

引用格式: 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 L G, Wang X Y, Ji L, 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.] DOI: 10.18402/resci.2024.11.10

# 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

陈龙高<sup>1,2</sup>, 王欣瑶<sup>1,2</sup>, 吉莉<sup>1,2</sup>, 吴海倩<sup>1,2</sup>, 林莹<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学公共管理学院, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学中国资源型  
城市转型发展与乡村振兴研究中心, 徐州 221116)

**摘要:**【目的】基于国土空间规划碳效应机理构建相应的评估模型, 进而预测国土空间规划方案实施下的碳效应, 从而为“双碳”目标实现路径的提出提供参与支撑。【方法】基于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, 并以江苏省为实证区域, 基于1990—2020年历史数据, 实现了研究区2020—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, 随后提出了相应的碳中和目标实现路径。【结果】①1990—2020年, 国土空间净碳排放从3257万t增加至35772万t, 呈“先减后增, 但整体增加”变化趋势; ②自然发展与国土空间规划方案实施两种情景下, 国土空间净碳排放量2020—2060年均呈下降趋势, 但直至2060年仍为正值, 均未实现碳中和目标; 碳中和情景下基于非规划指标调控与规划指标调控的两种方案下, 江苏省则可提前实现碳中和目标, 但调控非规划指标方案的可操作性更强; ③分类国土空间净碳排放中, 城镇空间中的工业碳排放贡献比重最大、农业空间则是国土空间的主要碳汇。【结论】国土空间规划对于“双碳”目标的实现具有重要支撑作用, 江苏省若要按期实现碳中和目标, 可通过调整部分国土空间规划指标, 或制定相应的保障措施以调控非规划指标因子实现。

**关键词:** 国土空间规划; 碳效应评估; 系统动力学; 碳中和目标; 江苏省

DOI: 10.18402/resci.2024.11.10

## 1 引言

经济社会快速发展导致自然资源的过度利用并排放出大量温室气体, 加剧了气候变暖趋势并引发一系列生态环境问题<sup>[1,2]</sup>。中国已在2009年成为世界第一大碳排放国, 2023年碳排放总量占全球比重约35%(据国际能源署(IEA)《2023年碳排放报告》), 故“双碳”目标的提出对于我国实现“五位一体”总体布局和绿色发展具有重要意义。土地既是重要的碳源, 也是重要的碳汇, 如研究发现2011—2020年全球土地利用转变导致的碳排放占全球碳排放的14%<sup>[3]</sup>, 林地、草地与湿地滩涂等则可以有效的吸收并固定二氧化碳等温室气体。国土空间规

划作为各类国土空间开发保护与建设活动的基本依据<sup>[1]</sup>, 对土地利用的减碳增汇具有关键性指导作用。2021年《中共中央 国务院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》中提出要将碳达峰、碳中和目标要求全面融入经济社会发展中长期规划, 并强化国土空间规划等的支撑保障, 这进一步推动了全社会向低碳经济和生态文明转型。

中国国土空间规划体系建立时间尚短, 国土空间规划碳效应相关研究也相应起步较晚, 相关成果多为基础理论或策略思路的初步探讨, 如有学者指出要将碳治理目标嵌入到国土空间规划中, 据此构

收稿日期: 2023-11-20; 修订日期: 2024-02-21

基金项目: 江苏省社会科学基金项目(22GLB028); 国家自然科学基金项目(72474214); 中国矿业大学校基本科研业务费项目-重大项目培育专项基金(2022ZDPYSK08)。

作者简介: 陈龙高, 男, 安徽宿州人, 博士, 教授, 研究方向为城乡土地利用与规划。E-mail: chenlonggao@cumt.edu.cn

建面向碳中和的国土空间格局体系<sup>[4]</sup>;也有学者提出要将“双碳”目标纳入国土空间规划路径与治理机制的设想<sup>[5]</sup>。在国土空间规划碳效应评估方法与应用方面,有个别研究构建了市级国土空间总体规划碳评估框架并开展了实证应用,但未能基于系统论的角度刻画“人类活动-国土空间利用-碳排放”之间的作用机理机制,对于包括耕地在内的多种国土空间利用碳效应考虑并不充分,框架方法的可移植性不足。虽然该领域研究不足,但碳排放测算<sup>[6]</sup>、土地利用碳效应与减排路径<sup>[7]</sup>等相关成果较为丰富,为该领域研究奠定了坚实的方法基础。如包括排放系数法与生命周期法等<sup>[8]</sup>均被证明是有效的测算方法;STIRPAT模型<sup>[9]</sup>、LEAP模型<sup>[10]</sup>与统计分析方法等则有助于揭示碳排放的影响机制机理;系统动力学<sup>[11]</sup>模型可实现顾及多种因素的碳排放系统模拟仿真,并有助于发现相应的减排路径。

省级治理是连接中央与地方治理的关键环节,省级“双碳”目标的实现对于落实全国“双碳”战略目标具有重要作用。江苏省作为中国东部沿海发达省份,具有典型的人口密度大、经济社会发展速度快但自然资源紧缺等特点,这使得江苏省能源消耗及温室气体排放强度远大于全国大多数省份。开展江苏省国土空间规划碳效应评估研究具有重要意义和价值。本文首先构建了基于系统动力学的国土空间规划碳效应评估模型;随后以江苏省为实证区域,基于1990—2020年历史数据,对构建的评估模型参数进行调整与校正,并据此对2020—2060年包括国土空间规划方案实施在内的多种情景下国土空间碳排放进行了模拟预测,以期为研究区“双碳”目标实现路径的提出提供参考,也为其他省份开展此类工作提供借鉴。

## 2 机理分析与模型构建

### 2.1 机理分析

国土空间规划对土地及其他自然资源的利用数量、结构与强度等具有约束与引导作用,并在自然与经济社会因素的共同作用下影响碳排放/吸收。从不同类型国土空间利用对碳排放的影响来看:①耕地碳排放/吸收与细分耕地的类型(如水田与其他类型耕地)、土壤类型、各类生产资料的投入、种植作物的种类及其生长等因素密切相关<sup>[12]</sup>;各类农物资使用投入与灌溉会直接产生CO<sub>2</sub>排放,或通过

