

城市形态调控减碳路径与策略*

冷红 赵妍 袁青

The Path toward Carbon Reduction through Urban Form Control

LENG Hong, ZHAO Yan, YUAN Qing

Abstract: The threat of climate change has attracted worldwide attention, and achieving carbon emission peak and carbon neutrality is an important development goal of China at the current stage. The control of urban form is widely regarded as an important means to achieve carbon reduction. This paper focuses on relevant researches on urban form and carbon emissions both from China and abroad, and analyzes the urban form factors that influence carbon reduction from three spatial levels: city, block, and plot. Taking China's low-carbon strategy and the technological innovations in territorial spatial planning into consideration, the paper suggests integrating urban form control elements into territorial spatial plans. It also puts forward carbon reduction strategies through urban form control in municipal territorial spatial planning in order to achieve the dual carbon target and China's low-carbon economic goal. The paper provides a reference for low-carbon sustainable development.

Keywords: low-carbon city; urban form; carbon emission; territorial spatial planning

提 要 气候变化的威胁已受到全世界的关注和重视,实现“碳达峰、碳中和”是当前阶段我国的重要发展目标。城市形态调控被广泛认为是实现低碳减排的重要手段。聚焦国内外城市形态与碳排放的相关研究,分别从城区、街区、地块等3个空间层级解析城市形态减碳影响要素。结合我国低碳战略要求和国土空间规划技术革新,将不同层级的城市形态要素管控融入国土空间规划编制内容,在市级国土空间规划层面提出城市形态调控减碳路径与策略,以期对“双碳”背景下国土空间规划有所启示,为我国低碳可持续化建设提供指引。

关键词 低碳城市;城市形态;碳排放;国土空间规划

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202301008
文章编号 1000-3363(2023)01-0054-08

气候变化是全球城市正面临的重大威胁之一,也是推动城市可持续发展的现实契机。为了积极应对气候变化,我国于2020年提出“碳达峰、碳中和”战略目标,对城镇化建设提出了新的要求。“十四五”以来,国务院及相关部门陆续出台了推进“双碳”战略的政策文件,明确了实现“双碳”目标的重点任务。据统计,全球80%的温室气体排放都源于城市,城市是人类活动、工业生产、交通运输和建筑开发的聚集地,是高能耗、高碳排的集中地^[1-4]。城市中主要的碳排放部门为工业、交通和建筑,而城市形态是影响建筑碳排放和交通碳排放的重要因素^[5-6]。随着我国产业结构不断调整,工业碳排放占比下降,交通和建筑碳排放的比重将逐步上升,城市形态调控的重要性就愈发显著^[4, 7]。

城市形态是城市建设的骨架和空间要素布局的基础,大量研究证实,不同空间层级的城市形态特征对城市交通以及微气候有着长期的影响^[8-10],城市形态优化是低碳城市建设中重要的规划手段。本文结合相关理论研究与实践经验,从城市形态调控的视角,结合我国低碳战略要求和国土空间规划技术革新,探索不同空间层级的减碳路径与策略,以期推动国土空间规划的低碳转型。

1 城市形态与碳排放关系研究综述

城市形态是城市实体物质环境以及各类活动的空间结构和形式^[11],对城市运行以及各城市要素存在一定的锁定效应,是影响城市能源使用效率和碳排放的重要因素^[12]。国内外学者们从不同视角对碳排放和城市形态关系进行探讨,大致可以分为两类:一类是从自上而下的视角,关注城市的宏观土地开发模式和空间结构对碳排放的影响^[6, 13-14];

作者简介

冷红,哈尔滨工业大学建筑学院、自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室教授、博导, hitlaura@126.com

赵妍,哈尔滨工业大学建筑学院、自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室博士研究生

袁青,哈尔滨工业大学建筑学院、自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室教授、博导,通信作者, hityq@126.com

*“十三五”国家重点研发计划课题“基于地域风貌特色传承的县域城镇低碳规划设计研究”(2018YFC0704705)

另一类多从自下而上的视角，从微气候和居民生活方式的角度探讨城市形态对碳排放的影响^[15-16]。

城市形态与碳排放关系的研究最早从城市层级开始切入，研究案例集中于大中城市，Newman等^[5]通过研究表明城市密度和土地混合利用与城市交通能源消耗密切相关。随后，其他学者^[17-19]陆续证实城市功能结构、土地使用、道路系统等城市形态要素对碳排放的影响关系。Glaeser等^[19]对城市规模和土地开发与碳排放的关系进行了实证研究，证明了城市规模增长会导致更高的碳排放水平。学者们^[12, 20]提出高效的土地开发、紧凑的空间布局、多中心的城市空间结构等都是更利于低碳发展的城市形态特征。随着研究的发展，学者们^[21]发现城市形态从多方面影响着城市热岛效应，而城市热岛效应引起的气温上升进而影响建筑能源消耗与城市能源供应碳排放。例如城市高密度建设侵占绿地，造成不透水表面的增加，增强了城市热岛效应，这将显著提升城市建筑碳排放。

从微气候和居民生活方式视角的城市形态和碳排放影响关系的研究通常在街区和地块层级开展。潘海嘯^[22]以上海市4个街区为例进行实证研究，表明街区土地利用、道路网密度、道路面积密度等空间形态特征与居民出行方式密切相关。学者们^[23-24]提出街区交叉口密度、地块开发强度等指标都会通过居民出行方式或出行距离对交通碳排放产生不同程度的影响。学者们^[25]通过建筑能源建模(BEM/UBEM)的方法，模拟建筑周围微气候影响以及使用者用能行为，定量分析空间形态差异对建筑能源性能的影响。研究^[26]表明，地块内建筑群体的能耗并不等于单个建筑能耗的简单相加，建筑间的相互遮挡所产生的微气候环境变化会对建筑能源消耗产生影响，地块建筑高度、建筑间距、建筑朝向都是影响建筑能源消耗的城市形态要素。

