

城市街区减碳规划方法集成体系*

孙娟

Methodology of Integrated Planning Toward Urban Block-Level Carbon Reduction

SUN Juan

Abstract: In the latest stage of urbanization, urban development predominantly takes place at the meso and the micro scales. Therefore, it is of great practical significance to examine low-carbon development at the block level. However, many research questions remain to be answered, for example, how to quantitatively assess the application potential of carbon reduction technologies in the planning and development of low-carbon blocks, how to select high-efficiency carbon reduction technologies, and how to integrate various carbon-reduction technologies at the block scale. Based on the scenario assumption, this paper traces the carbon emission data at the block scale to evaluate the carbon reduction potential of low-carbon technologies in all dimensions. To balance the efficiency of carbon reduction technology and to optimize the urban form at the block level, the paper, starting from a system planning perspective, makes several proposals regarding the issues of efficient renewable energy system, methods for green and low-carbon building development, low-carbon transportation system, low-carbon urban form, public spaces with high carbon sink, green and resilient municipal infrastructure, convenient, and interconnected smart governance system.

Keywords: urban block; carbon reduction; planning methodology; integrated system; efficiency balance; system coordination

提要 进入城镇化后期,城市建设越来越聚焦在中微观尺度展开,城市街区成为一个基本建设单元。但是当前针对城市街区减碳规划建设过程中如何定量判断减碳技术的应用潜力,如何遴选高效能减碳技术,以及如何在街区空间中统筹集成各项减碳技术的研究尚显不足。在减碳技术层面,溯源街区尺度的碳排放核算方法,评估各维度低碳技术的减碳潜力,基于效能平衡遴选兼顾可实施性的减碳技术。在空间协同层面,基于强度匹配、空间预留等层面的不同需求,提出街区空间形态的优化策略。最终形成涵盖高效可再生的能源系统、绿色低碳的建筑建造、绿色出行的低碳交通、低碳化的布局形态、高碳汇的公共空间环境、绿色韧性的市政基础设施、便捷互联的智慧管治系统等7个维度的城市街区减碳规划方法集成体系。

关键词 城市街区;减碳;规划方法;集成体系;效能平衡;系统统筹

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202206014

文章编号 1000-3363(2022)06-0102-08

实现碳达峰碳中和,是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求,是推动构建人类命运共同体和实现可持续发展做出的重大战略决策。2021年10月,国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》,明确指出“加快推进城乡建设绿色低碳转型”。城乡建设领域作为减碳的关键领域,在不同空间尺度减碳关注的重点有所不同:国家和区域宏观尺度更多关注能源维度和工业维度的减碳,主要依赖能源革命与工业转型提升;微观尺度目前更关注建筑建造单一个体的减碳技术。随着中国城市发展逐渐进入存量转型阶段,城市建设活动主要在中微观尺度展开,街区尺度成为链接宏观和微观,面向实施落地的合理尺度。因此,本文聚焦“城市街区”尺度,以平衡街区减碳技术协同效能、优化街区空间形态为目标,提出具有实践价值的城市街区减碳规划方法集成体系。

1 “城市街区”和“城市街区减碳”

1.1 “城市街区”理论溯源与概念界定

在城市规划语境下,城市“街区(block)”指城市建成区内通过自然边界或街道等界定的区域,是城市空间结构的最小组成单位^[1]。从古希腊时期的“希波丹姆模式”

作者简介

孙娟,清华大学建筑学院2019级创新领军工程博士研究生,中国城市规划规划设计研究院上海分院院长、教授级高级工程师,26061345@qq.com

*国家重点研发计划“基于城市可持续发展的规划建设与治理理论和方法”项目课题“城市存量空间评估与优化技术”资助(课题编号2022YFC3800204)

到“邻里单元”再到如今兴起的“社区生活圈”^[2]，随着近现代城市规划理论的发展，“街区”作为城市肌理的最小组成单位，空间尺度逐渐稳固，功能内涵不断丰富（表1）^[3-5]。

从尺度看，街区通常在几十公顷至3 km²左右，处于单独建筑的个体性与复杂建筑环境的群体性之间，发挥了中间尺度的协调作用^[6]。从功能看，街区将开敞空间与居住、商业服务及文化娱乐等多种城市活动有机组合，构成邻里生活的基本单位^[7]。街道、用地、建筑与开敞空间、功能混合、私密性及公共性是构成街区内涵的关键要素^[8]。从国际绿色低碳相关标准看，尽管未直接使用block这一名词，但其空间层次及尺度与街区具有内在一致性。如LEED-Neighborhood Development中使用“neighborhood”的表述，社区尺度最大为6 km²。BREEAM Communities中使用“community”的表述，社区尺度的面积为2—180 hm²。CASBEE for Urban Development中划分为建筑（含住宅）、街区（group of buildings）及城市3个层次，其中街区的范围界定为几公顷至几百公顷。

综上，本研究中将“城市街区”概念界定如下：城市街区是指由城市道路或生态边界要素围合而成，面积在几公顷到几百公顷，具有就业、居住、公共服务等混合功能的区域。

1.2 城市街区作为规划减碳基本单元的重大意义

为了应对气候变化，世界各国相继提出“正能量街区”“净零能耗区”“负排放街区”“可持续街区”等概念，出现了包括法国拉弗勒里耶正能量街区（PED）、美国旧金山波特雷罗发电厂可持续街区（PPS）、新加坡登加新镇等一系列街区尺度的绿色低碳实践。随着我国城镇化进入下半场，城市建设逐渐聚焦至中小尺度，中国的绿色低碳实践也逐渐由几十到几百平方公里的绿色生态城区向1 km²左右的绿色低碳试点区转变。城市街区凭借其紧凑的空间尺度与混合的功能布局在资源循环和低碳生活方式引导方面具有先天优势，正成为承载城市绿色低碳发展的基本空间单元。

城市街区是基本的能源单元，是能

表1 城市街区理论缘起与演进一览表

Tab.1 List of origin and evolution of urban block theory

时期	相关理论	理论提出	街区尺度	主要观点
公元前5世纪	希波丹姆模式	希波丹姆	30 m×30 m	正交的道路系统，形成十字格网
1853—1882年	巴黎奥斯曼改造	奥斯曼	100 m×150 m	道路有所扩大，疏解城市交通
1929年	邻里单元理论	C.A.佩里	0.6 km ²	邻里中心包括社会设备（小学、宗教场所、绿地草地和社区中心）和团体机构，片区内约10%的土地面积作为土地和开放空间
1960年	街道理论	简·雅各布斯	—	多样性是维持城市街区活力的重要因素
1980年代	新都市主义-TND模式	彼得·卡尔索普	50 hm ²	社区的基本单元是邻里，最佳规模半径为400 m
	新都市主义-TOD模式		1 km ²	一个多功能区域，将居住、零售、办公、开放空间和其他公用设施混合在一个适于步行的环境里
	绿色尺度	刘易斯·芒福德	35 hm ²	街区范围的划定应当以步行的舒适距离为基本出发点，居住人口不超过1.5万人
2014年至今	社区生活圈理论	日本第三次《全国综合开发计划》等	1—3 km ²	步行15—20 min以内的生活范围，基本满足人民日常生活的基本需要
2020年	15分钟城市	卡洛斯·莫雷诺	1—3 km ²	除了健康、购物、教育之外，把工作场所也纳入15 min出行范围之内

