

基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究*

郑德高 吴浩 林辰辉 翁婷婷

提 要 在国家承诺2030碳达峰与2060年碳中和的背景下,城市是碳排放的重点也是低碳发展的重要载体。目前我国对低碳城市的研究是风起云涌,但需要更加重视科学理性的减碳逻辑。从碳排放核算角度出发,在规划建设运营的城市全生命周期前端提出更加系统性的规划减碳策略。通过识别消费端碳排放核算的六个维度,溯源不同尺度下碳排放的结构特征,提出在片区尺度构建城市减碳单元。在单元内以各维度碳排放计算公式为依据,以降低单元内碳排放为目标,从城绿共生的融合城市、绿色出行的紧凑城市、集约高效的循环城市、人性化的街坊与建筑、智慧管治支撑系统五个方向集成规划减碳的技术体系,并提出每个方向的关键技术和核心指标,为制定城市减碳单元的减碳方案提供集成型的减碳对策。

关键词 碳核算;城市减碳单元;规划减碳技术

中图分类号 TU984 文献标识码 A
DOI 10.16361/j.upf.202104007
文章编号 1000-3363(2021)04-0043-08

The Formulation of Urban Carbon Reduction Unit and Integrated Planning Methodology Based on Carbon Accounting

ZHENG Degao, WU Hao, LIN Chenhui, WENG Tingting

Abstract: China has made the commitment to reach the peak of carbon emission by 2030 and carbon neutrality by 2060, and cities should become the key policy focus of carbon reduction effort and low-carbon development. At the present, low-carbon cities in China are growing vigorously, but more attention need to be paid to scientific and rational carbon reduction effort. From the perspective of carbon emission accounting, this paper proposes a systematic carbon reduction strategy with clearer and efficient targets from the early stage of the whole life cycle of city planning, construction and operation. By identifying the six dimensions of carbon emission accounting at the consumer end and tracing the structural characteristics of carbon emission at different scales, this paper proposes to formulate urban carbon reduction units at the regional scale. Within each unit, carbon emission of each dimension is calculated according to formula, and toward the goal of reducing unit-wide carbon emission, a technological system of carbon reduction is integrated from five directions, namely city of green symbiosis, compact city for green commuting, city of efficient recycling, human-centered neighborhood and architecture, and smart urban governance system. The key technologies and core indicators of each direction are put forward to form integrated carbon reduction strategies for urban carbon reduction units.

Keywords: carbon accounting; urban carbon reduction unit; urban planning carbon reduction methodology

为应对全球气候变化,我国在第75届联合国大会上提出“二氧化碳(CO₂)排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的庄严目标承诺。新的减碳目标将倒逼整个经济与社会系统进行结构性调整,向低碳转型成为当前城镇化新阶段发展目标,低碳既是中国向国际社会的一种承诺,也是全球新一轮技术竞争的主战场。在此形势下,城市地区作为承担地区重大战略发展任务的综合功能区,更需要推进深度低碳转型,成为国家实现低碳发展的重要路线样本。

当前城市地区的低碳研究涉及能源、交通、工业、建筑等诸多领域,但研究成果主要集中于单一维度,偏重工程技术,尚缺乏基于量化的碳排放核算标准,通过城市规划手段以更小成本实现基础设施、交通运输、绿色空间等多个维度的协调配合,正向发挥多维度的叠加效应,实现最大化的整体减碳效果。

*基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题资助“城市新区绿色规划设计技术集成与示范”(项目编号:2018YFC0704606)

作者简介

郑德高,中国城市规划设计研究院副院长,教授级高级城市规划师, zdg2000@163.com

吴浩,中国城市规划设计研究院上海分院,城市规划师

林辰辉,中国城市规划设计研究院上海分院院长助理,高级城市规划师

翁婷婷,中国城市规划设计研究院上海分院,城市规划师

本文结合相关理论与实践经验,在溯源城市消费端碳排放维度的基础上,识别城市规划减碳的关键尺度,构建片区尺度的城市减碳单元,以降低城市碳排放为目标在单元内集成规划减碳技术,为城市提供规划减碳对策支撑。

1 相关研究综述

在城市规划领域碳排放的相关研究主要包含两个重点方向。一是城市地区碳排放的核算方法研究,关注多尺度多维度的计量核算研究。另一个是城市减碳技术方法研究,从城市空间形态、产业结构、低碳指标体系等角度提出减碳策略(沈娉,等,2020)。同时从微观建筑到宏观区域与国家的不同空间尺度,碳排放的核算方法不同,减碳策略的重点也有所不同。

1.1 城市碳排放核算的相关研究

城市碳排放的核算研究尚未形成系统性成果(李迅,等,2009),不同学者针对不同城市尺度,往往会根据地区特性和数据获取情况,选择碳排放的多个维度构建碳排放清单(表1)。在国家及城市尺度,多从能源碳排放、工业碳排放和废弃物处理碳排放等维度入手计算,将能源结构和产业结构作为影响碳排放的关键因素(张梅,等,2019;LIU Chao,等,2012)。在城市片区尺度,通常包含建筑碳排放、交通碳排放和绿色碳汇维度,既有研究往往会根据测算对象调整核算维度,例如在工业园区的核算中增加工业维度(叶祖达,2009),在居住社区中将废弃物维度进一步细化分解(黄建,等,2019)。在街区尺度,碳排放核算会更加针对建筑布局,关注微气候、空间形态等指标对街区碳排放的影响(扈万泰,等,2012;邬尚霖,等,2016)。总之,能源、建筑、交通和绿色碳汇在碳排放核算的各个尺度应用最多,且核算方法较为成熟。工业和废弃物维度随核算对象特征不同,被研究者有选择性地纳入核算清单。