2 国土空间规划背景下城市形态调控对减碳的意义

国土空间规划作为国家空间发展格局的指南，其编制将影响未来国土空间的结构与形态^[27]，影响城市的空间布局、

土地利用、建筑、交通等每个领域^[28-29]，对于从多层次调节碳源碳汇结构具有极大优势。国土空间包含国土要素和空间尺度两个特征^[30]，其中：国土要素表征为基于人类活动影响的土地要素；空间尺度则是国土要素的空间边界，表征为各类空间边界关系表现出的空间布局和形态特征等。城市形态调控能够通过优化城市空间的结构布局来影响城市的各碳排放部门^[31]。由此，应将城市形态调控作为一项重要手段，结合国家低碳发展战略和国土空间规划背景，从国土空间规划中不同层次城市空间的规模、土地开发、空间结构等方面进行有效调控，形成自上而下的规划布局管控体系，逐步深化指标管控与规划引导，达到低碳减排的目标^[32]。

国土空间规划要落实“双碳”目标就应做出全方位的低碳转型，从多层次空间视角出发，强化全空间整体统筹。基于不同层级城市形态要素对碳排放、碳汇的关联性，以空间结构优化为核心，明确国土空间规划中各类规划的管控重点内容，将城市形态调控减碳融入国土空间规划体系，推进“碳达峰、碳中和”稳步实施。

3 城市形态减碳影响要素解析

在城市形态的研究中，不同学科针对其研究视角对城市形态提出了多样的空间划分方式。欧洲的城市形态学^[33]提出的层级结构中，依据研究对象的尺度

差异，将城市形态大致划分为城市/区域、街道/街区、建筑/地块等3个层级^[34-36]。碳排放研究在不同空间层级下的研究视角与分析方法有所不同，城市形态调控减碳的重点内容也存在着空间差异。基于前文的城市形态层级结构，对本文研究的3个空间层级进行范围界定：城区层级指城市建成区的空间范围，城市形态调控侧重城市土地开发和空间格局的低碳统筹；街区层级指由街道划分和围合而成的区域，一般由一个或多个街坊构成，通常覆盖几十公顷到3 km²的空间范围^[37]，城市形态调控侧重居民生活空间的低碳布局；地块层级指规划控制的基本单元，通常覆盖几百平方米到10 hm²的空间范围^[34]，城市形态调控侧重地块内部开发和建筑群体的节能布局。

3.1 城区层级城市形态减碳影响要素

城区层级进行城市形态调控能够形成有序、高效的的城市系统。通过宏观土地资源管控和空间布局的调整，能够在城市减排、增汇中发挥重要作用。城区层级城市形态减碳影响要素可归纳为两类，包括城区土地利用和城区空间布局(图1)。

3.1.1 城区土地利用

城区土地利用的变化会引起碳源、碳汇空间分布的改变^[18, 38]。城区土地开发模式与用地功能布局的规划调控，能够从多方面影响城市碳排放水平。其中，土地开发模式与城市能源、资源利用率密切相关，高强度的土地开发能够通过

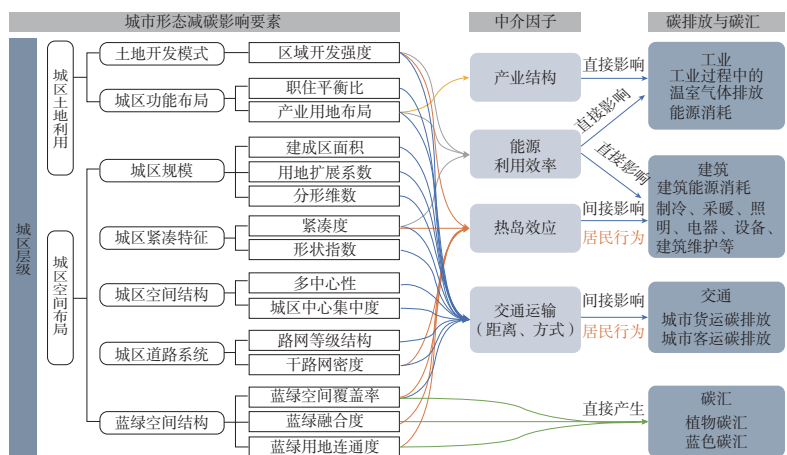


图1 城区层级城市形态减碳影响要素解析

Fig.1 Analysis of urban form factors for reducing carbon emissions at the urban level

提高资源投入效率促进低碳城市建设。区域开发强度一般用于表征土地开发模式,较高的区域开发强度有助于形成紧凑型城市形态,能够降低城市交通碳排放水平^[39]。但是,区域开发强度过大则会引起人为热量集中,易产生城市热岛效应,导致建筑碳排放上升^[40]。用地功能布局是影响城市交通碳排放的重要城市形态要素。有序的城市功能组织,可以实现城市居住、就业的平衡布局以及公共服务设施的均衡分布,有利于提升城市居民出行和交通运输的整体效率^[41],职住平衡比是衡量城市用地功能布局是否合理的一项重要指标^[42]。除此之外,城区层级的用地功能布局还能通过对产业空间的管控间接影响工业部门碳排放水平。例如,通过管控高碳产业的土地供应,调整城市产业结构^[43-44]。还能通过整合城市产业空间,形成整体协调的产业集群,提高能源利用效率与产业园区运转效率,降低工业过程中不必要的能源消耗。

3.1.2 城区空间布局

城区的空间布局对于城市运行与发展具有长期、结构性的影响,是城市低碳减排的规划重点。城区规模扩张导致的机动化使近年来城市碳排放显著增长^[6, 45],测度城区规模的常用指标是建成区面积^[46-47],用地扩展系数和分形维数常用来测度城区的规模扩张状态^[48-49]。城区紧凑特征和城区空间结构与交通运输碳排放密切相关。其中,紧凑布局有利于形成良好的城市交通结构^[50],是低碳交通城市的基本结构特征。量化城市形态紧凑性的常用指标是形状指数、紧凑度^[51]。城区人口与建筑的相对集中有利于能源的集中供应,减少能源在运输过程中的损耗,提高能源利用效率。但过度紧凑则会产生城市热岛效应,从而影响建筑能源使用^[52]。城区空间结构指城区多中心或单中心布局特征,多中心性和城区中心集中度常作为表征城区空间结构的指标。多中心结构在大城市中更利于降低交通碳排放,而小城市则与单中心区别较小^[53]。并且,提高城区中心集中度,使城区中心周边资源配置集中布局,更有利于居民低碳出行^[54]。城区道路系统是城市形态的基本骨架,在支撑城市交通流动中发挥着核心作用。路网等级结构是影响城市交通效率的重