量和物质循环流动的合理尺度。能源革命的到来推动我国进入集中式与分布式能源利用并举的新时代。考虑到分布式能源系统中电力供给、蒸汽供给、热水供给等各项终端供能的最大直供半径一般在1—2 km，覆盖范围通常在1—3 km²^[9]。城市街区空间尺度与分布式能源系统所对应的最优供应范围匹配，能够发挥最高能源利用效率和实现最佳经济效益。

城市街区是基本的人居单元，街区中市民的生活方式与城市绿色低碳发展水平息息相关。亲近自然的生活习惯、云端轻量的就业形式、绿色共享的出行方式都将深刻影响城市居民的碳排放。我国打造的3 km²左右的15 min社区生活圈，是提升日常便捷度与承载生活幸福感的空间单元。低碳街区与15 min生活圈的空间尺度相当，能够通过空间场所的优化与塑造，协调、推动、引导居民选择绿色低碳的生活方式。

1.3 当前城市街区减碳面临的核心挑战

一方面，街区层面减碳研究侧重研究城市碳排放的计算方法，分析碳排放的影响机制^[9-10]，但是对于如何定量判断各类减碳技术贡献的研究较为缺乏，导致在低碳街区开发建设中出现过度追求前沿技术，忽略了经济成本与减碳效用的平衡。部分地区存在盲目提升超低能耗、近零能耗建筑比例，但从国内各地住建部门的补贴和工程实践来看，超低能耗建筑的增量成本在1000—1200元/m²^[11]，近零能耗建筑、零碳建筑、产能建筑建设增量成本则会更高。此类前沿减碳技术的大规模使用将对街区开发带来沉重

的经济负担，影响技术落地的可行性，最终导致规模效应难以实现。

另一方面，既有研究侧重研究工程减碳技术和形态学的优化方法，提出原则性的规划减碳策略^[12-17]，但是对于如何建立与空间更匹配的街区减碳技术集成系统的研究尚处于起步阶段，导致在低碳街区的建设中往往缺乏系统集成与空间匹配的统筹施策。规划减碳技术在单一维度研究上比较成熟，但不同系统的减碳技术之间既有协同也有矛盾，如何利用其协同效能建立街区减碳集成体系，尚处于起步阶段。同时，不同类型的减碳技术对于适用的街区类型以及空间落位的要求均有所不同，面向诸如屋顶绿化和光伏屋面争抢空间、分布式能源中心落地选址等现实问题，如何解决减碳技术与城市空间耦合运用的问题，当前也仍未形成系统的理论支撑和统一的建设标准。

2 效能平衡：基于“潜力-成本”矩阵的减碳技术遴选

随着“双碳”战略对我国建设领域低碳发展提出全新要求，不同领域的减碳技术进入快速发展、不断迭代的阶段。层出不穷的减碳技术在多大程度上影响城市街区的碳排放并不清晰，因此本文通过溯源街区碳排放关键维度建立街区减碳技术簇群，并通过情景假设测度评估不同类型减碳技术的潜力与成本增量。

2.1 基于碳排放关键维度的街区减碳技术簇群

通常情况下，碳排放的核算维度将随

着尺度的减小从供给端向消费端转移^[18]。本次研究在街区尺度重新归纳 IPCC (2019) 四大排放部门^[19]的细分内容: 建筑维度对应能源部门中建筑能源使用所产生的碳排放; 交通维度对应能源部门中移动端的燃料燃烧所产生的碳排放; 资源维度对应废弃物部门中固体废弃物及废水处理中产生的碳排放; 绿色碳汇维度对应土地中各类植物碳汇量的差值。考虑到城市街区范围内工业生产、农林种植等活动较少, 故工业过程及产品、农业、林业和其他土地利用维度的碳排放不纳入本次城市街区碳排放的关键维度 (图1)。

与碳排放的关键维度相对应, 本次研究重点考虑源头供应、过程削减、系统流转、末端捕集等减碳技术需求, 从当前5大类18项子类技术66项亚类技术^②中, 依据技术的成熟程度以及适用的空间尺度, 梳理形成能源供应、建筑运行、交通通勤、资源循环和碳汇增强5大街区减碳技术簇群 (图2), 讨论其减碳潜力的测度方法及关键影响指标 (表2)。

在能源供应方面, 城市街区的减碳目标: 一是提升可再生能源的利用率, 降低高碳排的能源使用比例; 二是提升能源的使用效率, 减少不必要的能源浪费。适宜街区尺度的能源减碳技术主要包括光伏技术、光热技术、热泵技术、分布式供能技术等。光伏、光热、热泵技术利用太阳能、地热能等可再生能源可降低传统燃煤发电所带来的碳排放。以冷热电三联供为代表的分布式供能技术则通过余热利用将能源综合利用率提升至70%—90%, 较传统的燃煤电厂增加30%—50%左右。通过估算街区的能量需求预测分布式能源站、建筑光伏、建筑光热的装机容量及各自运行小时, 测度能源减碳技术的减碳潜力。

在建筑运行方面, 碳排放主要来自建筑运营阶段的直接和间接能源消耗, 因此街区建筑减碳关键在于持续提升建筑节能水平。除了绿色建筑外, 超低能耗 (近零能耗) 建筑通过高性能围护结构、新风热回收技术等最新技术节能值较普通民用建筑单位面积节能50% (近零能耗建筑节能值达75%), 是当前街区尺度建筑减碳的重要抓手。超低能耗建筑的维护结构、暖通空调等具体设计多为建筑领域讨论重点, 在规划层面, 通

