

国土空间规划“双碳”计算仿真模块构建及应用*

罗文静 汪 颢 熊 伟

提 要 “双碳”理念与国土空间规划在目标、手段及过程等方面具有内在一致的逻辑关联,然而由于两者缺乏数字联系,尚无法实现“双碳”目标的空间统筹。为将“双碳”理念纳入国土空间规划体系,有必要面向自然资源全要素,构建“双碳”空间计算仿真的工具模块,以评估规划方案的碳模拟值,传导自然资源要素的碳管控值,并实时监督碳实施值,从而贯穿规划的全生命周期,构建集“碳模拟”“碳管控”“碳监测”的数字化跟踪闭环。围绕“碳模拟”空间计算模块,为实现能量代谢活动碳核算向空间使用活动碳计算的逻辑转换,按照识别“双碳”要素、摸清“双碳”底数、搭建“双碳”算术的“三步走”技术路线,构建市级国土空间总体规划碳评估计算框架,并以武汉为例进行计算验证。研究发现减排增汇的关键因子包括工业用地面积、工业用地地均产值、单位GDP生产能耗降幅、能源结构调整、新建建筑规模、出行次数、出行结构等,并以碳达峰增速、增量及总量拐点为关键时点,提出关键因子的分阶段导控要求,在此基础上围绕城市规模、用地管控、空间结构—交通模式、底线约束、基础设施、实施监督等方面提出空间治理建议。

关键词 碳达峰碳中和;国土空间规划;计算仿真;碳评估

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202302007
文章编号 1000-3363(2023)02-0047-10

作者简介

罗文静,武汉市规划编审中心高级规划师,371833031@qq.com

汪 颢,武汉市自然资源与规划局空间规划处处长

熊 伟,武汉市自然资源和规划信息中心副主任

A Study on the Computational Model of Territorial Spatial Planning Towards the Goals of Carbon Peak and Carbon Neutrality

LUO Wenjing, WANG Xie, XIONG Wei

Abstract: The goals, means, and processes of the "double carbon" mission are consistent with those for territorial spatial planning. However, due to the missing quantitative link between the two, spatial plans can not be made to achieve the "double carbon" goals. In order to integrate the goals of carbon peak and carbon neutrality into the territorial spatial planning system, it is necessary to establish a computational model to quantify the carbon impacts of development on natural resources and monitor and regulate carbon emissions through a digital governance system. For the purpose of monitoring carbon emissions, this paper attempts to establish a computational framework that is able to identify carbon elements, assess carbon impacts, and accounts for carbon emissions based on municipal territorial master plans. The model is tested on the case of Wuhan and it reveals that key carbon emission factors include size of industrial land, productivity of industrial lands, magnitude of decrease in energy use per unit of GDP, energy structure, quantity of newly constructed buildings, residents' travel frequencies, and their travel modes. Critical time points include the points of inflexion for the rate, quantity, and total carbon emission. Based on this, the paper makes suggestions on city scales, land use control, spatial structure and transit modes, infrastructure, and plan implementation.

Keywords: carbon peak and carbon neutrality; territorial spatial planning; computational model; carbon assessment

党的十八大以来,生态文明建设从认识到实践不仅取得了历史性成就,也实现了全局性变革^[1]。实现碳达峰碳中和作为重大国策,已纳入生态文明建设整体布局。从“低碳”到“双碳”,体现了更加确定、理性的目标逻辑,需要在生态文明建设的方式、方法及路径上作出有效响应、实现系列变革。近年来国家出台的相关政策文件均提出将“双碳”全面纳入国土空间规划体系,构建有利于碳达峰碳中和的国土空间开发保护新格局^[2]。作为国家空间发展的指南、可持续发展的蓝图,国土空间规划应全面落实“双碳”目标,并纳入空间治理全过程。从纽约、伦敦、巴黎、东京等城市实践来看,基于空间规划实现“双碳”战略的统筹治理已成为各国主流政策^[3]。因此,将“双碳”全面纳入国土空间规划体系是实现碳达峰碳中和的关键路径。

实际上,规划长期以来将绿色低碳作为基本原则理念,但由于缺乏空间要素与“双

*自然资源部城市仿真实验室科研项目“武汉城市仿真实验室碳达峰碳中和模块前期研究”(项目编号:2021JH39)

碳”的量化关系，目标传导与空间统筹不足^[2-3]。一方面，国土空间规划针对绿色低碳的内容以原则性要求及指导性政策为主，由于缺乏明确定量的减碳增汇目标，无法转换为空间安排，相关工作更多聚焦于中微观空间尺度的城乡建设领域^[2]；另一方面，“双碳”战略的推进尚存在领域碎片化及空间脱节化等问题，减碳任务往往被分解为能源、产业、交通、建筑、金融等若干领域，各领域由于缺乏对于自身在城市整体碳排中的贡献比、代价比等全局性认知，难以在空间上整体统筹各个领域专项措施的主与次、远与近^[4-5]。上述问题产生的本质原因在于缺乏各项国土空间活动与碳影响水平之间的量化关系，从而无法定量评价各类自然资源要素影响碳循环过程的作用机制。

近年来，学界对“双碳”与国土空间规划的量化关系有不少探讨：一是在体系架构层面，强调将“双碳”纳入国土空间规划“五级三类四体系”的总体框架统筹考虑，尤其需要利用数字技术赋能，在规划方案的碳定量模拟等方面进行创新探索，从而“建立适应本地特色的碳源碳汇核算、规划情景碳效应评估等关键技术体系”^[2, 4-7]。研究已达成的共识是“双碳”战略下的国土空间规划体系应建构在碳核算等基础工作上，但对于技术层面的相关路径及实践探索有待深入。二是在技术方法层面，国内外早有学者^[8-17]聚焦碳核算方法在各层级国土空间规划中的应用，分别针对总体规划、详细规划及社区规划等规划类型，研究构建现状碳核算、规划碳估算的计算框架。相关研究在国土空间规划碳定量评估领域已建立了较为扎实的理论及实践基础，但由于缺乏“双碳”目标融入国土空间规划体系的整体考虑，对于评估结论的应用，尤其是如何发挥规划的空间统筹作用欠考虑。

武汉城市仿真实验室^②围绕如何将“双碳”目标纳入国土空间规划体系，从两者的逻辑关联出发，提出构建现状“碳监测”、规划“碳模拟”及实施“碳管控”的数字化跟踪闭环。选取规划“碳模拟”模块为先行先试，重点围绕市级国土空间总体规划搭建碳评估计算框架，并以武汉为例，进行了测试验证。

1 “双碳”纳入国土空间规划体系的框架思路

国土空间规划与“双碳”虽身处不同的语境体系，但在目标、过程、路径等方面存在深刻的内在逻辑关联^[14]。站在国土空间规划的视角，从两者的底层逻辑出发，研究构建将“双碳”纳入规划体系的框架思路。

1.1 “双碳”与国土空间规划的思维逻辑

一是“双碳”赋予了国土空间规划更高的核心价值观。规划诞生的本源是保护人居环境，国土空间规划以生态文明理念为核心价值观，是保护与发展的最优解。“双碳”纳入国土空间规划体系，不仅可进一步强化规划核心价值观，而且可建立更加科学理性的目标逻辑及全局长远的目标站位。“双碳”战略并非以碳达峰碳中和为单一目标，而是在综合社会、经济及空间多方诉求下，实现效率与代价的最大平衡。因此，有必要发挥“双碳”的目标约束作用，通过量化分析各项空间安排的碳影响水平，构建有利于碳达峰碳中和的国土空间开发保护最优方案。