要形态要素,城市道路分为快速路、主干路、次干路和支路等四级,路网等级结构指城市道路系统中这4种道路长度所占比重的相对值^[55]。路网密度是分析城市道路系统的常用指标,城区层级主要管控干路网密度。并且城区干路网能够形成较好的城市通风廊道,促进城区空气流通,降低城市热岛效应。蓝绿空间结构不仅关系到城市碳汇总量,还能间接影响城市其他系统的碳排放水平^[56]。蓝绿空间覆盖率、蓝绿融合度和蓝绿用地连通度等3个指标常用来测度蓝绿空间结构的均衡性和完整性^[57]。

3.2 街区层级城市形态减碳影响要素

街区由城市道路或生态边界要素组合而成,是城市形态构成的基本单元,也是构成邻里生活的基本单元^[37]。街区层级的城市形态调控能够通过空间环境的塑造和优化,引导居民选择低碳的生活方式^[37]。本文从街道布局、街区结构两方面解析街区层级城市形态减碳影响要素。见图2。

3.2.1 街道布局

街道布局与居民出行便利程度、交通工具选择密切相关^[58]。街道密度包含路网密度和交叉口密度指标,用以表征街道布局的均衡性和连通性^[59]。在街区层级,提升街区路网密度和交叉口密度能够促进居民低碳出行,降低街区交通碳排放^[59, 60]。还能形成良好的街区通风廊道,改善街区微气候环境,降低建筑能源消耗。街道层峡形态与街区自然通风有密切关联,能够通过影响街区通风条件,进而影响街区内建筑能源消耗^[61],一般用建筑高宽比来描述^[62]。当高宽比H/W为1:1时称为标准层峡;当H/W<0.5时称为浅层峡;当H/W>2时称为深层峡;当街道两边建筑等高时称为对称层峡。街区气温与街道层峡直接相关^[63],街道层峡形态的调控影响了街区内建筑碳排放。

3.2.2 街区结构

街区由一个或多个街坊构成,小尺度街坊划分有利于促进街区土地集约利用,还能形成更加高效、通达的生活性街道布局^[64]。街坊尺度常通过街坊面积和街坊边长两项指标进行调控^[65]。街区用地功能的混合布局与居民出行所产生

的交通碳排放高度相关^[66]。居民的出行需求主要分为两类:一类是刚性需求,例如上学、工作、购买生活必需品等;另一类是弹性需求,即去商业中心或文化中心等。弹性需求往往难以在街区范围内解决。土地利用混合度和混合功能街坊比例是测度街区用地功能混合的常用指标。当街区用地功能高度混合,可解决居民的刚性需求时,即可缩短居民的出行距离与出行时间,降低街区交通碳排放^[67]。街区绿地布局既能通过到访交通量影响交通碳排放,也能通过调节街区微气候环境影响建筑碳排放^[68]。对街区绿地面积比例和公共绿地可达性的调控可从多方面影响街区碳排放和碳汇。

3.3 地块层级城市形态减碳影响要素

地块是对街区土地的进一步划分,也是规划控制和土地开发的基本单元^[69]。地块及其内部的建筑构成了城市形态描述的最小单元^[34],地块层级的城市形态调控是塑造城市形态的基础。因此,地块层级的减碳着重关注其内部的形态影响要素,包括地块开发容量和地块建筑群体布局。见图3。

3.3.1 地块开发容量

开发容量的管控是地块层级形态调控减碳的重要手段。建筑密度能够反映地块的开发强度,容积率能够反映地块人口承载力。高强度开发对降低交通碳排放有明显效果,尤其在城市中心区域和轨道交通附近,能够有效促进公共交通出行比例^[43]。但对于建筑碳排放的影响较为复杂,有学者认为高建筑密度会引起局部气温升高,需要更多能源用于夏季降温,使建筑碳排放增加^[70],也有学者^[71]通过研究表明高建筑密度意味着更小的单体空间和外墙面积,建筑热(冷)量存储效率更高,从而减少建筑碳排放。关于容积率的减碳作用,有研究^[72]表明容积率与家庭碳排放存在倒“U”型曲线,临界值为1.65,容积率在临界值以下时对碳排放有促进作用,在临界值以上时有抑制作用。绿地率是对地块环境容量管控的重要指标,绿地率的管控能够调节地块内微气候环境,并且保证地块的绿地总量,直接影响地块的碳汇量^[73]。

3.3.2 地块建筑群体布局

地块建筑群体布局是低碳建筑和微

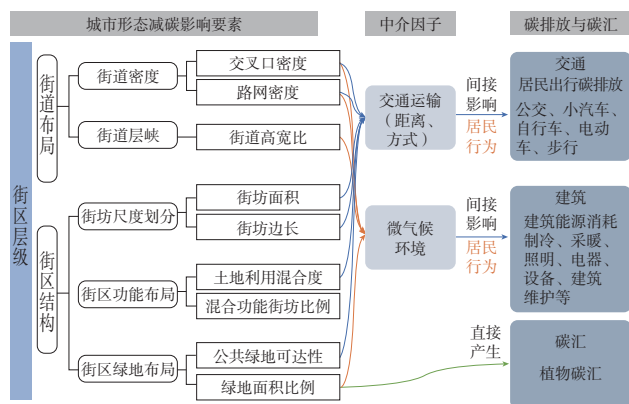


图2 街区层级城市形态调控减碳要素解析

Fig.2 Analysis of urban form factors for reducing carbon emissions at the block level

