

# 城镇化对黑土地碳平衡能力的影响及其提升路径

腾云<sup>1</sup>, 逢正菲<sup>1</sup>, 武文<sup>2</sup>, 徐卉<sup>3</sup>

(1. 东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨金融学院  
黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 西三一大学 管理学院, 加拿大 兰利 V2Y 1Y1)

**摘要:** [目的] 分析黑土地碳平衡能力与城镇化的关系, 为推动土地合理利用以及黑土地的增固减碳, 实现区域土地可持续发展和管理提供科学依据。[方法] 基于覆盖黑土地的 22 个地级市 2007—2022 年面板数据, 采用 Granger 因果检验模型、土地利用碳排放强度测算模型和核密度估计法进行分析。[结果] ① 黑土地碳排放呈现“两侧较高、中部较低”的空间分布特征, 且随时间推移碳排放量上升呈“北上”态势。② 按照城镇化水平与碳平衡能力影响关系可划分成增长型、反馈型、保护型和中立型 4 种类型。③ 经济增长较好城市的黑土地碳平衡能力与人口城镇化、经济城镇化和生态城镇化存在因果关系; 工业化城市黑土地碳平衡能力与空间城镇化存在因果关系, 其他城市黑土地碳平衡能力与城镇化综合指标存在因果关系。[结论] 未来应根据研究区不同影响类型因地制宜优化城镇化空间格局, 实现黑土地区域生态与城市发展相平衡, 助推黑土地保护与碳中和目标实现。

**关键词:** 碳平衡能力; 城镇化; 土地利用碳排放; 黑土地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0236-11

中图分类号: F301.2, X321

**文献参数:** 腾云, 逢正菲, 武文, 等. 城镇化对黑土地碳平衡能力的影响及其提升路径[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 236-246. Teng Yun, Pang Zhengfei, Wu Wen, et al. Effects of urbanization on carbon balance capacity of black soil areas and its promotion path [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 236-246.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.035

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.035

## Effects of urbanization on carbon balance capacity of black soil areas and its promotion path

Teng Yun<sup>1</sup>, Pang Zhengfei<sup>1</sup>, Wu Wen<sup>2</sup>, Xu Hui<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 2. Harbin Finance University, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 3. Trinity Western University, School of Management, Langley V2Y 1Y1, Canada)

**Abstract:** [Objective] The relationship between the carbon balance capacity of black soil areas and urbanization were analyzed in order to provide a empirical evidence for promoting the rational land use, enhancing carbon sequestration, reducing black soil areas, and achieving sustainable development and management of regional land. [Methods] Panel data from 22 prefecture-level cities covering black soil from 2007 to 2022 were analyzed using the Granger causality tests, land-use carbon emission intensity measurement models, and kernel density estimation methods. [Results] ① Regarding the spatial distribution of black land carbon emissions, a trend of higher emissions on ‘both sides and lower in the middle’ was observed, with a northward increase over time. ② The impact of urbanization level on carbon balance capacity can be categorized into four types: growth, feedback, protection, and neutrality. ③ In cities with better economic growth, there was a causal relationship between the black soil areas carbon balance capacity and population urbanization, economic urbanization, and ecological urbanization. In industrialized cities, a causal link exists between black soil areas carbon balance capacity and spatial urbanization, whereas in other cities, causal relationships exist between black soil areas carbon balance

收稿日期: 2025-06-20

修回日期: 2025-09-04

采用日期: 2025-09-04

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土地保护性利用技术模式区域适宜性评估与推广机制创新及应用”(2024YFD1500901); 国家社会科学基金项目“基于全面质量管理的东北黑土地保护多元驱动机制研究”(22BJY240); 黑龙江省哲学社会科学规划项目“黑龙江省推进保护性耕作提升碳中和效应的实施路径及对策研究”(23JYA045)

第一作者: 腾云(1980—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事农业绿色生产研究。Email: xlyt@neau.edu.cn。

通信作者: 徐卉(1988—), 女(汉族), 安徽省宿州市人, 博士, 讲师, 主要从事农业绿色发展等方面的研究。Email: xuhui3131@163.com。

capacity and comprehensive urbanization indicators. [Conclusion] Based on these insights, it is recommended that the spatial pattern of urbanization be optimized according to specific influence types in different regions to balance regional ecology and urban development in black soil areas. Such tailored strategies will facilitate black soil areas conservation and support the achievement of the carbon neutrality goals.