二是“双碳”强化了国土空间规划更综合的系统治理观。规划作为空间治理工具，“双碳”作为国家战略，均涉及不同空间尺度的目标分解以及各个专业领域的相互配合，需要以整体效用最大化为原则、在各个局部找到最关键的发力点。将“双碳”纳入国土空间规划体系，不仅可强化规划对于生态系统治理体系的作用，而且可将“双碳”目标转化为空间治理路径与任务。因此，有必要发挥“双碳”对于国土空间规划的治理统筹作用，以最大程度提升碳排效率及减碳潜力为目标，通过明确各个空间层次及专业领域的关键路径，实现“牵一发而动全身”的整体最优。

三是“双碳”加强了国土空间规划更精准动态施策观。规划本身就是动态过程，国土空间规划已构建了持续监测评估并及时反馈调校的动态机制，而碳达峰碳中和的过程既要考虑气候变化、科技发展等不可预见因素，也受到城市

系统复杂性、减排阶段差异性等多因素的交叉影响^[5]。因此，“双碳”目标的实现并非一劳永逸，应综合考虑近期举措的确定性与长期发展的不确定性。有必要基于国土空间规划体系，建立“双碳”目标、行动及环境的动态监测机制，实现精准施策、动态调校的过程控制。

1.2 “双碳”纳入国土空间规划体系的框架

国土空间规划与“双碳”的逻辑关联决定了两者的融合可相互借力并发挥“1+1>2”的协同效应，其关键是解决下面三大核心问题：

一是如何形成有利于碳达峰碳中和的国土空间规划最优方案？

二是如何设计科学合理的“双碳”目标分解与任务分配的空间统筹机制？

三是如何构建“双碳”目标、行动及环境的监测评估与预警机制？

解决上述问题的关键在于构建“双碳”目标与国土空间规划的数字关联关系。有必要面向自然资源全要素，建立国土空间规划的“双碳”计算逻辑，通过构建集“碳模拟”“碳管控”“碳监测”的数字化跟踪闭环，模拟计算规划方案的碳影响水平，科学构建自然资源要素的碳管控方式，并全面建立国土空间活动的碳预警机制，从而将“双碳”理念纳入规划的全生命周期过程（图1）。

1.2.1 “碳模拟”：仿真计算规划方案的碳影响水平

制定有利于碳达峰碳中和的国土空间开发保护最优方案，既需落实碳配额目标，也需要实现碳排效率及减碳潜力的最大化，关键在于客观评价各类空间要素的碳影响水平，构建国土空间规划“碳模拟”的计算框架。该模块可用于评判国土空间规划方案能否满足社会、经济与生态尤其是“双碳”目标的多重要求，并从中找到关键影响因子，从而最大程度激发减排增汇潜力。

具体可在区域、市域及街区等尺度展开计算：在区域尺度，基于自然资源基底条件及规划空间格局，分析城市协同减排增汇的潜力与关联效应；在市域尺度，基于总体规划方案，多情景预测规划方案的“碳模拟”曲线，分析实现“双碳”目标的关键因子及关键时点；在

街区尺度，基于详细规划方案，通过地块级及建筑级模拟预测，校核城市级计算结果，分析减排增汇潜力。

1.2.2 “碳管控”：构建自然资源要素的碳管控方式

设计科学合理的“双碳”目标分解与任务分配的空间统筹机制，可以“碳模拟”为基础，在以下两个层次实现“碳管控”：一是基于区域及市域尺度的“碳模拟”，将国家及省级层面的“双碳”目标分解落实到各地市规划指标调配、底线管控及名录管理中；二是基于市域及街区尺度的“碳模拟”，将城市的碳配额总量转化为专项行动计划及用地管控要求^[6]。

有必要基于国土空间规划体系，构建数字化管控传导路径：针对总体规划，基于城市级“碳模拟”，围绕城市规模、底线管控、功能格局、空间结构及设施布局等，提出规划优化策略；结合专项规划，基于各关键因子贡献度分析，确定重点领域的近期行动指标及责任部门；针对详细规划，基于街区“碳模拟”，划分重点及一般减碳增汇单元，围绕功能用途、建设强度、设施配置、环境形态等，提出差异化的管控要求，并纳入规划设计条件^[5]。

1.2.3 “碳监测”：建立国土空间规划的碳预警机制

构建“碳监测”模块，实现“双碳”目标、行动及环境的监测评估与实时预警，关键在于打通三大模块之间的数字关联关系，即针对规划的“碳管控”值建立“碳监测”模块，将实际的“碳监测”值实时传导至“碳模拟”模块，形成国土空间规划的碳预警机制，从而保证各项国土空间开发保护活动既能充分落实刚性的“双碳”目标，又能柔性适应空间活动中各种内在及外界不确定性因素。

国土空间规划监测评估预警管理系统可作为构建“碳监测”模块的基础。首先，面向自然资源全域全要素，监测各类空间要素的实际碳排碳汇规模；其次，将“碳管控”值纳入国土空间规划体检评估体系，结合实际“碳监测”值，围绕关键时点与关键因子，评价“碳管控”值的实现程度；在此基础上，实时计算“碳模拟”值，用于评价“双碳”目标的完成度，根据三大值的偏离程度设定预警反馈机制。

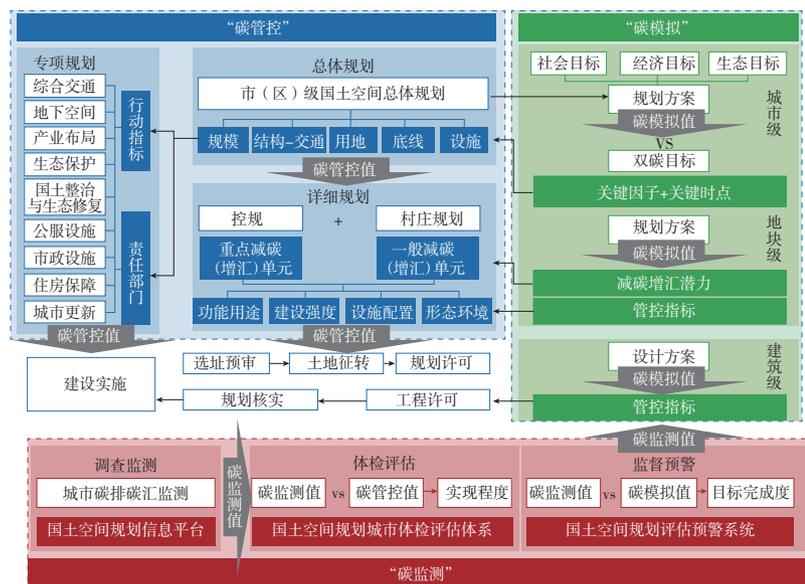


图1 “双碳”纳入市级国土空间规划体系的总体框架图

Fig.1 The structure of municipal territorial spatial planning system towards carbon peak and carbon neutrality

2 基于国土空间总体规划的城市级“碳模拟”模块

在上述三大模块中，“碳模拟”是构建数字化治理闭环的前提。城市级“碳模拟”是以城市为对象，针对全市域尺度，围绕市级国土空间总体规划开展的碳评估模拟。一方面，作为碳排的主要来源地^[18-19]，城市是分解落实国家“双碳”目标、统筹调配各项资源、制定减碳增汇举措的关键治理单元，目前已具备一定的碳核算工作基础；另一方面，市级层面的总体规划是当前国土空间规划工作的重中之重，目前也已形成了阶段性成果。因此，有必要以城市级“碳模拟”模块为先行先试。

