

国土空间规划碳效应机理及其评估范式*

Impact Mechanism of Carbon Emission from the Implementation of Territorial Spatial Planning and Its Assessment Framework

陈龙高 王欣瑶 杨小艳 李 龙 张 婷 刘 晶

CHEN Longgao, WANG Xinyao, YANG Xiaoyan, LI Long, ZHANG Ting, LIU Jing

摘 要 国土空间规划对于我国“碳达峰、碳中和”目标的实现具有重要的支撑保障作用。基于现行国土空间规划相关指南规范,总结国土空间开发利用与保护活动的内涵并明确国土空间规划碳效应的基本概念。基于国土空间利用类型系统研究国土空间规划的碳效应机理,据此提出具有普适性的国土空间规划碳效应评估基本范式和评价流程。依据该评估范式,可以实现基于国土空间规划方案实施情景等的多情景碳效应评估,还可通过对相关具体参数的调整,实现不同目标下的碳减排路径发现与低碳国土空间规划方案修编,从而助力我国“双碳”战略目标的实现。

Abstract Territorial spatial planning (TSP) plays a crucial supporting role in achieving China's dual carbon goals of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality. This article, based on current TSP-related guidelines and regulations, first analyzes and summarizes the essence of activities related to the development, utilization, and protection of territorial space. It clarifies the basic concept of TSP carbon emission impact and explores the mechanisms behind these effects based on the classification system of territorial space use types. Subsequently, it proposes a universal framework for assessing carbon emission impact in the implementation of the TSP scheme and outlines the evaluation process. According to this framework, multi-scenario assessments can be conducted based on implementation scenarios derived from TSP schemes. Furthermore, by adjusting relevant parameters, it becomes possible to identify carbon reduction pathways and revise low-carbon TSP schemes to meet different objectives, thereby facilitating the realization of China's dual carbon strategy goals.

关 键 词 国土空间规划;碳效应;评估范式;机理

Key words territorial spatial planning (TSP); carbon emission impact; assessment framework; mechanism

文章编号 1673-8985 (2025) 04-0107-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. sup. 20250415

作者简介

陈龙高

中国矿业大学公共管理学院

教授,博士生导师,chenlonggao@163.com

王欣瑶

中国矿业大学公共管理学院

硕士研究生

杨小艳

江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院

副教授,博士

李 龙

中国矿业大学公共管理学院

副教授,硕士生导师

张 婷

中国矿业大学公共管理学院

讲师,硕士生导师

刘 晶

中国矿业大学公共管理学院

副教授,硕士生导师

0 引言

“碳达峰、碳中和”(以下简称“双碳”)目标的提出是我国主动承担应对全球气候变化责任的庄严承诺和大国担当,对于我国实现“五位一体”总体布局和绿色发展具有重要意义。2021年《中共中央 国务院关于完整准确

*基金项目:江苏省社科基金项目“‘双碳’目标下江苏国土空间规划碳效应评估研究”(编号22GLB028);中央高校基本科研业务费专项资金“省级国土空间规划碳效应多因素影响与‘双碳’目标实现路径”(编号2025HQZZSK02)资助。

全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》指出“将碳达峰、碳中和目标要求全面融入经济社会发展中长期规划,强化国家发展规划、国土空间规划……的支撑保障”。国土空间规划(Territorial Space Planning, TSP)规范和引导着自然资源的利用管理^[1],同时对人类生产与生活活动产生作用,进而对碳排放产生影响。因此,国土空间规划方案的科学编制和实施对于我国“双碳”目标的实现具有重要支撑作用。

我国现行统领“多规合一”的国土空间规划体系建立较晚,在理论研究及实践探索方面均刚刚起步。因此,国土空间规划的“碳问题”虽然已成为热点并有相当数量的学者开始研究,但公开发表的成果依然较为有限,研究领域主要涉及顾及“双碳”目标的国土空间规划^[2]、管控^[3]、治理措施或实现路径^[4-5],对于“双碳”目标与国土空间规划的关系也有学者进行了探讨^[6-7]。然而,大量研究更多是基于理论或逻辑框架的分析^[8-9],面向实际应用的相关方法与技术体系研究还需深入。研究的视角也更多地投向城市空间语境,基于行政管辖范围的空间尚未得到足够的重视^[10]。在研究的深度、广度及系统性等方面均有待加强,特别是对于国土空间规划的碳效应机理机制的系统性研究不足,难以科学地把握全域空间语境下国土空间规划的碳认知。此外在构建逻辑清晰的碳效应评估,以及路径发现的方法与技术体系方面理论依据也不足。

本文在全域国土空间语境下,首先系统分析了国土空间规划的碳效应机理,其次基于我国现行国土空间规划相关规程标准,构建了面向应用层面的国土空间规划碳效应评估范式框架与流程。研究成果可为区域国土空间规划碳效应评估与路径发现研究提供理论基础与模型支撑。

1 国土空间规划碳效应的基本内涵

国土空间规划是对一定区域国土空间开发保护在空间和时间上作出的安排。国土空间开发利用与保护活动涉及3个方面的涵义:

(1) 活动的范围为一定区域内的国土空间,包括生态空间、农业空间和城镇空间,对于沿海地区还存在海洋空间类型。《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》从国土空间功能角度划分16种用地用海类型,该类型体系为市级国土空间总体规划成果编制提供了依据,也重点体现了不同类型国土空间的细分功能类型,不同类型国土空间范围内开发利用与保护活动内容的类型与强度均有所不同。(2) 活动的内容指人类在国土空间上的生产生活活动。不同类型国土空间范围内人类活动的内容和形式各不相同:生态空间范围内的人类活动主要以保护和维持生态空间所具有的生态系统服务或生态产品功能为目的;农业空间是以农业生产和农村生活为主的空间,具体包括耕地种植、农村居住生活、园地种植,以及畜禽养殖等活动;城镇空间以城镇范围内的各类产业生产与人类生活活动为主要类型。(3) 活动的结果表现为国土空间的变化,主要表现在空间格局、数量结构、强度效益等方面。

从国土空间变化过程来看,国土空间规划方案实施通常会有国土空间类型保持和国土空间转换两类结果。如永久基本农田和耕地的保护、生态红线区域保护,以及现有城镇空间的维持通常使得国土空间类型不发生变化,只是在利用方式或强度效益方面产生变化;而土地复垦与生态修复、城镇空间扩张等会导致不同类型的国土空间产生转换。相应地,国土空间规划的碳效应可以分为国土空间保持及转换的碳效应。

基于上述分析,国土空间规划碳效应指国土空间规划方案实施下的生态、农业和城镇等国土空间利用模式,以及相应的人类生产生活活动对碳排放产生的影响(其中碳吸收属于负的排放效应),并可区分为直接碳效应和间接碳效应两种类型。其中,因国土空间格局、数量结构和强度效益的变化导致的碳效应为国土空间规划的直接碳效应;因规划方案实施后国土空间利用模式变化导致的人类活动影响而引起的碳效应为国土空间规划的间接碳效应。对于沿海区域,海洋空间的碳效应也是

重要的组成部分。

2 国土空间规划的碳效应机理

《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》中将各类国土空间分为24个一级类型,该类型体系从调查、规划与用途管制等多个角度对国土空间类型进行了划分,以便统一国土调查、统计和规划分类标准。考虑到部分国土空间类型(尤其城镇空间中的细分类型)难以在空间上进行区分,相应的人类活动界限难以进行清晰地界定,将其进行分类阐述对于国土空间利用碳效应测算并没有实质性的指导价值。故本文根据不同类型国土空间的碳效应基本特征出发,整合为耕地、园地与林地、草地、湿地与水域用地、城乡建设用地、基础设施用地及海洋等不同国土空间类型开展碳效应分析。此外,对于各类空间的复合与立体利用则需根据具体研究的尺度与精度要求确定是否采用进一步细分方式详细测算不同细分类型下的碳效应,也可以从不同复合与立体利用国土空间中的具体活动类型明确相应的碳排放/吸收机理,进而进行测算。

2.1 耕地利用规划的碳效应机理

耕地包括水田、水浇地及旱地3类,耕地利用规划的碳效应包括耕地与其他国土空间类型相互转换导致的碳排放变化,以及耕地利用过程中的持续碳排放效应。从耕地利用碳排放角度来看:一是耕地变化首先会导致土壤的理化性质发生变化,进而影响土壤内部碳循环过程^[11];二是耕地变化会通过改变耕地地表农作物的生长发育状况的直接影响改变碳排放^[12-13];三是耕地变化会导致CO₂排放浓度的变化,从而使得各类国土空间植物覆盖的光合作用发生改变并对生态系统碳循环产生影响^[14]。

对于省级及以下国土空间规划而言:耕地和基本农田保护指标以相应的保护区划定成果,约束了耕地在规划期间数量及空间布局的变化方向。这是导致耕地规划期间碳效应变化的关键因素。此外,用水总量与能源利用指

标约束等也会导致农产品需求及化肥农药施用、农业机械大规模应用等种植经营方式的变化,并对耕地碳排放产生相应的影响。

2.2 园地与林地利用规划的碳效应机理

相较于耕地,园地与林地对土壤的人为扰动较少。从碳效应的角度来看,园地和林地具有类似的作用机制。园地与林地转变为其他土地类型通常导致林木被砍伐,使得温度和水分均会发生变化,也改变了土壤呼吸作用^[15]。有学者对岩溶区的橘园地^[16]和粉煤灰填充后的复垦园地^[17]进行研究,发现其土壤中的有机碳含量均高于耕地;也有研究发现,长江经济带林地是碳汇量最大的用地类型^[18]。适当的森林管理是增加碳储量并提高碳吸收效应以缓解气候变化的关键手段和有效途径^[19-21]。