1.2 城市减碳技术方法的相关研究

城市减碳技术随研究尺度不同,其减碳策略的重点差异较大。通过梳理各

表1 既有研究中碳排放核算及减碳策略一览表

Tab.1 Carbon emission accounting and carbon reduction strategies in the existing studies

| 论文名称 | 作者 | 计算公式 | 运用尺度 | 减碳策略 |
|---|--|---|------|--|
| 中国城市碳排放核算及影响因素研究 | 张梅, 黄贤金, 揣小伟 (2019) | 碳排放总量=能源消耗碳排放+工业生产过程碳排放+废弃物处理碳排放 | 国家尺度 | <ul style="list-style-type: none"> • 关注空间效应, 发挥中心区域的碳减排影响力 • 优化产业结构, 鼓励高科技产业和第三产业的发展 • 大力宣传绿色低碳的生活方式 |
| Exploring an integrated urban carbon dioxide (CO ₂) emission model and mitigation plan for new cities | LIU Chao, HUANG Sen, XU Peng, PENG Zhongren (2018) | 碳排放总量=(建筑+运输)碳排放-绿化碳汇 | 城市尺度 | <ul style="list-style-type: none"> • 提高建筑材料标准和运输效率; 实施绿色低影响的施工管理; 采用新能源和提高能效; 增大建筑回收利用比例 • 增大职住平衡, 减少人均每日车辆行驶里程 • 增大绿地比例, 增大灌木比例 |
| 上海市城市总体规划碳排放核算方法研究 | 李毅, 任云英 (2019) | 碳排放总量=(工业仓储用地+交通用地+居住用地+公共设施用地-公园绿地)碳排放 | 城市尺度 | <ul style="list-style-type: none"> • 控制公共设施建筑的总量 • 鼓励居民公共出行 • 调整生态用地结构, 增加森林面积 |
| 基于碳排放清单编制的低碳城市规划技术方法研究 | 王雅捷, 何永 (2015) | 碳排放总量=生产端碳排放+建筑端碳排放+交通碳排放-绿色碳汇 | 城市尺度 | <ul style="list-style-type: none"> • 提升建筑可再生能源使用比例, 发展节能建筑 • 调整工业结构, 降低单位能耗 • 优化交通出行方式分担率 • 增加绿地面积 |
| 碳排放量评估方法在低碳城市规划中的应用 | 叶祖达 (2009) | 碳排放总量=工业碳排放量+建筑碳排放量+交通碳排放量+能源碳排放量 | 片区尺度 | -- |
| 低碳社区碳排放核算及减排路径研究 | 黄建, 罗淑湘, 史军, 孙金额 (2019) | 碳排放总量=建筑碳排放+交通碳排放+固废处理碳排放+废水处理碳排放 | 片区尺度 | <ul style="list-style-type: none"> • 提升职住平衡; 提升绿色出行比例; 提升电动车数量 • 提升新建绿色建筑比例 • 餐厨厨余垃圾本地化、资源化处理 • 增加中水处理及雨水收集比例 • 增加可再生能源比例 |
| 社区碳排放评估及其空间分布研究 | 黄娅 (2019) | 碳排放总量=(建筑+交通+废弃物)碳排放-绿色空间碳汇 | 街区尺度 | -- |
| 城市商务街区低碳规划技术集成研究 | 李冬凌 (2019) | 碳排放总量=(建筑+交通+能源)碳排放-绿色碳汇 | 街区尺度 | -- |

资料来源:张梅,等,2019;刘超,等,2012;李毅,等,2019;王雅捷,等,2015;叶祖达,2009;黄建,等,2019;黄娅,2019;李冬凌,2019。

尺度的减碳策略可以发现,空间尺度越大,减碳技术越偏向能源、工业等生产端部门,空间尺度越小(如城市片区和街区层面),减碳技术越偏向建筑、交通等城市消费端。除此之外,现阶段的城市减碳技术尚存在以下两个主要问题。

(1)既有研究多基于定性分析视角,缺少碳排放定量溯源下的针对性策略

现有的城市减碳策略主要围绕紧凑空间布局、公交导向发展模式、绿色空间布局、可再生能源利用和提高能源利用效率等方面,对城市发展提出定性的原则和要求。一些城市会提出碳排放空间管治、低碳规划指标体系等手段来引导城市发展和建设(王雅捷,等,2015),但是由于缺少核算数据的支撑,关于空间结构、人口和建筑密度、用地布局等城市规划的核心要素对城市碳排放的影响程度研究较少,也就是说许多

学者研究的减碳技术对城市减碳总目标来说是雪中送炭还是锦上添花缺乏更加科学的认识,多停留在定性研究层面,削弱了规划减碳策略的科学性。

(2)既有研究侧重工程减碳技术,缺少规划层面的减碳方法

当前我国减碳技术的研究与应用多在城市运营阶段,且较多侧重于工程技术。绿色建筑、能源减排等工程领域热度普遍较高,缺乏来自城市规划层面的减碳技术。近年来,一些学者开始尝试从城市规划层面评估能源结构优化、产业结构调整、生活方式转变等方面提出减排措施(颜文涛,等,2011;吴乘月,等,2017),但是现有的国家和省级碳排放清单较多的局限在几大部门的能耗和碳排放总量,而未能将能耗分解到具体的终端活动,难以与城市规划的关键要素产生有机联系。

2 基于消费端的碳排放核算维度识别

2.1 城市碳排放的核算方法

当前国际上较成熟的碳排放核算模型有IPCC模型、WRI分析模型、GPC模型、LEAP模型、Kaya模型等。其中，IPCC模型作为世界气象组织（WMO）和联合国环境规划署（UNEP）共同建立的政府间气候变化专门委员会发布的温室气体清单，为世界各国建立国家温室气体清单和减排履约提供较为权威的方法和规则。基于IPCC排放清单的碳排放计算方法为：

$$\text{碳排放量} = \text{活动数据} \times \text{排放因子}$$

其中，活动数据代表人类活动导致的排放或清除的数据，排放因子代表量化每单位活动的气体排放量或清除量的系数。IPCC（2019）最新公布的《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》（以下简称《IPCC温室气体排放指南》）将温室气体分为四大类部门：能源、工业过程及产品、农/林业及土地利用和废弃物管理，在这四类部门之下划分出一级或多级子类部门，通过适当方法核算各级子类部门排放并逐级汇总后，最终形成温室气体清单。

2.2 基于消费端的碳排放核算维度

由于《IPCC温室气体排放指南》的分类来源于温室气体的生产部门，无法直接判断城市消费端各维度对碳排放的贡献情况，对提出规划减碳策略缺乏直接的指导意义。本研究对四大生产部门的子类部门进行分解重组，将各部门碳排放转译至城市消费端，以此评估各类城市活动导致的碳排放量以及城市活动与碳排放结构的关系，揭示人类活动对于全球气候变化的影响。

分解温室气体的生产部门，可以发现：在能源部门，温室气体主要来自燃料燃烧以及开采和运输过程中的气体逸散。其中，燃料燃烧为城市日常生活、交通运输、产品制造提供了热量、电力等能源，是能源部门碳排放的主要组成部分。在工业过程部门，温室气体主要来自水泥、金属等工业生产中的物理化学反应。在农/林业及土地利用部门，温