**Keywords: carbon balance capacity; urbanization; land use carbon emissions; black soil areas**

城镇土地利用变化对碳中和目标实现具有重要影响。自1961年以来,土地利用变化产生的直接碳排放量已成为重要的碳排放来源,也是自然地理覆被与社会经济活动的重要载体<sup>[1-2]</sup>。随着新型城镇化建设的推进,大量农业转移人口在城镇就业并定居,农村宅基地闲置和空心村问题日益凸显<sup>[3]</sup>。在城镇化进程中,土地利用变化对碳中和目标实现起到了关键作用。近年来,城镇化建设用地碳排放效应逐渐受到社会各界重视,城镇空间格局改变引起土地生态系统碳汇变化,城市快速扩张、化石燃料过量消耗加剧温室气体排放、土壤固碳能力降低,对城镇土地利用产生的综合效益造成了负面影响<sup>[4-6]</sup>。

黑土是世界上最肥沃土壤之一。黑土区是落实“双碳”目标的重要区域,也是中国水土流失、人地矛盾问题严重的区域。2015年联合国气候变化大会中提出“千分之四”计划,即全球2 m深土壤有机碳储量每年增加4‰,可有效抵消当前全球范围内的矿物燃料碳排放<sup>[7]</sup>。对中国9省土壤开展的固碳潜力研究表明,黑龙江省和吉林省0—20 cm土层黑土的固碳潜力为 $1.92 \times 10^6$  t,占9省总固碳潜力的42.2%,黑土地固碳潜力巨大<sup>[8]</sup>,也是实现“双碳”目标的重要角色。然而,长期高强度垦殖与不合理利用导致黑土退化问题突出,近40 a东北黑土区水土流失面积达 $2.76 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,黑土层平均厚度由50~80 cm降至20~30 cm,侵蚀速率超过自然成土速率的10倍。加之人口增长与耕地扩张的叠加效应,人地矛盾激化,生态空间持续压缩。这种“高碳汇潜力-高生态风险”的二元特征,亟需通过统筹黑土保护,破解粮食安全、生态安全与碳中和目标的协同困境。因此,在黑土地区域新型城镇化转型过程中,揭示黑土地区域碳平衡能力与城镇化的关系,能够了解黑土地利用及城镇化的发展情况,科学探究黑土地区域新型城镇化发展的新路径,能够有效缓解黑土地利用不充分、不科学的现状,为相关部门发现问题、制定计划提供科学依据。

关于土地碳平衡能力与城镇化关系的研究已成为学术界关注的焦点。学者们依托跨学科理论支撑,运用多种方法开展系列研究,其成果可归结为3个方面。①依据系统协调理论,运用耦合协调模型、PVAR模型和Tobit模型等,探究城镇化与区

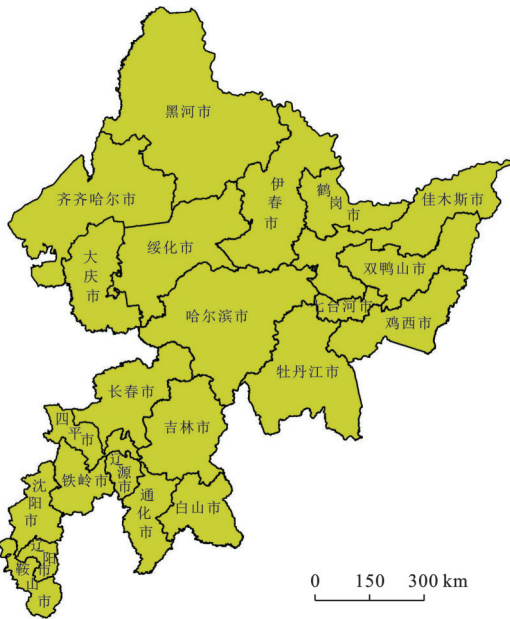
域低碳发展的耦合协调时空演化特征、互动响应关系及影响因素<sup>[9-10]</sup>,揭示长江经济带城市群、宁夏沿黄城市群等区域城镇土地利用变化对碳排放空间的交互效应与脱钩效应,并在此基础上提出推动新型城镇化转型、促进碳减排与区域高质量发展的优化路径及低碳发展策略<sup>[11]</sup>;②依据人地关系协调理论,通过构建“双碳”目标下的城镇化指标体系<sup>[12]</sup>,运用计量模型、EMB模型、固定效应与中介效应模型等方法,探究城镇化对土地利用效率的影响机制<sup>[13-14]</sup>,揭示新型城镇化转型过程中实现土地资源高效利用与低碳转型的有效路径;③依据可持续发展理论,利用SBM, MGWR等模型<sup>[13,15]</sup>,分析浙江省、黄土高原等地区的碳排放效率时空格局,揭示城镇化要素投入对碳排放效率的影响路径与作用机制,探索以绿色低碳为导向破解国土空间治理瓶颈的方案,提出有效促进新型城镇化转型的低碳路径<sup>[14,16]</sup>。综合来看,在研究范围上,少数学者以单个城市或全国省域作为研究对象<sup>[9-10,17]</sup>,多数则以长江流域、黄河流域、黄土高原地区或单个县市为研究单元<sup>[13-15]</sup>;在研究内容上,主要聚焦于城镇化与碳排放的时空互动关系、效率提升路径及低碳转型机制<sup>[11-12,15,17]</sup>。