国土空间规划中林地保有量面积指标限制了其他用地向林地的超量侵占,对于增加林地碳汇能力具有正向作用;林业发展区的划定则可辅助制定相关的林业发展与保护制度措施,也有利于林地碳汇能力的保持;生态保护红线区域和城镇中特别用途区往往是林地(森林)的重要分布区域,这两类区域的开发建设管制和保护制度措施对于保护林地碳汇能力具有重要作用。

2.3 草地利用规划的碳效应机理

草地是陆地生态系统碳循环的核心要素之一^[22]。研究表明,在祁连山国家公园所有土地利用类型中,草地的碳密度仅次于林地^[23]。草地土壤碳库是草地生态系统中最大的碳储库,此外天然草地比受过人类活动干扰的人工草地的土壤碳含量更高^[24]。另外有研究发现,退化荒漠草地在进行人工植被建设后,其恢复区碳密度明显高于退化荒漠草地^[25],表明草地上的植被恢复和保护等活动能有效地提升固碳能力^[26-27]。因此,应充分关注草地资源禀赋特征,合理规划利用和保护草地资源。以基本草原面积作为国土空间规划中的一项约束性指标,可以有效地实现对草地的保护性利用,从而防止对草地的建设侵占、过度放

牧或其他植被破坏等行为,有利于保持草地的固碳能力。

2.4 湿地与水域利用规划的碳效应机理

淡水湿地是重要的碳汇^[28],全球湿地面积占陆地面积的5%—8%,在整体陆地生态系统土壤碳储量中所占的比例却高达20%—30%^[29]。尽管湿地固碳能力强,但由于其生态系统较为脆弱,不论自然干扰(潮汐作用或气候变化)还是人为干扰(如围垦造田)均会导致湿地生态系统的明显变化,从而影响碳排放和吸收效应^[30]。湿地水文条件变化也会对枯落物分解产生影响,从而改变区域碳收支平衡^[31]。水体是全球生物地球化学循环中的重要碳汇或碳源^[32-33],河流中的碳主要通过径流输送至下游的淡水和海洋生态系统,部分碳会沉积在内陆水体中,或以气态碳的形式进入大气^[34];湖泊、水库及坑塘水面是内陆水体的重要组成部分,汇集了大量陆地地表水的碳素,强烈影响着全球碳源和碳汇^[35]。

国土空间规划中湿地与水域相关的规定包括湿地面积和用水总量两个约束性指标。同时省市规划指南中还分别有针对性地提出每万元GDP水耗、降雨就地消纳率、地下水水位等相关指标。其中湿地面积、降雨消纳率、地下水水位等指标对于湿地规模和质量、土壤水文循环等生态过程具有积极作用,此外前述有关生态红线区域的划定及相应管控规则的制定也有利于湿地和水域的有效保护,从而对碳汇具有正向作用。用水总量、每万元GDP水耗及地下水水位等指标控制了水资源的利用强度与效率,上述指标与城乡建设用地规模等指标有效结合,会对区域人口布局与经济社会发展产生影响,进而影响碳排放/吸收。

2.5 城乡建设用地规划的碳效应机理

城乡建设用地是人类生产生活活动最重要的国土空间载体,也是碳排放活动最集中的区域^[36-37]。研究发现,全球占据陆地面积仅

2.4%的建设用地产生了约80%的碳排放^[38],而建设用地中的绝大部分为城乡建设用地,故城乡建设用地是碳排放的主要来源。

首先,城乡建设用地中硬化区域会因植被难以生长而丧失植被碳汇能力,也有研究发现建筑材料的使用也具有一定的碳汇效应^[39];非硬化区域(如景观绿地或湿地等区域)则会因其土壤及地表覆被特点呈现与林地、草地或湿地相似的碳效应。其次,城乡建设用地数量规模和空间布局的变化大多会导致城乡周边的耕地或其他非建设用地被占用,从而降低区域碳吸收的能力。最后,城乡建设用地利用强度的变化或利用强度的约束(在国土空间规划中体现为用水总量以及新能源和可再生能源比例等指标的约束或引导)会导致能源^[40]、水、矿产等自然资源利用强度的变化^[41],从而对碳排放产生影响;居住用地范围内人口密度的增加会提高对食物与能源的消费,碳排放强度也会相应增加。由于城乡建设用地范围内涵盖多种用地类型,其碳排放的来源及活动特征也各有不同,但是整体上表现为碳源。

2.6 基础设施用地规划的碳效应机理

从国土空间规划的视角来看,基础设施用地主要指城乡建设用地范围外的交通、水利、通信、电力等基础设施用地类型。由于除交通用地之外的通信、电力等基础设施类型建成后的运营大多不产生直接的碳排放,或者该类用地上的能源消费与人类活动通常已纳入城镇空间测算其碳排放。故该部分重点对交通用地碳效应进行分析。不同交通用地的碳效应有所不同,但整体均呈现出碳源特性。公路用地包括建设、运营和养护3个阶段的碳效应。铁路运输是一种相对环保低碳的运输方式,但铁路行业运营期碳排放占全生命周期的80%以上^[42]。港口码头等航运用地的碳排放来源包括运营期间各类车辆、船舶等消耗燃油产生的排放^[43],其每年的碳排放已超过全球排放总量2.7%^[44]。港口码头的碳排放受到多种技术与管理因素的共同作用,此外港口的产出水平、