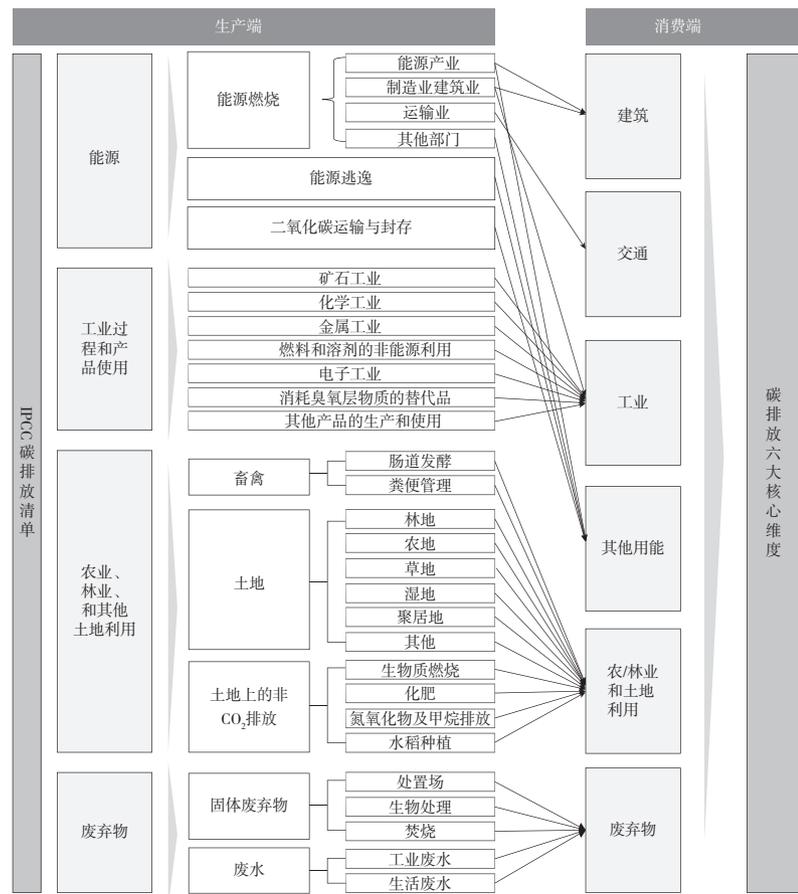


图1 碳排放消费端维度转译图

Fig.1 Carbon emission from the consumption side

资料来源：作者自绘。

室气体主要来自牲畜的肠道和粪便排放，野外的植物燃烧以及作物及化肥引起的土地中甲烷和氮氧化物排放三个部分。在废弃物部门，温室气体主要来自固体废弃物和废水处理中产生的甲烷（CH₄）及二氧化碳（CO₂）。

从城市消费端的角度重新归纳排放部门的细分内容，可以将碳排放划分为建筑、交通、工业、其他能源活动、农/林业和其他土地利用和废弃物六个维度。其中，建筑对应的能源部门中公共及居住建筑的能源使用所产生的碳排放；交通对应能源部门中移动端的燃料燃烧所产生的碳排放；工业对应能源部门中制造业所使用的燃料燃烧以及制造过程中物理化学反应所产生的碳排放；其他能源活动对应的为能源部门中能源生产、运输逸散过程中产生的碳排放；农/林业和其他土地利用对应农业生产中的碳排放量与土地中各类植物碳汇量的差值；废弃物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。由此，通过生产端向消费端的转译，完成了IPCC温室气体排放清单与城市规划体系的相互衔接（图1）。

2.3 多重尺度下的碳排放结构比较

本次研究通过比较不同尺度下城市空间的碳排放结构，识别各个尺度的减碳重点。将空间划分四类尺度，包含国家尺度、城市尺度，片区尺度和街区尺度。其中，国家尺度即整个国家范围；城市尺度为城市市域范围；片区尺度为城市中由自然地物或生态走廊分隔的功能区域，通常覆盖10—30km²的空间范围；街区尺度为单个或多个街坊组成的城市空间，通常覆盖1—3km²的空间范围。

从国家、城市、片区、街区尺度选取实际案例进行碳排放核算。在国家、城市尺度，根据年鉴类统计数据掌握各消费端能源消耗情况，计算出各维度的

碳排放量。在片区及街区尺度，根据空间数据及现场调查结果，将城市规划要素纳入碳排放计算公式，间接得到各维度的碳排放数据（图2）。

对比计算结果（表2）发现，由能源消耗所引起的碳排放占据了主体地位，而不同空间尺度碳排放结构的异同，也会导致减碳策略侧重点的变化。在全国和城市尺度，工业维度和其他用能维度的碳排放量占比超过全部碳排放量的75%，能源结构的调整和生产工艺的进步显得尤为重要，在减碳措施中能源和工业维度的指标控制占据了主要地位（表3）。在片区尺度，建筑碳排放最为突出，其次为工业与交通的碳排放，林/农业及土地利用维度还能产生一定的碳汇。不同的城市片区城市空间各要素的功能布局、形态布局将对城市片区的碳排放量产生影响。通过适当的规划干预能形成更加低碳的整体空间形态、低碳建筑、绿色交通体系以及高效的绿色碳汇空间，以降低整体碳排放量。

3 城市规划减碳单元构建

迈向碳中和的城市减碳策略不能仅局限在运营阶段的技术减碳层面，而应在规划建设运营城市全生命周期的前端制定合理的减碳策略，发挥城市规划在城市发展中的战略引领和刚性控制作用，把握方案优化对城市的碳排放量影响，以更低的成本降低城市碳排放量。

当前中国处于城镇化发展的后期，城市发展处于存量转型阶段，城市建设活动主要在中观和微观尺度上进行，在城市市域——城市片区——城市街区的不同尺度中，城市片区的减碳处于承上启下的关键尺度之中；在市域尺度，城市的减碳主要在能源与工业领域；在微观尺度城市的减碳主要在建筑单体领域。在中观尺度，城市的减碳可以发挥城市规划的管控与引领作用。

结合中新天津生态城、青岛中德生态园等实践的探索（表4），本文界定的城市规划减碳的关键尺度在于10—30km²，也是一个相对理想的规划减碳单元。首先，中观尺度下的城市形态是城市规划的主要研究对象，也是影响建筑、交通和林/农业及土地利用等维度碳排放