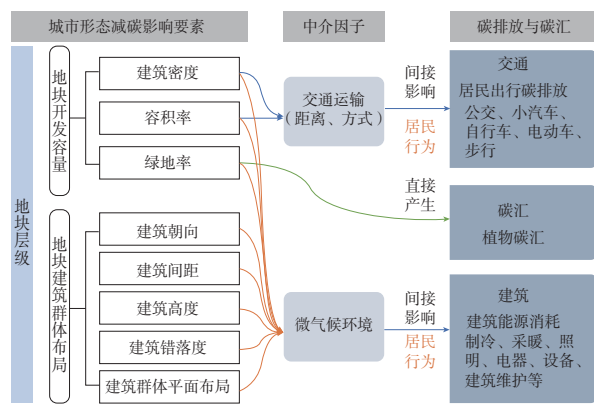


图3 地块层级城市形态减碳影响因素解析

Fig.3 Analysis of urban form factors for reducing carbon emissions at the plot level

气候研究的重要内容^[59, 62]。建筑朝向和建筑间距会通过建筑的相互遮挡影响建筑间的微气候环境, 从而影响建筑内部空调、采暖以及照明设备使用的能源消耗和碳排放^[74]。建筑高度和建筑错落度是建筑竖向布局的表征, 建筑竖向布局会改变街区内的空气流通^[75]。通过合理安排地块建筑高度以及不同高度建筑的位置关系, 可引入自然通风和遮挡冬季寒风, 降低建筑能源消耗。地块内建筑群体平面布局会通过改变建筑间的风、热环境, 进而影响建筑内部能源消耗^[76]。常见的建筑群体平面布局包含行列式、围合式、点群式和混合式等4种。围合式布局有利于防寒防风, 行列式布局更利于保障建筑日照需求, 点群式布局采光较好但对风环境影响较大, 混合式布局是最常采用的布局形式, 能够结合地域气候条件与盛行风向对建筑群体平面布局进行气候适应性调整, 达到防寒或散热的效果。例如: 可采用点式与板式混合的建筑群体平面布局, 并将点式建筑置于夏季迎风侧, 促进夏季通风^[77]。

4 城市形态调控减碳路径与策略

在当前的国土空间规划体系中, 市级国土空间规划在引领城市空间可持续发展方面担负着统筹城市空间发展和空间结构优化的重要的职责, 是城市形态调控减碳的重要环节。本文以国内外相关研究与实践经验为基础, 深入挖掘城市形态对碳排放的影响关系, 在市级

国土空间规划层面探索城市形态调控减碳路径框架(图4), 并从城区、街区、地块层级分别提出城市形态调控减碳策略, 以哈尔滨市为研究案例, 探索城市形态调控减碳策略在国土空间规划中的实践与应用, 以期推进低碳城市建设与发展。

4.1 城区层级城市形态调控减碳策略

城区层级的城市形态调控减碳是总体规划中的重点内容。在总体规划过程中将城市形态要素引起的高碳排问题纳入管控, 通过规划手段形成低碳的宏观城市结构。城区层级城市形态调控减碳策略主要包括: ①控制适宜的区域开发强度。目前国际上区域开发强度警戒线为30%, 可依据城市生态承载力, 适度提高区域开发强度, 提升能源资源利用效率。同时, 应平衡城区开发强度与聚集度的关系, 在规划过程中划分开发强度分区, 中等开发强度的区域应占据城区最大比重, 控制在50%—60%或以上, 避免过度密集带来的热岛效应产生负面影响^[78]。②职住平衡的功能区分。划分居住和就业的布局平衡的城市功能组团, 区域内保证0.8—1.2的职住平衡比^[43], 降低居民通勤产生的交通碳排放。③产业用地集中布局。将高关联性的产业临近、集中布局, 提高主导产业集群集聚度, 整合为产业园区, 共享资源的同时降低额外的客货运输碳排放。例如, 天津子牙循环经济产业园区规划中将产业链中的拆解、分类、加工、再生处理、精深加工与再制造、再生资源交易及废

旧物资回收等类型的产业按关联度高低综合考虑进行布局, 以提高产业园区能源、资源利用效率^[79]。④防止城区规模盲目扩张。依据城市未来人口和用地增长需求预测进行建成区面积管控, 避免城市盲目扩张。已有研究^[49, 80]表明, 城区用地扩展系数的合理值为1.12。通过分形维数控制建成区扩张的边界形态复杂度, 分形维数的理论值在1—2, 值越大表示边界形状越复杂, 则意味着更加分散、随机的扩张状态^[48]。⑤紧凑的城区空间布局。城市空间紧凑布局有利于形成良好的交通结构和促进资源高效利用, 但同时, 过度紧凑也会产生一系列负面影响, 因此城区紧凑度管控应在适当的范围内^[49]。从交通效率来看, 紧凑度在0.3—0.5时, 城市交通效率更高, 并将紧凑度与形状指数一并考虑^[51]。形状指数为建成区面积与其周长相等的定圆面积之比, 已有研究^[51]表明: 形状指数小于0.2及大于0.6的城市出行迂回值最小; 当形状指数增大, 城区形态布局接近圆形均匀分布时, 城市交通网络效率较高。⑥适宜的城区空间结构。特大城市和大城市宜采用多中心结构, 结合城市地形地貌和道路体系, 选择带型、轴向放射型或组团型等空间布局模式; 中小城市适宜集中式空间结构, 注重产业和居住用地的合理布局。⑦构建层级完善的城区道路系统。城区道路等级结构宜形成快速路、主干路、次干路、支路为1、2、3、7—8的金字塔形结构。保证道路交通流由低一级向高一级的有序汇集, 由高一级道路向低一级道路的有