2.1 当前碳核算方法应用于市级国土空间总体规划的难点

目前，城市碳核算工作大多以IPCC为依据，若直接应用于市级国土空间总体规划，在核算对象、核算边界及核算方法上还存在以下3方面的问题：

一是核算对象难以落空间，未覆盖自然资源全要素。现有温室气体清单分为能源活动、工业生产过程、农业活动、土地利用变化和林业、废弃物处理等5类，但由于其核算逻辑来源于温室气体的产生过程，与生产生活活动未建立直

接联系，难以落实到各类国土空间上。同时，现有核算标准对于耕地的碳排、碳汇双重属性以及湿地、海洋、内陆水域等水系的碳核算考虑欠缺，难以全面反映自然资源全要素的碳影响过程^[20]。

二是核算边界缺乏共识，难以反映国土空间活动全貌。城市空间活动的跨边界性较国家及省域层面更强。如对于跨境交通部分，目前该如何计算尚未达成共识，《省级指南》^③提出仅按运营主体注册地原则，核算跨境客货运公铁水交通^[21]，而城市实际碳核算工作，大多仅涵盖行政区划边界内与自身经济活动有关的温室气体排放^[20]，难以完全反映国土空间活动的全貌。

三是核算方法重在整体线性推演，未考虑城市复杂巨系统的多因子。现有碳核算的核心逻辑均是碳排放量等于活动水平与活动因子的乘积，其中：活动水平反映能量代谢过程，与空间活动规模无关；活动因子代表单位活动量的现状碳影响强度，并未考虑未来变化^[2]。基于未来的模拟预测是将社会经济环境政策代入后的整体线性推演，未考虑城市复杂巨系统中多因子相互作用形成的量变与质变，无法直接用于规划方案的碳评估计算^[22]。

综上，有必要在现有城市碳核算工作基础上，结合市级国土空间总体规划的相关要求，进一步明确界定核算对象、

边界及方法。

2.2 城市级“碳模拟”模块搭建思路

基于上述难点，“碳模拟”模块构建的关键是将能量代谢活动的碳核算转化为空间使用活动的碳计算。在此过程中，既需要将现有碳核算的对象转化为空间要素，即识别空间规划中的“双碳”要素，也需充分对接现有碳核算工作，即摸清“双碳”底数，最后结合未来影响因素分析做出多情景判断，即构建“双碳”算术。见图2。

2.2.1 识别“双碳”要素，构建自然资源全要素碳核算清单

将碳核算工作中的能量代谢过程要素转换为空间使用过程要素是构建国土空间规划“碳模拟”模块的前提，既应保证与现有碳核算工作范围的横向可对比，也应强化空间计算范围的目标导向性。为充分支持城市行政边界内的各项空间活动决策，综合考虑市级国土空间总体规划的事权，针对交通部分，仅纳入城市境内客运交通及客货运公路运输。

面向自然资源全域全要素，按照可空间落位、可规划管控的原则，建立温室气体清单与生产、生活及生态空间使用的一一对应关系，转译形成工业、建筑、交通、市政、农业及农林生态空间碳汇等6大类“双碳”空间要素，共计22小类。见图3。

2.2.2 摸清“双碳”底数，明确各类空间要素碳计算依据

为合理推算各类“双碳”空间要素的单位活动碳影响强度，有必要以现有碳核算底数为基础，结合空间要素规模进行反推。在系统梳理各类空间要素碳核算方法的基础上，按照“经验算法受认可、权威数据可获取”的原则，经过综合比选后确定各类要素的底数计算方法。以排放因子法为基础，各要素的“双碳”底数计算可依据能量代谢过程活动量与单位能量代谢活动碳影响强度乘积计算：

$$C_{\text{“双碳”底数}} = A_{\text{能量代谢过程活动量}} \times F_{\text{单位能量代谢过程活动碳影响强度}}$$

其中：活动量数据可利用城市统计年鉴、相关专项报告资料收集或局部地区实测等方法，如工业、建筑及农业要素，可利用城市统计年鉴中的能源消耗数据，交通、市政、农林及生态空间要

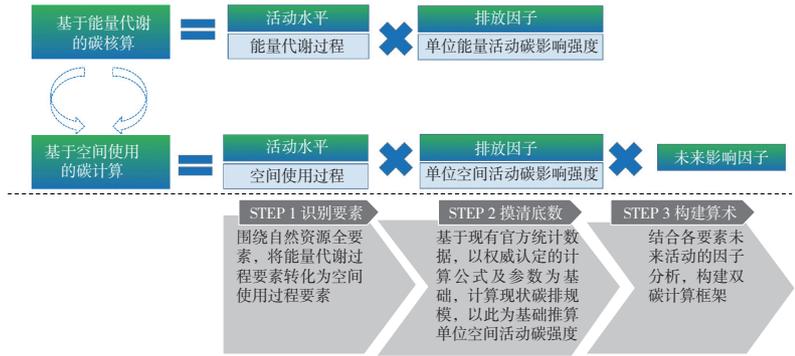


图2 城市“碳模拟”计算模块搭建思路图
Fig.2 The structure of "carbon simulation" model for spatial planning

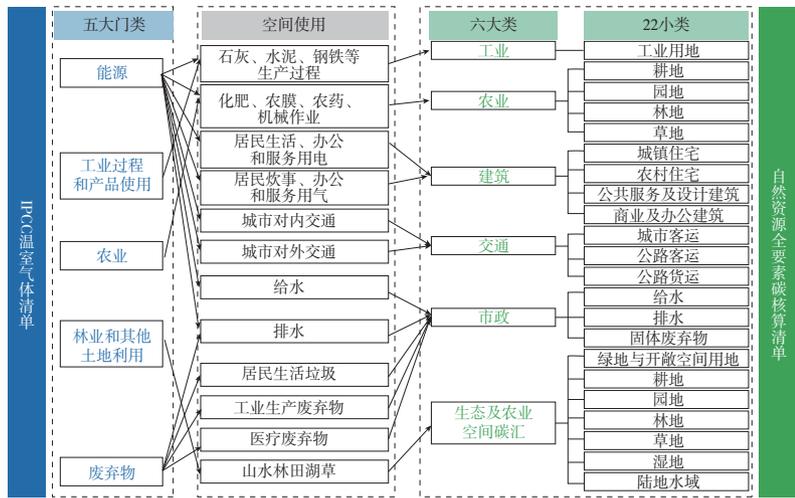


图3 国土空间规划“双碳”要素识别分析图
Fig.3 Identifying the carbon elements in territorial spatial planning

素，可利用城市统计年鉴中的相关活动数据；单位活动碳影响强度可依据国家相关技术标准或研究报告取值，也可基于代表性的测量数据推算。见表1。

2.2.3 构建“双碳”算术，建立国土空间规划碳评估框架

“双碳”算术的构建过程采取“三步走”：

首先是转换基本公式，将基于能量代谢过程碳核算的“底数”公式转换为空间使用过程的计算逻辑，根据各类“双碳”空间要素的底数值，结合现状空间要素规模，推算或验算各要素现状单位空间使用活动的碳影响强度。

$$F_{\text{单位空间使用活动碳影响强度}} = \frac{A_{\text{能量代谢过程活动量}} \times F_{\text{单位能量代谢过程活动碳影响强度}}}{A_{\text{空间使用活动量}}}$$