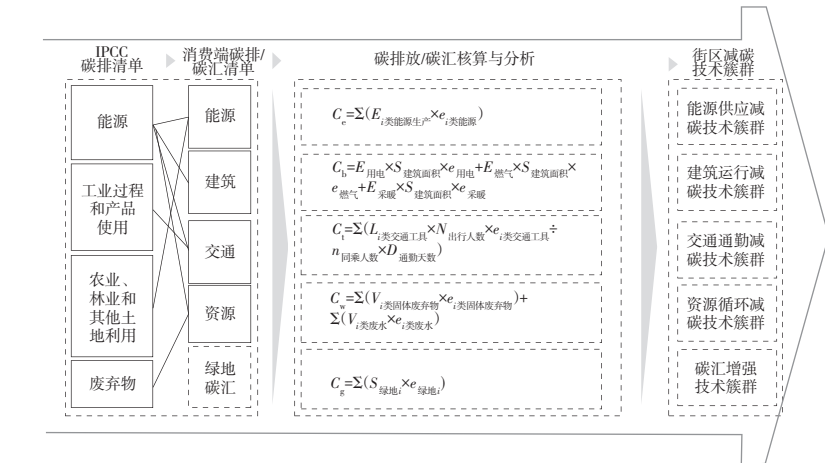


图1 基于碳排放核算维度的城市街区减碳技术簇群图

Fig.1 Cluster diagram of carbon reduction technologies in urban districts based on carbon emission accounting

注释: 碳排放、碳汇公式参考IPCC排放清单的计算方法, 即碳排放量=活动数据×排放因子。 C_e 为街区能源生产所产生的碳排放, $E_{i, \text{类能源生产}}$ 为街区第*i*类能源生产量, $e_{i, \text{类能源}}$ 为第*i*类能源的碳排放系数, C_b 为建筑维度的碳排放量, $E_{\text{用电}}$ 为单位面积建筑用电能耗, $E_{\text{燃气}}$ 为单位面积建筑燃气能耗, $E_{\text{采暖}}$ 为单位面积建筑采暖能耗, $S_{\text{建筑面积}}$ 为建筑面积, $e_{\text{用电}}$ 为建筑用电的碳排放系数, $e_{\text{燃气}}$ 为建筑用燃气的碳排放系数, $e_{\text{采暖}}$ 为建筑采暖的碳排放系数, C_t 为交通维度的碳排放量, $L_{i, \text{类交通工具}}$ 为第*i*类交通工具的平均通勤距离, $N_{\text{出行人数}}$ 为该交通工具的使用人数, $e_{i, \text{类交通工具}}$ 为第*i*类交通工具的碳排放系数, $n_{\text{同乘人数}}$ 为第*i*类交通工具的平均载客量, $D_{\text{通勤天数}}$ 为第*i*类交通方式的全年通勤天数, C_w 为废弃物处理产生的碳排放量, $V_{i, \text{类固体废物}}$ 为第*i*类固体废弃物的总量, $e_{i, \text{类固体废物}}$ 为第*i*类固体废弃物处理的碳排放系数, $V_{i, \text{类废水}}$ 为第*i*类废水的总量, $e_{i, \text{类废水}}$ 为第*i*类废水处理的碳排放系数, C_g 为街区绿地产生的碳汇量, $S_{\text{绿地}}$ 为第*i*类绿地的面积, $e_{\text{绿地}}$ 为第*i*类绿地的单位面积碳汇量。

过计算应用超低能耗和近零能耗建筑的面积比例, 测度低碳建筑运行过程中的减碳潜力。

在绿色交通方面, 城市街区的减碳目标: 一是提高交通电气化水平, 提升街区出行用能中清洁能源利用比例; 二是构建绿色共享的出行模式, 提升街区的绿色出行比例、降低通勤距离。在街区尺度的减碳技术主要包括新能源汽车相关配套基础设施建设以及以MaaS平台为代表的智能共享出行技术等。通过计算新能源汽车出行替代比例、绿色出行比例增量、通勤距离减量等指标, 测度街区各类交通减碳技术的减碳潜力。

在基础设施方面, 固体废弃物以及废水处理所产生的碳排放占据了街区碳排放中的重要部分。整个城市系统资源大循环的建立以及垃圾焚烧厂、污水处理厂等终端处理技术的提升固然重要, 但是聚焦到街区尺度, 核心需要运用生活垃圾气力回收系统、建筑垃圾迭代等固废循环技术, 降低街区固废总量; 运用透水铺装、下凹绿地、地下调蓄池等水循环技术降低街区水资源消耗。通过计算街区固体废弃物及水资源的减少量即可测度资源减碳技术的减碳潜力。

在碳汇增强方面, 根据碳汇公式,

减碳的关键在于增加绿色空间规模面积和碳汇效率, 街区尺度的减碳技术主要涉及立体绿化以及植被优化技术。同等面积的绿色空间, 乔木和灌木的碳汇量是草坪碳汇量的数百倍^[20], 因此城市街区应优先选择乔木、灌木等高效固碳植被类型。立体绿化对于碳汇总量的增加相对有限, 但是其在节能滞尘、降低噪声、缓解城市热岛效应方面仍起到了显著作用。通过计算增加的立体绿化面积以及新增乔灌木面积, 对碳汇增加技术簇群的减碳潜力进行测度。

2.2 基于情景模拟的减碳技术潜力评估

为了定量核算各项技术的减碳潜力, 本文假设一处位于上海占地面积1 km², 建设规模160万m²的混合街区, 其中: 居住80万m²、办公60万m²、商业15万m²、酒店5万m²; 居住人口2万人, 办公人数为1.5万人。街区内部的各维度活动数据参考上海市平均水平^⑤。根据情景假设对样本街区碳排放进行定量核算, 年碳排放总量为95 071.8 t (表3)。其中: 建筑维度碳排放主要由建筑用能产生, 占街区整体碳排放的87.7%, 是街区碳排的主体; 交通与资源维度贡献相当, 分别占5.9%和8.2%; 街区尺度绿色空间占比

普遍较低，因此碳汇减碳量较少，占比为-1.7%。

根据样本街区的建设强度和用能现状，预判不同类型减碳技术的应用规模，通过减碳公式核算各项减碳技术的减碳潜力，形成高低两类减碳情景。如表4所示，现有的减碳技术通常能在现状的基础上实现30%—60%的碳排放减量。拆解到不同维度，能源减碳技术中分布式供能技术三联供减碳潜力最大，一般在20%—25%；建筑光伏和热泵技术单体减碳量一般，但规模化使用后减碳潜力将达到5%—20%；建筑光热技术的减碳潜力则相对较低。在建筑运行维度，通过超低能耗建筑、近零能耗建筑等技术手段，一般可以实现10%左右的减碳潜力。在交通维度，交通电气化与交通系统的提升在街区尺度难以定量，参考虹桥绿色生态城区等地区先进水平，一般可以实现2%左右的减碳潜力。资源设施层面的减碳策略核心在于形成资源循环网络，提升资源回收利用率，结合情景假设并对标国内先进水平，该维度的减碳潜力为1%—5%。碳汇维度对于街区减碳量的贡献较小，一般不超过3%。