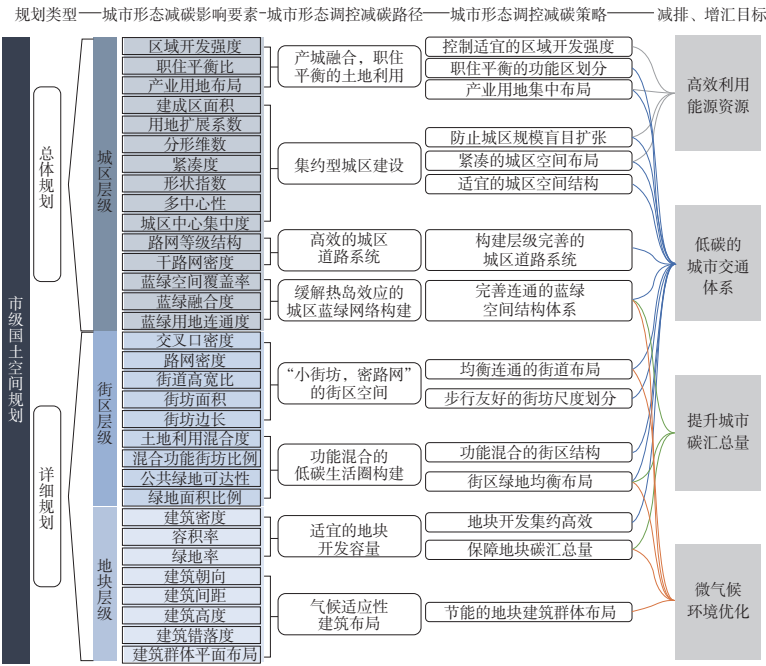


图4 市级国土空间规划中的城市形态调控减碳路径框架

Fig.4 Framework of urban form control for reducing carbon emissions in municipal territorial spatial planning

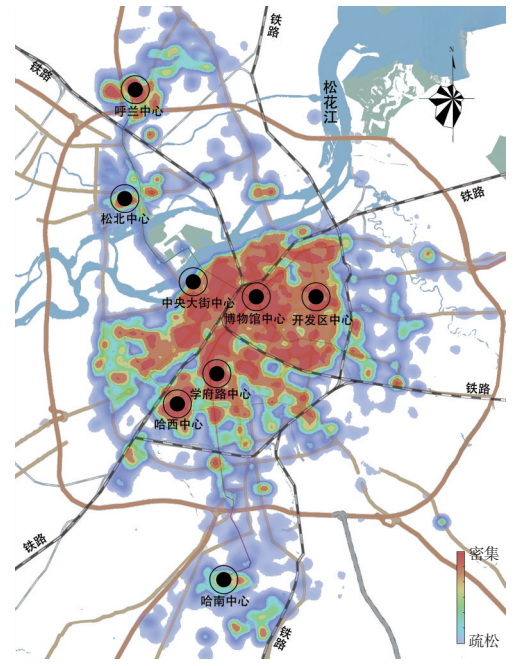


图5 哈尔滨城区人口聚集中心区域识别示意图

Fig.5 Identification of population gathering centers in Harbin urban area

序疏散，以提升城区交通运输效率。应依据城市人口规模合理管控干路网密度，提升道路通行能力，促进公共交通线网布设以及低碳交通出行。人口规模大于等于200万人时，干路网密度宜控制在1.5—1.9 km/km²；人口规模在100—200万人时，干路网密度宜控制在1.4—1.9 km/km²；人口规模在50—100万人时，干路网密度宜控制在1.3—1.8 km/km²；人口规模在20—50万人时，干路网密度宜控制在1.3—1.7 km/km²；人口规模不超过20万人时，干路网密度宜为1.5—2.2 km/km²^[81]。⑧完善连通的蓝绿空间结构体系。提高蓝绿空间覆盖率与蓝绿融合度，构建服务半径覆盖70%以上的城市生态景观体系，提升城市固碳和汇碳能力^[82]。提高蓝绿用地连通度，促进蓝绿空间空气流通性，改善城市微气候环境。

以哈尔滨为例，在国土空间规划的总体规划阶段：首先，依据城市经济发展现状和资源环境承载力评价，控制建成区规模，避免城市不合理扩张产生居住郊区化引起的高碳排放情况。其次，基于城市自然地理格局与现状资源分布特征规划城市空间格局。由于哈尔滨的历史文化与自然地理特征，铁路与松花江

形成了城区的空间屏障，影响了城区空间的整体性（图5）。因此，哈尔滨市宜采用多中心的空间结构布局模式。本文依据百度热力图数据量化哈尔滨建成区人员集中程度，识别出了城区人口聚集中心区域（图5），规划应依据现状聚集中心划分城区功能组团。各组团功能协调，将大型公共服务设施、商业中心均匀分布，组团内用地混合、职住平衡。目前哈尔滨城区内交通“潮汐式”现象明显，应针对该现象对哈尔滨市道路进行评估，识别交通量较大的路线与道路，平衡城区道路等级配比。由于老城区空间形态已基本固定，新开发区域应集约紧凑地高强度开发，提升城市运行效率。并且哈尔滨气候寒冷，有研究^[83]表明，寒冷地区冬季平均低温每低1℃，单位住宅面积供热能耗增加约7 MJ/m²。哈尔滨宜采用紧凑式布局，提升冬季平均温度，进而影响冬季供暖能耗。同时，哈尔滨冬季采用区域集中供热系统，紧凑布局有利于提高供热能源利用效率，降低管道输送距离，减少输送过程中的能源损耗。最后，应结合城市水系与湿地系统，构建完善且布局均衡的城市蓝绿空间体系，增加城市碳汇总量的同时，调节城市微气候环境。

4.2 街区和地块层级城市形态调控减碳策略

街区和地块层级的城市形态调控减碳主要在详细规划中进行。详细规划是对城市土地使用与开发做出的实施性安排^[30]，主要内容是将宏观空间使用细化落实到街区和地块^[31]，在城市范围内主要进行控制性详细规划。其中，街区层级的城市形态调控减碳策略着眼于居民生活空间的低碳布局，主要包括：①均衡连通的街道布局。基于街区的主导功能类型以及街区内居民的出行规律特征解析，预测居民出行需求与空间分布，提高路网密度和交叉口密度，以保证路网布局均衡性和连通性，降低交通碳排放。居住功能主导的街区路网密度宜不低于8 km/km²，商业功能主导的街区与城市中心区域的街区路网密度宜控制在10—20 km/km²，工业区与物流园区的路网密度宜不低于4 km/km²^[81]。同时依据气候条件管控街道高宽比，营造良好的街区风环境，降低建筑碳排放。例如，提高街道高宽比形成的深层峡谷有助于降低建筑热损失^[63]。②步行友好的街坊尺度划分。小尺度的街坊划分有利于营造活力友好的步行环境，增加步行、非机动车以及公共交通的使用概率，促进街

