开发，引导社区服务TOD街区布局，并提供多元化绿色接驳方式；第四，通过水体、乔木、立体绿化等生态景观设计，调节社区微气候。

4.2 推行绿色建造技术

建筑领域是改善社区用能的重要手段。绿色建造技术包括以下三个维度：首先，推动建筑营建、运营全过程减碳。推行绿色建造技术，优先使用低碳、无污染、低能耗的当地材料，以及经绿色建材认证的建材，提升装配式建造和装修的比例，降低营建过程能耗。采用能效提升改造技术，降低运营全过程能耗，包括更换节能门窗、增加遮阳设施、增加保温隔热层、采用浅色饰面等。其次，推进节能电器与设备、分布式能源等措施。在社区更新中利用闲置用地增建互补能源站，并整合传统能源与分布式能源及储能系统，实施多能互补能源供应技术。推动智慧能源管理技术，对社区能源供应系统进行智慧化改造，实现能源供需实时平衡。最后，推进建筑立体绿化技术。对建筑屋顶、架空层、阳台、窗台、墙面或其他部位进行绿色改造，包括建筑构造、维护管理系统、植物选择等。

4.3 改变交通出行方式

交通领域减排主要为出行方式引导和交通能源转变两方面。全国新能源汽车占比仅3.23%^[25]，能源转变在近期发挥主导作用。因此，近期重点是提高绿色交通的分担率，并通过有效的城市空间组织减少出行次数和距离。远期则是通过优化交通能源结构实现减排。重点包括：

一是提升步行和自行车出行品质。提升慢行出行方便性和舒适度，利用城市过街天桥、公共建筑、空间开放等实现慢行交通与家门和公共交通站点间的顺畅安全衔接，根据地形和气候条件增加垂直交通、有盖廊道、风雨连廊等形式多样连续步行道。二是优化公交及轨道接驳。通过设置慢行专用路，增设小区开口等，增加公交站点、轨道车站入口，提升公共交通吸引力。高峰时段开通社区巴士，改善公交地铁接驳难和有效覆盖等问题。三是共享交通精细化管理技术。按需科学配置共享交通工具的数量和规模，提高共享交通工具使用率。

4.4 优化生活方式和消费方式

生活方式和消费方式的转变是对降低碳排影响最深远的手段之一，应当尽早展开社区绿色生活方式的推广与实践，增强居民对绿色生活方式的接受度，推进节水、垃圾分类、节约食物等绿色生活方式。绿色生活方式倡导包括三个方面：一是低碳消费，侧重于消费品和消费过程的低碳化，提倡购买使用绿色低碳产品。这些产品能耗低，排放低，更耐用，也包括选用绿色出行、低碳饮食。二是减量使用，侧重于使用过程的减量化，减少家电、交通工具等使用过程的

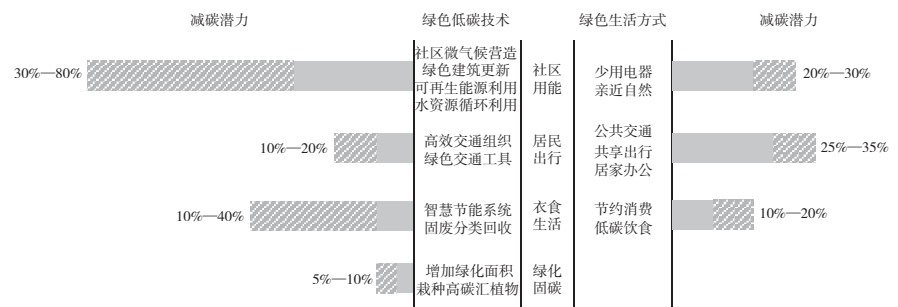


图5 社区减碳措施潜力图

Fig.5 Map of community carbon reduction potential for different measures

碳排放。三是缩短碳链，侧重于活动链的缩减，指通过改变工作学习生活模式与场所，缩减通勤过程的碳排放。

4.5 加强政策支撑

政策支撑涉及能源、建筑、个人、交通、市政等多个领域。能源领域重点在于市场价格的调节机制，扩大峰谷时段电价差额，对节能技术与节能产品进行补贴，激活分布式发电市场等。建筑领域建立对建筑设计、施工、运营、拆除全生命周期监测与评估的方法和治理体系，推进绿色建筑全生命周期管理。建立家庭或个人减碳激励机制，可对能耗达到优秀标准的家庭，纳入个税专项扣除优惠；能耗超标严重的居民可申请政府补贴进行节能改造，并接受监测。交通领域推进交通低碳激励政策，包括低碳出行积分政策，老旧车辆淘汰补贴，低碳车船使用奖励优惠等；试点城市交通低碳排放区示范项目。市政领域改革水价，通过阶梯水价市场调节机制，促进节水和高效利用；实现城市、社区水资源与供排水能耗的协同治理；将新鲜水、雨水、再生水等多源水分质协同智慧管理，实现系统效率提升、用能降低、碳排减少。完善垃圾分类监管体制，制定奖惩措施，提高分出垃圾的质量；优化垃圾处理收费制度，促进垃圾源头减量；加快建立可回收物体系，引入市场机制，激励社会资本参与，促进可回收物回收增量和其他垃圾末端处置减量。