区位条件、产业及政策等因素也会对碳排放产生明显的作用^[45]。

基础设施类相关规划指标包括道路网密度、交通服务覆盖率、绿色交通出行比例、工作日平均通勤时间等类型。通过上述指标的引导与约束,基础设施用地的利用效率与碳排放会得到有效的改善。特别是对于城镇区域而言,公路等基础设施用地碳排放的降低有利于从整体性减少其碳排放。此外,国土空间规划方案中关于独立选址的重大基础设施用地规划对于区域碳排放格局也有重要影响,尤其是公路等交通用地的建设会增加碳排放的规模。但是通过实施新能源交通工具的鼓励性使用政策,则会有效降低碳排放的强度。

2.7 海洋空间规划的碳效应机理

海洋是世界上最大的活跃碳库^[46],目前已知的海洋储碳机制主要包括物理溶解碳泵、生物碳泵、微生物碳泵和海洋碳酸盐泵^[47]。溶解碳泵主要因大尺度海洋环流导致对大气中CO₂吸收后最终形成的碳封存,溶解碳泵人为调控的难度非常大;生物碳泵指海洋中浮游植物将无机碳转化为有机碳并由部分通过沉降等过程输送至深海;微生物碳泵指微型生物的生理生态过程中把有机碳转化为不易被降解的惰性溶解有机碳的储碳机制;碳酸盐泵指海底沉积物中存在大量的碳酸盐在溶解过程中会从大气吸收CO₂,从而可在长时间尺度上实现对碳的储存。

海洋国土空间规划的碳效应一般包括海洋国土空间转换(如填海造地、造岛)和保持的碳效应影响。海洋国土空间形态转换碳效应与转换的类型相关,保持的碳效应包括利用方式(如海洋渔业和运输)和强度变化的碳效应,对于人类活动难以改变的碳效应机制通常不予考察。海洋国土空间碳效应可重点从海洋渔业及海洋运输业进行考察,渔业固碳可以通过碳综合系数法,综合海水养殖干湿重转换系数、贝壳和软组织碳含量等参数测算^[48];海洋运输业主要产生能源消耗碳排放,可采用碳排

放系数法进行测算。

3 国土空间规划碳效应的评估范式与流程

社会科学研究中的实证主义范式主要包括客观现象的分析描述、现象变化的驱动机制与影响分析、多情景分析与模拟预测,以及对策建议的提出等4个主要流程框架。实证主义范式强调科学严谨性,依赖于可观察、可测量的数据,通过发现普遍规律和因果关系,为社会现象提供广泛的解释,并期望能够预测社会行为和现象的未来趋势,进而提出相应的决策建议路径。国土空间规划碳效应与减碳路径涉及人地活动行为规范的提出,属于社会科学研究范畴。基于该思路及国土空间规划碳效应的基本内涵,国土空间规划碳效应评估基本范式和流程主要包括:国土空间规划碳效应的自然与经济社会影响指标体系分析构建、国土空间变化的多情景设定、影响因素指标值与国土空间利用多情景估算预测、国土空间碳效应多情景评估模拟,以及减碳增汇路径提出等方面(见图1)。

3.1 国土空间规划碳效应的自然与经济社会影响指标体系分析构建

系统分析各类自然与经济社会因素影响下,因国土空间规划方案实施导致国土空间利用模式以及人类活动的变化,进而引起的碳效应,是构建相应影响因素指标体系的基础。影响因素指标的选取需遵循主导性、代表性、区域适用性与数据的可获得性原则。

自然因素主要包括地形地势、工程地质与植被水体等生态环境要素。其中地形地势因素通常以高程与坡度两类指标表征;工程地质因素表现为地质灾害风险对国土空间利用的影响,通常以距地质灾害的距离或地质灾害风险等级表征;生态环境要素重点从生态系统服务功能考虑,一般考虑植被与生态水体因素,通常以归一化植被指数和水体指数加以表征。

经济社会因素主要包括人口、经济、产

业结构、科技水平与制度政策等因素。其中人口包括人口总量和人口结构因素,通常以人口数量和城市化率两类指标表征;经济包括总量与增长因素,通常以地区生产总值及其增长率两类指标表征;产业结构因素通常以二三产业比重表征;科技水平难以进行量化,一般以科技投入或专利授权数量等指标表征;制度政策因素也通常以间接指标表征,如生态保护红线与基本农田保护比重等指标。

3.2 国土空间变化的多情景设定

情景分析法是一种对事物未来发展方向或方案进行模拟评估的方法,其分析过程具有科学性、分析结果具有可能性特征^[49-50]。国土空间规划碳效应评估需基于对非规划规划下的国土空间利用变化碳效应评估对照开展,还需考虑到我国当前实施的“双碳”战略目标背景,多情景设定时应充分考虑这两个前提,预测不同发展背景约束下的碳效应。因此设定以下3种情景4类方案:(1)自然发展情景应根据评估区域的惯性发展趋势与当前政策约束,假定在没有国土空间规划方案约束时,国土空间利用变化的碳效应。(2)规划方案实施情景在自然发展情景的基础上,假定叠加规划方案实施可能引起的碳效应,该方案重点通过规划方案中的相关指标约束实现。(3)“碳中和”情景共分两种方案。一