区居民低碳出行。街坊面积宜控制在 4 hm^2 以内,街坊边长控制在 $70\text{ m}\times 70\text{ m}$ 到 $200\text{ m}\times 200\text{ m}$ 以内^[65]。③功能混合的街区结构。提高土地利用混合度,宜进行两种以上用地功能的混合开发,混合功能街坊应占街区用地的50%以上。④街区绿地均衡布局。应增加街区内部绿地面积比例,调节街区微气候环境,引入自然通风降低夏季空调制冷能耗。并且提升公共绿地可达性,将街区公共绿地与居住用地邻近布局,促进居民低碳出行。

地块层级是控制性详细规划的基本单元。控制性详细规划在地块层级对土地性质、开发容量以及地块建筑群体布局等指标进行控制,是管控城市发展和土地使用的基本前提。地块层级的城市形态调控减碳策略主要包括:①地块开发集约高效。地块高强度开发有利于居民低碳出行。宜提高城市中心区域及轨道交通站点附近的容积率与建筑密度,轨道交通站点 500 m 范围内的地块容积率宜大于等于 2.5 ^[43],为保证地块的微气候环境处于适宜状态,地块建筑密度不宜过高,宜控制在 $20\%\text{—}50\%$ ^[78]。地块所处位置距城市中心越近,土地开发应更加集约;距离城市中心越远,容积率与建筑密度宜适当降低。②保障地块碳汇总量。提升地块绿地率,确保地块碳汇总量,地块绿地率不宜低于 30% 。③节能的地块建筑群体布局。采用适应地域气候的建筑群体平面布局模式,根据城市盛行风向与日照需求控制建筑朝向与建筑间距,气候炎热的地区建筑朝向应重点考虑夏季盛行风向,引夏季主导风入室,降低夏季制冷能源需求。并且应重点考虑地块内高层建筑的方位和布局位置,控制地块建筑高度和建筑错落度,将高层板式建筑置于冬季盛行风向来流方向,起到遮挡寒风的作用,减少建筑碳排放的产生。

以哈尔滨市松北区某街区控制性详细规划为例,该街区用地面积约 87 hm^2 ,毗邻地铁站。从用地现状来看[图6(a)],街区内部用地功能较为单一,且路网密度较低。该街区的控制性详细规划方案[图6(b)],采用了小尺度街坊划分方式,提高了路网密度与交叉口密度,保证了街区道路均衡性、连通性,是降低街区交通碳排放的有效措施。在地块组织方

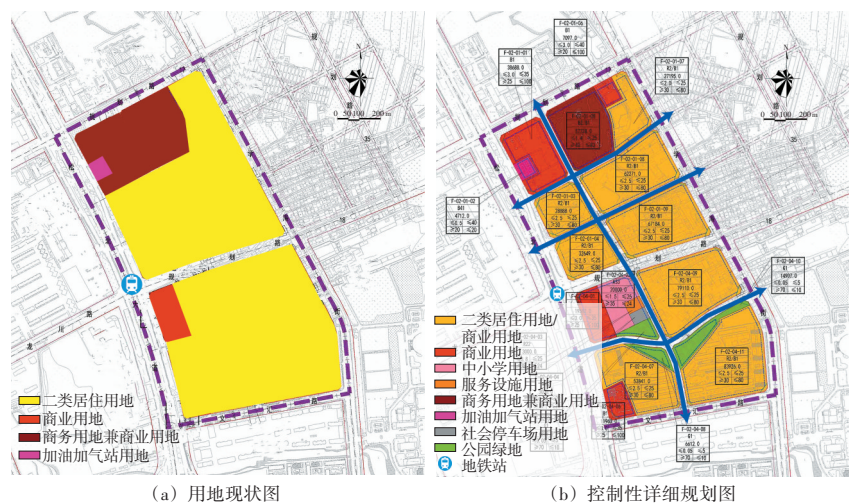


图6 哈尔滨某街区控制性详细规划示意图

Fig.6 Schematic diagram of regulatory detailed plot plans of Harbin

面,控规增加了现状缺乏的公园绿地、中小学用地、服务设施用地等,提升了土地利用混合度与混合地块比例,有利于街区内部居民低碳出行。针对地块层级,控规对地块开发容量的管控遵循地铁站周边的高密度开发原则,可有效提升公共交通出行比例。并且控规提升了各地块绿地率,并将公园绿地与居住用地相邻布置,提高公园绿地可达性。在此基础上,为更好地促进街区低碳发展,笔者认为规划还应重点营造适应严寒气候的街区空间环境,降低寒地城市占比较高的冬季采暖能耗。在下一步规划过程中,应结合严寒地区采暖需求对各地块建筑群体布局提出指导性要求。在规划阶段,着重关注提升地块防寒和保温性能,应在保证建筑间距满足建筑冬季日照需求的情况下,适当提高建筑高度,以提高地块温度与热舒适度,从而降低建筑能源消耗。依据冬季主导风向,宜在冬季来流方向采用围合式布局或布置板式高层建筑。

5 结语

当前我国“碳达峰、碳中和”战略的提出对国土空间规划编制提出了新的要求。在进行国土空间规划的低碳转型时,城市形态的重要性不可忽视。本文从减碳的角度探索城市形态调控的规划路径,分析不同空间层级城市形态的减碳影响因素,并将城市形态要素管控融入国土空间规划编制过程,从城区层级、

街区层级、地块层级分别提出城市形态调控减碳路径与策略,以期当前阶段“双碳”背景下的国土空间规划提供策略性指引和启示。新时期国土空间规划应进一步着眼于城市空间统筹和形态调控,将减碳增汇规划目标落实到国土空间规划编制体系的各层级,转化为具体的管理政策与实施引导,并在后续的规划实施过程中加强监督管理,实现更加精准的规划响应。

