

基于温室气体清单的市级国土空间规划碳定量研究:分析框架、核算方法与规划模拟

Study on Carbon Quantitative Analysis of Spatial Planning: Framework, Calculation Methods and Simulation

熊健 张翀 谢湘雅 卢柯 张天然 金昱 王波 时寅

XIONG Jian, ZHANG Chong, XIE Xiangya, LU Ke, ZHANG Tianran, JIN Yu, WANG Bo, SHI Yin

摘要 碳排放数据的统计和分析对于实现“碳达峰、碳中和”目标的相关政策制定和行动选择至关重要。国土空间规划作为聚焦“空间”的综合治理平台,需加强“双碳”战略下的专题性定量分析。首先,在梳理温室气体清单应用延伸的国际经验和国内研究基础上,明确国土空间规划碳定量分析的任务和要点,提出研究以国土空间碳核算为核心、以国土空间规划碳排放多情景模拟为延展的关键方法;其次,从温室气体清单着手,构建碳定量分析体系,制定核算公式,并以上海为例说明体系细化、因子标定等本地化路径和应用情况;最后,提出减碳目标约束下开展规划碳排放模拟的技术思路,并对上海市规划交通碳排进行评估。

Abstract The statistics and analysis of carbon emission data are crucial to policy formulation. It's important to strengthen thematic carbon quantitative analysis of spatial planning. On the basis of summarizing the international practical experience and domestic research of the application of greenhouse gas inventories, the specific goals and main points of carbon quantitative analysis of spatial planning are clarified, and the key methods are proposed. An analysis structure is constructed, and calculation formulas are formulated. Based on Shanghai's empirical analysis, the localized application path is introduced. Further, the technical approach for conducting multi scenario simulation is proposed.

关键词 国土空间规划;温室气体清单;碳排放;定量分析

Key words spatial planning; greenhouse gas inventories; carbon emissions; quantitative analysis

文章编号 1673-8985 (2024) 02-0073-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240210

作者简介

熊健

上海市城市规划设计研究院
党委书记、副院长,正高级工程师

张翀 (通信作者)

上海市城市规划设计研究院
规划师,硕士, changyu.z@163.com

谢湘雅

上海市城市规划设计研究院
规划师,硕士

卢柯

上海市城市规划设计研究院
发展研究中心副主任,正高级工程师

张天然

上海市城市规划设计研究院
交通分院院长,正高级工程师

金昱

上海市城市规划设计研究院
交通分院总工程师,高级工程师,硕士

王波

上海市城市规划设计研究院
高级工程师,硕士

时寅

上海市城市规划设计研究院
规划师,硕士

0 引言

IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会) 于2018年发布《全球升温1.5°C特别报告》(Global Warming of 1.5°C) 以来的系列报告和全球各地的动态显示,减缓气候变化正在从“提高意识”“博弈协定”“制定目标”加速进入“行动落实”阶段^[1-3],碳排放总量和强度已成为未来地方发展的约束条件。

可靠、连续地统计、报告和分析碳排放数据,能够帮助决策者和相关行业从业人员准确把握历史和现状情况,开展碳排放评估和模

拟,支持政策制定和行动选择^{[4], [5]23}。当前有必要基于减碳增汇基本原理,将量化思维融入国土空间规划全过程^[6]。10余年来,我国学者围绕国土空间规划中不同空间尺度、重点专项条线的碳定量分析提出一些思考,但总体来说目前仍处于探索阶段。笔者旨在通过系统学习借鉴国内外温室气体清单体系方法及其应用延伸经验,以上海市为例,探索完善国土空间碳定量分析的技术方法,为“碳达峰、碳中和”(以下简称“双碳”)战略下国土空间规划编制技术的创新提供基础性支撑。

1 温室气体清单应用延伸的国际实践与国内研究

温室气体清单作为一定区域内人类活动排放和吸收的温室气体信息的全面汇总,凭借其体系方法科学、覆盖项目全面、核算方法标准等特点,成为全球各个国家、区域、城市及社区等进行碳管理的重要工具^{[7-10], [11]3-10}。

在国际城市面向“碳中和”的实践中,始终强调在清单编制的基础上进行本地化分析和应用(见表1)。包括:(1)根据地方特点和管理需要,对清单核算体系进行调整和细化;(2)溯源分析碳排放数据,研究其与建筑、产业、交通等的关系;(3)模拟规划政策的减碳效果,支持确定合理的措施安排^[22]。其中,空间类型和措施影响作为主要的考虑因素,被

纳入清单编制、分析和模拟工作,相关的规划策略也较好地融入城市减碳路线,为开展国土空间规划碳定量分析提供了可借鉴的思路。

2010年前后,我国学者开始关注温室气体清单与城市空间规划的衔接^[23],探索从规划视角对温室气体清单的体系方法进行重构、转译和应用(见表2)。前期,相关研究主要梳理全球范围内的温室气体清单编制情况,建立碳排放与规划政策的匹配框架,并初步开展总规策略和指标评估^{[5]28, [24-25], [26]104-110}。随后,进一步深化空间关联机理分析,研究土地利用的碳排放水平及其影响因子,进而开展多情景模拟^{[27]52-55, [28]74-78}。近年来,开始探讨形成基于国土空间更为完善的碳核算方法,并关注其与国土空间规划从评估、模拟、管控到监测的系统衔接^{[29]356-363, [30], [31]50-55}。

然而,对于国土空间规划碳定量分析的内容和思路等尚未完全达成共识。包括:(1)在碳排放类型上,对非二氧化碳、非能源活动碳排放的关注不足,在“碳中和”目标内涵下存在漏项;(2)在碳排碳汇项上,从基本原理出发,对于是否考虑除湿地外的水域碳汇、如何结合地方实际细化调整各项设置等问题仍有待进一步探讨;(3)在分析思路上,多数研究通过将“自上而下”核算的碳排放数据映射到国土空间并作为分析基础,虽然在某种程度上能够反映总体强度特征,但将不同分区和

用地视为均质的排放可能影响规划精准施策;(4)在工作衔接上,“双碳”路线是基于成本效益、技术发展等多因素考量后的结果,市级国土空间规划碳定量分析应进一步加强与城市总体减碳框架的衔接。本文重点围绕上述4个方面进行探索。

2 国土空间规划碳定量分析的任务内容与思路要点

在国土空间规划中,如何利用温室气体清单体系方法,衔接地方清单数据,使规划更好地服务于“双碳”战略落实,需要明确碳定量分析的任务内容和思路要点。

2.1 国土空间规划碳定量分析的任务内容

国土空间规划碳定量分析的任务内容并非精确核算碳排放的绝对值,而是突出减碳目标约束,实现以国土空间视角认识碳排放、基于国土空间要素核算碳排放、通过规划手段促进减碳增汇。包括:(1)现状认识。发现碳排放总量、强度的空间特征,包括总体分布和不同用地碳强度的差异情况。(2)专题分析。研究碳排放与空间要素的相关性,明确调控思路。(3)方案模拟。预测规划方案的碳排放,比照地方减碳目标指标进行反馈和优化。(4)规划确定。制定规划“目标—策略—指标”框架,开展实施监测和动态调整。

表1 国际城市低碳实践和研究中基于温室气体清单的应用延伸

Tab.1 Summary of extended application based on greenhouse gas inventories in low-carbon practice and research of international cities