改变土壤性质与作物生长间接影响碳排放<sup>[3]</sup>;土壤有机碳含量基本稳定,秸秆还田对耕地碳的影响实际上最终以农作物吸收等形式流动,因此实际测算时可以忽略;②园地、林地与草地中,土壤、植被类型与生长状况,气候等均会影响碳排放/吸收;此外,该类土地上的不合理砍伐、放牧等行为或管理措施对植被覆盖及其碳吸收会产生重要影响<sup>[13]</sup>;③建设用地中非农生产活动及其能源消耗是碳排放增多的主要原因<sup>[2]</sup>,故能源结构调整与科技进步对碳减排具有重要作用<sup>[14]</sup>;人口增加使得各类生活消费增加,进而增加碳排放,但人口集聚效应有助于抑制人均碳排放强度<sup>[15]</sup>;建筑中建材生产、施工以及建筑运行过程中均会产生碳排放<sup>[16]</sup>,并受到建筑结构与运行效率等因素影响;建设用地中的林草植被与湿地水体等非硬化区域,会呈现与林草地或湿地相似的碳效应<sup>[17]</sup>;④畜禽养殖主要使用设施农用地,其养殖及管理过程会产生CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O<sup>[18]</sup>;湿地与水域中的水生植物光合作用、有机碳沉积以及土壤侵蚀等过程均会对碳排放/吸收产生影响<sup>[19]</sup>;⑤海洋空间碳排放主要包括海洋运输、渔业及其他生物生长代谢等产生的碳排放/吸收效应;海洋运输碳排放与运输强度和能源消耗密切相关,海洋渔业养殖中的生物生长钙化与呼吸作用具有固碳效应<sup>[20]</sup>。

国土空间规划主要通过以下指标实现对国土空间利用的约束与引导:耕地/基本农田保护指标会影响未来的耕地/基本农田数量结构与空间布局;湿地保有量以及生态保护红线区域限制了对生态用地的超量侵占;城乡建设用地利用规模、强度与空间布局的限制引导有助于防止建设用地的无序扩张;道路网密度、交通服务覆盖率、绿色交通出行比例等会对交通等基础设施用地的利用效率与能源消耗产生影响;用水总量、每万元GDP水耗以及地下水水位等指标会对区域人口与产业等经济社会因素产生影响;新能源和可再生能源比例等指标则会导致化石能源利用规模变化。国土空间规划的约束与引导作用会引起国土空间利用的变化,进而最终影响国土空间的碳排放/吸收效应。

### 2.2 模型构建

#### 2.2.1 相关指标参数确定

##### (1)碳排放相关系数确定

碳排放相关系数涉及城镇、农业、生态与海洋

2024年11月

空间四大类型:①因城镇空间中工业、商业与生活居住等细分空间类型较难区分,故本文从人类活动与产业类型视角构建了城镇空间净碳排放测算模型;②农业空间碳排放重点考虑农村居民生活、人口呼吸、耕地与设施农用地碳排放,以及耕地、园地、水体与绿地的碳吸收效应。其中耕地净碳排放包括各类农用物资投入、灌溉以及作物生长的碳效应;设施农用地主要考虑畜禽养殖过程中的碳排放;③生态空间主要考虑林地、草地、生态水体与湿地4种类型的碳汇效应;④海洋空间主要考虑海洋交通运输碳排放以及贝类与藻类碳汇两类。上述各类用地及人类活动等碳排放相关系数取值及依据见表1。

### (2)指标值估算确定

国土空间规划指标值以及模型中其他经济社会指标值主要采用简单趋势外推法、多元线性回归与人口指数增长法等进行估算。其中多元线性回归公式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $Y$ 为因变量(本文中为构建的系统动力学模型中相关指标); $X_1, X_2, \cdots, X_p$ 为自变量(为构建的模型

中相应指标的影响因素指标); $\beta_0$ 为常数项; $\beta_1, \cdots, \beta_p$ 为回归系数; $\varepsilon$ 是误差项。若自变量仅有一个时间序列,则公式(1)为简单趋势外推法公式。对于2020(规划基期年)至2060年期间未设定的年份规划指标值,利用线性插值法或简单趋势外推法估算。

此外,本文采用马尔萨斯人口指数增长模型测算研究区总人口:

$$X(t) = X_0 e^{rt} (r > 0) \quad (2)$$

式中: $X_0$ 为初始年份的常住人口数; $r$ 为人口增长率,该数值根据常住人口历史变化趋势并结合经济、社会与人口流动等因素综合确定; $t$ 为评估时点。

### 2.2.2 模型构建与系统参数确定

系统动力学以系统反馈控制为理论基础,能够深入研究和解决复杂系统中的相互作用和反馈机制。通过仿真模拟复杂现实系统在时间维度上的动态行为<sup>[31]</sup>,可以预测系统的长期行为和效应,据此为决策者提供科学的指导与决策支持。

#### (1)建模步骤与系统参数确定

江苏省国土空间规划碳效应评估模型具体建模步骤如图1所示。

表1 国土空间规划碳效应碳排放相关系数确定及依据表

Table 1 Emission and other related coefficients in the Territorial Spatial Planning (TSP) carbon emission assessment

国土空间类型	碳排放系数/参数	系数/参数值	文献来源	国土空间类型	碳排放系数/参数	系数/参数值	文献来源	国土空间类型	碳排放系数/参数	系数/参数值	文献来源
城镇空间	原煤	0.7559/(tC/t)	IPCC	出租车	1.169/(t/万 km)			绵羊	231.65/(kgC/头)		
	其他洗煤	0.2155/(tC/t)		私人小型汽车	1.402/(t/万 km)			小麦碳吸收率	-0.4835		[28]
	焦炭	0.855/(tC/t)		人口呼吸	0.079/(tC/人)	[23]		水稻碳吸收率	-0.4144		
	煤气	0.3548/(tC/t)		木材	-842.8/(kg/m <sup>3</sup> )	[21]		薯类碳吸收率	-0.422		
	原油	0.5857/(tC/t)		水体	-0.0257/(t/hm <sup>2</sup> )	[24]		玉米碳吸收率	-0.4709		
	汽油	0.5538/(tC/t)		绿地	-1.660/(t/hm <sup>2</sup> )	[25]		大豆碳吸收率	-0.45		
	煤油	0.5714/(tC/t)		农业化肥	0.8956/(kgC/kg)	[26]		棉花碳吸收率	-0.45		
	柴油	0.5921/(tC/t)		空间农药	4.9341/(kgC/kg)			花生碳吸收率	-0.45		
	燃料油	0.6185/(tC/t)		农膜	5.18/(kgC/kg)			油菜籽碳吸收率	-0.45		
	液化石油气	0.5042/(tC/t)		农用柴油	0.5927/(tC/t)			蔬菜碳吸收率	-0.45		
	天然气	0.4483/(tC/t)		农业翻耕	312.6/(kg/km <sup>2</sup> )			园地	-0.21/(tC/hm <sup>2</sup> )	IPCC	
	热力	0.26/(tC/t)		农业灌溉	23.72/(kg/hm <sup>2</sup> )			生态林地	-0.644/(tC/hm <sup>2</sup> )	[29]	
	电力	2.5255/(tC/t)		非奶牛	1844.25/(kgC/头)	[27]		空间草地	-0.021/(tC/hm <sup>2</sup> )		
	钢材	1.789/(kgC/kg)	[21]	奶牛	2617.00/(kgC/头)			生态湿地	-0.41/(tC/hm <sup>2</sup> )	[30]	
	水泥	0.822/(kgC/kg)		马	918.27/(kgC/头)			海洋贝壳碳汇折算系数	0.8	[20]	
	平板玻璃	0.966/(kgC/kg)		驴	673.55/(kgC/头)			空间POC碳汇折算系数	1		
	铝材	2.6/(kgC/kg)		骡子	673.55/(kgC/头)			生物体释放POC转化为碳汇比率	1		
	公共汽电车	0.198/(t/万 km)	[22]	猪	266.45/(kgC/头)			生物体释放的DOC	1		
	轨道交通	0.075/(t/万 km)		山羊	232.21/(kgC/头)			转化为碳汇比率			