参考文献

- [1] DHAKAL S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications[J]. Energy Policy, 2009, 37(11): 4208–4219.
- [2] LIU W, QIN B. Low-Carbon city initiatives in China: a review from the policy paradigm perspective[J]. Cities, 2016, 51: 131–138.
- [3] PÉREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, POUT C. A review on buildings energy consumption information[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(3): 394–398.
- [4] 秦波, 邵然. 低碳城市与空间结构优化: 理念、实证和实践[J]. 国际城市规划, 2011, 26(3): 72–77.
- [5] NEWMAN P, KENWORTHY J. Sustainability and cities: overcoming automobile dependence[J]. Landscape & Urban Planning, 1999, 44(4): 219–226.
- [6] LI Z, WANG F, KANG T T, et al. Exploring differentiated impacts of socioeco-

- conomic factors and urban forms on city-level CO₂ emissions in China: spatial heterogeneity and varying importance levels[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 84: 104028.
- [7] 顾朝林. 气候变化与低碳城市规划[M]. 2版. 南京: 东南大学出版社, 2013.
- [8] BANERJEE S, CHING N Y G, YIK S K, et al. Analysing impacts of urban morphological variables and density on outdoor microclimate for tropical cities: a review and a framework proposal for future research directions[J]. *Building and Environment*, 2022, 225: 109646.
- [9] 易艳春, 马思思, 关卫军. 紧凑的城市是低碳的吗?[J]. *城市规划*, 2018, 42(5): 31-38.
- [10] 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.
- [11] 杨俊宴, 邵典, 汪鹏, 等. 集成·拓扑·转译: 一种基于知识图谱的城市形态深度解析方法[J/OL]. *城市规划*: 1-11[2023-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2378.TU.20220919.1630.002.html>
- [12] 杨磊, 李贵才, 林姚宇, 等. 城市空间形态与碳排放关系研究进展与展望[J]. *城市发展研究*, 2011, 18(2): 12-17.
- [13] FANG C L, WANG S J, LI G D. Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: a case study of 30 provincial capital cities[J]. *Applied Energy*, 2015, 158(15): 519-531.
- [14] JUNG M C, KANG M Y, KIM S. Does polycentric development produce less transportation carbon emissions? evidence from urban form identified by night-time lights across US metropolitan areas[J]. *Urban Climate*, 2022, 44: 101223.
- [15] SHEN Y S, LIN Y C, CHEAH W, et al. Influences and pathways of urban form and lifestyle on carbon emission reduction[J]. *Urban Climate*, 2022, 46: 101325.
- [16] LIU W L, ZUO B H, QU C L, et al. A reasonable distribution of natural landscape: utilizing green space and water bodies to reduce residential building carbon emissions[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 267: 112150.
- [17] 叶玉瑶, 张虹鸥, 许学强, 等. 面向低碳交通的城市空间结构: 理论、模式与案例[J]. *城市规划学刊*, 2012(5): 37-43.
- [18] CHEN S S, HAASE D, QURESHI S, et al. Integrated land use and urban function impacts on land surface temperature: implications on urban heat mitigation in Berlin with eight-type spaces[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 83: 103944.
- [19] GLEASER E L, KAHN M E. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development[J]. *Journal of Urban Economics*, 2008, 67(3): 404-418.
- [20] 刘志林, 秦波. 城市形态与低碳城市: 研究进展与规划策略[J]. *国际城市规划*, 2013, 28(2): 4-11.
- [21] LI Y F, SCHUBERT S, KROPP J P, et al. On the influence of density and morphology on the urban heat island intensity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2647.
- [22] 潘海啸. 面向低碳的城市空间结构: 城市交通与土地使用的新模式[J]. *城市发展研究*, 2010, 17(1): 40-45.
- [23] 杨文越, 曹小曙. 多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1814-1828.
- [24] HONG J, GOODCHILD A. Land use policies and transport emissions: modeling the impact of trip speed, vehicle characteristics and residential location[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 26: 47-51.
- [25] ALI U, SHAMSI M H, HOARE C, et al. Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 246: 111073.
- [26] RODE P, KEIM C, ROBAZZA G, et al. Cities and energy: urban morphology and residential heat-energy demand[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2014(41): 138-162.
- [27] 尚嫣然, 张悦, 薛昊天. 市县联动的国土空间规划传导体系研究: 以湖北省黄冈市为例[J]. *规划师*, 2021, 37(19): 35-40.
- [28] 孙施文. 国土空间规划的知识基础及其结构[J]. *城市规划学刊*, 2020(6): 11-18.
- [29] 孙施文. 从城乡规划到国土空间规划[J]. *城市规划学刊*, 2020(4): 11-17.
- [30] 孙嘉麟, 杨新海, 吕飞. “双碳”目标下乡镇国土空间存在问题与优化路径[J]. *规划师*, 2022, 38(1): 41-48.
- [31] 朱雷洲, 谢来荣, 黄亚平. 当前我国国土空间规划研究评述与展望[J]. *规划师*, 2020, 36(8): 5-11.
- [32] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. *城市规划学刊*, 2021(4): 74-80.
- [33] MOUDON A V. Urban morphology as an emerging interdisciplinary field[J]. *Urban Morphology*, 1997(1): 3-10.
- [34] 刘鹏, 董卫, 马库斯·尼珀. 基于地块的形态—类型分析框架: 以南京城南历史城区的演变为例[J]. *城市发展研究*, 2020, 27(4): 62-71.
- [35] 刘铨, 丁沃沃. 城市肌理形态研究中的图示化方法及其意义[J]. *建筑师*, 2012(1): 5-12.
- [36] 朱思洁, 石邢. 城市形态学视角下城市绿地形态研究审视与探讨[J]. *现代城市研究*, 2021(11): 82-88.
- [37] 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.
- [38] 李春慧, 胡林, 王晓宁, 等. 基于“双碳”目标的城乡规划策略[J]. *规划师*, 2022, 38(1): 12-16.
- [39] XIA C Y, DONG Z Y Z, WU P, et al. How urban land-use intensity affected CO₂ emissions at the county level: influence and prediction[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109601.
- [40] NASERIKIA M, HART M A, NAZARIAN N, et al. Background climate modulates the impact of land cover on urban surface temperature[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 15433.
- [41] WOLDAY F. The effect of neighbourhood and urban center structures on active travel in small cities[J]. *Cities*, 2022: 104050.
- [42] ZHOU X G, YEH A G O, YANG Y, et al. Residential-employment mixed use and jobs-housing balance: a case study of Shenzhen, China[J]. *Land Use Policy*, 2022, 119: 106201.
- [43] 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.
- [44] 张赫, 王睿, 于丁一, 等. 基于差异化控碳思路的县级国土空间低碳规划方法探索[J]. *城市规划学刊*, 2021(5): 58-65.
- [45] ZHOU Y, CHEN M X, TANG Z P, et al. Urbanization, land use change and carbon emissions: quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 66: 102701.
- [46] HUO T F, LI X H, CAI W G, et al. Exploring the impact of urbanization on urban building carbon emissions in China: evidence from a provincial panel data mod-