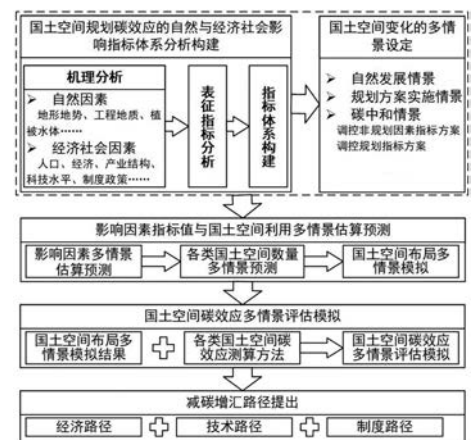


图1 国土空间规划碳效应评估范式与流程示意图
Fig.1 Schematic diagram of carbon effect assessment paradigm and process in territorial spatial planning

资料来源:笔者自绘。

是在自然发展情景的基础上,叠加“碳中和”目标可能引起的碳效应,该方案对涉及的规划指标依据历史惯性进行设置;二是在规划方案实施情景下,再叠加“碳中和”目标可能引起的碳效应。通过自然发展情景与规划情景的对照,即可实现规划方案实施碳效应的定量评估与预测;而“碳中和”情景模拟结果则为减碳增汇目标的提出提供了更加精确和有针对性的路径建议。

3.3 影响因素指标值与国土空间利用多情景估算预测

主要分两个部分,其中影响因素指标值估算预测以各具体指标的多因素影响分析及其评估预测模型构建为基础,利用相关历史数据进行多情景估算预测,评估预测模型可以采用趋势分析法、回归分析法,以及基于深度学习的人工智能算法构建。

国土空间利用多情景估算预测以基于各影响因素指标构建的国土空间利用评估预测模型为基础开展。具体过程依据研究区研究尺度及其国土空间规划碳效应评估目标确定,对于大尺度研究(如国家或省域)且以总量评估为目标的研究,只需完成各类国土空间利用的数量结构即可,其所采用的方法多为基于数理统计的回归分析方法或人工智能算法。若研究区尺度较小(如市县乃至乡镇)且需完成基于空间分异的评估目标,则还需在数量结构预测的基础上,实现对国土空间格局的多情景模拟。这可以采用PLUS、FLUS、CLUMondo及多智能体等土地利用模拟模型实现。

3.4 国土空间碳效应多情景评估模拟

该部分的关键在于构建不同类型的国土空间碳排放/吸收效应测算模型。为了尽可能地提高评估精度和更好地适应研究区实际情况:对于耕地(包括旱地、水浇地与水田等类型)重点考虑化肥、农药、农膜、农业机械使用与灌溉过程中的碳排放效应,以及作物生长中的碳排放/吸收效应;对于城镇空间(包括城

镇范围内的各类居住、商业、工矿、基础设施,以及绿地与水体等类型),大尺度研究重点从不同产业与人类活动消耗的能源碳排放,以及城镇内部的建筑、水体与绿地的碳吸收两个角度考虑,小尺度研究可以在完成城镇空间进一步细分(如居住、商业、工业、工商居住混合、交通、绿地与水体空间)的基础上,通过构建不同细分类型的碳效应测算模型实现;植被绿地空间(包括园地、林地与草地等类型)可基于植被类型的空间分布及其碳汇系数进行测算;海洋空间主要考虑海洋交通运输碳排放及贝类与藻类养殖碳汇;水体空间(包括河流、湖泊、坑塘等)因缺乏基于区域分异的碳排放系数数据,可以直接基于水体面积和以往研究成果中确定的碳排放系数进行测算。依据前述思路,可以构建不同类型的国土空间利用碳效应测算方法,随后根据多情景下的相关指标参数调整结果,利用“国土空间利用多情景模拟结果”实现对研究区国土空间碳效应多情景评估模拟。

3.5 减碳增汇路径提出

依据多情景下的相关指标参数调整结果及相应情景下的国土空间碳效应评估模拟结果,即可提出“碳中和”情景下两种方案的减碳增汇路径,以此实现研究区“碳中和”目标。其中,“碳中和”情景下调控非规划指标方案立足于国土空间规划方案的约束,依据调控的其他相关参数指标直接提出相应的调控路径建议;“碳中和”情景下调控规划指标方案则将规划方案的调整纳入调控路径,据此提出基于规划方案具体指标调整的“碳中和”目标实现路径建议。

基于上述评估范式与流程,我们应用系统动力学模型与情景分析方法,构建了国土空间规划碳效应评估的系统动力学模型;随后以江苏为实证区域,依据1990—2020年历史数据,实现了研究区2021—2060年包括国土空间规划方案实施在内的多种情景碳效应模拟预测,并提出了相应的碳中和目标实现路径^[51]。