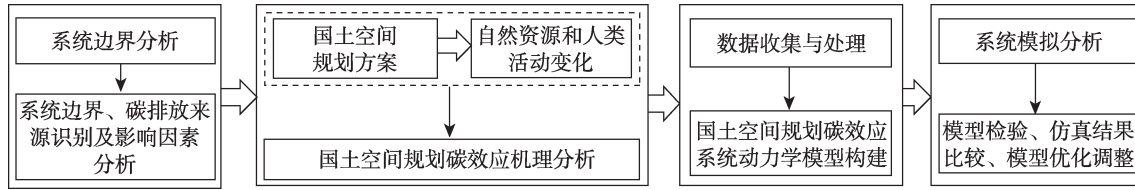


图1 江苏省国土空间规划碳效应系统动力学模型构建步骤

Figure 1 Steps of constructing a system dynamics model of carbon effect in the territorial spatial planning of Jiangsu Province

模型的系统空间边界为全省范围,时间边界为2020—2060年,基期时间为1990年,历史数据年份为1990—2020年,时间步长设置为1年。系统内容包括国土空间规划实施过程中影响碳排放/吸收的因素。首先根据历史数据以及规划指标要求,采用表函数与回归分析等方法设置模型参数,然后基于Vensim平台模拟不同情景下国土空间碳效应动态变化。

现有的国土空间碳效应相关研究多基于统计回归等机器学习算法<sup>[32]</sup>或深度学习方方法<sup>[33]</sup>,或者基于土地利用情景模拟模型进行预测<sup>[34]</sup>。上述方法多依据统计数据揭示被解释变量与解释变量之间的数理关系,对于变量间的作用机理缺乏认知。系统动力学仿真模型基于系统内部各参数间相互作用机制机理进行构建,理论基础明晰,运行机制明确且更容易理解;该方法还可以深入揭示每一参数变化对国土空间利用碳效应的贡献,从而为提出针对性的减排路径提供更加科学和实操性的仿真环境,特别适用于复杂系统的模拟预测与决策支持。

(2)江苏省国土空间规划碳效应系统动力学评估模型

图2为江苏省国土空间规划碳效应系统动力学存量流量简图:模型通过数学方程将各个子系统以及子系统内部因素有机结合,从而将研究对象置于系统之中,研究结果准确度更高。由于总系统共涉及200余个指标(其中前缀名TSP+指标名称的为国土空间规划方案中提出的相关指标),故按城镇空间、农业空间、海洋空间、生态空间4个子系统分别说明。国土空间净碳排放量即为城镇、农业、生态与海洋4类国土空间净碳排放量的总和。

其中:城镇空间子系统模型共约100个变量,包括2个水平变量(总人口和城镇空间净碳排放量),3个速率变量(总人口变化量、城镇空间总碳排放量与城镇空间总碳吸收量)和若干辅助变量(因方程与模型变量较多,若需要可联系笔者索要,下同)。

农业空间子系统共约100余个变量,其中包括1个水平变量(农业空间净碳排放量),2个速率变量(农业空间总碳排放量与农业空间总碳吸收量)以

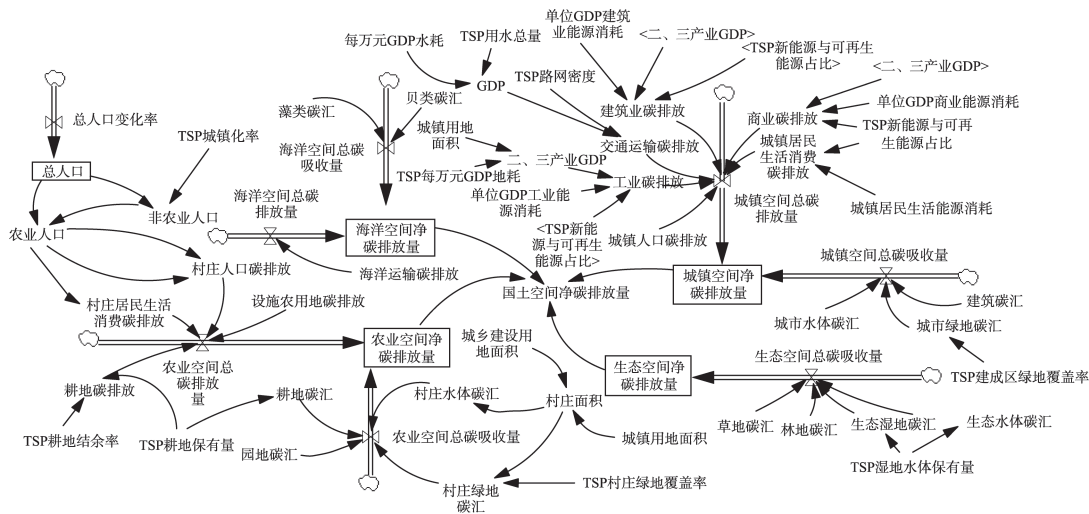


图2 江苏省国土空间规划碳效应系统动力学存量流量简图

Figure 2 Schematic diagram of carbon effect system dynamics of territorial spatial planning in Jiangsu Province

2024年11月

及若干辅助变量。

生态空间子系统共18个变量,包括1个水平变量(生态空间净碳排放量),1个速率变量(生态空间总碳吸收量)以及16个辅助变量。

海洋空间子系统共50个变量,包括1个水平变量(海洋空间净碳排放量),2个速率变量(海洋空间总碳排放量与海洋空间总碳吸收量)以及47个辅助变量。

### 2.2.3 情景模式设定

情景分析法通过对未来详细地、严密地推理和描述来构想未来各种可能的方案,从而有利于对事件发展的内在逻辑以及未来的可能状态进行全面把握。考虑到研究区国土空间利用管理与经济社会发展战略选择及情景设定的可能性与可行性,本文共设置3种情景4类方案:自然发展、规划实施与碳中和情景。各类情景下设置的参数指标类型主要包括:耕地结余率、村庄绿地覆盖率、湿地水体结余率、城镇化率、用水总量、建成区绿地覆盖率、每万元GDP地耗、路网密度、新能源与可再生能源占比等9项规划指标,以及海洋运输能耗、贝类与藻类产量、地均农物资使用量、地均作物产量、居民生活与各类产业能耗、建筑材料消耗、新能源汽车占比、公共汽电车客运量等非规划指标(具体设置方案略,可联系笔者索要)。