5 结语

社区是城市生活、居住的主要场所，如何在居民生活品质提高的同时实现“双碳”目标，是社区更新中面临的重要议题。如果不提前采取绿色技术与绿色生活方式的积极干预，社区更新将长期是城乡建设领域的降碳难题。

基于这一认识，笔者着眼于绿色技术的应用落实，综合考虑了社会经济和物质空间因素，选定4个城市中的5个社区作为案例，全方位定量分析碳排放的现状，识别社区碳排放未来发展趋势和去碳难点。基于对策略差异性和社区多元性的认识，研究得出以下几方面主要成果：①提出适于数据获取及长期跟踪

计算的社区碳排放核算模型；②提出了影响社区居民行为碳排放的因素，为后续低碳社区建设提供思考维度；③从居民行为角度在建筑、能源、交通、市政领域分别提出适于社区减碳的技术建议；④提出引导社区居民绿色生活方式的具体办法。希望对中国社区更新及低碳建设，在碳排放核算检测及绿色技术应用方面提供参考。

衷心感谢中国城市规划设计研究院学术信息中心、上海分院、西部分院、深圳分院、交通分院、生态市政院，以及深圳建筑科学研究院等单位的课题参与人员，感谢提供的思路启发、数据及技术支撑和研究帮助！

注释

① f_{ij} 具体参数来源于生态环境部《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》。

参考文献

[1] 何珍, 吴志强, 王紫琪, 等. 碳达峰路径与智力城镇化[J]. 城市规划学刊, 2021(6): 37-44.

[2] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J]. 城市规划学刊, 2021(4): 43-50.

[3] 仇保兴. 城市减碳三大领域的路径规划[J]. 城市规划学刊, 2022(5): 37-44.

[4] 余翔宇, 何京洋, 朱丹, 等. 既有社区低碳更新的路径与实践: 以上海7个社区为例[J]. 城市规划学刊, 2022(4): 111-119.

[5] 中共中央 国务院. 国务院办公厅关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见[R], 2020.

[6] 杨选梅, 葛幼松, 曾红鹰. 基于个体消费行为的家庭碳排放研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 35-40.

[7] 李杨. 深圳市华侨城社区建成环境碳评估研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

[8] 陈莎, 李懿佩, 程利平, 等. 基于LCA的北京市社区碳排放研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 5-9.

[9] 付琳, 张东雨, 杨秀. 低碳社区评价指标体系研究[J]. 环境保护, 2019, 47(15): 39-46.

[10] 朱雪梅, 江海燕, 肖荣波, 等. 广州居住区碳排放特征及对低碳社区的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 19-23.

[11] 吴浩, 林辰辉, 陈阳, 等. 基于全过程管控的城市街区减碳技术框架与实施策略: 以上海市数字江海产业园为例[J]. 城市规划学刊, 2022(S2): 59-65.

[12] 叶昌东, 周春山. 低碳社区建设框架与形式[J]. 现代城市研究, 2010, 25(8): 30-33.

[13] 高银霞, 王金亮, 何茂恒. 低碳社区建设浅谈[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(3): 40-43.

[14] 付琳, 杨秀, 狄洲. 我国低碳社区试点建设的做法、经验、挑战与建议[J]. 环境保护, 2020, 48(22): 62-66.

[15] IPCC2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategiess (IGES), 2006.

[16] 罗婷文. 北京城市家庭消费碳氮排放特征及影响因素分析[R]. 城市与区域生态国家重点实验室, 2007.

[17] 王娟, 简银鼎. 城市绿地生态效应[J]. 草原与草坪, 2004(4): 24-27.

[18] 朱欢, 郑洁, 赵秋运, 等. 经济增长、能源结构转型与二氧化碳排放: 基于面板数据的经验分析[J]. 经济与管理研究, 2020, 41(11): 19-34.

[19] 宋涛, 郑挺国, 佟连军. 环境污染与经济增长之间关联性的理论分析和计量检验[J]. 地理科学, 2007(2): 156-162.

[20] 方忠, 张华荣. 中国碳排放EKC的省域门限分组及其异质性检验[J]. 经济研究参考, 2019(21): 89-98.

[21] 姜亚. 中国经济增长、能源消费与碳排放互动关系: 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的实证分析[J]. 中南财经政法大学研究生学报, 2017(6): 27-35.

[22] 尚川. 基于软件模拟的街区尺度城市形态对建筑群能耗的影响研究[D]. 东南大学, 2019.

[23] 刁喆. 哈尔滨老城区街区尺度建筑布局对街区建筑能耗影响[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.

[24] 孙娟. 城市街区减碳规划方法集成体系[J]. 城市规划学刊, 2022(6): 102-109.

[25] 中国政府网. 全国新能源汽车保有量已突破1000万辆[EB/OL]. 2022-07-06. http://www.gov.cn/xinwen/2022-07/06/content_5699597.htm.