4 结语

有别于以往的土地、城乡及各类专项规划的分割编制管理,国土空间规划强调区域自然资源的整体性与协调性开发保护。本文基于我国现行国土空间规划相关指南规程,在分析总结国土空间开发利用与保护活动内涵并明确国土空间规划碳效应基本概念的基础上,系统研究了国土空间规划的碳效应机理,随后提出具有普适性的国土空间规划碳效应评估基本范式和评价流程。

在面向具体区域的实证应用时,可依据区域自然与经济社会特征以及数据的可获得性有机地嵌入相关影响指标,建立具有针对性的具体应用模型,从而实现基于国土空间规划方案实施情景等的多情景碳效应评估。此外,还可通过对相关具体参数的调整,实现不同目标下的碳减排路径发现与低碳国土空间规划方案修编,从而助力我国“双碳”战略目标的实现。

需要指出,评估模型中各变量之间的关系应具有通过验证的、明确的数量关系。这样最终的模型模拟结果方具有较高的信度。此外,因国土空间规划方案实施碳效应数量难以通过具体实测获得,为了对模型的精度进行评估,可通过采用多种方法(如排放因子法、部门测算法等)交叉验证的模式进行。

参考文献 References

- [1] 严金明,张东昇,迪力沙提·亚库甫.国土空间规划的现代法治:良法与善治[J].中国土地科学,2020,34(4):1-9.
YAN Jinming, ZHANG Dongsheng, DILISHATI Yakufu. Modern rule of law in territorial spatial planning: good law and benevolent governance[J]. China Land Science, 2020, 34(4): 1-9.
- [2] 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.
ZHANG He, WANG Rui, YU Dingyi, et al. Methods of low-carbon territorial spatial planning for county-level jurisdictions based on differentiated CO₂ emission control[J]. Urban Planning Forum, 2021(5): 58-65.
- [3] 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.
LIN Jian, ZHAO Ye. Optimization of territorial spatial pattern and planning response: based on carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(6): 12-19.
- [4] 黄贤金, 朱安录, 赵荣钦, 等. 碳达峰、碳中和与国土空间规划实现机制[J]. 现代城市研究, 2022 (1): 1-5.
HUANG Xianjin, ZHANG Anlu, ZHAO Rongqin, et al. Carbon emission peak, carbon neutrality and territorial spatial planning implementation mechanism[J]. Modern Urban Research, 2022(1): 1-5.
- [5] 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.
WANG Wei, ZOU Wei, ZHANG Guobiao, et al. Urban agglomerations territory spatial planning path and governance mechanism under the "Dual Carbon" goals[J]. Environmental Protection, 2022, 50(s1): 64-69.
- [6] 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.
CUI Jinli, ZHU Debao. Territorial spatial policies under carbon emission peak and carbon neutrality visions: key logic and realization path[J]. Planners, 2022, 38(1): 5-11.
- [7] 李禅, 肖百霞. 国土空间规划中广东省“碳达峰、碳中和”目标的传导路径研究[J]. 规划师, 2022, 38 (7): 66-71.
LI Shan, XIAO Baixia. The transmission path of "Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality" goal in territorial space planning, Guangdong[J]. Planners, 2022, 38(7): 66-71.
- [8] 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.
SHI Xiaodong, ZHAO Dan, CAO Qiwen. The response path of territorial spatial planning under the "Dual Carbon" goals[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(6): 20-29.
- [9] 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 Ziyang, 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.
- [10] 鲍海君, 张瑶瑶, 吴绍华. 低碳国土空间规划: 机理、方法与路径[J]. 中国土地科学, 2022, 36 (6): 1-10.
BAO Haijun, ZHANG Yaoyao, WU Shaohua. Low-carbon territorial space planning: mechanism, approach and path[J]. China Land Science, 2022, 36(6): 1-10.
- [11] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31 (18): 5207-5216.
ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5207-5216.
- [12] DAVIDSON E A, ACKERMAN I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils[J]. Biogeochemistry, 1993, 20(3): 161-193.
- [13] MUHAMMAD I, SAINJU U M, ZHAO F Z, et al. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: a meta-analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 192: 103-112.
- [14] REHMAN A, MA H, OZTURK I. Decoupling the climatic and carbon dioxide emission influence to maize crop production in Pakistan[J]. Air Quality Atmosphere and Health, 2020, 13(6): 695-707.