城市/国家	调整和细化核算体系	研究碳排放影响因素	模拟未来碳排放情况
东京,日本 ^[12-13]	将能源活动碳排分解为建筑、工业、交通大类,并细分至中类和小类(如交通—道路运输—货运)	分析各类建筑面积对建筑碳排的影响、交通量和各类及车辆登记数对交通碳排的影响等	聚焦办公、家庭和交通碳排,分析现状、未采取和采取空间规划措施时目标年的碳排放情况
大分县,日本 ^[14]	将住宅和交通碳排按照家庭人口数量分为5类,将工业碳排按照行业分为27类	—	—
纽约,美国 ^[15]	衔接相关行业主管部门的统计数据和方法进行细化(如细分21种建筑类型)	—	开发由能源、建筑、交通、废弃物废水处理模块构成的温室气体计算器,设定3种政策情景进行模拟
伦敦,英国 ^[16-17]	着重细化分析建筑和道路交通碳排	分析出行结构改变对交通碳排的影响等	设定4种政策情景对碳排放进行模拟,确定分领域碳配额
格罗塞托,意大利 ^[18-19]	将能源活动碳排分解为居住和交通碳排并进行细化	基于GIS的温室气体核算方法,研究土地利用变化对城市碳排放的影响	—
米斯,爱尔兰 ^[20]	结合本地模型和数据库等,细化建筑交通和土地利用变化碳排	研究建筑改造、绿色交通加强、远程工作增加等对碳排放的影响	—
奥地利 ^[21]	将建筑碳排细分为不同类型和年代,将交通碳排细分为不同目的出行	—	—

资料来源:笔者根据相关资料整理。

2.2 国土空间规划碳定量分析的思路要点

要完成上述任务,需抓住4个要点:(1)按照各碳排碳汇项的特点及其相关的空间载体,对温室气体清单进行重构,建构完整的碳排放—国土空间关联框架;(2)梳理影响碳排放的国土空间活动量值,确定规划调控的抓手;(3)分析基于国土空间的基准碳排放特征,建立碳排放与国土空间要素的深度耦合关

系;(4)聚焦国土空间规划,考虑外部影响因素,预测规划碳排放,进而对规划策略和指标进行反馈和修正。

综上,国土空间规划碳定量分析贯穿基础工作、规划编制、方案论证和实施监督全流程,将其中的技术要点进行整合,研究确定以国土空间碳核算为核心,以国土空间规划碳排放多情景模拟为延展的关键方法。其中,国土

空间碳核算主要解决体系构建、方法制定以及基准排放/吸收因子标定等问题,国土空间规划碳排放多情景模拟则重点关注如何对“双碳”路线中关键节点的国土空间规划方案进行碳排放分析评价(见图1)。

3 国土空间碳核算方法

结合上海市案例,比照我国“双碳”目标内涵^①,衔接国内外权威清单编制标准,界定核算范围,构建核算体系并提出核算方法。

3.1 核算范围

(1) 核算气体

本文涵盖《京都议定书》中规定需控制的6种温室气体,即二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟化碳和六氟化硫。近期,衔接我国“碳达峰”目标,重点评估二氧化碳排放。

(2) 核算边界

参考《城市温室气体核算国际标准》中设定的3个范围^②,为便于横向比较和避免重复,重点核算城市范围一(即直接排放)中除去外送电力和热能生产外的部分,以及范围二(即外调电力和热能)的碳排放^{[11]15-17, [32]20-24}。航空、航海等跨界交通碳排可视情况单列。

(3) 核算周期

以年度为单位进行核算。除计算城市稳定运营中的碳排放外,原则上还应考虑开发建设过程,即开发建设活动实施过程中各类活动造成的能耗、废弃物处理以及土地利用变化产生的碳排放。

3.2 核算体系

建立从温室气体清单到碳核算项再到国土空间用地用海的关联,构建国土空间碳核算总体框架,并总结上海核算项细化调整的过程。

3.2.1 国土空间碳核算总体框架

为确保体系完整,以我国2011年发布的省级清单指南为基础,衔接2019年修订完善的IPCC国家清单指南,同步参考世界资源研

表2 国土空间规划碳定量分析部分研究梳理

Tab.2 Summary of studies on carbon quantitative analysis methods in spatial planning

作者	构成	基于国土空间的核算思路	应用
鞠鹏艳 ^{[24]11-12}	工业、建筑	单位工业增加值能耗—碳排	北京市延庆县总规减碳评估
	城镇建筑(居住、公共)	单位建筑增加值能耗—碳排	
	农村生产与生活	建筑面积—能耗—碳排	
	交通(客、货运)	一产单位增加值能耗—碳排	
	废弃物(生活垃圾)	耕地面积—化肥总量—碳排	
	水系统(供水、污水)	畜牧数量—碳排	
	生态空间(城镇绿化、耕地、林地、园地、草地、水稻田、湿地、水库、河湖滩涂)	周转量—能耗—碳排	
姜洋等 ^{[27]52-53}	农业、工业(一、二、三类)	能耗(运输、处理)—碳排	北京市用地碳排强度分析
	住宅(城镇、农村)、公共建筑	能耗(处理与输配)—碳排	
	货运,城际、城市客运	用地面积—碳汇	
王雅捷等 ^{[28]77}	生产、建筑、交通、碳汇	用地面积—产出一能耗—碳排	北京市技术政策减碳评估
		建筑碳排:人口规模—人均建筑面积—分类建筑能耗—碳排	
徐一剑等 ^{[29]359-363}	工业能源活动	用地面积—建筑面积—能耗—碳排	总规分析与预测
	工业生产过程	产量—碳排	
	建筑能源活动	建筑面积—能耗—碳排;人口规模—能耗—碳排	
	城市交通	分方式运输周转量—能耗—碳排	
	林地	用地面积/碳储量变化—碳汇	
	工业	用地面积—地均产值—能耗—碳排	
	建筑	建筑面积(城镇住宅、商业及办公、公共服务及设施、农村住宅)—能耗—碳排(考虑保留、改造和新建因素)	
	客、货运交通	分方式运输周转量—碳排(考虑新能源车占比影响)	
		(人口—生活垃圾处理量—碳排)+(工业废弃物处理量—碳排)+(规划床位总数—医疗废弃物处理量—碳排)+(规划综合生活用水量—碳排)	
		(考虑生活垃圾回收利用率、焚烧处理方式、工业废弃物再利用率、规划的床位使用率、规划雨污再生利用率、雨水利用率、污水处理率、污水再生利用率影响)	
罗文静等 ^{[31]52}	市政(给水、排水、固体废弃物)	耕地面积—碳排(考虑复种指数、综合机械化率影响)	武汉市总规碳排放模拟
	农业	独立/非占地碳汇用地(耕地、园地、林地、草地、湿地、陆地水域及绿地与开敞空间)—碳汇	
	生态及农业空间		

资料来源:笔者根据相关资料整理。

注释: ① 即力争于2030年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取2060年前全经济领域温室气体排放实现中和。

② 包括范围一(城市活动直接产生的排放)、范围二(城市活动消耗的调入电力和热能生产的排放)和范围三(原材料异地生产、跨界交通、跨界废弃物处理和产品使用产生的排放)。