其中:①自然发展情景基于没有国土空间规划方案约束的假设,并根据研究区当前发展趋势和现行政策环境预测相关参数值,据此预测没有国土空间规划方案约束下的碳效应变化;②规划实施情景同样基于当前发展趋势和现行政策环境背景,并将相应规划参数值设定为国土空间规划方案具体指标,以此模拟预测碳效应变化;③碳中和情景则分为两种方案:一种在规划相关指标参数约束的基础上,通过调控部分可行的非规划指标参数值模拟碳效应变化,以此明确相关参数调整的具体范围和程度;另一种是在自然发展情景的基础上,通过调整规划指标参数值模拟其碳效应变化。

## 3 研究区概况、数据来源与指标选取

### 3.1 研究区概况

江苏省位于中国东部沿海区域,土地总面积10.2万km<sup>2</sup>。据2021年统计数据,江苏省人口数量众多(总人口8505万,全国排名第4)、经济发达(国

内生产总值11.63万亿,全国第2;国内生产总值同比增长8.6%,高于全国平均水平0.5个百分点),但也面临着人口密度大、人均土地面积少、国土开发强度远高于全国平均水平以及资源环境压力突出等问题。因经济社会快速发展与城镇化水平快速提高,导致江苏省面临能源资源消耗较高与碳减排压力较大等挑战。因此,江苏省自然资源禀赋与经济社会特征在中国具有非常强的典型性。

### 3.2 数据来源与指标选取

本文数据主要包括研究区自然资源、经济社会与国土空间规划指标数据3类。其中水与能源等自然资源数据,以及人口、经济、交通运输、建筑、农产品、海产品等经济社会指标数据,其主要来源于《江苏省统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国交通年鉴》《中国建筑业统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国渔业统计年鉴》等统计资料;耕地、林地与城镇用地等土地利用数据来源于江苏省土地调查成果数据。个别缺失年份的指标数据采用线性插值法测算得到。

此外:①城市水体面积依据江苏省风景名胜名录中位于城市内部的湖泊、河流与水库等面积汇总得到,因其改变的概率较小,故设为常数;②村庄水体面积根据土地利用遥感影像提取,村庄水体比重基于村庄水体面积与村庄总面积的平均比值(0.07)确定,并假定该比例保持不变。

国土空间规划指标主要依据《江苏省国土空间规划(2021—2035年)》文本选取。文本未提及的其他相关规划指标则分别依据《江苏省“十四五”自然资源保护和利用规划》《江苏省绿美村庄211提升工程三年实施方案(2023—2025年)》《江苏省“十四五”城市园林绿化规划(2021—2025年)》《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划》以及《江苏省国土空间规划(2020—2035)征求意见稿》选取。

## 4 结果与分析

### 4.1 模型检验结果分析

模型检验包括模型的合理性与有效性检验、参数灵敏度分析以及历史性检验3个部分。

(1)模型合理性检验结果显示该方程式两边量纲一致,模型试运行未产生病态结果;有效性检验结果显示,仿真值与真实值之间的误差率在10%之内的指标数据占比超过95%,通过了有效性

检验。

(2)灵敏度分析通过输出变量对关键指标变化的响应进行评估,本文将城镇、农业、生态与海洋空间的净碳排放量作为模型的关键输出变量,并将TSP每万元地耗等15个指标作为关键指标进行灵敏度分析。表2为选中指标值分别增加15%时对输出变量的影响程度:除每万元GDP地耗、地均水稻产量、单位GDP工业能源消耗、城镇用地面积和林地面积这5个指标之外,其他指标的灵敏度都小于

10%,表明模型稳定性较好,可以用于后续分析。高灵敏度指标是调控国土空间碳排放的关键因素,可为后续情景模拟分析关键指标的设置提供依据。

(3)基于真实值测算与应用模拟值采用本模型模拟测算的历史性检验结果发现(表3):包括城市客运总量等在内的各指标参数相对误差(RS)最大为2.0%,系统中各子类活动与国土空间净碳排放相对误差(RS)最大为2.61%,表明构建的相关指标参数模型模拟效果良好,测算结果精度较高,可用于

表2 模型灵敏度分析结果

Table 2 Model sensitivity analysis results

指标	灵敏度/%	指标	灵敏度/%	指标	灵敏度/%
城镇化率	6.60	用水总量	0.59	公共汽车客运量	0.88
耕地结余率	2.17	路网密度	0.03	城镇用地面积	14.69
湿地水体结余率	0.90	地均水稻产量	17.94	林地面积	10.34
每万元GDP地耗	12.73	地均化肥使用量	1.70	草地面积	0.05
新能源与可再生能源占比	0.55	单位GDP工业能源消耗	14.20	城市建成区绿地覆盖率	0.04

表3 模型指标参数历史性检验结果

Table 3 Model parameters and historical verification results

指标参数	数值	均值	指标参数	数值	均值	指标参数	数值	均值	指标参数	数值	均值
类型			类型			类型			类型		
城市客运	TV	833961.24	GDP	TV	33185.90	非农业人	TV	3780.86	村庄人口	TV	304.87
总量	SV	817269.35		SV	33185.32	口	SV	3780.35	呼吸碳排	SV	304.86
	RS	-2.00		RS	0.00		RS	-0.01	放	RS	0.00
国土空间	TV	15779.06	二、三产	TV	31181.13	农业人口	TV	3859.11	耕地碳汇	TV	-4539.30
净碳排放	SV	15799.26	业GDP	SV	31180.65		SV	3858.58		SV	-4538.84
量	RS	0.13		RS	0.00		RS	-0.01		RS	-0.01
城镇空间	TV	18180.09	工业碳	TV	10538.33	城镇人口	TV	298.69	园地碳汇	TV	-6.77
净碳排放	SV	18151.58	排放	SV	10537.81	呼吸碳排	SV	298.68		SV	-6.77
量	RS	-0.16		RS	0.00	放	RS	0.00		RS	-0.01
农业空间	TV	-2580.78	商业碳	TV	250.99	城市水体	TV	-0.17	村庄绿地	TV	-17.15
净碳排放	SV	-2531.52	排放	SV	250.98	碳汇	SV	-0.17	碳汇	SV	-17.15
量	RS	-1.91		RS	0.00		RS	-0.18		RS	-0.02
海洋空间	TV	236.01	建筑业	TV	7164.93	耕地碳排	TV	418.06	村庄水体	TV	-0.15
净碳排放	SV	235.99	碳排放	SV	7116.30	放	SV	418.06	碳汇	SV	-0.15
量	RS	-0.01		RS	-0.68		RS	0.00		RS	-0.03
生态空间	TV	-56.25	交通运	TV	775.71	村庄居民	TV	479.75	林地碳汇	TV	-25.44
净碳排放	SV	-56.24	输碳排	SV	795.96	生活碳排	SV	480.30		SV	-25.43
	RS	-0.01	放	RS	2.61	放	RS	0.11		RS	-0.02
总人口	TV	7639.97	城镇居	TV	554.56	养殖用地	TV	779.90	草地碳汇	TV	-0.09
	SV	7639.55	民生活	SV	554.39	碳排放	SV	779.88		SV	-0.09
	RS	-0.01	碳排放	RS	-0.03		RS	0.00		RS	-0.06