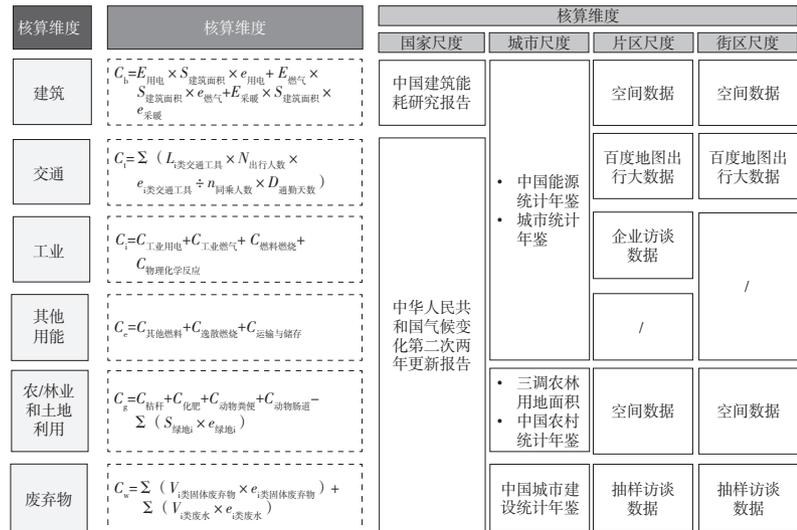


图2 多重维度碳排放核算路径图
Fig.2 Multi-dimensional carbon emission accounting path
资料来源：作者自绘。

注： C_b 为建筑维度的碳排放量， $E_{用电}$ 为单位面积建筑用电能耗， $E_{燃气}$ 为单位面积建筑燃气能耗， $E_{采暖}$ 为单位面积建筑采暖能耗， $S_{建筑面积}$ 为建筑面积， $e_{用电}$ 为建筑用电的碳排放系数， $e_{燃气}$ 为建筑用燃气的碳排放系数， $e_{采暖}$ 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 为第*i*类交通工具的平均通勤距离， N 为出行人数， n 为第*i*类交通工具的载客量， $D_{通勤天数}$ 为第*i*类交通方式的全年通勤天数。 C_i 为工业维度碳排放量， $C_{工业用电}$ 为工业生产用电的碳排放量， $C_{采暖}$ 为工业生产采暖产生的碳排放量， $C_{燃料燃烧}$ 为工业生产过程中燃料燃烧产生的碳排放量， $C_{物理化学反应}$ 为工业生产中物理化学反应产生的碳排放量。 C_o 为其他用能过程中产生的碳排放量， $C_{其他燃烧}$ 为除建筑、交通、工业维度以外的燃料燃烧过程中产生的碳排放量， $E_{选煤燃烧}$ 为燃料开采、生产过程中的碳排放量， $C_{运输与储存}$ 为燃料运输与储存过程中的碳排放量。 C_s 为土地上林业、农业活动产生的碳排放量与碳汇吸收量之和， $C_{秸秆}$ 为燃烧秸秆产生的碳排放量， $C_{化肥}$ 为化肥使用产生的二氧化碳当量， $C_{动物粪便}$ 为动物粪便产生的二氧化碳当量， $C_{动物肠道}$ 为动物肠道活动产生的二氧化碳当量， $S_{绿地}$ 为第*i*类绿地的面积， $e_{绿地}$ 为第*i*类绿地的单位面积碳汇量。 C_w 为废弃物处理产生的碳排放量， V_i 为第*i*类固体废弃物的总量， $e_{固体废弃物}$ 为第*i*类固体废弃物处理的碳排放系数， V_i 为第*i*类废水的总量， $e_{类废水}$ 为第*i*类废水处理的碳排放系数。

表2 四种尺度下碳排放结构统计表

Table.2 Statistical table of carbon emission structure under four scales

| 维度 | 建筑 (%) | 交通 (%) | 工业 (%) | 其他用能 (%) | 林/农业及土地利用 (%) | 废弃物 (%) |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|----------|---------------|---------|
| 国家尺度（以中国为例） ^① | 18.04 | 7.4 | 46.72 | 28.65 | -2.55 | 2 |
| 城市尺度（以天津市为例） ^② | 20.6 | 6.7 | 56.4 | 16.3 | -1.1 | 1.1 |
| 片区尺度（以中新天津生态城为例） ^③ | 81.8 | 5.5 | 16.9 | -- | -5.4 | 1.2 |
| 街区尺度（以中新天津生态城内某街区为例） ^④ | 95 | 1.1 | -- | -- | -0.1 | 5.2 |

注：①国家尺度各维度碳排放量根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告2018》以及《中国建筑能耗研究报告》中碳排放量分类统计得出；②天津市建筑、交通及工业等活动水平数据来源于《中国能源统计年鉴2018》和《天津市统计年鉴2018》，农/林业及土地利用的活动水平数据来源于《中国农村统计年鉴2018》，碳汇数据主要基于现状三调农林用地的面积统计，废弃物处理的活动水平数据来源于《中国城市建设统计年鉴2018》和《中国环境统计年鉴2018》；③④中新天津生态城及内部街区碳排放数据基于《天津中新生态城总体规划》、交通通勤大数据、居民抽样访谈数据采集整理计算得出。

资料来源：作者自绘。

表3 碳排放关键维度与减碳策略对比表

Table.3 Comparison of carbon emission structure and carbon reduction strategies

| 维度 | 关键维度 | 减碳策略 |
|------|-------------|--------------------------------|
| 国家尺度 | 工业、其他用能 | 调整能源结构、优化产业结构、提升生产工艺等 |
| 城市尺度 | | |
| 片区尺度 | 建筑、工业、交通、碳汇 | 调节空间形态、发展低碳建筑、构建绿色交通体系、提升绿地碳汇等 |
| 街区尺度 | 建筑、废弃物 | 发展低碳建筑、提升废弃物回收利用比例等 |