究所等2014年发布的城市温室气体核算标准和中国建筑能耗相关研究报告等,明确核算框架包括建筑、交通、工业、废弃物处理、生态与农业以及开发建设过程6类(见图2)。(1)建筑碳排由除交通、工业和公用设施(除集中供热用地)外所有建设用地上建筑能耗产生。(2)交通碳排考虑交通工具运营外,由于道路、轨道交通车辆基地等设施在建设用地上占比较高,且轨道交通和快速路等的地下化趋势使其能耗较地面设施有较大增幅,单列交通设施运营碳排项。其中,交通工具运营碳排与各类建设用地布局相关。(3)

工业碳排指工矿用地和电力、热能生产公用设施用地上工业生产过程中的能耗和化学物理作用,以及煤炭、石油开采逸散产生的碳排放。(4)废弃物处理碳排由垃圾填埋、焚烧以及生活和工业污水处理设施产生。(5)生态与农业中,除我国省级指南明确核算的林地碳汇、农田碳排和农业设施建设用地上畜禽养殖碳排外,在“山水林田湖草沙”生命共同体理念下,纳入草地、湿地等碳汇。此外,由于在生态空间转变为建设用地的过程中有大量碳排放,而建筑、基础设施等开发建设活动本身也会产生能耗,应重视不同历史时点间、

规划基期和目标年间因空间变化带来的碳排放影响,故单列开发建设过程项。

3.2.2 结合地方实际的框架细化

综合考虑各碳排碳汇项的总量和占比情况、基于国土空间视角的差异化特征以及数据可获得性等因素,结合近远期工作重点等实际,对核算项进行合理的调整和细化,确定中类和小类。

研究开展近期面向“碳达峰”目标的上海试算时:首先,排除非二氧化碳和其他不在达峰统计口径中的核算项(包括垃圾填埋、污水处理和农业碳排以及对外交通工具碳排);其次,排除部分排放量小的内容(如园区、校区内的小交通碳排),同时在目前生态系统碳汇监测和核算体系尚不完善的情况下,对湿地碳汇等核算难度较大的内容进行粗略处理;最后,比照全市清单,针对重点的核算大类进行细分。上海市碳排放总量自2011年阶段性达峰后基本稳定在2亿t左右。其中,工业碳排长期以来占比最大,交通碳排稳步增长,建筑碳排也呈刚性上升态势;2019年3个部门(工业、交通、建筑)碳排占比分别为50%、27%和22%^[33],需重点予以关注。在确定细分项时,工业碳排聚焦关键行业,结合重点排放行业情况细分为化学原料与化学制品制造、黑色金属冶炼与压延加工、石油、煤炭与其他燃料加工及其他4类。交通碳排中,考虑到其构成以及与政策措施的对应,将交通工具碳排细分为公共交通、私人客运和货运交通。建筑碳排则尽可能体现本地不同类型、区位的建筑在能耗强度上的差异,与核算方法中排放/吸收因子的标定同步考虑:首先,获取并分析现状建筑能耗数据与建筑功能、高度、区位等的耦合关系,参考全市建筑能耗监测及分析报告和统计数据,初步锚定细分项和相应的能耗强度区间^[34];其次,对接行业主管部门的建筑碳排细分标准和相应因子,修正完善方法;最后,比照温室气体清单中的排放数据^[35],进一步校核因子,结合数据可获得性初步按照浦东、浦西和中心、外围^③进行细分。

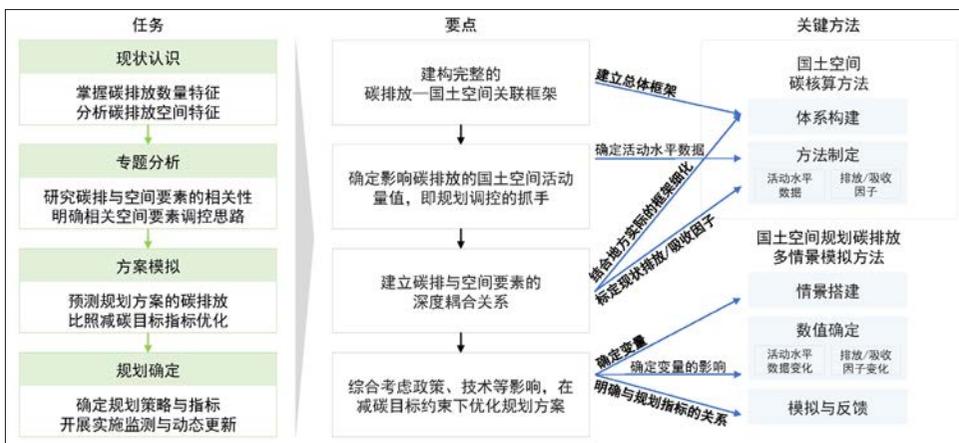
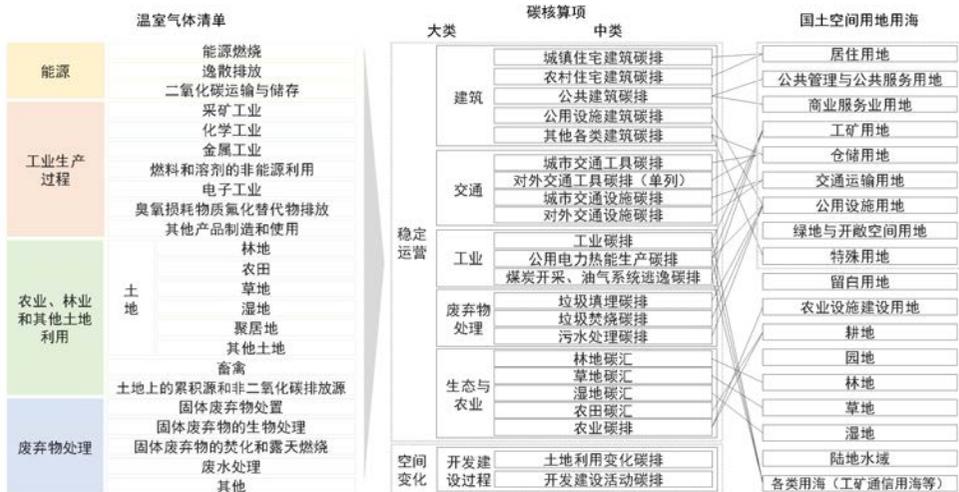


图1 国土空间规划碳定量分析的任务内容、思路要点和关键方法
Fig.1 Objectives-key points-methods of carbon quantitative analysis of spatial planning

资料来源:笔者自绘。



注:参照《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》。

图2 国土空间碳核算总体框架
Fig.2 Framework of carbon accounting methods based on space

资料来源:笔者自绘。

注释: ③ 中心指黄浦区、静安区、徐汇区、长宁区、普陀区、虹口区、杨浦区,外围指除上述区域和浦东新区外的其他各区。

3.3 核算方法

以清单编制的主要方法——排放因子法为参考,首先,根据各碳排放项目的产生机理和影响因素,考虑国土空间规划成果内容和深度,将基本公式“碳排放量=活动水平数据×排放/吸收因子”中的活动水平数据尽可能转换为国土空间相关量值(见图3)。这一转换并非都使用用地数据,部分需采用用地和设施的衍生数据,如建筑面积和交通周转量;还有少量则需向相关行业主管部门收集获取,如畜禽存栏量、农作物产量等,这是国土空间规划编制中的常见流程。其次,通过文献、调研和实验等方法标定基准排放/吸收因子^④,因子可能是单个参数,也可能由一系列参数构成。最后,将核算结果与清单数据或相关行业主管部门数据进行交叉验证,修正完善方法,降低不确定性。在现状因子的基础上,考虑未来发展趋势,进一步标定用于规划模拟的排放/吸收因子。