2.3 面向实施推广的街区减碳技术遴选

要想达到街区减碳目标，不应简单追求各项减碳技术的潜力最优，同时应考虑在实际建设过程中的经济可行性。基于减碳潜力的评估结果，对比减碳技术在建设过程中的成本增量，构建“潜力-成本”矩阵，为街区减碳技术的合理运用提供遴选依据。

从减碳潜力方面看，能源供给减碳技术集群和建筑运行减碳技术集群的减碳潜力较大，分布式供能技术、余热利用技术、建筑光伏技术以及水源热泵技术在规模配置得当时，通常带来15%—30%减碳量，对于街区减碳起到了决定性作用。地源热泵、空气源热泵、建筑光热、超低能耗（近零能耗）技术通常带来5%—15%减碳量，属于中等潜力的减碳技术。绿色交通、基础设施减碳和碳汇增强技术集群由于初始碳排放的占比比重较低，其中的交通电气化、固废循环、废水处理、立体绿化、乔灌木配置等减碳技术的减碳量通常不超过3%。虽然此类减碳技术在减碳层面仅仅称得上是锦

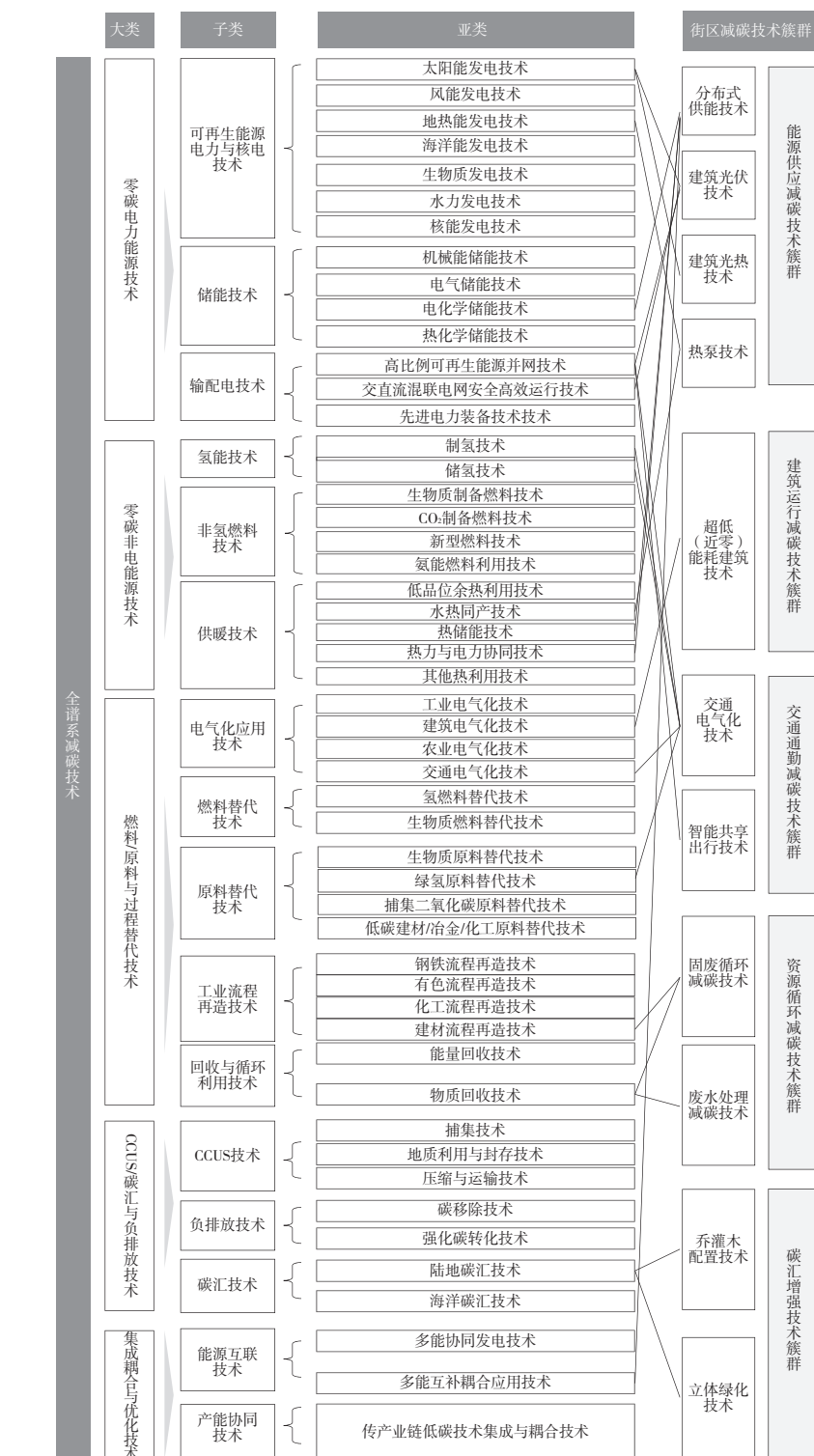


图2 街区减碳技术筛选图

Fig.2 Screening of block carbon reduction technologies

上添花，但是对于整个街区的生态保护、环境提升仍具备较大的正向作用。

从成本增量方面看，超低能耗建筑减碳技术的成本增量最高，通常为1000—3000元/m²不等，规模化应用后的

成本增量一般大于3亿元/km²，位于第一梯队。分布式供能技术涉及设备使用、管道建设、运营平台搭建等多方面的成本增量，单个成本增量可达1亿元左右；建筑光伏根据材料与安装工艺的不同，

表2 城市街区减碳技术潜力测度及关键要素表

Tab.2 Potential measurement and key elements of carbon reduction technologies in urban blocks