其次是拆解影响因子，充分考虑各类空间要素的碳作用机制，选择在城市

尺度可量化、可反映未来趋势的关键性因子，包括空间使用规模、空间使用行为、空间建设标准及能源结构变革等4类。

最后是构建计算模型，以空间要素活动水平与单位空间活动碳强度的乘积为基础公式，叠加各类影响因子形成的各类“双碳”空间要素的计算模型（表2）。

$$C_{\text{“双碳”算术}} = A_{\text{规划空间使用活动量}} \times F_{\text{单位空间使用活动碳影响强度}} \times f_{\text{关键影响因子}}$$

基于此，搭建完成市级国土空间总体规划“双碳”计算模块的要素层、底数层及算术层（图4）。

3 武汉市国土空间总体规划“碳模拟”计算测试

以《武汉市国土空间总体规划

表1 国土空间总体规划“双碳”底数计算框架

Tab.1 The computational structure for carbon accounting in the territorial spatial master plan

要素类型	计算公式	数据类型		数据来源
工业	$C_i^c = \sum E_i^{\text{industry}} \times f_i^{\text{industry}}$	能源消耗量	煤炭、燃料油、汽油、柴油、煤油、炼厂干气、液化石油气、天然气、外购热力、外购电力等	城市统计年鉴
		能源碳排放系数	煤炭、燃料油、汽油、柴油、煤油、炼厂干气、液化石油气、天然气、外购热力、外购电力碳排放系数	《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)、《省级温室气体清单编制指南》、《2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》)
建筑 ^④	$C_b^c = E_{\text{building}}^{\text{electricity}} \times f_{\text{electricity}}^{\text{building}} + E_{\text{gas}}^{\text{building}} \times f_{\text{gas}}^{\text{building}}$	能源消耗量	全社会居住及公共建筑用电量及用气量	城市统计年鉴
		能源碳排放系数	电力碳排放系数、天然气碳排放系数	《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)、《省级温室气体清单编制指南》、《2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》)、《建筑碳排放计算标准》(CB/T 51366—2019)
农业	$C_a^c = E_{\text{diesel}}^{\text{agriculture}} \times f_{\text{diesel}}^{\text{agriculture}} + E_{\text{electricity}}^{\text{agriculture}} \times f_{\text{electricity}}^{\text{agriculture}}$	能源消耗量	农用柴油、农林牧渔用电量	城市统计年鉴
		能源碳排放系数	柴油碳排放系数、电力碳排放系数	《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)、《省级温室气体清单编制指南》、《2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》)
交通 ^⑤	$C_t^c = \sum (N_i^{\text{intra-city}} \times L_i \times f_i) + V_{\text{rail}}^{\text{passenger}} \times L_{\text{rail}} \times f_{\text{rail}} + T_{\text{highway1}}^{\text{intercity}} \times f_{\text{highway1}} + T_{\text{highway2}}^{\text{intercity}} \times f_{\text{highway2}}$	保有量	私人小汽车、新能源小汽车、公共汽车、公共电车、出租车、轨道交通保有量	交通专题相关研究报告
		周转量	公路客货运周转量	城市统计年鉴
		年行驶里程	私人小汽车、新能源小汽车、公共汽车、公共电车、出租车、轨道交通平均运距	交通专题相关研究报告
		单位里程碳排放系数	私人小汽车、新能源小汽车、公共汽车、公共电车、出租车、轨道交通、公路客运及公路货运单位里程碳排放系数	《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南》等
市政	$C_m^c = (V_{\text{waste}} \times f_{\text{waste}}) + (V_{\text{water supply}} \times f_{\text{water supply}} + V_{\text{drainage}} \times f_{\text{drainage}})$	废弃物及给排水处理量	工业危险废物处理量、医疗废物处理量、城市生活垃圾焚烧量、供水量、污水处理量	生态环境局、水务局等相关公报等
		单位废弃物、污水处理及供水碳排放系数	废弃物碳含量、矿物碳在碳总量的百分比、燃烧效率、自来水供应碳排放系数、市政中水供应碳排放系数、污水排放碳排放系数	《省级温室气体清单编制指南》《中国绿色生态城区规划建设碳排放评估方法、数据、评价指南》等
农林及生态空间碳汇	$C_s^c = \sum A_i^{\text{ecological land}} \times c_i^{\text{ecological land}} + A_{\text{green coverage}} \times c_{\text{green coverage}}$	独立及非独立占地碳汇面积	耕地、园地、林地、草地、湿地、绿地与开敞空间用地、陆地水域、非独立占地绿化面积	城市统计年鉴
		独立及非独立占地碳汇吸收系数	耕地、园地、林地、草地、湿地、绿地与开敞空间用地、陆地水域等独立占地碳汇系数、非独立占地碳汇吸收系数	城市统计年鉴、《中国城市建成区植被结构特征和碳吸收》

注：C_i^c为现状工业碳排放量；E_i^{industry}为规上工业消耗的i类能源规模，f_i^{industry}为单位i类能源消耗碳排放系数，i表示能源的种类，包括煤炭、燃料油、汽油、柴油、煤油、炼厂干气、液化石油气、天然气、外购热力、外购电力等；C_b^c为现状建筑碳排放量；E_{building}^{electricity}为建筑用电量，包括居民建筑及公共建筑用电量；f_{electricity}^{building}为单位建筑用电量碳排放系数；E_{gas}^{building}为居民建筑及公共建筑用气量；f_{gas}^{building}为单位建筑用气碳排放系数；C_a^c为现状农业碳排放量；E_{diesel}^{agriculture}为农用柴油量；f_{diesel}^{agriculture}为单位农用柴油碳排放系数；E_{electricity}^{agriculture}为农林牧渔用电量；f_{electricity}^{agriculture}为单位用电碳排放系数；C_t^c为现状交通碳排放量；N_i^{intra-city}为第i类市内交通工具保有量；L_i为第i类市内交通工具年行驶里程；f_i为第i类市内交通工具单位里程碳排放系数，i表示交通工具的种类，包括私人小汽车、新能源小汽车、公共汽车、公共电车、出租车等；V_{passenger}^{rail}为轨道交通客流量；L_{rail}为轨道交通人均出行距离；f_{rail}为轨道交通单位周转量碳排放；T_{highway1}^{intercity}为客运交通周转量；T_{highway2}^{intercity}为货运交通周转量；f_{highway1}为公路客运单位周转量碳排放；f_{highway2}为公路货运单位周转量碳排放；C_m^c为现状市政碳排放量；V_{waste}为废弃物处理量；f_{waste}为单位废弃物处理碳排放系数；V_{water supply}为给水处理总量；V_{drainage}为污水处理总量；f_{water supply}为单位给水处理碳排放系数；f_{drainage}为单位污水处理碳排放系数；C_s^c为现状全市农业及生态空间碳汇总量；A_i^{ecological land}为第i类独立占地碳汇面积；c_i^{ecological land}为第i类独立占地碳汇单位面积碳吸收系数；A_{green coverage}为非独立占地碳汇面积；c_{green coverage}为非独立占地碳汇单位面积碳吸收系数。