资料来源：作者自绘。

量的主要因素。中观尺度的城市规划减碳手段更加丰富多元，可以通过指标控制和形态控制的双重手段实现减碳。当

前减碳规划试点如雄安新区启动区、中新天津生态城、青岛中德生态园等，覆盖范围均在10km²到30km²之间。其次，

表4 低碳城区及规划减碳体系表

Tab.4 Statistics of low carbon urban areas and planned carbon reduction system

| 新区名称 | 面积 (km ²) | 下辖空间层次 | 规划减碳维度 |
|---------|-----------------------|-----------------|--|
| 雄安新区启动区 | 38 | 6个混合组团 | 空间形态、土地利用、交通系统、市政设施、生态绿地 |
| 中新天津生态城 | 31.23 | 4个居住组团、1个公共服务组团 | 单位GDP碳排放强度、绿色建筑比例、绿色出行比例、垃圾回收利用率、可再生能源使用率、城市热岛效应强度 |
| 青岛中德生态园 | 11.58 | 4个混合组团 | 经济优化、环境友好、资源节约、包容发展 |
| 新加坡登加镇 | 7 | 5个居住组团、1个创新园区组团 | 开发模式、绿色交通、居住社区、住房保障、绿地系统、景观风貌、智能科技 |

资料来源：根据《河北雄安新区启动区控制性详细规划2020》公示稿、《中新天津生态城总体规划2008—2020》《中德未来城概念规划2018》《新加坡总体规划草案2019》整理而成。

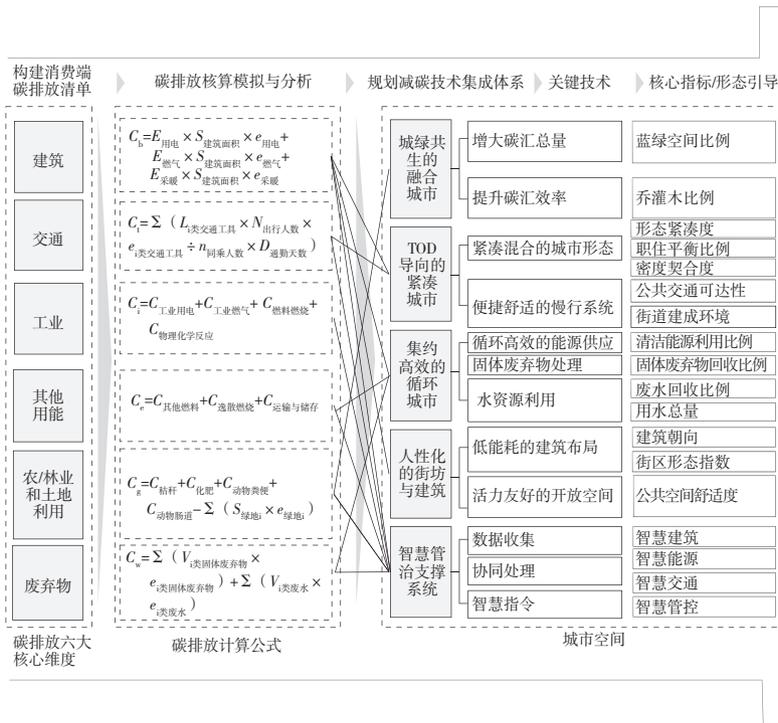


图3 城市减碳单元规划集成技术体系

Fig.3 Integrated technology system of urban carbon reduction unit planning

资料来源：作者自绘。

能源活动的特征决定了规划减碳的单元性：明确减碳单元的边界，有利于控制单元内部的能量和物质流动，促进形成循环并减少资源浪费。例如青岛中德生态园从低碳能源建设的角度出发，将整个片区作为一个循环单元，基于泛能站的覆盖半径，将片区继续细分为组团、街区、街坊等多个次级单元。最后，规划减碳单元作为拥有相对独立且能够承担城市综合功能的中尺度空间单元，与城市的控规单元结构类似，在空间规划体系中起到了向上承接总体规划，向下传导街坊与建筑的作用。新加坡登加镇的规划减碳体系就构建了镇区、社区、建筑三个空间层次，并通过不同颗粒度的控制指标向下逐级传导。

4 基于城市减碳单元的规划技术集成体系

当前，规划减碳技术在单一维度研究上比较成熟，但不同系统之间既有协同也有矛盾。为了提升减碳效率，使各类规划减碳技术形成合力，本次基于不同系统之间的协同效能，以消费端减碳维度的碳排放核算为基础，综合考虑各系统规划设计技术的应用规模和减碳效应，构建由“集成方向——关键技术——核心指标/形态引导”组成的城市减碳单元内的规划减碳技术集成体系。

依照城市片区各消费端碳排放和碳汇的强度不同，当前城市片区规划的减

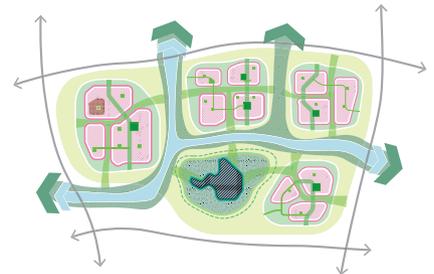


图4 城绿共生的融合城市空间模式图

Fig.4 Spatial model of urban-green symbiosis city

资料来源：作者自绘。

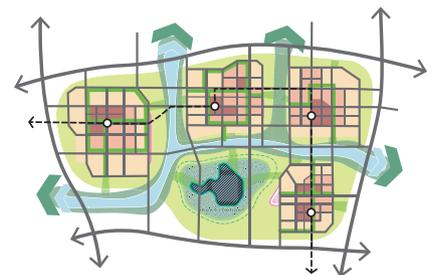


图5 绿色出行的紧凑城市空间模式图

Fig.5 Spatial model of compact city for green commuting

资料来源：作者自绘。

碳重点主要集中在以增加碳汇为重点的城绿共生的融合城市（图4）；以低碳交通为重点的绿色出行的紧凑城市（图5）；以能源再利用、减少废弃物为重点的循环城市（图6）；以低碳建筑与适宜的气候为重点的人性化街坊与建筑（图7）；以及数字化为重点的智慧管治系统（图8）5个方面。

4.1 城绿共生的融合城市

蓝绿空间是城市重要的碳汇空间，充分连通的蓝绿空间构成了减碳单元的生态网络，缓解了城市发展对气候变化和生态系统的影响（陈琳，等，2011）。城绿共生的融合城市关键技术在于增大碳汇总量、优化植被类型。根据碳汇公式，蓝绿空间占比和乔灌木占比是影响碳排放的两大核心指标。

首先，规划应保证充足的蓝绿空间，增大碳汇总量。提升蓝绿空间规模应该以资源环境承载能力为刚性约束条件，依据所在地水资源条件、社会经济状况和生态景观要求等实际情况，合理提升城市蓝绿空间比例。通常来说，随着空间尺度缩小，蓝绿空间比例通常逐渐缩小：片区尺度不宜低于30%，组团尺度