减碳维度	技术名称	减碳公式	关键指标
能源供应 减碳技术	分布式供能技术	减碳量=(上网电量+制冷量+供热量)×1.2×2.6-发电量/发电机效率×3.6×106×15.3 t-C/TJ×44/12 1万kWh等于1.2 t标准煤,每燃烧1吨标准煤将产生2.6 t二氧化碳	装机容量、上网电量、制冷量、供热量
	建筑光伏技术	减碳量=地区年太阳平均辐射量×Σ(建筑各表面面积×小时数比×安装面积比例)×转化效率×系统综合效率×电力排放因子	光伏安装面积、年利用小时数、光伏转化效率、地区年太阳平均辐射量
	建筑光热技术	减碳量=(4.18×热水用量×人数×热水温度×365)/(能效比×3600)×电力排放因子	热水容量、热水温度
	热泵技术	减碳量=(普通空调用电量-地源/空气/水源热泵用电量)×电力排放因子	制冷/制暖功率、制冷/制暖时间、热泵能效比
建筑运行 减碳技术	超低(近零)能耗建筑技术	减碳量=(居住建筑节能值+公共建筑节能值)×电力排放因子	节能建筑面积、节能率、光伏发电量、储能设施容量
交通通勤 减碳技术	交通电气化技术 智能共享出行技术	减碳量=(绿色出行比例增量×出行人数×平均出行距离×碳排放系数×通勤天数)/同乘人数	绿色出行比例、电动车比例、通勤距离
资源循环 减碳技术	固废循环减碳技术	减碳量=Σ(固废减量 <i>i</i> ×固废处理碳排放因子 <i>i</i>) + Σ(固废处理优化量 <i>a</i> - <i>b</i> ×(固废处理排放因子 <i>a</i> -固废处理排放因子 <i>b</i>))	固废减少量(回收率)、填埋下降比例
	废水处理减碳技术	减碳量=废水减量×废水处理碳排放因子+自来水减量×自来水供应碳排放因子	废水减少量
碳汇增强 技术	乔灌木配置技术	减碳量=乔灌木比例增量×用地面积×碳汇因子	乔灌木比例、总绿地面积
	立体绿化技术	减碳量=(屋顶种植面积×折算系数×碳汇因子)+(墙体种植面积×折算系数×碳汇因子)	可种植面积

表3 街区碳排放基线

Tab.3 Baseline of carbon emissions in neighborhoods

维度	建筑维度	交通维度	资源维度	碳汇维度	总碳排放量
碳排放量/t	83 353	5623.9	7756	-1661.1	95 071.8
占比/%	87.7	5.9	8.2	-1.7	100

表4 城市街区减碳技术潜力统计表

Tab.4 Potential of carbon reduction technologies in urban blocks

技术维度	技术名称	应用规模	潜力评估	
			低情景/%	高情景/%
能源供应	分布式供能中心	不安装;发电机装机容量为5.6 MW;运行时间3500 h;综合能源利用率85%	—	22.7(取值)
	地源热泵	10%建筑安装;30%建筑安装	6	9
	水源热泵	10%建筑安装;30%建筑安装	10	15
	空气源热泵	10%建筑安装;30%建筑安装	4	6
	建筑光伏	10%建筑安装;30%建筑安装	11.4	19
	建筑光热	不安装;所有居住建筑安装	—	4.9
建筑运行	超低能耗建筑	10%建筑达标;25%建筑达标	9	9
	近零能耗建筑	无建筑达标;15%建筑达标	—	6
交通通勤	交通电气化	—	0.2	0.2
资源循环	固废循环	资源化利用率提升5%;资源化利用率提升15%	0.4	1.5
	废水处理	资源化利用率提升5%;资源化利用率提升15%	0.1	0.4
碳汇	乔灌木配置优化	乔灌木比例达25%;乔灌木比例达到75%	0.5	1.5
	立体绿化增汇	不安装立体绿化;屋顶立体绿化占比30%	—	0.01
合计			31.6	67.2

单位安装面积的成本增量通常在300—600元;热泵类减碳技术的单位建筑面积成本增量通常为400—500元;立体绿化技术根据建设品质不同,单位屋顶面积成本增量通常在300—1000元,此类减碳技术在街区中规模化应用的成本增量一般控制在1亿—3亿元/km²,位于第二梯队。除此之外,建筑光热、交通电气化、固废循环、废水处理、乔灌木配置的单体成本增量较低,规模化应用后成本增量均不高于1亿元/km²,位于第三梯队。

经过综合研判,城市街区减碳技术

可以分为4类(图3)。第一,以分布式供能和超低能耗建筑为代表的高潜力、高成本减碳技术,这类技术当前通常处于试点示范阶段,亟待获得更多的政策支持。第二,以建筑光伏、各类热泵技术为代表的高潜力、低成本减碳技术,这类技术随着早期政策支持现阶段已获得较多的实践积累,亟待规范建设标准进行规模化推广。第三,以建筑光热技术、乔灌木配置、固废循环、废水处理为代表的减碳技术属于低潜力、低成本的减碳技术,这类技术由于高普及性和低减碳

能力往往不会受到过多关注,技术成熟度高但有待进一步迭代更新。第四,以垃圾气力回收系统、立体绿化为代表的低潜力、高成本的减碳技术,应待边际减碳成本下降后,再进行大规模推广。

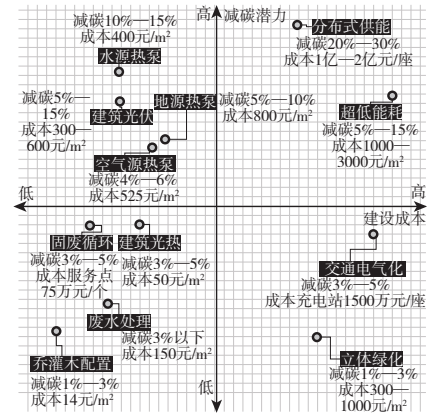


图3 “潜力-成本”矩阵图

Fig.3 "Potential-cost" matrix

3 系统统筹:基于空间协同的街区形态优化

3.1 基于碳排放关键指标的街区形态优化方向

既有研究通常关注街区微气候、出行方式以及公共空间环境舒适度对街区碳排放量的影响,通过平衡开发强度、街道高宽比、路网密度等规划设计因素间的关系,引导低碳化的街区空间形态建设^[21]。本文通过碳排放核算公式,识别容积率、街道高宽比、建筑密度、路网密度、公共服务设施用地面积、绿地率等指标对于各维度的碳排放活动水平的影响,定向建立街区空间形态优化的具体路径(图4)。

首先,影响建筑能耗活动水平的共有两类空间因素:一类是以平均高度、建筑密度、开发强度为代表的总量影响因素,建筑能耗随着建筑量的增加而增加,而以上指标基本可以表征街区内建筑规模的高低;另一类是以地块紧凑度、建筑形体系数、风环境舒适度、热环境舒适度为代表的环境影响因素。以上一系列指标通过表征街区空间布局方式,对街区物理环境产生影响,进而影响建筑能耗。其次,影响交通活动水平的共有3类空间因素:一是通过用地功能布