(2021—2035年)》为例，对“碳模拟”计算模型进行测试验证。

3.1 数据基础

以武汉市市域为计算范围，考虑到2020—2021年受疫情影响，以2019年为“底数”计算的基期年，对2035年碳影响水平进行模拟预测。相关数据分为三类(图5)：

一是空间要素活动水平类，即表征各类“双碳”要素规划空间活动规模的数据，包括规划人口规模、规划各类用地规模等，主要来源于总体规划及专项规划。

二是空间要素活动因子类，即各类“双碳”要素单位空间活动的碳影响强度，如单位工业用地碳排系数、单位播种面积碳排系数等，主要来源于国家、省市相关标准及权威研究报告，并基于武汉市2019年碳排底数核算进行推导验证^⑧。

三是未来相关影响因子类，包括空间使用规模、使用行为、建设标准及能源结构变革等，主要依据各部门“十四五”发展规划，基于历史演变情况及“十四五”目标值对2035年进行推演预测^⑨，并分别取高值及低值进行情景模拟。

3.2 碳达峰碳中和曲线模拟预测

根据武汉市碳达峰碳中和的情景模拟预测结果(图6)，低碳排及高碳排方案的碳达峰时间均为2030年，峰值将达到12 040.89万—13 360.4万t，碳排与碳汇规模的上下浮动值均达到总量的10%—15%，表明未来减排增汇的潜力较大。按照合理值对各计算参数进行取值，预计2030年单位GDP碳排强度下降到2005年的84%，满足国家“双碳”目标要求。

对达峰年各要素进行具体分析，发现：

一是工业碳排占比最大，达到2030

表2 国土空间总体规划“双碳”算术框架
Tab.2 The computational structure for carbon simulation in the territorial spatial master plan

要素	基本公式		影响因素				计算模型
	转换前	转换后	空间使用规模	空间使用行为	空间建设标准	能源变革	
工业	$C_i^c = \sum E_i^{industry} \times f_i^{industry}$	$C_i^p = \sum A_i^p \times V_i^p \times f_{industryvalue}$	工业用地面积	地均工业产值	工业用地集约节约水平	能源结构调整、非化石能源使用	$C_i^p = \sum f_{industryvalue} \times f_{energy} \times f_{green\ electricity}$
建筑	$C_b^c = E_{electricity}^{building} \times f_{electricity}^{building} + E_{gas}^{building} \times f_{gas}^{building}$	$C_b^p = \sum S_{b_i}^p \times f_{b_i}$	城镇住宅、商业及办公建筑、公共服务及设施建筑、农村住宅建筑面积	空置率	新建、改造、保留建筑占比；超低能耗及零能耗建筑占比	能源结构转型、可再生能源使用	$C_b^p = \sum (S_{b_n}^p \times f_{b_n} \times (\sum f_{n\ percentage} \times f_{n\ reduction}))$
交通	$C_t^c = (\sum (N_i^{intra-city} \times L_i \times f_i) + V_{passenger}^{rail} \times L_{rail} \times f_{rail} + T_{highway1}^{intercity} \times f_{highway1} + T_{highway2}^{intercity} \times f_{highway2})$	$C_t^p = (\sum (V_{all}^{intra-city} \times P_i^p \times L_i^p \times C_i \times f_i^{traffic}) + T_{highway1}^{intercity} \times P_{highway1} \times f_{highway1} + T_{highway2}^{intercity} \times P_{highway2} \times f_{highway2})$	出行人次、出行距离、客货周转总量	出行方式、公路运输占比	单车交通工具载客量	能源结构转型、新能源车占比	$C_t^p = (\sum (V_{all}^{intra-city} \times P_i^p \times L_i^p \times C_i \times f_i^{traffic} \times f_{newenergy} \times f_{green\ electricity}) + T_{highway1}^{intercity} \times P_{highway1} \times f_{highway1} \times f_{newenergy} \times f_{green\ electricity} + T_{highway2}^{intercity} \times P_{highway2} \times f_{highway2} \times f_{newenergy} \times f_{green\ electricity})$
市政	$C_m^c = (V_{waste} \times f_{waste}) + (V_{watersupply} \times f_{watersupply} + V_{drainage} \times f_{drainage})$	$C_m^p = (\sum (P_{city}^p \times A_{householdwaste}^p + V_{highway1}^p \times A_{industrialwaste}^p \times N_{beds}^p + V_{water}^p \times f_{watersupply} + V_{water}^p \times R_{sawage} \times f_{drainage})) \times f_{waste}$	人口规模、人均固体生活垃圾量	处理方式、再循环利用使用率	设施布局及建设标准	能源结构转型、可再生能源使用	$C_m^p = P_{city}^p \times A_{householdwaste}^p \times (1 - R_{recycle}) \times f_{burn} \times (f_{waste} - f_{power}) + V_{industrialwaste}^p \times (1 - R_{reuse}) \times f_{waste} + A_{medicalwaste}^p \times N_{beds}^p \times R_{use} \times f_{waste} + (V_{water}^p - V_{reuse}^p) \times f_{watersupply} \times f_{green\ electricity} + (V_{water}^p \times R_{rainwater} + V_{water}^p \times R_{sawage} \times R_{wastewater}) \times f_{reclaimed\ water} \times f_{green\ electricity} + (V_{water}^p \times R_{sawage} \times f_{drainage} \times f_{green\ electricity})$
农业 ^⑥	$C_a^c = E_{dieseloil}^{agriculture} \times f_{dieseloil}^{agriculture} + E_{electricity}^{agriculture} \times f_{electricity}^{agriculture}$	$C_a^p = A_{farmland}^p \times n_{multiple} \times f_{plantingarea}$	耕地面积	复种指数	农业机械化水平	能源结构转型	$C_a^p = A_{farmland}^p \times n_{multiple} \times f_{planting\ area} \times f_{mechanization} \times f_{energy} \times f_{green\ electricity}$
农林及生态空间碳汇 ^⑦	$C_s^c = \sum A_i^{ecological\ land} \times c_i^{ecological\ land} + A_{green\ coverage} \times c_{green\ coverage}$		耕地、园地、林地、草地、湿地、陆地水域及绿地与开敞空间	复种指数	几何形态特征、植物配置特征、分布格局特征	—	$C_s^p = A_{farmland}^p \times n_{multiple} \times c_{planting\ area} + \sum A_i^{ecological\ land} \times c_i^{ecological\ land} + (A_{urban}^p \times R_{green\ coverage}^p - A_{green\ land}^p) \times c_{green\ coverage}$