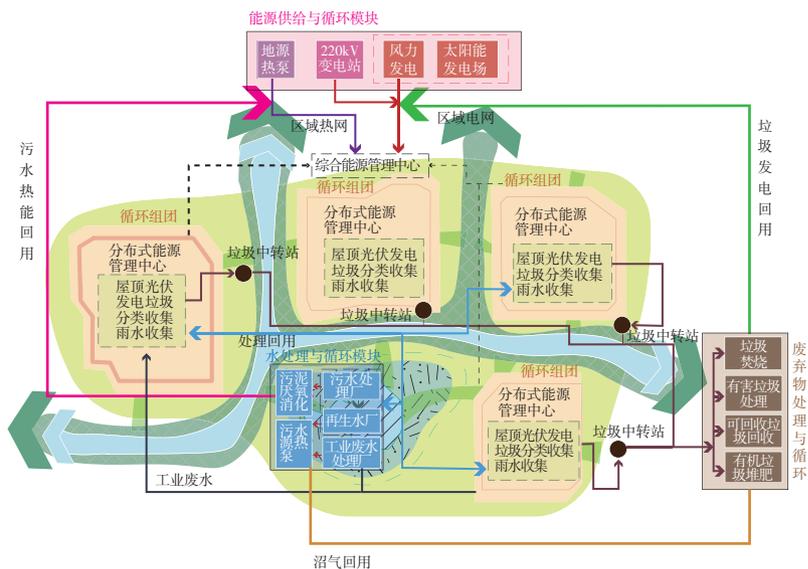


图6 集约高效的循环城市空间模式图

Fig.6 Spatial model of efficient recycling city

资料来源：作者自绘。

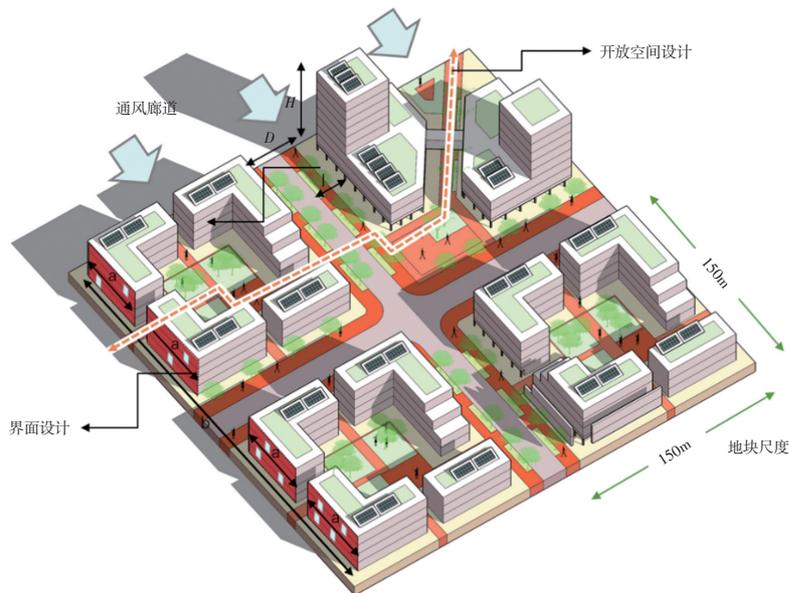


图7 人性化的街坊与建筑空间模式图

Fig.7 Spatial model of human-centered neighborhood and building

资料来源：作者自绘。

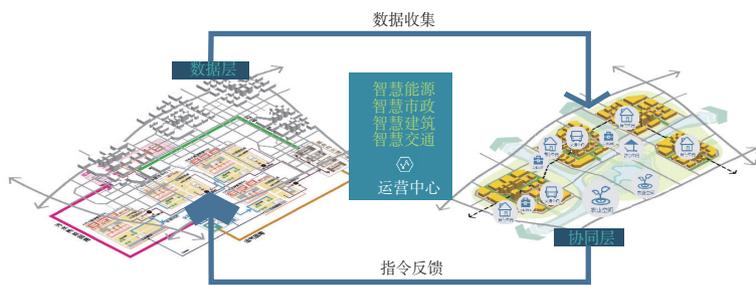


图8 智慧管治支撑系统空间模式图

Fig.8 Spatial model of smart governance system

资料来源：作者自绘。

不宜低于15%。

其次，按照碳核算模型配置适宜的植被类型能够有效提升绿地的碳汇效率。各类研究表明，同等面积的绿色空间，森木的碳汇量约为草坪碳汇量的30倍，灌木的碳汇量是草坪碳汇量的6倍（方精云，2007）。因此，城市绿地植被种植设计应优先选择乔木、灌木等高效固碳植被类型。绿地覆盖面积中乔灌木设计配比宜控制在50—70%，同时根据所在城市的自然条件因地制宜地进行设计配置。

4.2 绿色出行的紧凑城市

绿色出行导向的紧凑城市旨在降低交通维度的城市碳排放，根据交通枢纽配置确定土地集约程度和开发密度，优化城市结构与形态，发展职住平衡的功能空间，建立绿色出行导向的综合交通网络。绿色出行导向的紧凑城市的关键技术在于形成紧凑混合的城市形态和便捷高效的公交系统。基于交通维度的碳排放公式，平均出行距离和绿色交通出行方式占比是影响碳排放的两大核心指标。

首先，规划应倡导形成紧凑多孔的空间形态、职住平衡的功能布局和契合公共交通网络的密度分布。过度分散的城市形态通常会导致通勤距离的增加，而过于集中的城市形态也易于带来交通拥堵。采用形态紧凑度和网格分形维数两项指标，量化城市片区的整体形态和用地填充度，经研究形态紧凑度宜大于等于0.5，用地填充度宜控制在1.5—1.8之间（方创琳，等，2007）。同时，鼓励片区内功能混合布局引导居民趋向于就近工作，缩短出行距离和时间，提升步行、自行车或者其他的非机动车方式的出行比例。减碳单元内，规划应控制超过50%的混合街坊，保证0.8—1.2的职住平衡度。考虑到小汽车交通出行的人均碳排放是轨道交通的2倍，公共汽车的4倍（陈飞，等，2009），将高密度的人群和城市功能布局于轨道站点，能够提升公共交通出行比例，降低交通出行碳排放。减碳单元内应保证中间密度的街区占据最大比重（50%—60%）（郑德高，等，2020），轨道交通站点500m范围内街坊容积率宜大于等于2.5，快速公