(1) 建筑碳排放

不同类型的建筑在用能需求、结构和强度上存在差异^[36]。研究基于建筑面积,结合单位面积能耗水平核算碳排放;对于城市总规中没有明确建筑面积的,可结合强度分区通过平均容积率进行估算。由于建筑能耗受绿色建筑技术、人群习惯、空间形态等多因素的影响,因此不同地区、年代、使用人群和建设水平的建筑能耗存在显著差异,很难使用一套通用因子,需基于调研和分析加以明确。

(2) 交通碳排放

针对交通工具和交通设施的能耗特征,分别采取基于交通活动量和设施量两种思路进行核算。前者主要以交通周转量来表征活动,后者以交通设施的用地面积、建筑面积、设施量或运输量作为活动水平数据。

交通工具运营碳排放是依附于交通工具的运输行为产生的。结合交通工具运输量的分析方法,按照源头、过程、终端3个环节分步核算:源头阶段生成交通需求,估算客货运输量;过程阶段形成交通周转量,划分交通方式结构,细分交通工具类型,估算交通工具周转量;终端阶段结合能源结构等计算能耗,进而核算

碳排放。其中,各类交通工具年周转量是核算的核心,应根据不同工具的运营特点区别对待:如定时定点服务的公共交通,其周转量主要由网络规模和车辆服务频率等决定;私人客运交通和各类货运交通周转量则更多与个体交通需求直接相关。有条件的情况下建议利用交通规划模型辅助核算。

交通设施运营碳排放主要来源于动力设备、照明设备、弱电设备和检修设备的能耗,与设施的使用特性相关。对于运营作业相对简单的设施,如城市道路、轨道交通车站等,可将设

施用地规模、长度等作为活动水平数据,参考现状单位设施量能耗或行业用能标准核算碳排放^[37];对于机场、港口等运营作业相对复杂的对外交通设施,可以建筑面积或作业量为活动水平数据。

(3) 工业碳排放

工业用地的碳排放十分复杂,不仅不同行业间情况千差万别,同行业不同企业间也会因工艺设备等的差异有所不同。

研究以工业用地面积为活动水平数据,相关因子的标定需将重点用能单位能耗、经普等

计算项	计算思路	活动水平数据	排放/吸收因子	计算公式
建筑	城镇住宅建筑碳排放	城镇住宅建筑面积 A_{t1} = 各类城镇住宅用地面积 S_{t1} × 开发强度 a_{t1}	单位建筑面积能耗强度 e_{t1} × 单位能耗排放因子 f_{t1}	$C = \sum_{t1} S_{t1} \times a_{t1} \times e_{t1} \times f_{t1}$ /为城镇住宅用地类型, j 为能源类型
	农村住宅建筑碳排放	农村住宅建筑面积 A_{r1} = 各类农村宅基地面积 S_{r1} × 开发强度 a_{r1}	单位建筑面积能耗强度 e_{r1} × 单位能耗排放因子 f_{r1}	$C = \sum_{r1} S_{r1} \times a_{r1} \times e_{r1} \times f_{r1}$ /为农村宅基地类型, j 为能源类型
	公共建筑碳排放	公共建筑面积 A_{p1} = 各类商业服务业、公共管理与公共服务用地面积 S_{p1} × 开发强度 a_{p1}	单位建筑面积能耗强度 e_{p1} × 单位能耗排放因子 f_{p1}	$C = \sum_{p1} S_{p1} \times a_{p1} \times e_{p1} \times f_{p1}$ /为商业服务业、公共管理与公共服务用地类型, j 为能源类型
	公用设施建筑碳排放	公用设施建筑面积 A_{u1} = 各类公用设施用地面积 S_{u1} × 开发强度 a_{u1}	单位建筑面积能耗强度 e_{u1} × 单位能耗排放因子 f_{u1}	$C = \sum_{u1} S_{u1} \times a_{u1} \times e_{u1} \times f_{u1}$ /为公用设施用地类型, j 为能源类型
	其他各类建筑碳排放	其他各类建筑面积 A_{o1} = 其他各类建设用地面积 S_{o1} × 开发强度 a_{o1}	单位建筑面积能耗强度 e_{o1} × 单位能耗排放因子 f_{o1}	$C = \sum_{o1} S_{o1} \times a_{o1} \times e_{o1} \times f_{o1}$ /为其他各类建设用地类型, j 为能源类型
交通	公共交通	公共交通运营周转量 V_{t2} = 建设用地面积 L × 规划公交线路密度 D × 公交线路平均服务频率 F	单位距离能耗强度 e_{t2} × 单位能耗排放因子 f_{t2}	$C = \sum_{t2} L \times D \times F \times e_{t2} \times f_{t2}$ /为交通方式, j 为能源类型
	私人客运	私人客运交通周转量 V_{p2} = 常住人口 P × 人均出行次数 T_{p2} × 人均出行距离 D_{p2}	单位距离能耗强度 e_{p2} × 单位能耗排放因子 f_{p2}	$C = \sum_{p2} P \times T_{p2} \times D_{p2} \times e_{p2} \times f_{p2}$ /为出行方式, j 为能源类型
	货运	货运交通周转量 V_{h2} = 建设用地面积 L × 日均货运需求 T_{h2} × 日均运输距离 D_{h2}	单位距离能耗强度 e_{h2} × 单位能耗排放因子 f_{h2}	$C = \sum_{h2} L \times T_{h2} \times D_{h2} \times e_{h2} \times f_{h2}$ /为运输方式, j 为能源类型
	城市交通设施	设施用地面积 S_{t3} 设施数量或长度 Q_{t3}	单位设施能耗强度 e_{t3} × 单位能耗排放因子 f_{t3}	$C = \sum_{t3} S_{t3} \times e_{t3} \times f_{t3}$ /为交通设施类型, j 为能源类型 $C = \sum_{t3} Q_{t3} \times e_{t3} \times f_{t3}$ /为交通设施类型, j 为能源类型
	对外交通设施	对外交通设施建筑面积 A_{o2} = 设施用地面积 S_{o2} × 开发强度 a_{o2} 设施运输量 V_{o2}	单位建筑面积能耗强度 e_{o2} × 单位能耗排放因子 f_{o2} 单位运输量能耗强度 e_{o2} × 单位能耗排放因子 f_{o2}	$C = \sum_{o2} L \times a_{o2} \times e_{o2} \times f_{o2}$ /为交通设施类型, j 为能源类型 $C = \sum_{o2} V_{o2} \times e_{o2} \times f_{o2}$ /为交通设施类型, j 为能源类型
工业	工业碳排放	工业产值 V_{i3} = 工业用地面积 S_{i3} × 单位用地行业产值 p_{i3}	单位行业产值能耗强度 e_{i3} × 单位能耗排放因子 f_{i3} + 单位行业产值生产过程排放因子 m_{i3}	$C = \sum_{i3} S_{i3} \times p_{i3} \times (e_{i3} \times f_{i3} + m_{i3})$ /为工业用地类型, j 为行业类型, A 为能源类型
	公用电力热能生产碳排放	电力热能产量 V_{e3}	单位电力热能生产标准能耗强度 e_{e3} × 单位能耗排放因子 f_{e3} × 厂用电率或热效率 d_{e3}	$C = \sum_{e3} V_{e3} \times e_{e3} \times f_{e3} \times d_{e3}$ /为电力热能生产类型, j 为能源类型
	煤油气开采选散碳排放	煤炭开采量 Y_{c3} 油气装置数量 Q_{o3}	单位煤炭开采量排放因子 f_{c3} 油气装置排放因子 f_{o3}	$C = \sum_{c3} Y_{c3} \times f_{c3}$ /为煤矿等级与开采方式 $C = \sum_{o3} Q_{o3} \times f_{o3}$ /为油气装置类型
废弃物处理	垃圾填埋	垃圾填埋量 T_{m3} = 常住人口 P × 人均垃圾产生量 t_1 × 垃圾填埋率 m_1	甲烷产生潜力 L 、甲烷回收率 R 和氧化因子 OX	$C = \sum_{m3} (P \times t_1 \times m_1 \times L - R) \times (1 - OX)$ /为填埋废弃物类型
	垃圾焚烧	垃圾焚烧量 T_{b3} = 常住人口 P × 人均垃圾产生量 t_1 × 垃圾焚烧率 b_1	垃圾焚烧碳排放因子 f_{b3}	$C = \sum_{b3} P \times t_1 \times b_1 \times f_{b3}$ /为焚烧废弃物类型
	污水处理	污水排放量 V_{w3} = 常住人口 P × 人均污水排放量 q_1 N ₂ O排放 常住人口 P	污水中有机物比例 α_1 × 甲烷排放因子 f_{w3} 人均蛋白质消费量 r × 蛋白质含氮量 F × 氧化亚氮排放因子 f	$C = \sum_{w3} P \times t_1 \times q_1 \times \alpha_1 \times f_{w3}$ /为污水类型 $C = P \times r \times F \times f$
生态与农业	生态碳汇	林地 乔木灌木生木蓄积量 S_{l3} 其他碳汇 草地、湿地、耕地等用地面积 S_{o3}	单位面积蓄积量 g_{l3} × 单位蓄积量吸收因子 f_{l3} 单位用地面积吸收因子 g_{o3}	$C = \sum_{l3} S_{l3} \times g_{l3} \times f_{l3}$ /为树种类型 $C = \sum_{o3} S_{o3} \times g_{o3}$ /为草地、湿地、耕地等类型
	农业碳排	农作物种植 稻田用地面积 S_{r3} 农用地用地面积 S_{a3} 农作物产量 Q_{c3}	单位稻田面积排放因子 f_{r3} 单位面积氮肥和粪肥施用量 m_2 × 单位施用量排放因子 f_{a3} 单位产量排放因子 f_{c3}	$C = \sum_{r3} S_{r3} \times f_{r3}$ /为稻田类型 $C = \sum_{a3} S_{a3} \times m_2 \times f_{a3}$ /为农用地类型, j 为肥料类型 $C = \sum_{c3} Q_{c3} \times f_{c3}$ /为农作物类型
	畜禽养殖	畜禽存栏量 N_{c3}	单位存栏量排放因子 f_{c3}	$C = \sum_{c3} N_{c3} \times f_{c3}$ /为畜禽类型
	空间变化	土地利用变化 开发建设活动	生态用地转变为其他用地的面积 ΔS_1 建设和设施建设量 Q_1	单位转变面积的排放因子 f_1 单位建设量排放因子 f_1