- [15] GALINATO G I, GALINATO S P. The effects of government spending on deforestation due to agricultural land expansion and CO₂ related emissions[J]. Ecological Economics, 2016, 122: 43-53.
- [16] 陈高起, 傅瓦利, 沈艳, 等. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (3): 123-129.
CHEN Gaoqi, FU Wali, SHEN Yan, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and its fractions in Karst Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 123-129.
- [17] 李奇超, 李新举. 不同利用方式下复垦土壤的有机碳组分空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (2): 204-209.
LI Qichao, LI Xinju. The spatial distribution of organic carbon components in reclaimed soil under different utilization modes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 204-209.
- [18] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. 生态学报, 2022 (23): 1-16.
HOU Ruiping, XIA Chaozong, CHEN Jian, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022(23): 1-16.
- [19] ERB K, KASTNER T, PLUTZAR C, et al. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass[J]. Nature, 2018, 553: 7686.
- [20] WATSON J E M, EVANS T D, VENTER O, et al. Manage forests as protection against warming[J]. Nature, 2019, 567: 7748.
- [21] LUYSSAERT S, MARIE G, VALADE A, et al. Trade-offs in using European forests to meet climate objectives[J]. Nature, 2018, 562: 7726.
- [22] 张钊. 呼伦贝尔草甸草原生态系统碳循环动态模拟与未来情景分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
ZHANG Zhao. Simulation on Hulunber Meadow Steppe ecosystem carbon cycle dynamic and future climate scenario analysis[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [23] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42 (3): 1-12.
DENG Zhe, DING Wenguang, PU Xiaoting, et al. Spatial-temporal distribution of carbon storage in Qilian Mountain National Park based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 1-12.
- [24] 张超, 闫瑞瑞, 梁庆伟, 等. 不同利用方式下草地土壤理化性质及碳、氮固持研究[J]. 草业学报, 2021, 30 (4): 90-98.
ZHANG Chao, YAN Ruirui, LIANG Qingwei, et al. Study on soil physical and chemical properties and carbon and nitrogen sequestration of grassland under different utilization modes[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(4): 90-98.
- [25] 于钊, 李奇铮, 王培源, 等. 退化和恢复过程驱动的荒漠草地生态系统有机碳密度变化[J]. 中国沙漠, 2022, 42 (2): 215-222.
YU Zhao, LI Qizheng, WANG Peiyuan, et al. Changes of organic carbon density in desert steppe ecosystem driven by degradation and restoration[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 215-222.
- [26] LI B B, FANG X Q, YE Y, et al. Carbon emissions induced by cropland expansion in Northeast China during the past 300 years[J]. Science China-Earth Sciences, 2014, 57(9): 2259-2268.
- [27] SMITH P, BHOGAL A, EDGINGTON P, et al. Consequences of feasible future agricultural land-use change on soil organic carbon stocks and greenhouse gas emissions in Great Britain[J]. Soil Use and Management, 2010, 26(4): 381-398.
- [28] LIMPET K E, CARNELL P E, TREVATHAN-TACKETT S M, et al. Reducing emissions from degraded floodplain wetlands[J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8: 8.
- [29] 钱玺亦, 毛思诺, 蒋雨洁, 等. 基于文献计量学的中国湿地碳循环研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13 (2): 742-752.
QIAN Xiyi, MAO Sichen, JIANG Yujie, et al. Research progress of wetland carbon cycle in China based on bibliometrics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 742-752.