注:表中TV、SV与RS分别为各指标参数及测算结果的真实值、模拟值以及相对误差,其中RS的单位为%;各类碳排放/碳汇单位为万t,客运总量与人口指标单位为万人,经济产出类指标单位为万元。



2024年11月

后续模拟仿真分析。

## 4.2 模型1990—2020年国土空间碳排放测算结果

### (1) 国土空间净碳排放总量测算结果

基于本模型测算的江苏省1990—2020年国土空间碳效应总量测算结果显示(图3中1990—2020年间曲线):30年间,国土空间净碳排放总量从1990年的3257万t增长至2020年的35772万t,年均增长率为8.31%,整体呈碳源效应且大体呈增加趋势;具体而言,1990—2000年净碳排放总量整体保持稳定,随后呈持续快速增加状态。根据测算,城镇空间是国土空间净碳排放的最主要贡献来源,城镇空间碳排放的主要来源则为各类产业能源消费碳排放,前述变化规律应是2000年以来江苏经济快速发展导致能源消费快速增加的结果。

### (2) 不同类型国土空间净碳排放测算结果

不同类型国土空间碳排放测算结果中(图3中1990—2020年间曲线):①城镇空间净碳排放年度变化规律与全省国土空间净碳排放一致;数量上则从5027万t增长至38748万t,年均增长7.04%;②农

业空间从-1706万t降低至-3314万t,年均降低2.23%,呈碳汇效应且大体呈增加趋势。经济水平的提高通常会引起包括农业在内的科技水平进步,这有利于提高农用物资利用效率并提升耕地作物产量,并在降低碳排放强度的同时提升了碳吸收量,从而使得农业空间净碳排放呈上述变化规律;③生态空间从-66.04万t降低至-73.15万t,年均降低0.3%,亦呈碳汇效应且呈微弱增加趋势,但各年度间波动相对较大;④海洋空间从2.22万t增长至412.3万t,年均增长19.02%,年度变化上与全省国土空间净碳排放一样呈“先稳定后快速增长”的态势。考虑到海洋空间的碳排放来源主要为海洋运输碳排放,这也说明经济社会的快速发展同样使得海洋运输行业对能源消费的需求快速增加,从而呈上述变化规律。

## 4.3 不同情景下2021—2060年模拟预测结果

### (1) 自然发展情景模拟预测结果

基于自然发展情景的模拟仿真结果显示:①国土空间净碳排放量在2020年达到峰值后呈下降趋

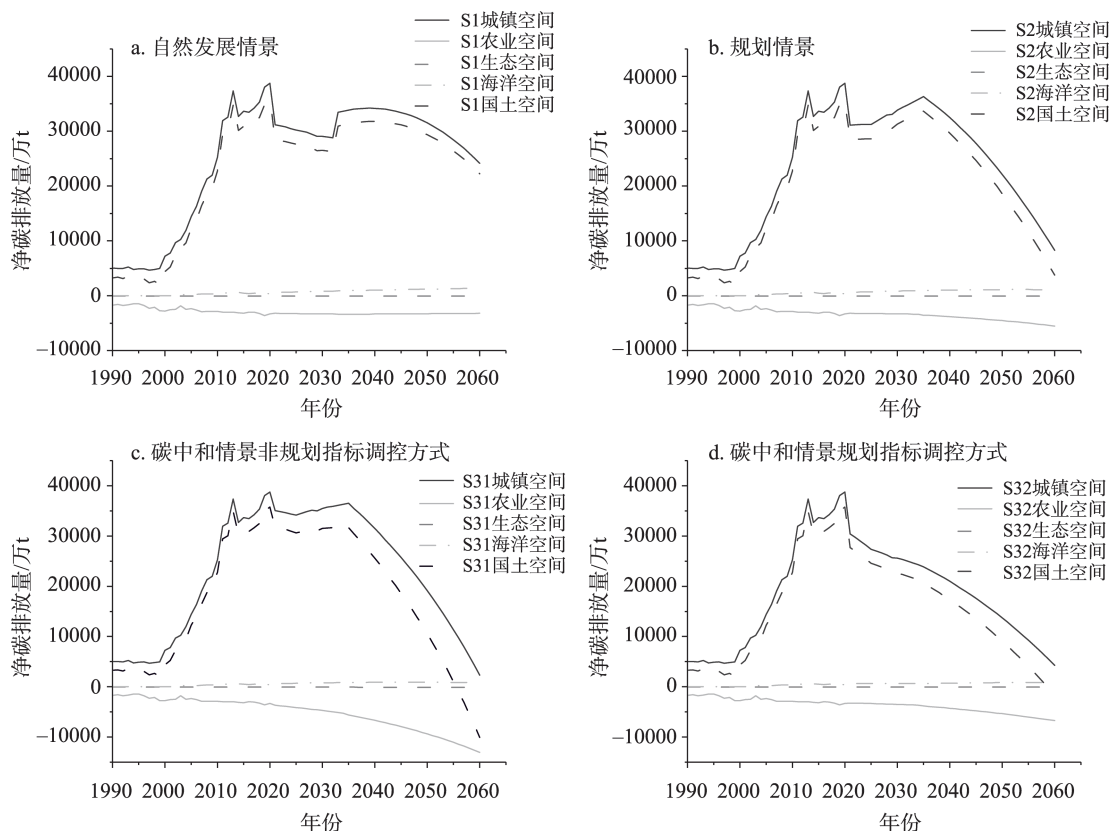


图3 1990—2060年不同情境下江苏国土空间净碳排放量测算模拟结果图

Figure 3 Calculation and simulation results of territorial space net carbon emissions in Jiangsu Province under different scenarios, 1990–2060

势,但直至2060年仍较大(22237万t),难以按期实现碳中和目标。有研究表明,惯性发展情景下江苏省城市碳排放在2035年以前呈增长趋势<sup>[31]</sup>,但其仅直接依据有关文献对耕地、园地等用地碳排放系数取值,误差较大。本文根据细分农业生产活动内容以及其他各类用地上的人类活动年度差异进行测算,更符合研究区实际;②城镇空间净碳排放与国土空间净碳排放变化趋势大致相同,其净碳排放量远远超出其余子系统;城镇空间中工业碳排放为主要碳排放来源,与相关研究结论一致<sup>[35]</sup>;③农业空间是主要的碳汇来源,这也与江苏地区农田碳效应研究的结论一致<sup>[36]</sup>。其中2021—2040年碳汇逐年上升至峰值后开始下降。研究表明科技水平的进步导致农作物单产提高,同时单位面积农资产品使用减少,从而使得碳排放强度降低<sup>[3]</sup>,本文结果也验证了这一结论。然而,由于耕地总面积整体呈减少趋势,最终导致农业空间碳汇能力下降;④生态空间碳汇从2021年开始逐年减少,海洋空间净碳排放量则大体呈上升趋势。江苏耕地后备资源较少,补充耕地的来源除建设用地复垦外,林地、坑塘沟渠等水体也是重要来源<sup>[37]</sup>,林草湿地生态空间面积的减少致使其碳汇能力减弱。这也与相关研究中关于林草湿地等生态空间规模对碳汇的影响结论一致<sup>[3,13]</sup>。