图3 国土空间碳核算方法
Fig.3 List of carbon quantitative analysis methods in spatial planning

资料来源:笔者自绘。

注释: ④ 文献法指借鉴相关技术标准或论文书籍;调研法指参考行业主管部门或研究机构的数据;实验法指采用典型样本数据推算或建立回归模型拟合,微观数据标定、宏观数据核校。

行业数据与用地进行耦合分析,建立“用地/设施—产值/产量—能耗”量化关联。对于钢铁、水泥等生产中的化学物理作用会产生碳排的行业,还需建立“用地—产值—碳排”关联,后者较前者更为复杂。目前,上海等地已经体现了跨部门联合管理工业碳排的导向,《上海产业能效指南(2018版)》和《上海产业用地指南(2019版)》中的一系列指标可为标定因子提供参考。另外,在建立了稳定的重点企业碳排数据统计报送制度的背景下,可采用实验法进行样本分析,但是由于涉及企业能耗等敏感信息,需在衔接渠道和机制方面进一步探索。

(4) 废弃物处理碳排

参考温室气体清单核算方法,以处理量和人口规模为活动水平数据,结合甲烷回收量、人均蛋白质消费量等参数组成的因子进行核算。其中,垃圾和废水处理量原则上可基于人口规模进行推算,相关参数参考地方均值或省级清单指南中的默认值予以标定。

(5) 生态与农业碳汇与碳排

该大类中核算项较多,各项的核算思路也因基本原理不同而有较大差异。其中,生态碳汇以用地面积为活动水平数据,但是由于自然生态系统在碳库构成、碳汇效率、碳量饱和等方面存在较高的复杂性^[38-39],温室气体清单核算方法与国土空间规划中生态用地的分类口径并不完全一致,需梳理对应关系后进行核算。如林地应区分乔木林和其他林地,湿地应区分海洋和内陆湿地等,各类生态和农业空间的吸收因子参考相关文献标定。农业碳排可参照清单方法核算。

(6) 开发建设过程碳排

土地利用变化的碳排需建立不同用地间的转化矩阵,以转化面积为活动水平数据,结合相应因子核算。对于开发建设活动的碳排,既有研究主要通过小样本量实例标定排放因子,需进一步通过文献研究,确定以建设规模为活动水平数据的排放因子。

3.4 方法应用

将碳核算模块嵌入国土空间基础信息

平台,整合人口、用地等多源时空数据,形成国土空间碳排“一张图”,支持开展相关分析(见图4)。

以上海市为例,以交通小区为单元开展现状核算,实现对全领域和分项、全市域和分区的碳排总量、强度分析,结合空间规划建设趋势,能够识别减碳关键区域。如中心城区建筑碳排总量和占比明显高于其他地区,应重视局部气候改善和存量建筑节能改造,同时避免大拆大建带来的额外碳排放;主城区交通碳排约占全市总量的50%,应关注高碳排单元的功能布局和交通网络优化,考虑在中央活动区等重点地区设置“零排放区”;工业碳排除在南北两侧宝山区、金山区呈高度集聚特征外,五个新城的工业碳排占比也高于全市平均水平,应探索结合行业规范将碳排指标纳入园区、用地准入标准,拓展工业用地空间效益评价维度。此外,还可基于核算结果,深入分析碳排与国土空间要素,包括交通碳排与常住人口和就业岗位密度、路网密度、公交可达性和土地利用混合度,建筑碳排与建筑高度、建筑密度等的关系,为空间施策提供一定的参考。