- el]]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 56: 102068.
- [47] RIBEIRO H V, RYBSKI D, KROPP J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3204.
- [48] 蒋宇超, 金晓斌, 覃丽君, 等. 近六百年来城市建成区扩展过程与特征分析: 以苏沪地区为例[J]. *城市规划*, 2019, 43(12): 55-68.
- [49] 方创琳, 祁巍锋. 紧凑城市理念与测度研究进展及思考[J]. *城市规划学刊*, 2007(4): 65-73.
- [50] CERVERO R. Planned communities, self-containment and commuting: a cross-national perspective[J]. *Urban Studies*, 2016, 32(7): 1135-1161.
- [51] 曹小曦, 梁斐雯, 陈慧灵. 特大城市空间形态差异对交通网络效率的影响[J]. *地理科学*, 2019, 39(1): 41-51.
- [52] YE H, HE X Y, SONG Y U, et al. A sustainable urban form: the challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 90-98.
- [53] LI P L, ZHAO P J, BRAND C. Future energy use and CO₂ emissions of urban passenger transport in China: a travel behavior and urban form based approach[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 820-842.
- [54] RODRIGUE J P, COMTOIS C, SLACK B. The geography of transport systems: 2nd ed[M]. New York: Routledge, 2009.
- [55] 石飞, 王炜. 城市路网结构分析[J]. *城市规划*, 2007(8): 68-73.
- [56] SCHWAAB J, MEIER R, MUSSETTI G, et al. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6763.
- [57] 韩笑, 单峰, 贾茵, 等. 新时期城市园林绿化评价指标研究: 以徐州市为例[J]. *中国园林*, 2021, 37(12): 20-25.
- [58] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.
- [59] JI Q F, LI C C, MAKVANDI M, et al. Impacts of urban form on integrated energy demands of buildings and transport at the community level: a comparison and analysis from an empirical study[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 79: 103680.
- [60] SHARIFI A. Resilient urban forms: a review of literature on streets and street networks[J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 171-187.
- [61] BATTISTA G, DE LIETO VOLLARO E, OCLÓN P, et al. Effect of mutual radiative exchange between the surfaces of a street canyon on the building thermal energy demand[J]. *Energy*, 2021, 226: 120346.
- [62] 丁沃沃, 胡友培, 窦平平. 城市形态与城市微气候的关联性研究[J]. *建筑学报*, 2012(7): 16-21.
- [63] OKE T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations[J]. *Journal of Climatology*, 1981, 1(3): 237-254.
- [64] 周扬, 钱才云. 低碳出行导向的居住街区适宜尺度研究[J]. *建筑学报*, 2017(9): 68-73.
- [65] 王峤, 臧鑫宇. 城市街区制的起源、特征与规划适应性策略研究[J]. *城市规划*, 2018, 42(9): 131-138.
- [66] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design[J]. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 1997, 2(3): 199-219.
- [67] EGGIMANN S. The potential of implementing superblocks for multifunctional street use in cities[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(5): 406-414.
- [68] 陈天, 臧鑫宇, 王峤. 生态城绿色街区城市设计策略研究[J]. *城市规划*, 2015, 39(7): 63-69.
- [69] 刘鹏, NEPL M. 中国历史城市的地块肌理保护研究: 内涵、演变和策略[J]. *城市规划学刊*, 2020(5): 92-99.
- [70] ROSENFELD A, ARTHUR H, AKBARI H, et al. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates[J]. *Energy and Buildings*, 1995, 22(3): 255-265.
- [71] EWING R, RONG F. The impact of urban form on U.S. residential energy use[J]. *Housing Policy Debate*, 2008, 19(1): 1-30.
- [72] 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, 41(6): 83-91.
- [73] 郭洪旭, 肖荣波, 李晓晖, 等. 城市控制性详细规划的碳排放评估[J]. *城市规划*, 2019, 43(9): 86-94.
- [74] MOUZOURIDES P, KYPRIANOU A, NEOPHYTOU M K A, et al. Linking the urban-scale building energy demands with city breathability and urban form characteristics[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101460.
- [75] BANSAL P, QUAN S J. Relationships between building characteristics, urban form and building energy use in different local climate zone contexts: an empirical study in Seoul[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 272: 112335.
- [76] MARTINS T, FARAUT S, ADOLPHE L. Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 190: 262-278.
- [77] 曾穗平, 田健, 曾坚. 基于CFD模拟的典型住区模块通风效率与优化布局研究[J]. *建筑学报*, 2019(2): 24-30.
- [78] 郑德高, 董淑敏, 林辰辉. 大城市“中密度”建设的必要性及管控策略[J]. *国际城市规划*, 2021, 36(4): 1-9.
- [79] 吴南, 王雪岚, 杨军, 等. 城市规划中的减碳和固碳策略研究[J]. *规划师*, 2012, 28(S2): 267-270.
- [80] 王厚军, 李小明, 张祖陆, 等. 1979—2006年沈阳市城市空间扩展过程分析[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2673-2679.
- [81] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 城市综合交通体系规划标准(GB/T 51328—2018)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [82] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022年城市体检指标体系[R/OL]. [2022-07-04]. <http://www.mohurd.gov.cn>
- [83] 马一翔, 尚嫣然, 冯雨. 北方社区碳排放的空间影响因素分析: 以烟台市为例[J]. *城市发展研究*, 2022, 29(4): 118-124.