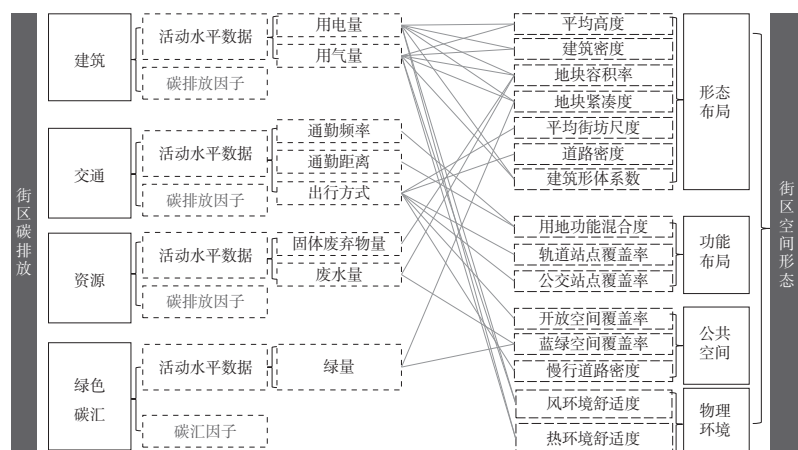


图4 城市街区碳排放核算与空间形态指标对应关系图

Fig.4 Correlation between carbon emissions and spatial forms of urban blocks

局混合度指标营造更加职住平衡的周边用地结构,增加街区内部的短距离通勤,降低高碳排的远距离通勤比例;二是通过轨道交通、公共交通站点的覆盖率提升公共交通出行的比例,降低高碳排的小汽车交通占比;三是通过慢行道路密度、平均街坊尺度等指标提升街区步行环境,从而提高街区慢行比例,减少高碳排的出行方式占比。再次,影响资源活动水平的共有两类空间因素:一类是街区建筑规模,该因素会对街区活动人口数量产生影响;二是用地功能类型,该因素将会影响人群的活动水平。两者将共同影响固废、废水等资源循环处理所产生的碳排放量。最后,碳汇水平主要受到绿色空间总量的影响,具体包括开放空间覆盖率和蓝绿空间覆盖率两项空间因素。

3.2 面向系统协同的街区形态优化策略

把握形态优化对街区碳排放量的影响:一方面是提升空间与技术的协同程度,提高减碳技术的使用效益;另一方面是提升城市街区各系统的运行效率,以更低成本实现碳排放量降低。具体而言,街区的用地功能、建筑布局、开放空间和交通体系应与减碳技术的使用场景及空间需求相适应,根据遴选的减碳技术做好强度匹配、空间预留、气候响应与系统优化。

在强度匹配方面,分布式供能中心的布局应与街区的用能负荷中心相结合。针对街区不同类型用地能耗的峰谷波动特点,在分布式供能中心周边适度增加

开发强度并提升街区用地功能的混合度,从而保证分布式供能全天候的运行效率。同时,通过组团化的用地布局匹配分布式供能中心的经济输配距离,形成不超过1.5 km半径的供能单元。

在空间预留方面,街区在空间布局中应充分预留减碳技术的应用空间。在街区的平面布局,考虑到低碳街区可再生能源瞬时性和不稳定的特点,预留储能设备的建设空间,提高能源利用效率并保障能源平稳供应。在建筑的三维布局中,应尽量保证南向平整的屋顶空间,以此增大可安装建筑光伏、光热技术的面积比例,同时在规划阶段还应协调好建筑光伏与立体绿化的混合布局。

在气候响应方面,通过调整优化建筑布局和开敞空间位置,为建筑提供更舒适的运行氛围,从而降低整体能耗。适度提升街区开敞空间占比,合理配置开敞空间的景观环境,提高开敞空间内各类遮阳措施的覆盖率,从而缓解热岛效应。同时,根据城市街区盛行风的方向和强度,优化道路、绿地和开敞空间布局,梯度排列不同高度建筑,以预留畅通的通风廊道。

在系统优化方面,协调交通、废弃物回收系统的设施布局,并与人的活动相匹配,实现交通、基础设施维度减碳技术的高效运行。注重各级就业中心和公共服务中心与公共交通枢纽的耦合,结合道路断面与停车空间设计,预留充电桩等电气化交通设施的安装空间。注重生活服务中心与废弃物回收系统的耦合,提升废物回收、

清运的运行效率。

4 城市街区减碳规划方法集成体系构建

推动面向实施的低碳街区建设,应发挥规划的统筹能力,以综合性思维去看待减碳技术创新、形塑街区空间形态。从效能平衡和系统统筹的视角出发,基于街区碳排放的关键要素,平衡街区减碳技术的综合效能,打造与减碳技术相匹配的街区空间形态,形成包括高效可再生的能源系统、绿色低碳的建筑建造、绿色出行的低碳交通、低碳化的布局形态、高碳汇的公共空间环境、绿色韧性的基础设施和便捷互联的智慧管治系统在内的城市街区减碳规划方法集成体系(图5),从而制定更为系统科学、更具落地推广意义的减碳路径与实施措施。

4.1 高效可再生的能源系统

街区用能是碳排放的主要来源之一,减碳重点在于推进可再生能源的规模化应用,提高项目的可再生能源渗透率。鼓励匹配街区用能特征,采用分布式供能系统,设置能源中心作为区域集中供能、调节和储能中心。同时重点预留可再生能源的承载空间,因地制宜地推广太阳能热水系统、建筑光伏一体化系统和浅层地热能利用等技术措施。新建国家机关办公、工业厂房等屋顶安装光伏发电比例不低于50%,新建商业、办公建筑屋顶安装光伏发电比例不低于30%^③。

4.2 绿色低碳的建筑建造

建筑是城市街区能源消耗的主要空间载体,需利用绿色建筑技术,建造高品质、低碳的建筑群。提升城市街区内建筑星级目标要求,推广超低能耗建筑示范。新建民用二星级及以上绿色建筑比例应达到100%,标志性建筑执行绿色建筑三星标准,同时推进街区内既有建筑的绿色化改造。在普及绿色建筑基础上,根据街区条件推广近零能耗、光储直柔建筑示范,进一步控制建筑运行能耗。