4 国土空间规划碳排放多情景模拟方法

4.1 基本思路

碳排放情景模拟的核心是确定在城市规模与发展特质的影响下,活动水平数据和排放/吸收因子在基准年和情景年变化的数值集

合,常见的方法包括“自上而下”和“自下而上”两种^{[27]51, [31]50-52, [40]}。研究参考LEAP等典型的“自下而上”模型,基于国土空间碳核算方法,提炼影响碳排放的“国土空间规划指标”和“重要外部指标”。前者是国土空间规划的重要抓手,通过对“方案”进行统计或模拟解析获得;后者即为“情景”,是能源、交通等领域的关键外部假设,根据地方“双碳”路线中的相关指标和数值确定(见图5)。国土空间规划中的碳排放模拟既需长期的规划理论和实践积累作为数量模型基础,也要顺应“双碳”工作长时间尺度的不确定性,衔接各阶段特点,体现政策制度、产业结构、能源结构、工艺技术和消费行为等的重大变化。

通过指标拆解,能够着眼于规划方案模拟碳排放情况,进而比照城市总体或分领域减碳阶段目标自查,进行调整优化。考虑设置基准情景以及加强规划和政策引导的3种情景(见图6):基准情景根据既有国土空间规划和现状外部指标趋势外推模拟,是对不增加新的干预情况下城市碳排放发展的基本认识;情景一保持既有国土空间规划方案不变,参照“双碳”路线中对于达峰、中和等关键时点的要求对外部指标进行修正,是考虑非空间规划类政策引导下的碳排放预期结果;将情景一的结果与减碳目标进行比对,如有差距,考虑通过优化调整空间规划进一步减碳,此为情景二,是对减碳目标约束下采取进

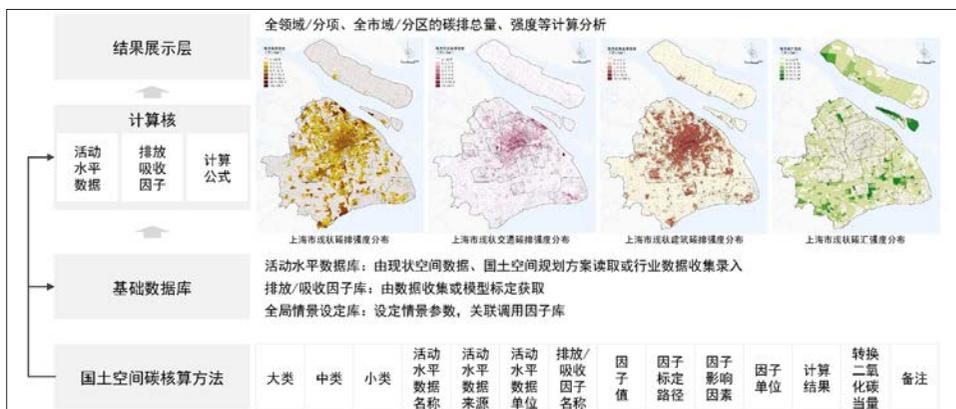


图4 国土空间碳核算模块架构

Fig.4 Technical ideas of module development

资料来源:笔者自绘。

一步空间规划措施的碳排情况评估;由于空间规划减碳有其间接性和局限性,情景三在既有“双碳”路线要求的基础上考虑更积极的政策调控,综合考虑各种可行行动的影响,

模拟更广泛的影响。

4.2 方法应用

从已发布的上海市碳达峰实施方案来

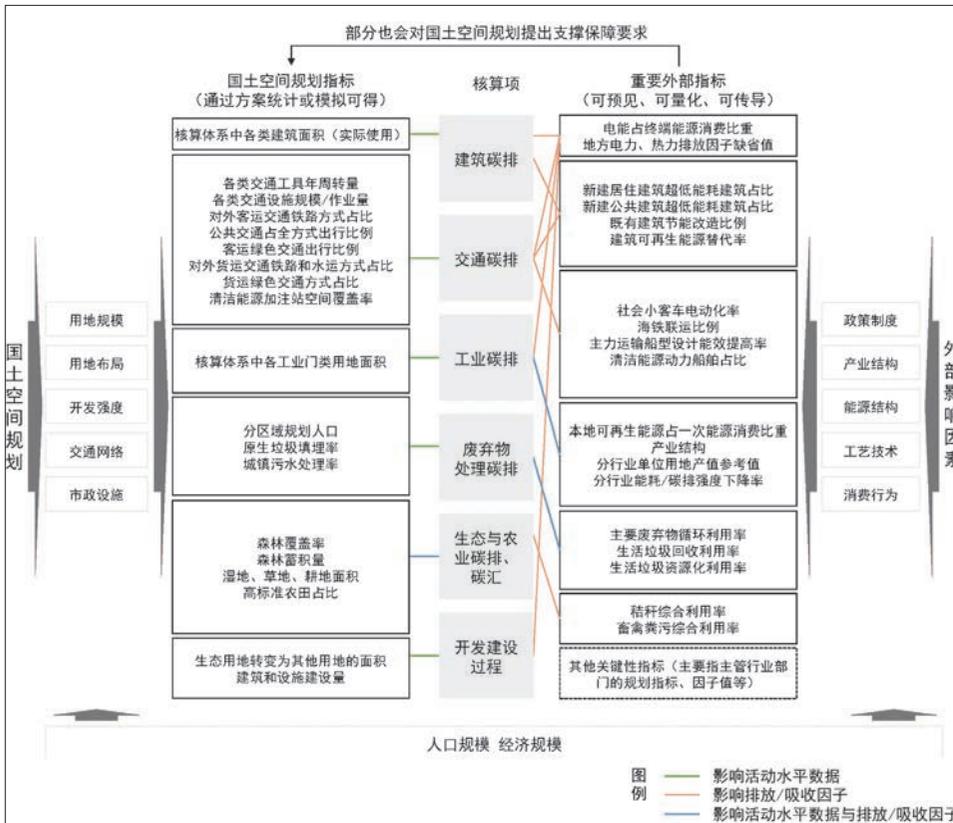
看,作为进入存量发展阶段、高度依赖外来能源输入且产业经济仍将继续增长的高密度超大城市,上海达峰目标的实现主要依靠能源结构绿色化以及产业结构调整和技术改造,规划模拟中的外部指标变量主要与此相关;同时,面对不断加大的建筑和交通碳排压力,需尽早引导建筑和交通领域消费侧低碳转型,这是国土空间规划干预的重点^[33]。

以交通碳排模拟为例,基准情景基于“上海2035”空间方案提炼国土空间规划指标,得到规划年全社会交通(包括居民城市交通出行、对外公路和铁路客货运交通,不含航空和水运,下同)碳排。情景一根据《上海市碳达峰实施方案》《上海市交通领域碳达峰实施方案》中全社会用电量碳排放强度、小客车电动化比例等相关指标对重要外部指标进行修正,交通碳排较基准方案降低7.4%。比照交通领域碳达峰实施方案中至2030年营运交通工具单位换算周转量碳排强度较2020年下降9.5%左右的要求,客运周转量碳排强度能够满足要求,但货运方面存在一定差距。