本研究选取水土流失、人地矛盾问题突出的黑土区域,从确定城镇化指标出发,在土地利用碳排放量测算的基础上,构建城镇化指标体系,研究碳排放量、碳平衡能力、城镇化水平时空分布特征,并采用Granger因果检验探究黑土地碳平衡能力与城镇化的关系,推动土地合理利用以及黑土地的增固减碳,为实现区域土地可持续发展和管理提供科学依据。

## 1 数据来源与理论框架

### 1.1 研究区域与数据来源

本研究以覆盖黑土地的地级市为研究对象,结合近年“黑土地保护利用”重点区域,综合考虑地域特点和政策信息<sup>[18]</sup>,选取中国黑龙江省、吉林省和辽宁省中覆盖黑土地的地级市,主要包括哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、佳木斯、长春、通化、沈阳、铁岭等22个城市(图1)。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的遥感监测数据。城镇化指标数据主要来源于各省、市统计年鉴。



注:本图基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站的标准地图绘制,审图号为GS(2019)1827号,底图无修改。下同。

图 1 黑土地研究区(22个地级市)示意图

Fig.1 Schematic diagram of studied black soil areas (22 prefecture-level cities)

## 1.2 理论框架

黑土地内城市的人口规模、经济水平、土地扩张和生态治理不同,导致城镇化的程度出现差异<sup>[10]</sup>。将城镇化类型分为人口城镇化、经济城镇化、空间城镇化、生态城镇化4类,分别与碳平衡的互动关系进行分析<sup>[17]</sup>。结合李竹等<sup>[12]</sup>、尹鹏等<sup>[19]</sup>的研究方法,构建城镇化背景下影响碳平衡能力的理论框架。

(1) 人口城镇化。提高人口素质、优化人口结构可推动城镇化由传统向新型转变,随着非城镇人口持续地向城市迁移和聚集,导致城市人口持续增长。城市居民的生产和消费习惯是影响碳排放的主要因素,随着人口数量的增长和能源使用量的上升,碳排放量也随之增多,进而促进碳平衡能力提升<sup>[12]</sup>。

(2) 经济城镇化。在经济城市化进程中,城市经济水平直接决定增强碳平衡能力投入资金的支撑力度。通过产业结构转型升级,提高资源利用效率,推动城市绿色化发展进程。政府环境监管对经济发达城市的碳排放变化起到一定作用,经济较为落后的城市作用相对较弱<sup>[19]</sup>。

(3) 空间城镇化。在空间城市化背景下,随着经济和人口的城市化趋势,人口数量逐渐增加,住房面积需求增长,两个因素相互作用导致城市建设用地面积扩大。在城市快速扩张情景下,建设用地不断增加,碳汇用地面积相应减少,导致碳排放量上升,对城市碳平衡能力提升产生负面影响。

(4) 生态城镇化。政府出台生态政策,鼓励人们使用公共交通工具,减少机动车使用,打造循环经济,推动能源绿色低碳转型,减少碳排放。同时,政府提高绿地覆盖率、投入减碳增固资金,增强碳平衡能力<sup>[10]</sup>。