4.3 绿色出行的低碳交通

街区交通系统碳排放主要来源于居民出行产生的能源消耗,通过构建与城

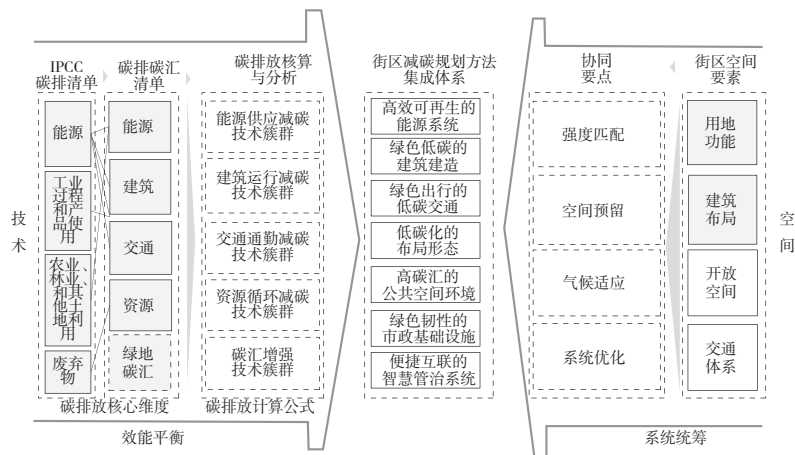


图5 街区减碳规划方法集成体系示意图

Fig.5 Integrated system of carbon reduction technologies in low-carbon blocks

市功能布局相耦合的公共交通体系和低碳交通基础设施，可以在满足刚性出行需求的前提下降低交通出行的碳排放。发展TOD导向的公共交通体系，各级就业中心和公共服务中心应与公共交通枢纽的布局相匹配，公共交通站点500 m覆盖率不宜低于90%。配置低碳交通基础设施，保障街区居民“最后一公里”绿色出行。配置电动车充电桩、共享停车设施和智慧交通系统平台等绿色安全的低碳交通设施，通过步行网络串联街区热点地区，步行交通网络密度不宜低于12 km/km²，自行车交通网络密度不宜低于9 km/km²④。

4.4 低碳化的布局形态

建筑周边微气候的变化对建筑用能产生着潜移默化的影响，空间紧凑、功能复合、步行舒适的建筑群布局，可减少建筑耗能和居民出行产生的二氧化碳排放量。以“中层中密度”为导向进行街区建筑群体开发建设，引导适度紧凑的建筑形态，街区建筑布局以降低热岛效应和建筑能耗、优化风环境为原则，宜根据当地气候条件调整建筑间距、朝向以及进深等形态布局控制要求。布局混合多样的功能业态，混合街坊比例不小于60%。提高街区功能混合度，可以在提升街区职住平衡水平的同时平衡街区内的用电峰谷，减少整体能耗损失。

4.5 高碳汇的公共空间环境

街区内公共空间环境优化的关键在于形成舒适宜人的街区环境和提升街区

碳汇能力，一方面能够培养居民绿色低碳的生活方式，另一方面能够提升街区的碳排放吸收。合理布局完整、连续的蓝绿空间系统，加强沿河沿路“绿化毛细血管”系统建设，保证绿地空间覆盖率。控制开敞空间中各类遮阳措施的覆盖率不低于50%，预留畅通的通风廊道，以调节场地微气候。优化乔灌木占比，街区地面绿化的植被配置类型应尽可能选择乔灌木、本地适生等高碳汇植物，地面绿化覆盖面积中乔灌木占比宜达到70%。根据建设条件推广立体绿化的应用，结合地块附加图则推广“地块绿化容积率”指标的应用，作为传统绿地率强制性指标的补充引导性指标。

4.6 绿色韧性的市政基础设施

在构建安全韧性的市政基础设施的前提下，通过建设高资源化利用的低废街区和因地制宜的水循环系统，进一步促进节能减排。一方面关注生活垃圾资源化利用和建筑废弃物就地化利用。通过“互联网+回收”、投放智能回收机等技术控制生活垃圾资源化利用率不应低于70%。另一方面构建因地制宜的街区水资源循环方案。根据地块功能特征与空间禀赋，建立从地块到区域的智能雨洪管理系统，选择渗—滞—蓄—净—用多类雨水回用组合，提升整体雨水调蓄能力，控制供水管网漏损率不大于6%，提高供水管网管理水平。

4.7 便捷互联的智慧管治系统

低碳街区在运用低碳绿色技术的基

础上，应通过智慧系统赋能，实现低碳技术和智慧平台的耦合运行。探索能源智慧管控系统，具备建筑用能监测、变电站监控管理、分布式电源监控管理、综合能源站接入管理、微电网运行管理和充电桩监管、用能定额管理、能耗诊断和审计、碳排放管理和综合可视化等功能接入，实现能源的分项计量和温室气体的排放监测。新建国家机关办公建筑与大型公共建筑用能分类分项计量安装率应达到100%，进而有效对街区区域内能源消耗情况和碳排放进行优化。

5 结语

“低碳”理念正从全球气候变化背景下追求碳排放量降低的单维度目标，逐步拓展为优化人居环境、提升城市形象、促进可持续发展的综合性营城方略。随着可采用的减碳技术持续丰富，如何遴选高效能可落地的减碳技术，并建立与之相匹配的街区空间显得十分重要。因此，在低碳街区建设中有必要发挥规划建设的引领作用和系统统筹优势，通过“潜力-成本”的效能评估识别城市街区减碳的关键技术，基于多系统的统筹协同优化街区空间形态，构建以高效可再生的能源系统、绿色低碳的建筑建造、绿色出行的低碳交通、低碳化的布局形态、高碳汇的公共空间环境、绿色韧性的资源基础设施和便捷互联的智慧管治系统为抓手的城市街区减碳规划方法集成体系。值得注意的是，针对不同地域特征、不同发展阶段的城市街区，应当因地制宜地选择特色化的减碳技术，建立有针对性的空间优化策略，形成可落地可推广的低碳街区建设机制。

注释

- ① 《燃气分布式供能站设计规范》(DL/T 5008—2015)
- ② 减碳技术根据2022年6月24日科技部、国家发展改革委、工业和信息化部、生态环境部、住房和城乡建设部、交通运输部、中国科学院、中国工程院、国家能源局印发的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案》整理。
- ③ 根据国家能源局综合司2021年9月8日发布的《关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》整理。

④ 根据上海市住建委2022年发布的《新城绿色低碳试点区建设导则》整理。街区建筑参照民用建筑能耗标准中对于夏热冬冷地区各类建筑单位面积能耗值的约束,居住建筑户均耗电为3100 kWh/(a·H),燃气消耗为150 m³/(a·H);办公建筑单位面积能耗为85 kWh/(m²·a);商业建筑单位面积能耗为120 kWh/(m²·a);宾馆建筑单位面积能耗为150 kWh/(m²·a)。假设公共建筑能耗均为用电,电力排放因子取上海市电力CO₂排放因子缺省值0.79 t/MWh,热力CO₂排放因子取上海市缺省值0.11 t/GJ,户均建筑面积取上海市平均值71 m²。街区内平均通勤距离取上海市平均值8.9 km;通勤比例按上海现状通勤比例,即地铁:公交车:小汽车:自行车+步行=2:3:3:2,地铁同乘人数为240人,小汽车同乘人数为2人,公交车同乘人数为50人;通勤天数为250天;地铁平均每公里碳排放0.13 kg,小汽车平均每公里碳排放0.2 kg,公交车平均每公里碳排放1 kg。街区内人均生活垃圾参考上海2020年人均垃圾量为0.36 t/(人·a),其中:卫生填埋占比7.7%;焚烧处理占比77.7%;生物堆肥占比14.6%。人均用水量参考上海2020年人均用水量97.75 m³/a。根据IPCC温室气体核算指南得到生物堆肥CO₂排放因子取0.1 t/t,垃圾焚烧取0.32 t/t,卫生填埋取2.1 t/t;污水排放系数取0.8,自来水供应CO₂排放因子取3.5 t/万m³,污水处理CO₂排放因子取4.4 t/万m³。