交、有轨电车站点500m范围内街坊容积率宜大于等于2.0。

其次,规划倡导独立车道的慢行系统,并把慢行系统与轨道车站有效链接。保障慢行空间与交通枢纽之间的联通度,有助于打通绿色出行的最后1km,为市民绿色出行提供支撑保障,倡导具有物理隔离的自行车专用系统覆盖密度达到 $2\text{km}/\text{km}^2$,独立的绿道系统覆盖密度达到 $4\text{km}/\text{km}^2$ 。除此之外,鼓励小街区密路网的街道尺度,控制 2hm^2 — 4hm^2 的街坊数量占街坊总量比例的70%以上,能够增大市民步行选择,提升步行舒适性。

4.3 集约高效的循环城市

集约高效的循环系统能够降低能源使用以及垃圾处理中产生的碳排放,将消耗资源、丢弃废弃物的线性系统转化为循环体系,使能源、固体废弃物和水资源彼此相互作用和利用。循环城市减碳技术集中在能源供应、固体废弃物处理、水资源利用三个方面。基于碳排放公式,可再生能源比例、固体废弃物焚烧处理比例和用水总量是影响碳排放的三大核心指标。

在能源供应方面,碳排放主要源自对石油、煤炭和天然气的生产、加工、运输和储存所产生的碳排放,以及转化为二次能源电力等所产生的碳排放。在能源生产端,因地制宜地规划太阳能、风力发电、地源热泵等可再生能源的使用规模和形式,同时对余热、废热等资源进行合理规划。在能源消费端,规划设计重点提升能源供应效率,通过分布式的综合能源调峰设施,改进和优化能源平衡,实现系统性节能降耗的管控一体化系统。每个城市片区至少设置1处能源管理中心,能够对热电联产、废弃物处理、污水处理、分布式能源站、末端调峰设施等进行统一调度。

在固体废弃物处理方面,碳排放受垃圾处理方式的影响较大。其中,卫生填埋碳排放强度较大,可达到 $2.1\text{tCO}_2/\text{t}$;焚烧发电碳排放强度次之,为 $0.56\text{tCO}_2/\text{t}$,但其所发电量可减少能源供应碳排放量;垃圾焚烧碳排放强度 $0.32\text{tCO}_2/\text{t}$;生物堆肥碳排放强度 $0.1\text{tCO}_2/\text{t}$ (IPCC, 2006)。因此,规划应减少垃圾卫生填埋比例,倡导垃圾循环利用系统,一般固

体废弃物应在垃圾焚烧厂进行集中焚烧并用来发电回用,可回收废弃物、有害废弃物应分别由专业机构分别处理,有机垃圾可以堆肥可用于林业和农业。

水资源碳排放主要包括自来水供应和污水处理两个环节,碳排放总量受供水总量和污水处理总量影响较大。因此,规划设计应减少用水需求,强化分质供水和分质排水可有效减少碳排放。同时,推广可回用的水循环系统,规划雨水回收系统以及生活污水回用系统,可以减少供水及污水处理环节的碳排放。

4.4 人性化的街坊与建筑

适应本地气候条件的宜居街坊目的是为了优化建筑和开放空间布局,改善街坊与建筑内部微气候,降低建筑能源消耗,引导更低碳的生活方式。规划减碳关键技术在于低能耗的建筑布局和活力友好的开放空间两个方面。基于碳排放公式,建筑布局模式和开放空间舒适性是降低碳排放的核心指标和形态引导重点。

在低能耗的建筑布局方面,需通过合理的建筑布局降低建筑用电、燃气和采暖能耗。通过优化空间布局和建设强度,获得更多的自然采光、自然通风和太阳热能,以此降低建筑空调、照明等内部系统的能源消耗。应根据气候条件不同,在夏季炎热或高密度发展的地区,增加遮阳设施、提高室外自然通风效率;在冬季寒冷或风速过大地区,采用遮挡强风布局,增加南向立面窗墙比,以此来降低空调能耗。适度采用中庭、采光井或庭院等方式确保自然采光的最佳渗透。

在活力友好的开放空间方面,合适的开放空间比例、舒适的公共环境能够引导片区居民实现低碳绿色的生活方式。公共开放空间在雨水管理、改善微气候、吸收温室气体等方面具有不可替代的作用。控制街坊中开放空间的比例和位置,避免在可能产生狭管效应的位置设置公共活动空间,能够提升开放空间的吸引力和环境品质。在冬季主导风上风向设置边界绿植风障,以阻挡冬季寒风;在夏季上风风口处宜设置水体,增加水体蒸发面积,改善体感温度。

绿色建筑与超低能耗建筑是城市减

碳的重要方面,国家和地方也纷纷制定了围绕碳达峰和碳中和的标准和要求,本文不再赘述。

4.5 智慧管治支撑系统

智慧管治支撑系统目标在减碳单元内形成全过程设计、收集、监控与运营的平台,支撑以上各方向规划减碳技术的应用和反馈。通过采用互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等先进技术,组成集合数据层和协同层的智慧管控体系。

在智慧数据层,通过构建城市信息系统(CIM),集成智慧能源、智慧交通、智慧建筑、智慧市政等系统,收集片区六大减碳维度的运行数据。搭建综合能源监测平台,对片区工业、建筑、交通、居民生活等城市活动进行能源监测与调控。建立智能化城市综合交通综合管理信息系统,监测交通流量。运用智慧照明、智慧空调和智慧电梯系统,根据外界气候条件变化与亮度条件进行室内温度、湿度和光照自动调节,建筑和市政设施的节能减排。

在智慧协同层,基于数据层的监测数据对城市片区规划、建设、运营管理的全生命周期进行模拟,协调不同维度的减碳措施。建立智慧能源管理中心,对管网实行能源调度、分布自治、远程协作和应急指挥。拓展停车诱导、应急指挥、智能站牌、出租车与公交车管理等应用模块。构建智慧建筑运维中心,对绿色建筑实行能源调峰、垃圾调度等工作。保证智慧能源、市政、交通及建筑等系统的协作运行。

5 结语

总之,城市减碳是一定时期内城市规划的重要工作,从增加城市规划减碳的科学性角度,本研究基于碳核算的研究结果,溯源了城市消费端碳排放的六大维度;通过不同尺度下碳排放结构的比较,识别规划减碳的关键尺度为 10km^2 — 30km^2 ,并提出了从城市减碳单元入手来促进城市减碳工作;在城市减碳单元内,优化不同系统间的协同效能,从城绿共生的融合城市、绿色出行的紧凑城市、集约高效的循环城市、人性化

的街坊与建筑、智慧管治支撑系统五个方向集成规划减碳的技术体系,并提出每个方向的关键技术和核心指标。

参考文献 (References)

[1] 陈琳,石崧,王玲慧.从规划理念到实践的低碳城市与复合社区——以上海市南桥新城为例[J].城市规划学刊,2011(4):30-38.(CHEN Lin, SHI Song, WANG Linghui. Low-carbon city and complex community: form planning ideas to planning practice—a case study of Shanghai Nanqiao new city[J]. Urban Planning Forum, 2011(4): 30-38.)