注：C_i^c为规划期全市工业碳排放量；A_i^p为规划工业用地面积；V_i^p为规划工业用地地均工业产值；f_{reduction}为规划期单位工业GDP能耗下降水平；f_{industryvalue}为现状单位工业产值碳排放；f_{energy}为规划期能源结构影响系数；f_{green electricity}为规划期绿电影响系数；C_b^c为规划全市建筑碳排放量；S_{b_i}^p为规划第i类建筑的建筑面积，f_{b_i}为第i类建筑的单位建筑面积碳排放，i为建筑的功能类型，包括城镇住宅、公共服务及设施建筑、商业及办公建筑、农村住宅；f_{n percentage}为第n类建筑的建筑面积占比系数，f_{n reduction}为第n类建筑的能耗强度降幅，n为建筑的空间使用类型，包括保留、改造及新建等；C_t^c为规划期全市交通碳排放量；V_{all}^{intra-city}为规划期的市内客运交通出行总量；P_i^p为第i类交通方式的规划出行占比系数，L_i^p为第i类交通方式的规划出行距离，C_i为第i类单车交通工具载客（货）量；f_{i traffic}为第i类交通工具单位里程碳排放，i表示交通方式种类，包括公共汽（电）车、私人小汽车等；f_{new energy}为新能源车占比影响系数；T_{highway1}^{intercity}为规划期客运交通总量；T_{highway2}^{intercity}为规划期货运交通总量；P_{highway1}为公路客运运输占比；P_{highway2}为公路货运运输占比；f_{highway1}为公路客运单位周转量碳排放；f_{highway2}为公路货运单位周转量碳排放；C_m^c为规划期全市市政碳排放量；P_{city}^p为全市规划人口规模；A_{householdwaste}^p为规划人均生活垃圾处理量；R_{recycle}为生活垃圾的回收利用率；f_{burn}为规划焚烧处理方式系数；f_{waste}为现状单位固体废弃物处理碳排放系数；f_{power}为垃圾焚烧发电减排系数；V_{industrialwaste}^p为规划全市工业危险废弃物处理量；R_{reuse}为工业危险废弃物的再利用率；A_{medicalwaste}^p为规划单个床位的医疗废弃物处理量；N_{beds}^p为全市规划床位总数；R_{use}为规划的床位使用率；V_{water}^p为规划综合生活用水量；V_{water}^p为规划雨水再生利用率；f_{water supply}为单位给水处理碳排放系数；R_{rainwater}为雨水利用率；R_{sawage}为污水处理率；R_{wastewater}为污水再生利用率；f_{reclaimed water}为单位中水处理碳排放系数；f_{drainage}为单位污水处理碳排放系数；C_a^c为规划期全市农业碳排放量；A_{farmland}^p为规划全市耕地面积；n_{multiple}为规划耕地的复种指数；f_{planting area}为单位播种面积碳排放；f_{mechanization}为综合机械化率；C_s^c为规划全市农业及生态空间碳汇总量；c_{planting area}为单位播种面积碳吸收系数；A_{i ecological land}^p为规划全市第i类独立占地碳汇的面积，c_{i ecological land}^p为第i类独立占地碳汇单位面积碳吸收系数，i表示独立占地碳汇的种类，包括林地、园地、湿地、草地、绿地与开敞空间以及水域等；A_{urban}^p为全市规划城镇建设用地面积；R_{green coverage}^p为全市规划绿化率；A_{green coverage}^p为全市规划绿化覆盖面积；A_{green land}^p为全市规划绿地面积；c_{green coverage}为非独立占地碳汇单位面积碳吸收系数。

年碳排放总量的57%，是影响碳达峰时间及峰值的重点领域。尽管能源结构调整可降低10%左右的工业碳排放增量，但减排效果仅达到单位GDP能耗降低举措的1/7。

二是建筑碳排放情景模拟方案的浮动最大，接近峰值浮动水平的一半，是发挥减排潜力的关键领域。建筑碳排放增量

主要来源于新建建筑，尤其是城镇住宅建筑占新建建筑碳排放比例接近75%，建筑节能仅能减少约7%—11%的新建建筑碳排放。

三是交通碳排放的增长速度最快，从2005至2030年，交通碳排放量增长6倍，远大于工业及建筑的1.5—3.0倍。出行总量上升是碳排放增长的主要原因，出行

结构优化的减排效果达到能源结构调整的0.9—1.2倍，减排潜力更大。

四是市政的减排措施效果最明显，市政碳排放增量主要来源于废弃物及用水规模的增加。对于废弃物而言，回收利用、焚烧发电等使用行为方式的改变，可完全抵消人口增长带来的废弃物碳排；但对于给排水而言，雨污再利用的减排

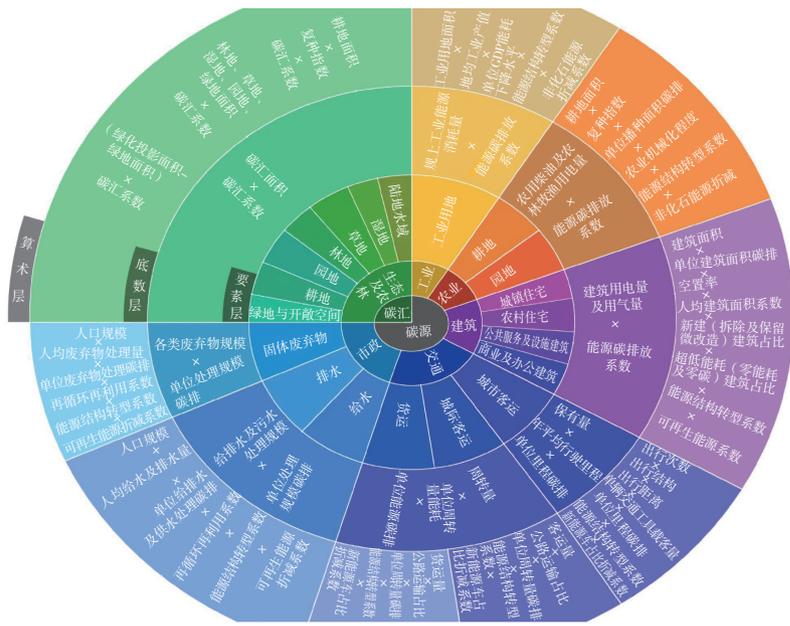


图4 市级国土空间总体规划“双碳”计算框架图

Fig.4 The computational model for carbon simulation in the territorial spatial master plan

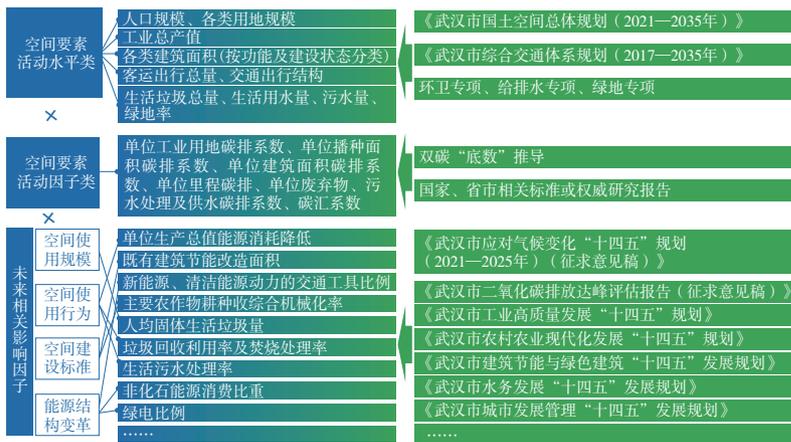


图5 武汉市国土空间总体规划“碳模拟”计算数据来源分析图

Fig.5 The sources of data used in the carbon simulation in the territorial spatial master plan of Wuhan