## (2) 规划情景模拟预测结果

基于规划情景的模拟预测结果显示:2021—2060年,全省国土空间净碳排放从35772万t减少至3790万t(图3),表明规划方案的实施有明显减排作用,但仍未按期实现碳中和目标。分类型来看,40年间:①城镇空间累计减排远大于自然情景。这主要归因于新能源和可再生能源占比以及每万元GDP能耗两项指标的共同调控,使得化石能源的消耗量降低;②农业空间碳汇能力呈增加趋势,这是由于耕地保有量指标的约束使得耕地规模不再减少,以及农作物单产提高促使耕地碳汇能力增强;此外,村庄绿地覆盖率的提高也使得其绿地碳汇有所提升;③生态空间碳汇呈减少趋势,但幅度远小于自然发展情景:受湿地保有量指标约束,湿地水体面积不再减少,但林地和草地面积减少依然会导致生态空间的碳汇能力减弱;④海洋空间净碳排放

量呈先增后减趋势,这主要是由于新能源和可再生能源占比的增加所致。

## (3) 碳中和情景模拟预测结果

碳中和情景下基于非规划指标调控的模拟预测结果显示,江苏可提前至2056年实现碳中和。具体而言:①节能降耗方面主要通过降低各类能源消耗以及增加绿色公共交通客运量等措施,直接降低碳排放;②城镇空间碳汇在保证建设用地需求的前提下,通过加大屋顶绿化并提高立体绿化率来提升;③农业空间通过减少农资物品的使用并提高作物单产,同时减缓农村居民生活能耗的增长速度,以实现减碳增汇;④生态空间在确保湿地水体面积不减少的前提下,通过增加林地和草地面积来提升碳汇能力;⑤海洋空间主要通过调控能耗总量和结构,同时提高藻类和贝类产量,以实现减碳增汇目标。

基于调控规划指标的模拟仿真结果发现,江苏省可提前至2059年实现碳中和目标。具体调控包括:①通过增加新能源和可再生能源占比来促进减排;②城镇空间通过提升万元GDP地耗的下降速率并降低用水总量,以及提高城市建成区绿地覆盖率指标,实现减碳增汇目标;③农业空间通过提高耕地保护数量与村庄绿地覆盖率实现增汇;④生态空间通过提高湿地水体保护面积实现增汇。

## 4.4 3种情景4类方案下模型预测结果综合分析

综合3种情景4类方案下模型模拟预测结果(图4)可以看出:

(1)从2021年起,各情景方案下国土空间净碳排放均整体呈降低趋势,但具体变化上有明显不同,其中:①自然发展情景2021—2060年基本呈稳定下降的特征;②国土空间规划方案实施情景下在2021—2035年呈一定程度的增加,2035年后则呈快速下降趋势。这应与江苏省2021—2035年国土空间规划方案中需在实现经济社会发展与生态环境建设等多战略目标下,制定的相应规划控制指标有关;③碳中和情景下非规划指标调控方案呈“先缓慢下降,随后快速降低”的趋势,规划指标调控方案则呈持续稳定下降趋势。

(2)从各情景方案的减排效果来看:①相比自然发展情景,规划情景下国土空间规划方案实施的



2024年11月

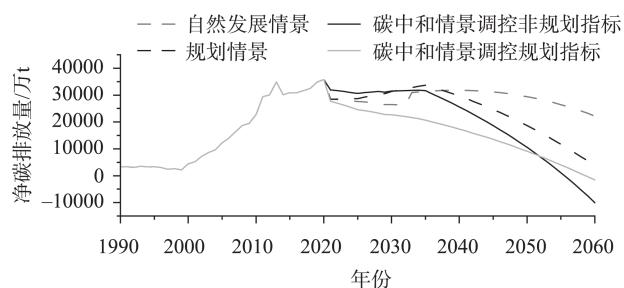


图4 1990—2060年不同情景下国土空间净碳排放量测算模拟预测值对比图

Figure 4 Comparison of calculated and simulated projections of net carbon emissions from the territorial space for different scenarios, 1990–2060

减排作用更加显著,但仍未达到碳中和目标,因此还需制定相应的减排措施,以助力“双碳”目标的实现;②碳中和情景下调控非规划指标方案的减排效果最为显著,且调控路径更加广泛,可操作性更强。该方案主要包括推广能源节约与高效利用技术、减少农资物品使用、提高农作物产量、推广立体绿化等多种措施;碳中和情景下调控规划指标方案效果次之,该方案通过国土空间规划指标的调整,实现减碳增汇。上述两种方案均可按期实现碳中和目标

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

国土空间规划为区域国土空间利用管理提供了基本规制,进而影响碳排放。本文基于国土空间规划碳效应机理,首先构建了基于系统动力学的、直接嵌入国土空间规划相关控制指标的碳效应评估模型,随后开展了包括国土空间规划方案实施在内的江苏省2020—2060年国土空间碳效应多情景模拟预测。主要结论如下:

(1)1990—2020年江苏省国土空间净碳排放均值为15779.06万t,与基于真实值测算的结果相比,其相对误差为0.13%。时间变化方面,从1990年的3257万t最终增加至2020年的35772万t,呈“先减后增,但整体增加”变化趋势。

(2)自然发展情景下,国土空间净碳排放量在2020年达到峰值后呈下降趋势,但直至2060年仍为22237万t,未实现碳中和目标;国土空间规划方案实施情景下,2020—2060年从35772万t减少至3790万t,表明规划方案的实施有明显减排作用,仍

未按期实现碳中和目标;碳中和情景下基于非规划指标调控与规划指标调控的两种方案下,江苏省可分别提前至2056年与2059年实现碳中和目标,但调控非规划指标方案的可操作性更强。

(3)相比其他相关研究成果,本文1990—2020年间国土空间净碳排放测算结果及变化趋势更加符合研究区实际;分类国土空间净碳排放测算结果中,城镇空间中的工业碳排放贡献比重最大、农业空间是国土空间的主要碳汇来源、以及林草湿地生态空间面积的减少致使其碳汇能力减弱,上述3个结论均与相关研究一致。

### 5.2 建议

综上,江苏省若要按期实现碳中和目标,可通过调整部分国土空间规划指标,或制定相应的保障措施以调控非规划指标因子实现,具体而言:

(1)对于城镇空间,可通过每万元GDP地耗指标约束、新能源和可再生能源占比调控以及城市建成区绿地覆盖率指标提升,遏制建设用地无序扩张并增加碳汇。非规划减碳措施包括:鼓励低碳产业发展并推广低碳技术,以减少各类产业单位GDP能源消耗;通过宣传引导和政策激励措施,鼓励引导市民采取节能措施,降低居民生活能耗;推广低碳交通,鼓励市民采用公共交通与绿色出行方式,减少交通拥堵与尾气排放;推广绿色建筑以及节能材料与技术,提高建筑能源利用效率;鼓励立体绿化,建设屋顶花园或绿化屋顶,在保障城镇建设用地需求的前提下降低能耗并增加城市碳汇。

(2)对于农业空间,可通过进一步提高耕地保护与村庄绿地覆盖率指标,提升农业空间碳汇能力。非规划减碳措施包括:引导农村居民采取节能措施,降低生活能耗;推广有机与生态农业,减少化肥和农药使用;持续推动技术创新,通过科学施肥、土壤结构改良、土壤水分保持等措施,提升农作物的产量质量,据此提升其碳汇能力。

(3)对于生态空间,可通过提高湿地水体保护面积指标以提高碳汇能力。非规划减碳措施包括:制定相应的湿地保护政策,限制对湿地的侵占破坏;实施湿地生态修复工程,进一步提升湿地植被的覆盖度与湿地土壤的有机碳含量;加强林地保护再造,禁止非法砍伐滥伐;通过人工造林和天然更

新等方式增加林木数量,并采取适当的管理与技术措施促进林木生长,增强碳吸收能力;通过植被恢复、荒山荒坡绿化等方式增加草地的面积,提升植被覆盖,并采取适时修剪、合理施肥、避免过度利用等科学管理措施,促进草地健康生长和碳积累。

(4)对于海洋空间,可通过提高新能源和可再生能源占比,推行海洋风电能源开发与利用,从而减少海洋运输领域的碳排放。非规划减碳措施包括:加强海洋生态系统的保护和恢复,禁止滥捕滥渔,保护海底生物栖息地;鼓励藻类和贝类养殖产业发展等具有海洋碳汇功能的项目,以提高藻类和贝类产量,据此提升海洋空间的碳汇能力。

### 参考文献(References):

- [1] van Marle M, van Wees D, Houghton R A, et al. New land-use-change emissions indicate a declining CO<sub>2</sub> airborne fraction[J]. *Nature*, 2022, 603(7901): 450–454.
- [2] 丁学谦, 吴群, 刘向南, 等. 土地利用、经济高质量发展与碳排放耦合协调度及影响因素: 来自中国282个地级市的经验研究[J]. *资源科学*, 2022, 44(11): 2233–2246. [Ding X Q, Wu Q, Liu X N, et al. Coupling and coordination degree of land use, high-quality economic development, and carbon emissions and influencing factors in China: An empirical study of 282 prefecture-level cities[J]. *Resources Science*, 2022, 44(11): 2233–2246.]
- [3] 童荣鑫, 梁迅, 关庆锋, 等. 2000–2020年中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算[J]. *地理学报*, 2023, 78(9): 2209–2222. [Tong R X, Liang X, Guan Q F, et al. Estimation of soil carbon storage change from land use and management at a high spatial resolution in China during 2000–2020[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9): 2209–2222.]
- [4] 黄贤金, 张安录, 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 X J, Zhang A L, Zhao R Q, 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(Z1): 64–69. [Wang W, Zou W, Zhang G B, et al. Urban agglomerations territory spatial planning path and governance mechanism under the “Dual Carbon” goals[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(Z1): 64–69.]
- [6] Zhang Y C, Peng T, Yuan C, et al. Assessment of carbon emissions at the logistics and transportation stage of prefabricated buildings[J]. *Applied Sciences*, 2023, DOI: 10.3390/app13010552.
- [7] Simmonds M B, Di Vittorio A V, Jahns C, et al. Impacts of California’s climate-relevant land use policy scenarios on terrestrial carbon emissions (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) and wildfire risk[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, DOI: 10.1088/1748-9326/abcc8d.
- [8] You J Z, Xu X, Wang Y F, et al. Life cycle carbon emission assessment of large-span steel structures: A case study[J]. *Structures*, 2023, 52: 842–853.
- [9] Liu H J, Yan F Y. Quantitative analysis of impact factors and scenario prediction of energy related carbon emissions at county level[J]. *International Journal of Green Energy*, 2023, 20(12): 1342–1351.
- [10] 冯相昭, 赵梦雪, 王敏, 等. 中国交通部门污染物与温室气体协同控制模拟研究[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 279–288. [Feng X Z, Zhao M X, Wang M, et al. Simulation research on co-controlling pollutants and greenhouse gases emission in China’s transportation sector[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(3): 279–288.]
- [11] Karamouz M, Zare M, Ebrahimi E. System dynamics-based carbon footprint assessment of industrial water and energy use[J]. *Water Resources Management*, 2023, 37(5): 2039–2062.
- [12] Liu X, Wang S, Zhuang Q, et al. A review on carbon source and sink in arable land ecosystems[J]. *Land*, 2022, DOI: 10.3390/land11040580.
- [13] 彭云峰, 常锦峰, 赵霞, 等. 中国草地生态系统固碳能力及其提升途径[J]. *中国科学基金*, 2023, 37(4): 587–602. [Peng Y F, Chang J F, Zhao X, et al. Grassland carbon sink in China and its promotion strategies[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(4): 587–602.]
- [14] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. *管理世界*, 2022, 38(1): 35–66. [Zhang X L, Huang X D, Zhang D, et al. Research on the pathway and policies for China’s energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(1): 35–66.]
- [15] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(12): 3103–3118. [Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO<sub>2</sub> emissions at the county level of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3103–3118.]
- [16] 庄惟敏, 刘加平, 王建国, 等. 建筑碳中和的关键前沿基础科学问题[J]. *中国科学基金*, 2023, 37(3): 348–352. [Zhuang W M, Liu J P, Wang J G, et al. Key frontier basic scientific issues in building carbon neutrality[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(3): 348–352.]
- [17] 吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. *经济地理*, 2023, 43(2): 190–200. [Ji X Q, Liu H M, Zhang Y S. Spatiotemporal evolution and driving factors of spatial correlation network structure of China’s land-use carbon emission[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(2): 190–200.]
- [18] 宁静, 王震, 杜国明, 等. 东北地区农业碳排放特征与农业经济的脱钩状态分析[J]. *经济地理*, 2023, 43(11): 173–180. [Ning J,