参考文献 (References)

- [1] 全国科学技术名词审定委员会. 建筑学名词 2014[M]. 科学出版社, 2014. (China National Committee for Terminology in Science and Technology. Chinese terms in architecture[M]. Science Press, 2014.)
- [2] 张帆, 杨保军, 司马晓, 等. 概念·方法·实践: 15分钟社区生活圈规划的核心要义辨析[J]. 城市规划学刊, 2020(1): 1-8. (ZHANG Fan, YANG Baojun, SIMA Xiao, et al. Thoughts, methodology, and practice: symposium on the planning of 15-minute community-life circles[J]. Urban Planning Forum, 2020(1): 1-8.)
- [3] KRIER R. Urban space[M]. London: Academy Editions, 1979.
- [4] 肖亮. 城市街区尺度研究[D]. 同济大学, 2006. (XIAO Liang. A research on urban block[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.)
- [5] 汪碧刚. 中西居住文化背景下的街区制比较研究[J]. 经济社会体制比较, 2016(5): 136-144. (WANG Bigang. A comparative study of the block system from the perspectives of Chinese and western residential culture[J]. Comparative Economic & Social Systems, 2016(5): 136-144.)
- [6] 臧鑫宇. 生态城街区尺度研究模型的技术体系构建[J]. 城市规划学刊, 2013(4): 81-87. (ZANG Xinyu. The construction of technical indicator system for eco-cities at block's scale[J]. Urban Planning Forum, 2013(4): 81-87.)
- [7] 潘海啸, 刘冰. 关于“小街区”规划设计的几点探讨[J]. 城市规划学刊, 2019(S1): 220-226. (PAN Haixiao, LIU Bing. Discussions on the planning and design of small-blocks[J]. Urban Planning Forum, 2019(S1): 220-226.)
- [8] 夏晟, 张天尧, 许顺才, 等. 社区健康性能评估: 基于社会生态学模型的社区使用后评价[J]. 城市发展研究, 2020, 27(2): 24-30. (XIA Sheng, ZHANG Tianyao, XU Shuncai, et al. Evaluation on neighborhood health performance: a post-occupancy evaluation approach based on socioecological models[J]. Urban Development Studies, 2020, 27(2): 24-30.)
- [9] 梁浩, 龚维科. 致力于碳中和的绿色城市思考与探索[J]. 建设科技, 2021(11): 28-32. (LIANG Hao, GONG Weike. Thinking and exploration of green city committed to carbon neutral[J]. Construction Science and Technology, 2021(11): 28-32.)
- [10] 杨沛儒, 权纪义. 生态容积率(EAR): 高密度环境下城市再开发的能耗评估与减碳方法[J]. 城市规划学刊, 2014(3): 61-70. (YANG Peiru, QUAN Jigang. EAR(Ecological Area Ratio): assessment of energy performance and reduction for urban redevelopment in high-density environment[J]. Urban Planning Forum, 2014(3): 61-70.)
- [11] 郝雨航, 时元元, 田靖. 经济型超低能耗建筑能耗模拟及成本增量分析: 以河北省建筑科技研发中心9#楼为例[J]. 建筑节能, 2018, 46(8): 134-136. (HAO Yuhang, SHI Yuanyuan, TIAN Jing. Energy consumption simulation of economical ultra low energy consumption building and its analysis of increment cost: building 9# of Hebei building engineering research and development center[J]. Building Energy Efficiency, 2018, 46(8): 134-136.)
- [12] 林辰辉, 吴浩. 低碳街区的国际实践与规划减碳技术探索[J]. 人类居住, 2022(1): 28-31. (LIN Chenhui, WU Hao. International practices and exploration in carbon reduction planning for low-carbon neighborhoods[J]. Human Settlements, 2022(1): 28-31.)
- [13] 白一飞, 刘加平, 张伟荣, 等. 以城市街区建筑为对象的低碳技术方法[J]. 工业建筑, 2020, 50(7): 166-174. (BAI Yifei, LIU Jiaping, ZHANG Weirong, et al. Low-carbon technique methods for urban block buildings[J]. Industrial Construction, 2020, 50(7): 166-174.)
- [14] 刁喆. 哈尔滨老城区街区尺度建筑布局对建筑能耗影响[D]. 哈尔滨工业大学, 2018. (DIAO zhe. The influence of building layout on the energy consumption at the block level of Harbin old town district[D]. Harbin Institute of Technology, 2018.)
- [15] 刘洋. 基于微气候效应的低碳城市街区空间形态优化研究[D]. 沈阳建筑大学, 2020. (LIU Yang. Optimization of low-carbon city blocks based on microclimate effect: taking Taiyuan street in Shenyang as an example[D]. Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [16] 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. (WANG Weiqiang, LI Jian, YUE Yufeng. The relationship between residential pattern and the low-carbon effect based on behavior characteristics: the case of Caoyang Xincun, Shanghai[J]. Urban Planning Forum, 2015(3): 36-43.)
- [17] 匡晓明, 徐进, 陈君. 基于控制性详细规划地块层面的低碳生态管控要素体系建构研究[J]. 城市规划学刊, 2018(5): 56-62. (KUANG Xiaoming, XU Jin, CHEN Jun. Research on low-carbon ecological control indicator system based on plot-level regulatory planning[J]. Urban Planning Forum, 2018(5): 56-62.)
- [18] 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. (ZHENG Degao, WU Hao, LIN Chenhui, et al. The formulation of urban carbon reduction unit and integrated planning methodology based on carbon accounting[J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 43-50.)
- [19] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R]. 2019.
- [20] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007(6): 804-812. (FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China in 1981-2000[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007(6): 804-812.)
- [21] 黄盛航. 天府新城空间形态的低碳化评价及规划策略研究[D]. 西安建筑科技大学, 2021. (HUANG Shenghang. Research on low-carbonization evaluation and planning strategy of space form of Tianfu new city[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.)

修回: 2022-09