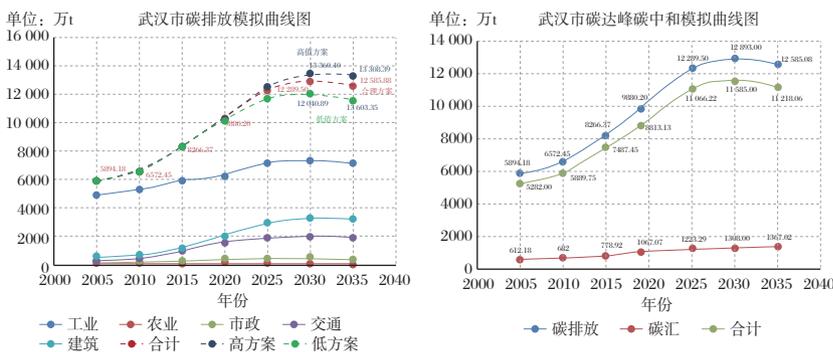


图6 武汉市国土空间总体规划“碳模拟”分析图

Fig.6 The carbon simulation for Wuhan territorial spatial master plan

潜力仍有提升空间，原因在于目前中水处理过程的碳排增量还远大于给水工程。

五是农业碳排已跨过碳达峰拐点，但未来有逐步反弹的态势。农业碳排量主要来源于综合机械化率及复种指数的提升，尽管能源结构调整可以抵消至少60%以上的碳排增量，但仍需谨防未来机械化率提升带来的碳排反弹。

六是碳汇增量主要与耕地复种指数、单位播种面积碳吸收强度及非独立占地绿化面积等相关，尤其是复种指数带来的碳吸收收益已达到碳排效应的15倍左右，未来有待通过提高农作物单产、复种指数激发耕地碳汇潜力，通过提升城市绿量来提高非独立占地碳汇潜力。

3.3 关键因子及时点识别

基于上述计算结果，结合我国“3060”碳达峰碳中和的总体目标要求，对其中的关键因子及关键时点进行识别，为自然资源的时空配置优化提供支撑，从而最大化发挥减排增汇潜力。

3.3.1 关键因子识别

以2019年碳排碳汇总量为基数，采用LMDI加法分解法，通过计算各项影响因素产生的碳影响值变化量及相对自身量值的变化程度衡量各项因子的贡献度及敏感度^①（图7）。其中，贡献度可体现各类因子对于碳排碳汇变化量及变化速度的影响，敏感度可从侧面反映各类因子减排增汇的效益成本比。

分析发现，工业用地面积、工业用地地均产值、单位GDP生产能耗降幅、能源结构调整、新建建筑规模、出行次数、出行结构是对未来碳排规模贡献度及敏感度相对较高的关键因子。其中：

空间使用规模类因子对碳排增量的贡献度普遍较高，如工业用地面积、出行次数、新建建筑规模等。这类因子的取值不仅直接决定了碳排的增量、增速及达峰时间，而且是表征城市发展规模的重要参数，因此也决定了碳排强度的高低。

空间使用行为类因子敏感度及贡献度均相对较高，如单位GDP生产能耗降幅、出行结构、平均出行距离、废弃物回收利用率等。作为表征城市发展质量的重要指标，这类因子的取值决定了减碳的规模与速度，对降低碳排总量及强

系。区域层面，综合考虑能源需求、生态环境、空间规模、运输效率等因素，统筹布局各类可再生能源区域及设施；市域层面，既要对未来能源基础设施的空间需求做好充分预留^[2]，也要对现有城市基础设施提出改造升级的方案；街区层面，统筹空间形态与设施布局的关系^[27]。

4.6 实施监督：构建“碳模拟—碳管控—碳监测”数字化传导闭环

基于国土空间规划体系，构建“碳模拟—碳管控—碳监测”数字化传导闭环：

针对“碳模拟—碳管控”的数字化传导，将碳模拟关键因子与关键时点转化为“碳管控”指标，一是结合专项规划编制，构建行动层指标，二是基于重点及一般减碳增汇单元划定，依托详细规划设置规划层指标。见图9。

针对“碳模拟—碳监测”的数字化传导，一方面分领域监测各类要素碳排放及碳汇值，拓展自然资源调查和监测体系^[6]，另一方面将“碳管控”指标纳入城市体检评估指标体系，实时评价各项指标的实现度，建立预警机制。见图10。

5 结语及启示

尽管国土空间规划与“双碳”存在深刻的内在逻辑关联，但倘若仅仅做“加和”工作，不仅难以相互助力，更无法在系统层面推进生态文明建设变革。两者融合的难点，既来源于其自身面临的复杂性与不确定性，也来自融合后的“超学科性”。因此，有必要利用数字科学技术的赋能，在“双碳”与国土空间规划之间建立系统层面的逻辑与规则转换共识。基于“双碳”理念与国土空间规划之间的内在逻辑，首先在系统层面搭建涵盖“碳模拟”“碳管控”“碳监测”的整体框架，构建“碳空间”的数字化跟踪闭环。重点针对“碳模拟”模块，基于碳影响值等于活动水平与活动因子乘积的计算逻辑，按照能量代谢活动碳核算转换为空间使用活动碳计算的整体思路，采取“认识—承接—建立”的层层递进式规则转换方法，搭建国土空间规划的“双碳”计算框架。在此基础上，

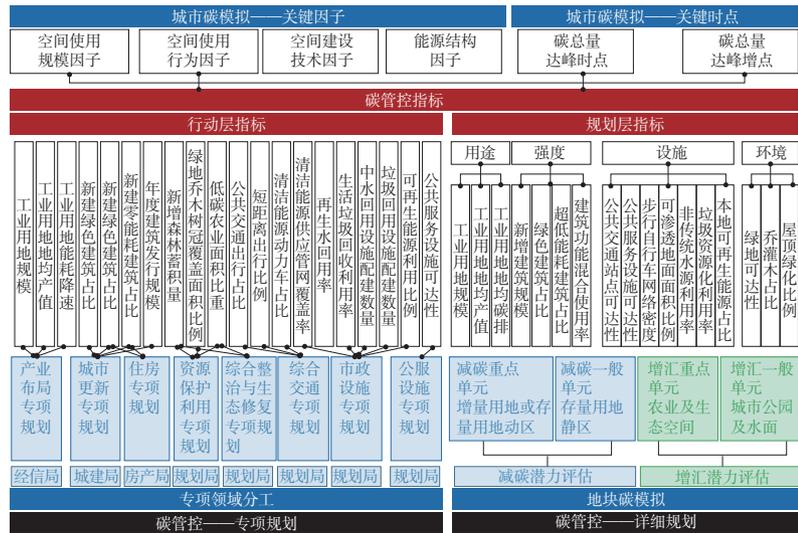


图9 “碳模拟—碳管控”数字化传导分析图
Fig.9 The digital loop for carbon simulation and regulation

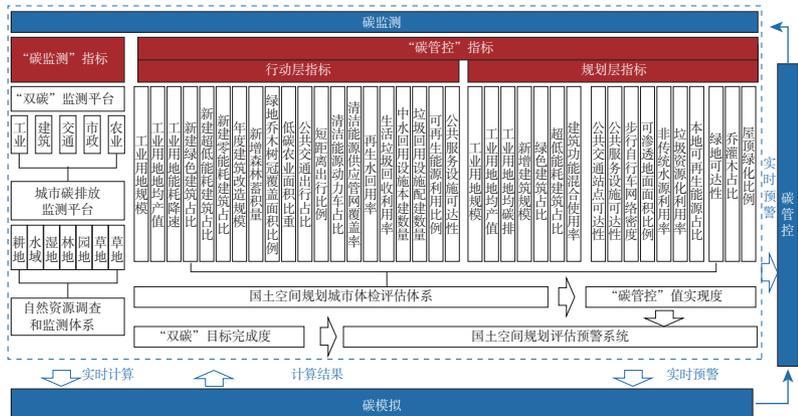


图10 “碳模拟—碳监测”数字化传导分析图
Fig.10 The digital loop for carbon simulation and monitoring