为进一步推动货运减碳,同时降低交通领域峰值碳排,情景二在“上海2035”方案的基础上,优化主城区和新城功能分布和用地布局,完善铁路枢纽客站对人口岗位密集地区的有效覆盖,提高大中运量公共交通站点周边城市功能、人口和岗位的集聚度,强化产城融合、产销融合的布局,交通碳排较情景一减少约9.7%,体现了优化用地布局和交通网络布局对于交通减碳具有较好的效益。尽管如此,货运周转量碳排强度仍未能满足上位要求。对此,情景三纳入零碳管控区、提高货车电动化比例等空间和交通管理政策,强化更为综合的低碳政策引导(见表3)。

5 结语与讨论

随着国家和地方“双碳”路线的陆续制定与实施,碳排放数据必将更加广泛地应用于决策研究中。笔者在明确国土空间规划碳定量分析目标和要点的基础上,构建了较为完整的基于国土空间的碳核算体系方法,结合上海实



注:图中“重要外部指标”主要参考《上海市碳达峰实施方案》《上海市交通领域碳达峰实施方案》中行动与指标确定。

图5 国土空间规划碳排放模拟指标拆解(以上海市达峰年为例)

Fig.5 Dismantling of scenario simulation indicators for carbon emissions peak year in territorial spatial planning (taking Shanghai as an example)

资料来源:笔者自绘。

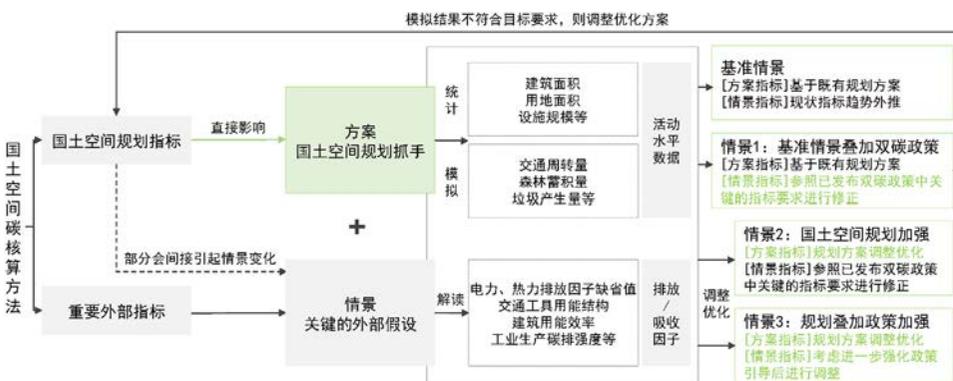


图6 国土空间规划碳排放模拟路径

Fig.6 The carbon effect analysis and optimization path of spatial planning

资料来源:笔者自绘。

表3 上海市国土空间规划交通碳排放模拟

Tab.3 Simulation of transportation carbon emissions in Shanghai's territorial spatial planning

情景	方案指标			情景指标		碳排情况		
	方式比重	客、货运量	平均出行距离	电动化比例	电网排放因子	总量/万吨CO ₂ ^e	较现状变化比例/%	较基准情景变化比例/%
现状(2020年)	—	—	—	—	0.42	1 848	—	—
基准情景	较现状: 轨交出行比例显著提升, 其他略有下降	较现状: 均有一定程度增长	较现状: 助动车、摩托车增加, 大巴、出租、轨交、公交、小汽车下降	较现状: 小汽车电动化比例上升	较现状: 保守外推, 少量下降	2 275	+23.1	—
情景一	同基准情景			较基准情景: 大巴、出租车、公交、小汽车、小货车、大货车电动化比例上升	较基准情景: 参照达峰年全社会用电碳排放强度指标修正, 有所下降	2 107	+14.0	-7.4
情景二	较情景一: 轨交和公交出行比例上升, 摩托、大巴、出租、小汽车出行比例下降	较情景一: 小汽车、出租车、大巴、摩托车、助动车等出行量下降, 轨交和公交出行量上升	较情景一: 摩托、大巴、出租车、小汽车和集卡平均出行距离下降	同情景一		1 902	+2.9	-16.4
情景三	较情景二: 小汽车出行比例进一步下降, 绿色出行比例提高	同情景二		较情景二: 小货车、大货车和集卡电动化比例上升	同情景二	1 779	-3.7	-21.8

资料来源: 笔者自制。

梳理本地化应用路径, 并提出基于碳核算方法的规划模拟技术思路。展望未来, 可重点从3方面进行深化完善, 以推广应用于更多的规划实践: (1) 对碳排放和空间数据进行持续跟踪, 通过更深入的实证分析, 发现背后复杂的关联, 准确掌握基准特征; (2) “碳中和”目标的实现有赖于更广领域、更多维度和更深层次的转型, 应加强对“双碳”路线的解析, 完善规划模拟的技术架构, 支撑方案比选和优化; (3) 研究提出的方法主要适用于城市尺度的碳定量分析, 更小尺度的规划分析原则上可参考其中的思路, 但活动水平数据和排放/吸收因子的确定需更加精准。

参考文献 References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global warming of 1.5°C[R]. 2018.
- [2] City of New York. OneNYC 2050: building a strong and fair city[R]. 2019.
- [3] Greater London Authority. The London plan 2021[R]. 2021.
- [4] 世界资源研究所. 城市温室气体清单编制与应

- 用的国内外经验[R]. 2015.
- World Resources Institute. International and China's experience on city greenhouse gas inventories and application of inventory results[R]. 2015.
- [5] 叶祖达. 国外城市区域温室气体清单编制对我国城乡规划的启示[J]. 现代城市研究, 2011(11): 22-30.
- YIP S C P. Study on the greenhouse gas inventories of different cities and regions and the implications for Chinese urban rural planning[J]. Modern Urban Research, 2011(11): 22-30.
- [6] 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.
- XIONG Jian, LU Ke, JIANG Ziyi, et al. Study and thoughts on territorial spatial planning under the goal of "carbon emissions peak and carbon neutrality"[J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 74-80.
- [7] 李晴, 唐立娜, 石龙宇. 城市温室气体排放清单编制研究进展[J]. 生态学报, 2013(2): 367-373.
- LI Qing, TANG Li'na, SHI Longyu. Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013(2): 367-373.
- [8] 联合国政府间气候变化专门委员会. IPCC国家温室气体清单指南[S]. 2006.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[S]. 2006.
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单指南(试行)[S]. 2011.
- National Development and Reform Commission.

- Guidelines for compilation of provincial greenhouse gas inventories (trial)[S]. 2011.
- [10] 上海市生态环境局. 上海市区级温室气体清单编制技术指引[S]. 2022.
- Shanghai Municipal Bureau of Ecology and Environment. Technical guidelines for Shanghai municipal greenhouse gas inventory compilation[S]. 2022.
- [11] World Resources Institute, C40 Cities Climate Leadership Group, Local Governments for Sustainability (ICLEI). Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories[S]. 2013.
- [12] Bureau of Environment Tokyo Metropolitan Government. Final energy consumption and greenhouse gas emissions in Tokyo[R/OL]. [2023-04-18]. <https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/en/climate/index.html>.
- [13] 姜紫莹. 日本低碳城市建设规划中的减碳逻辑与碳定量方法[J/OL]. 国际城市规划: 1-12[2023-12-14]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2022.336>.
- JIANG Ziyi. Carbon reduction logic and carbon quantification method in Japan's low-carbon city construction planning [J/OL]. Urban Planning International: 1-12[2023-12-14]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2022.336>.
- [14] LI Y, QIAN X, ZHANG L, et al. Exploring spatial explicit greenhouse gas inventories: location-based accounting approach and implications in Japan[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 702-712.
- [15] NYC Office of the Mayor. New York City's roadmap to 80 x 50[R/OL]. [2023-04-18]. https://www1.nyc.gov/assets/sustainability/downloads/pdf/publications/New%20York%20City's%20Roadmap%20to%2080x%2050_Final.pdf.
- [16] Greater London Authority. London energy and