- [30] BONETTI G, LIMPET K E, BRODERSEN K E, et al. The combined effect of short-term hydrological and N-fertilization manipulation of wetlands on CO₂, CH₄, and N₂O emissions[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 294: 118637.
- [31] 张全军, 张广帅, 于秀波, 等. 鄱阳湖湿地枯丰水期转换对灰化藁草 (*Carex cinerascens* Kükenth) 枯落物分解及碳、氮、磷释放的影响[J]. *湖泊科学*, 2021, 33 (5): 1508-1519.
- ZHANG Quanjun, ZHANG Guangshuai, YU Xiubo, et al. The impact of dry and flood seasons shifts on *Carex cinerascens* Kükenth litter decomposition and the release of C, N, P in Lake Poyang wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1508-1519.
- [32] PHYOE W W, WANG F. A review of carbon sink or source effect on artificial reservoirs[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(4): 2161-2174.
- [33] MARCE R, OBRADOR B, GOMEZ-GENER L, et al. Emissions from dry inland waters are a blind spot in the global carbon cycle[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 188: 240-248.
- [34] PILLA R M, GRIFFITHS N A, GU L H, et al. Anthropogenically driven climate and landscape change effects on inland water carbon dynamics: what have we learned and where are we going?[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(19): 5601-5629.
- [35] 段巍岩, 黄昌. 河流湖泊碳循环研究进展[J]. *中国环境科学*, 2021, 41 (8): 3792-3807.
- DUAN Weiyan, HUANG Chang. Research progress on the carbon cycle of rivers and lakes[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3792-3807.
- [36] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 等. 胡焕庸线两侧城镇建设用地变化及其碳排放差异[J]. *资源科学*, 2019, 41 (7): 1262-1273.
- ZHANG Mei, HUANG Xianjin, CHUAI Xiaowei, et al. Urban construction lands and their carbon emission differences east and west of the Hu Huanyong Line[J]. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1262-1273.
- [37] DEWA D D, BUCHORI I. Impacts of rapid urbanization on spatial dynamics of land use-based carbon emission and surface temperature changes in the Semarang Metropolitan Region, Indonesia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(2): 259.
- [38] 袁凯华, 甘世林, 杨慧琳, 等. 建设用地扩张与碳排放增长的EKC验证及特征分解研究——以武汉市为例[J]. *中国土地科学*, 2019, 33 (1): 56-64.
- YUAN Kaihua, GAN Chenlin, YANG Huilin, et al. Validation of the EKC and characteristics decomposition between construction land expansion and carbon emission: a case study of Wuhan City[J]. *China Land Science*, 2019, 33(1): 56-64.
- [39] 李绥, 石铁矛, 王梓通, 等. 基于建筑容量的城市建设用地碳汇量核算方法[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (3): 986-994.
- LI Sui, SHI Tiema, WANG Zitong, et al. Carbon sink calculation model of urban construction land based on building capacity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 986-994.
- [40] HE Z, XU S, SHEN W, et al. Impact of urbanization on energy related CO₂ emission at different development levels: regional difference in China based on panel estimation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 1719-1730.
- [41] 刘芳, 吕宁. 建设用地碳排放驱动因子及脱钩效应贡献分析——以安徽省为例[J]. *生态经济*, 2022, 38 (6): 35-40.
- LIU Fang, LYU Ning. Analysis on driving factors of carbon emission from construction land and its contribution to decoupling effect: evidence from Anhui Province[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(6): 35-40.
- [42] 任南琪, 许志成, 鲁垠涛, 等. 铁路运营期碳排放特征及减排路径思考[J]. *铁道标准设计*, 2022, 66 (7): 1-6.
- REN Nanqi, XU Zhicheng, LU Yintao, et al. Thinking on carbon emission characteristics and emission reduction path in railway operation period[J]. *Railway Standard Design*, 2022, 66(7): 1-6.
- [43] 邓红梅. 港口碳排放现状及减排措施分析[J]. *中国水运*, 2021 (12): 98-100.
- DENG Hongmei. The current situation of carbon emissions in ports and analysis of decarbonization measures[J]. *China Water Transport*, 2021(12): 98-100.
- [44] 郭瑾, 匡海波, 余方平. 能源消费视角下的港口碳足迹测算和驱动因素研究[J]. *管理评论*, 2020, 32 (8): 40-51.
- GUO Jin, KUANG Haibo, YU Fangping. Study on port carbon footprint measurement and drive factors from the perspective of energy consumption[J]. *Management Review*, 2020, 32(8): 40-51.
- [45] 郭瑾, 匡海波, 余方平. 基于Gamma的低碳港口形成机理研究——以日照港为例[J]. *科研管理*, 2020, 41 (5): 240-249.
- GUO Jin, KUANG Haibo, YU Fangping. A research on the port low carbon evolution mechanism based on Gamma Function: a case study of Rizhao Port[J]. *Science Research Management*, 2020, 41(5): 240-249.
- [46] 曹云梦, 吴婧. “双碳”目标下我国海洋碳汇交易的发展机制研究[J]. *中国环境管理*, 2022, 14 (4): 44-51.
- CAO Yunmeng, WU Jing. Research on the development mechanism of China's ocean carbon sink trading under the "dual-carbon" goal[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2022, 14(4): 44-51.
- [47] 焦念志, 戴民汉, 翦知湓, 等. 海洋储碳机制及相关生物地球化学过程研究策略[J]. *科学通报*, 2022, 67 (15): 1600-1606.
- JIAO Nianzhi, DAI Minhan, JIAN Zhimin, et al. Research strategies for ocean carbon storage mechanisms and effects[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1600-1606.
- [48] 杨林, 郝新亚, 沈春蕾, 等. 碳中和目标下中国海洋渔业碳汇能力与潜力评估[J]. *资源科学*, 2022, 44 (4): 716-729.
- YANG Lin, HAO Xinya, SHEN Chunlei, et al. Assessment of carbon sink capacity and potential of marine fisheries in China under the carbon neutrality target[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 716-729.
- [49] 贡金涛, 周鹏. 战争游戏法、情景分析法和博弈论的比较分析[J]. *情报探索*, 2011 (11): 26-28.
- GONG Jintao, ZHOU Peng. Comparative analysis of war gaming method, scenario analysis method, and game theory[J]. *Information Research*, 2011(11): 26-28.
- [50] 曾忠祿, 张冬梅. 不确定环境下解读未来的方法: 情景分析法[J]. *情报杂志*, 2005 (5): 14-16.
- ZENG Zhonglu, ZHANG Dongmei. Method for interpreting the future in uncertain environments: scenario analysis method[J]. *Journal of Intelligence*, 2005(5): 14-16.
- [51] 陈龙高, 王欣瑶, 吉莉, 等. 基于系统动力学的国土空间规划碳效应评估——以江苏省为例[J]. *资源科学*, 2024, 46 (11): 2225-2236.
- CHEN Longgao, WANG Xinyao, JI Li, et al. Carbon effect assessment of territorial spatial planning based on system dynamics: taking Jiangsu Province as an example[J]. *Resources Science*, 2024, 46(11): 2225-2236.