[2] 陈飞,诸大建,许琨.城市低碳交通发展模式、现状问题及目标策略——以上海市实证分析为例[J].城市规划学刊,2009(6):39-46.(CHEN Fei, ZHU Dajian, XU Kun. Research on urban low-carbon traffic model, current situation and strategy: an empirical analysis of Shanghai[J]. Urban Planning Forum, 2009(6): 39-46.)

[3] 方精云.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学,2007(6):804-812.(FANG Jinyun. Estimation of terrestrial vegetation carbon sinks in China from 1981 to 2000[J]. Science of China, 2007(6): 804-812.)

[4] 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.(FANG Chuanglin, QI Weifeng. Research progress and thinking of compact city and its measurement methods[J]. Urban Planning Forum, 2007(4): 65-73.)

[5] 黄建,罗淑湘,史军,等.低碳社区碳核算及减排路径研究[J].建筑技术,2019,50(8):1018-1022.(HUANG Jian, LUO Shuxiang, SHI Jun, et al. Study on methodology of carbon emissions calculation of low carbon community and carbon reducing path [J]. Architecture Technology, 2019, 50(8): 1018-1022.)

[6] 扈万泰, Peter Calthorpe.重庆悦来生态城模式——低碳城市规划理论与实践探索[J].城市规划学刊,2012(2):73-81.(HU Wantai, CALTHORPE P. The Yuelai eco-city model—an exploration on Chongqing low-carbon city planning[J]. Urban Planning Forum, 2012(2): 73-81.)

[7] 黄娅.社区碳排放评估及其空间分布研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2019.(HUANG Ya. Study on community carbon emission assessment and its spatial distribution[D]. The Dissertation for Master

Degree of Southwest Jiaotong University, 2019.)

[8] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. 2006.

[9] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R]. 2019.

[10] 李迅,刘球.中国低碳生态城市发展的现状、问题与对策[J].城市规划学刊,2011(4):23-29.(LI Xun, LIU Yan. The current situations, problems and solutions of Chinese eco-cities development[J]. Urban Planning Forum, 2011(4): 23-29.)

[11] LIU Chao, HUANG Sen, XU Peng, et al. Exploring an integrated urban carbon dioxide (CO₂) emission model and mitigation plan for new cities[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2018, 45(5): 821-841.)

[12] 李冬凌.城市商务街区低碳规划技术集成研究[D].广东工业大学硕士学位论文,2019.(LI Dongling. Research on technology integration of low carbon planning in urban business district[D]. The Dissertation for Master Degree of Guangdong University of Technology, 2019.)

[13] 李毅,任云英.上海市城市总体规划碳排放核算方法研究[C]//中国城市规划学会,重庆市人民政府.活力城乡美好人居——2019中国城市规划年会论文集(11总体规划),2019.(LI Yi, REN Yunying. Research on carbon emission accounting method of Shanghai urban master plan[C]// Urban Planning Society of China, Chongqing Municipal People's Government. Vitality and beautiful living in urban and rural areas——papers of China urban planning annual meeting in 2019(11 Master plan), 2019.)

[14] 沈婷,张尚武,潘鑫.我国城市新区空间绿色发展的规律和经验研究[J].城市规划学刊,2020(4):28-36.(SHEN Ping, ZHANG Shangwu, PAN Xin. Research on the principals and experience of spatial green development of new urban districts in China [J]. Urban Planning Forum, 2020(4): 28-36.)

[15] 鄢尚霖,孙一民.广州地区街道微气候模拟及改善策略研究[J].城市规划学刊,2016(1):56-62.(WU Shanglin, SUN Yinmin. Numerical simulation and improvement strategy for the street micro-climate in the Guangzhou area[J]. Urban Planning Forum, 2016(1): 56-62.)

[16] 王雅捷,何永.基于碳排放清单编制的低碳城市规划技术方法研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(6):72-80.(WANG Yajie, HE Yong. Methods for low-carbon

city planning based on carbon emission inventory[J]. China Population Resources and Environment, 2015, 25(6): 72-80.)

[17] 吴乘月,刘培锐,闫雯,等.低碳生态城市规划评价体系研究[J].城市规划学刊,2017(S2):222-228.(WU Chenyue, LIU Peirui, YAN Wen, et al. A research on the evaluation system of low carbon eco-city planning[J]. Urban Planning Forum, 2017(S2): 222-228.)

[18] 叶祖达.碳排放量评估方法在低碳城市规划之应用[J].现代城市研究,2009,24(11):20-26.(YIP S C T. Application of carbon dioxide emission audit to the planning of low carbon cities[J]. Modern Urban Research, 2009, 24(11): 20-26.)

[19] 颜文涛,王正,韩贵锋,等.低碳生态城规划指标及实施途径[J].城市规划学刊,2011(3):39-50.(YAN Wentao, WANG Zheng, HAN Guifeng, et al. Planning indicators system and implementation approach for low-carbon eco-city[J]. Urban Planning Forum, 2011(3): 39-50.)

[20] 张梅,黄贤金,揣小伟.中国城市碳排放核算及影响因素研究[J].生态经济,2019,35(9):13-19+74.(ZHANG Mei, HUANG Xianjin, CHUAI Xiaowei. Research on China's urban carbon emission accounting and influencing factors[J]. Ecological Economy, 2019, 35(9): 13-19+74.)

[21] 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/OL].国际城市规划,2021-06-27:1-17.https://doi.org/10.19830/j. upi. 2020.272.(ZHENG Degao, DONG Shumin, LIN Chenhui. The necessity and control strategy of “medium density” in metropolis[J/OL]. Urban Planning International, 2021-06-27: 1-17.)

修回: 2021-06