注释: © 本文核算的交通碳排放数值仅为支撑方案评估分析使用, 并非精准的预测数值。

- greenhouse gas inventory (LEGGI)[DB/OL]. [2023-04-18]. <https://data.london.gov.uk/dataset/leggi>.
- [17] Greater London Authority. Analysis of a net zero 2030 target for Greater London[R/OL]. [2023-04-18]. https://www.london.gov.uk/sites/default/files/nz2030_element_energy_final.pdf.
- [18] ASDRUBALI F, PRESCIUTTI A, SCRUCCA F. Development of a greenhouse gas accounting GIS-based tool to support local policy making—application to an Italian municipality[J]. Energy Policy, 2013, 61: 587-594.
- [19] MARCHI M, CAPEZZUOLI F, FANTOZZI P L, et al. GHG action zone identification at the local level: emissions inventory and spatial distribution as methodologies for policies and plans[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 386: 135783.
- [20] LYLYKANGAS K, CACHIA R, CERRONE D, et al. Territorial and consumption-based greenhouse gas emissions assessments: implications for spatial planning policies[J]. Land, 2023, 12(6): 1144.
- [21] ABART-HERISZT L, ERKER S, STOEGLHNER G. The energy mosaic Austria—a nationwide energy and greenhouse gas inventory on municipal level as action field of integrated spatial and energy planning[J]. Energies, 2019, 12(16): 3065.
- [22] 吴婕. 国外城市规划碳排放模拟平台建设研究[J]. 城市发展研究, 2014 (s2): 1-5.
WU Jie. Foreign research progress of carbon emissions simulation platform construction[J]. Urban Development Studies, 2014(s2): 1-5.
- [23] 叶祖达. 碳排放量评估方法在低碳城市规划中的应用[J]. 现代城市研究, 2009 (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(11): 20-26.
- [24] 叶祖达. 温室气体清单在城乡规划建设管理中的应用[J]. 城市规划, 2011 (11): 35-41.
YIP S C T. Application of greenhouse gas inventory to urban and rural planning[J]. City Planning Review, 2011(11): 35-41.
- [25] 鞠鹏艳. 从碳排放到低碳城市总体规划的量化研究[J]. 城市发展研究, 2012, 19 (11): 103-110.
JU Pengyan. From carbon emission to the quantized analysis of low carbon city master planning[J]. Urban Development Studies, 2012, 19(11): 103-110.
- [26] 鞠鹏艳. 城市总体规划层面低碳城乡规划方法研究——以北京市延庆县规划实践为例[J]. 城市规划, 2013, 37 (8): 9-17.
JU Pengyan. Low carbon urban-rural planning methods at master planning level: a case study on the planning of Yanqing County, Beijing[J]. City Planning Review, 2013, 37(8): 9-17.
- [27] 姜洋, 何永, 毛其智, 等. 基于空间规划视角的城市温室气体清单研究[J]. 城市规划, 2013 (4): 50-67.
JIANG Yang, HE Yong, MAO Qizhi, et al. City-level greenhouse gas emission inventory from a spatial planning perspective[J]. City Planning Review, 2013(4): 50-67.
- [28] 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 (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(6): 72-80.
- [29] 徐一剑, 李潭峰, 徐丽丽. 国土空间总体规划温室气体核算模型[J]. 气候变化研究进展, 2022 (3): 355-365.
XU Yijian, LI Tanfeng, XU Lili. Greenhouse gas inventory model for territorial spatial master plans[J]. Climate Change Research, 2022(3): 355-365.
- [30] 张振龙, 侯琰珍, 孙鸿鹤. 市域国土空间碳排放测算及低碳化发展效率差异[J]. 自然资源学报, 2023, 38 (6): 1464-1481.
ZHANG Zhenlong, HOU Yanzen, SUN Honghu. Calculation of carbon emissions and the difference of low-carbon development efficiency on city territorial space[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6): 1464-1481.
- [31] 罗文静, 汪颀, 熊伟. 国土空间规划“双碳”计算仿真模块构建及应用[J]. 城市规划学刊, 2023 (2): 47-56.
LUO Wenjing, WANG Xie, XIONG Wei. A study on the computational model of territorial spatial planning towards the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. Urban Planning Forum, 2023(2): 47-56.
- [32] 丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J]. 中国人口·资源与环境, 2004 (4): 19-26.
CONG Jianhui, LIU Xuemin, ZHAO Xueru. Demarcation problems and the corresponding measurement methods of the urban carbon accounting[J]. China Population, Resources and Environment, 2004(4): 19-26.
- [33] 王丹, 彭颖, 柴慧, 等. 上海实现碳达峰须关注的重大问题及对策建议[J]. 科学发展, 2022 (6): 93-100.
WANG Dan, PENG Ying, CHAI Hui, et al. Major issues and suggestions for countermeasures to achieve the carbon peak in Shanghai[J]. Scientific Development, 2022(6): 93-100.
- [34] 上海市住房和城乡建设管理委员会, 上海市发展和改革委员会. 2019年上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测及分析报告[R]. 2020.
Shanghai Municipal Development & Reform Commission, Shanghai Municipal Housing and Urban-Rural Construction Administration Commission. Shanghai office buildings of state organs and large public buildings energy consumption monitoring and analysis report, 2019[R]. 2020.
- [35] 蔡伟光, 李晓辉, 王霞, 等. 基于能源平衡表的建筑能耗拆分模型及应用[J]. 暖通空调, 2017 (11): 27-34.
CAI Weiguang, LI Xiaohui, WANG Xia, et al. Split model and application of building energy consumption based on energy balance table[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017(11): 27-34.
- [36] 蔡伟光, 庞天娇, 郎宁宁, 等. 我国各省建筑能耗测算与分析[J]. 暖通空调, 2020 (2): 66-71.
CAI Weiguang, PANG Tianjiao, LANG Ningning, et al. Calculation and analysis of provincial building energy consumption in China[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020(2): 66-71.
- [37] 上海市质量技术监督局. DB31T 676-2012城市轨道交通合理用能指南[S]. 北京: 中国质量标准出版传媒有限公司, 2012.
Shanghai Quality and Technical Supervision. DB31T 676-2012 Guidelines for rational energy utilization of urban rail transit[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co. Ltd, 2012.
- [38] 宋冰, 牛书丽. 全球变化与陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016 (1): 14-23.
SONG Bing, NIU Shuli. Global change and terrestrial carbon cycle: a review[J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2016(1): 14-23.
- [39] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果比对分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2005.
WANG Yinghong. Chamber method measurement of greenhouse gas emissions from typical terrestrial ecosystems of China: method research, application and results discussion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Atmospheric Physics), 2005.
- [40] 可持续发展社区协会. 城市碳排放达峰路线图及行动计划模块化设计指南[Z]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
Institute for Sustainable Communities. Guidebook for the module design of city GHG emissions peaking roadmap & action plan[Z]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2019.