2024年11月

- Wang Z, Du G M, et al. Characteristics of agricultural carbon emissions in Northeast China and its decoupling state with agricultural economy[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(11): 173–180.]
- [19] 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 W Y, Huang C. Research progress on the carbon cycle of rivers and lakes[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3792–3807.]
- [20] 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 L, Hao X Y, Shen C L, 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.]
- [21] 翁翎燕, 李伟霄, 张梅, 等. 江苏省农田生态系统净碳汇时空演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(7): 1584–1594. [Weng L Y, Li W X, Zhang M, et al. Spatial-temporal evolution of net carbon sink of farmland ecosystem in Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(7): 1584–1594.]
- [22] 卢双双. 北京市低碳客运交通结构优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021. [Lu S S. Research on Optimization of Beijing Low-Carbon Passenger Transport Structure[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.]
- [23] 魏巍, 叶长盛, 蔡鑫, 等. 基于生态网络分析模型的武汉市“三生空间”碳代谢特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2024, 46(4): 528–543. [Wei W, Ye Z S, Cai X, et al. Characteristics of carbon metabolism of production-living-ecological space in Wuhan City of Hubei Province, China based on ecological network analysis model[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2024, 46(4): 528–543.]
- [24] 张梅, 赖力, 黄贤金, 等. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(4): 792–799. [Zhang M, Lai L, Huang X J, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China[J]. *Resources Science*, 2013, 35(4): 792–799.]
- [25] Zhao M, Kong Z H, Francisco J E, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(4): 807–813.
- [26] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 80–86. [Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80–86.]
- [27] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 247–252. [Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 247–252.]
- [28] 冯博, 王雪青, 刘炳胜. 考虑碳排放的中国建筑业能源效率省际差异分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1256–1266. [Feng B, Wang X Q, Liu B S. Provincial variation in energy efficiency across China's construction industry with carbon emission considered[J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1256–1266.]
- [29] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981–2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2007, (6): 804–812. [Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of land vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2007, (6): 804–812.]
- [30] 张文菊, 童成立, 吴金水, 等. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测[J]. *环境科学*, 2007, (9): 1905–1911. [Zhang W J, Tong Cheng L, Wu J S, et al. Simulating and predicting of carbon cycling in typical wetland ecosystems[J]. *Environmental Science*, 2007, (9): 1905–1911.]
- [31] 李光亮, 李效顺, 和伟康, 等. 基于系统建模的城市土地利用碳达峰仿真研究: 以江苏省为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(2): 260–272. [Li G L, Li X S, He W K, et al. Simulation of carbon peak of urban land use based on system dynamics model: Take Jiangsu Province as an example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(2): 260–272.]
- [32] 李姝晓, 童昀, 何彪. 多情景下海南省旅游业的碳达峰与碳中和预测[J]. *经济地理*, 2023, 43(6): 230–240. [Li S X, Tong Y, He B. Prediction of tourism carbon peak and carbon neutrality based on multiple scenarios: A case study of Hainan Province[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(6): 230–240.]
- [33] 刘春梅, 钱啸吟. “双碳”目标下中国能源消费碳排放量预测[J]. *资源科学*, 2023, 45(10): 1931–1946. [Liu C M, Qian X Y. Prediction of carbon emissions from energy consumption in China under the “dual carbon” goal[J]. *Resources Science*, 2023, 45(10): 1931–1946.]
- [34] 马勇洁, 仲俊涛, 米文宝, 等. 基于青海湖流域土地利用多情景模拟预测的碳储量评估及其脆弱性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(10): 46–55. [Ma Y J, Zhong J T, Mi W B, et al. Assessment and vulnerability analysis on carbon storage based on multi-scenarios simulation and prediction of land use in Qinghai Lake basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(10): 46–55.]
- [35] 袁业. 远程耦合视角下江苏省土地利用碳排放研究[D]. 南京: 南京大学, 2020. [Yuan Y. Research on Carbon Emissions from Land Use in Jiangsu Province from the Perspective of Telecoupling [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.]
- [36] 孙小祥, 张华兵, 于英鹏. 江苏沿海地区农田生态系统碳源/汇时空变化及公平性研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(10): 56–64. [Sun X X, Zhang H B, Yu Y P. Spatial and temporal dynamics in carbon source/sink and equity of the farmland ecosystem in Jiangsu coastal area, China[J]. *Chinese Journal of Agriculture*



tural Resources and Regional Planning, 2021, 42(10): 56–64.]

- [37] 陈昌玲, 张全景, 吕晓, 等. 江苏省耕地占补过程的时空特征及驱动机理[J]. 经济地理, 2016, 36(4): 155–163. [Chen C L, Zhang

Q J, Lv X, et al. Analysis on spatial-temporal characteristics and driving mechanisms of cropland occupation and supplement in Jiangsu Province[J]. Economic Geography, 2016, 36(4): 155–163.]

## Carbon effect assessment of territorial spatial planning based on system dynamics: Taking Jiangsu Province as an example

CHEN Longgao<sup>1,2</sup>, WANG Xinyao<sup>1,2</sup>, JI Li<sup>1,2</sup>, WU Haiqian<sup>1,2</sup>, LIN Ying<sup>1,2</sup>

(1. School of Public Policy and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. China Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** [Objective] The purpose of this study was to predict the carbon effects under the implementation of Territorial Spatial Planning (TSP) schemes by developing an evaluation model based on the carbon effect mechanism of the TSP scheme implementation, and provide a reference and support for proposing paths to achieving the dual carbon goals. [Methods] Based on the system dynamics model and scenario analysis method, a system dynamics model for evaluating the carbon effects in the TSP scheme implementation was developed. Taking Jiangsu as the empirical region, based on historical data from 1990 to 2020, the simulation prediction of carbon effects for various scenarios, including the implementation of TSP schemes, was achieved in the study area from 2020 to 2060. Subsequently, a carbon-neutral target implementation path applicable to the research area was proposed. [Results] (1) From 1990 to 2020, the net carbon emissions in the territorial space increased from 32.57 million tons to 357.72 million tons, exhibiting a trend of initially decreasing, then increasing, but overall rising; (2) Under the two scenarios of natural development and the implementation of TSP schemes, net carbon emissions from 2020 to 2060 exhibit a declining trend. However, they remain positive until 2060, failing to achieve the goal of carbon neutrality. In the carbon neutrality scenario, under two schemes based on the regulation of non-planning indicators and planning indicators, Jiangsu can achieve the goal of carbon neutrality ahead of schedule, but the scheme regulating non-planning indicators is more feasible; (3) Among the classified net carbon emissions in the territorial space, industrial carbon emissions in urban areas contribute the most, while the agricultural space is the main carbon sink. [Conclusion] Territorial spatial planning plays a crucial supporting role in achieving the dual carbon goals. To achieve the carbon neutrality goal on schedule for Jiangsu Province, it is feasible to adjust certain territorial spatial planning indicators or formulate corresponding safeguarding measures to regulate non-planning indicator factors.

**Key words:** territorial spatial planning; carbon effect assessment; system dynamics; carbon neutrality target; Jiangsu Province