依据以上的碳平衡能力与城镇化形成机理,参考相关城镇化水平指标体系,构建碳中和目标下城镇化指标体系(表1),利用熵权法计算不同指标权重<sup>[19-20]</sup>。

表 1 碳中和目标下城镇化水平指标体系  
Table 1 Urbanization indicator system based on carbon neutrality goals

目标层	准则层	指标	代码
	人口城镇化( $Z_1$ )	城镇人口占比/%	$X_1$
		城镇从业人员占比/%	$X_2$
城镇化水平评价	经济城镇化( $Z_2$ )	人均GDP/万元	$X_3$
		第二产业产值占比/%	$X_4$
		第三产业产值占比/%	$X_5$
	空间城镇化( $Z_3$ )	人均社会消费品零售额/万元	$X_6$
		人均社会固定资产投资额/万元	$X_7$
		建成区面积占土地面积比重/%	$X_8$
		建成区绿化覆盖率/%	$X_9$
(C)	生态城镇化( $Z_4$ )	人均公园绿地面积/ $m^2$	$X_{10}$
		森林覆盖率/%	$X_{11}$
	生态城镇化( $Z_4$ )	工业固体废物综合利用率/%	$X_{12}$
		生活垃圾无害化处理率/%	$X_{13}$

## 2 研究方法

### 2.1 碳排放相关测算

#### 2.1.1 碳排放测算

土地利用碳排放测算按照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)划分,将耕地和建设用地作为碳源,园地、林地、草地、水域作为碳汇。园地、林地、草地、耕地、水域用地的测算方法采用IPCC提出的碳排放系数法,各类型用地碳排放来源如图2所示<sup>[14]</sup>。

土地利用碳排放计算公式为

$$CA_{ij} = \sum_{ij} (A_n \times a_n) \quad (1)$$

式中: $CA_{ij}$ 为*i*年*j*地区碳排放量; $a_n$ 为第*n*类用地碳排放系数; $A_n$ 为第*n*类用地面积。参考诸多学者研究,结合东北黑土地区域草甸草原、阔叶林和湿地植被的土地利用特征,对土地利用碳排放系数进行微调(表2)。

建设用地根据人类社会生产和生活活动消耗能源产生的碳排放进行计算<sup>[20]</sup>,运用温室气体清单法进行测算<sup>[21]</sup>,其中各项系数来源于《中国能源统计年鉴》及IPCC国家温室气体清单指南。计算公式为

$$CE_{ij} = \sum_m (E_m \times \beta_m \times B_m) \quad (2)$$

式中:  $CE_{ij}$  为  $i$  年  $j$  地区建设用地碳排放量;  $E_m$  为第  $m$  类能源消费量, 根据实际能源采购情况, 选取表 3 所示的 9 种能源进行测算;  $\beta_m$  为第  $m$  类能源标准煤折算系数;  $B_m$  为第  $m$  类能源碳排放系数。



图 2 土地利用碳排放来源

Fig.2 Sources of carbon emissions from land use

表 2 各类土地碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficients for various land types

土地利用分类	碳排放系数值	来源
园地	-0.073 0 kg C/(m <sup>2</sup> ·a)	吴春英等 <sup>[22]</sup> 、薛建春等 <sup>[23]</sup>
耕地	0.042 2 kg C/(m <sup>2</sup> ·a)	腾云等 <sup>[24]</sup>
林地	-0.078 0 kg C/(m <sup>2</sup> ·a)	孙赫等 <sup>[25]</sup>
草地	-0.002 1 kg C/(m <sup>2</sup> ·a)	吴春英等 <sup>[22]</sup> 、孙赫等 <sup>[25]</sup>
水域	-0.054 7 kg C/(m <sup>2</sup> ·a)	范建双等 <sup>[26]</sup>
未利用地	-0.000 5 kg C/(m <sup>2</sup> ·a)	李璐等 <sup>[27]</sup>