通过各项影响因子的贡献度及敏感度分析，明确决定未来碳影响水平的关键因子及关键时点，从而确定各项空间举措的主与次、远与近，为国土空间规划体系优化提供支撑。

本研究较现有的碳核算预测工作，在要素覆盖、目标预测和路径管控上更能发挥优势：既可全面反映自然资源全要素的现状碳排碳汇值，也可理性预测国土空间规划方案的碳影响水平，并可以此为依据实现“双碳”目标的过程管控。当然，现有研究还存在若干不足，如尚未考虑未来气候变化周期、各类要素之间的交叉影响机制以及各项因子取值的有限理性等，下一步有必要进一步优化完善“碳模拟”的计算框架、启动开展“碳监测”及“碳管控”模块建设，

尤其是通过地块级计算，实现“双碳”目标的精细化空间管控，同时也亟待借助于不同气候条件、经济社会发展水平地区的实践，不断修正调校计算逻辑，依此构建国土空间规划的“双碳”治理闭环。更加值得深思的是，本次研究依托数字科学技术的赋能打破跨学科研究壁垒的基本逻辑思路，值得进一步加以提炼并推广，从而解决生态文明时代背景下更多超越传统学科界限的实际问题。

注释

① 详见《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见（2021年）》《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知（2021年）》等。

- ② 武汉城市仿真实验室于2021年7月获批自然资源部重点实验室,由武汉市自然资源和规划局主持,依托武汉市自然资源和规划信息中心,联合华中科技大学、武汉市测绘研究院、武汉市规划研究院共同建设。
- ③ 全称为《省级温室气体清单编制指南(试行)(2011)》。
- ④ 建筑用电量可利用全社会用电量减去农林牧渔业用电量、工业用电量、仓储邮政用电量计算,仓储邮政用电量可用交通运输仓储邮政用电量按比例进行经验折减;建筑天然气用量可用居民家庭销售气量与公建商业销售气量进行加和计算,公建商业销售气量可用销售气量按比例进行经验折减。参考相关研究,交通用电量占比折减系数取值83%,公建商业用气占比取值5%^[28-29]。
- ⑤ 由于交通管理部门只统计运营车辆用油,缺乏其他部门及私人车辆油耗数据。
- ⑥ 牧渔等养殖业主要产生来自牲畜肠道的甲烷等气体,按照生态环境部2021年1月发布的《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》,温室气体清单仅计算CO₂一种温室气体,因此暂不考虑牧渔等养殖业。同时考虑到园地及林地的碳排总量占比较低,也暂不列入计算^[23]。
- ⑦ 生态及农业空间碳汇的“底数”计算公式已采用空间要素规模参与计算,因此不需要进行转换。同时考虑到绿地与开敞空间的几何形态特征、植物配置特征、分布格局特征等在城市尺度难以量化,暂不纳入计算模型。
- ⑧ 根据“双碳”底数计算框架,计算得到武汉市2019年碳排总量为9880.2万t,与武汉市生态环境局《武汉市二氧化碳排放达峰评估报告》发布的2019年碳排总量9538.9万t数值相当。
- ⑨ 若基期年与规划不一致,可根据历史值拟合预测规划数据,用最小二乘法、最大拟然性、最小绝对偏差来衡量拟合的程度,然后用线性趋势线、对数趋势线、多项式趋势线进行预测。
- ⑩ 按照公式 $\Delta C_k^0 = \frac{C_{11} - C_{10}}{\ln C_{11} - \ln C_{10}} \ln\left(\frac{k_1}{k_0}\right)$ 及 $\Delta E_k^0 = \frac{\Delta C_k^0}{(k_1 - k_0)/k_0} \times 100\%$ 分别计算各要素影响因子的贡献度及敏感度,其中: ΔC_k^0 表示期内影响因子k的碳影响贡献度, ΔE_k^0 表示期内影响因子k的碳影响敏

感度, C_{11} 表示规划年份的碳排放或碳汇量, C_{10} 表示规划基期的碳排放或碳汇量, k_1 为影响因子k在规划年份的取值, k_0 为影响因子k在规划基期的取值。

- ⑪ 对于工业及农业要素,为综合分析能源结构调整的影响,将化石能源消费结构系数及绿电比例系数合并为能源结构调整系数。

参考文献

[1] 陆昊. 全面推动建设人与自然和谐共生的现代化[R/OL]. 求是网, 2022-06-01.

[2] 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, 264(4): 74-80.

[3] 郑德高, 罗瀛, 周梦洁, 等. 绿色城市与低碳城市: 目标、战略与行动比较[J]. 城市规划学刊, 2022, 270(4): 103-110.

[4] 冯长春, 赵燕菁, 王富海, 等. 面向碳中和的规划响应[J]. 城市规划, 2022, 46(2): 25-31.

[5] 石晓冬, 赵丹, 曹祺文. “双碳”目标下国土空间规划响应路径[J]. 科技导报, 2022, (40)6: 20-29.

[6] 林坚, 赵晔. “双碳”目标下的国土空间规划及用途管控[J]. 科技导报, 2022, (40)6: 12-19.

[7] 王伟, 邹伟, 张国彪, 等. “双碳”目标下的城市群国土空间规划路径与治理机制[J]. 环境保护, 2022, 50(S1): 64-69.

[8] 叶祖达, 王静懿. 中国绿色生态城区规划建设: 碳排放评估方法、数据、评价指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[9] 李晓江, 何舸, 罗彦, 等. 粤港澳大湾区碳排放空间特征与碳中和策略[J]. 城市规划学刊, 2022(1): 27-34.

[10] 李毅, 任云英. 上海市城市总体规划碳排放核算方法研究[M]// 活力城乡 美好人居: 2019中国城市规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[11] 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.

[12] 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, 37(4): 50-56.

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

[14] 崔金丽, 朱德宝. “双碳”目标下的国土空间规划施策: 逻辑关系与实现路径[J]. 规划师, 2022, 38(1): 5-11.

[15] 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.

[16] 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, 264(5): 43-50.

[17] 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, 18(3): 355-365.

[18] 杨沛儒, 权纪戈. 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.

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

[20] 高原, 刘耕源, 陈操操, 等. 面向对标的我国城市温室气体排放核算方法框架[J]. 资源与产业, 2022, 24(3): 1-14.

[21] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 2010.

[22] 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, 35(11): 35-41.

[23] 唐洪松. 西北地区土地利用碳排放效率及减排潜力研究[D]. 新疆: 新疆农业大学, 2021.

[24] 武俊奎. 城市规模、结构与碳排放[D]. 上海: 复旦大学, 2013.

[25] 魏楚. 中国城市CO₂边际减排成本及其影响因素[J]. 世界经济, 2014, 37(7): 115-141.

[26] 王敏, 宋昊洋. 影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 17-23.

[27] 孙娟. 城市街区减碳规划方法集成体系[J]. 城市规划学刊, 2022, 272(6): 102-109.

[28] 朱方伟, 张春枝, 陈敏, 等. 武汉市城镇住宅建筑碳排放分析及总量核算研究[J]. 建筑节能, 2021, 49(2): 25-29.

[29] 朱方伟, 张春枝, 陈焯华, 等. 武汉市公共建筑运营阶段碳排放研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(12): 71-76.

修回: 2023-01