### 2.1.2 碳平衡能力测算

利用碳生态承载系数(ESC)表示城市碳吸收与碳排放比值, ESC 能有效揭示城市碳吸收对碳排放的吸纳效能, 是评估碳平衡能力强弱的重要指标<sup>[17]</sup>。计算公式为

$$ESC = \frac{\sum_{ij} CA_{ij}}{\sum_{ij} CE_{ij}} \quad (3)$$

式中:  $CE_{ij}$  为  $i$  年  $j$  地区建设用地碳排放量(kg);  $CA_{ij}$  为  $i$  年  $j$  地区园地、耕地、林地、草地、水域和未利用地总碳排放量(kg); 当  $ESC > 1$  时, 表明碳吸收能力较强, 碳平衡能力较强; 当  $ESC < 1$  时, 表明碳排放能力较强, 碳平衡能力较弱。

## 2.2 Granger 因果检验

### 2.2.1 面板单位根检验

在进行 Granger 因果检验之前, 需要先验证数据的平稳性。若数据平稳, 可继续使用 Granger 因果检

验。选用 LLC 法来进行面板单位根检验, 其检验方程为

$$\begin{aligned} \Delta y_{i,t} &= \rho_i y_{i,t-1} + \sum_{j=1}^{\rho_i} \delta_{i,j} \Delta y_{i,t-j} + \epsilon_{i,t} \Delta y_{i,t} \\ &= \rho_i y_{i,t-1} + \sum_{j=1}^{\rho_i} \delta_{i,j} \Delta y_{i,t-j} + \epsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: 假定参数  $\rho_i$  的值在截面间是一致的, 对一切的  $i$  而言,  $\rho_i$  值在截面间是一致的, 即  $\rho_i = \rho$ , 并且滞后阶数  $\rho_i$  可以自由改变。LLC 法检验原假设是对于所有  $i$  而言,  $\rho_i = 0, \rho = 0$ ; 备择假设是对于所有  $i$  而言,  $\rho_i < 0, \rho < 0$ 。

表 3 各类能源碳排放系数

Table 3 Carbon emission coefficients of different sources

能源名称	标准煤折算系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
汽油	1.471 4	0.553 8
焦炭	0.971 4	0.855 0
燃料油	1.428 6	0.618 5
天然气	1.214 3	0.448 3
原油	1.428 6	0.585 7
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
液化石油气	1.714 3	0.504 2

### 2.2.2 Granger 因果检验假设构建

本研究基于 Granger 因果检验, 提出 4 种碳平衡能力与城镇化关系的假设(表 4), 第一种为增长型, 在碳平衡能力变化过程中, 城镇化发展水平直接或间接作为影响碳平衡能力水平的要素, 能够有效促进碳平衡能力提升; 第 2 种为保护型, 城镇化发展水平各种要素能够影响碳平衡能力水平, 此情况下城镇化发展各种要素对碳平衡能力无影响; 第 3 种为中立型, 即二者之间互不影响; 第 4 种为反馈型, 即二者呈互动响应状态, 具有双向因果关系<sup>[9, 28]</sup>。

经济变量间的因果关系最早是 Granger 提出的, 随着学者们的不断改进, 它可以被广泛地运用到经济学实证研究。由于本研究重点关注黑土区碳平衡能力与城镇化的因果关系, 各地级市间既有不同的面板异质性也可能具有相关性, 即断面相关性, 因此选用 Dumitrescu 等<sup>[29]</sup>改进的面板 Granger 因果检验, 可以消除面板异质性和断面相关性对因果检验的影响。

$$y_{j,i} = a_j + \sum_{k=1}^K \varphi_j^k x_{j,i-k} + \sum_{k=1}^K \gamma_j^k x_{j,i-k} + \epsilon_{j,i} \quad (5)$$

式中:  $x$  为城镇化指标;  $y$  为碳平衡能力;  $k$  为滞后阶数;  $j$  为个体;  $i$  为时间;  $\epsilon$  为误差项;  $\varphi, \gamma$  为估计系数;  $a$  为常数项。

### 3 结果与分析

#### 3.1 黑土地利用碳排放时空格局分布

图3表明。时间趋势来看,碳排放量时序变化相对稳定,总体呈上升趋势,黑土地区域的3省会城市尤为明显。

2007—2017年区域间碳排放水平存在显著差异,到2022年城市间的差异明显缩小。从空间分布来看,2007—2022年黑龙江省和辽宁省土地利用碳排放量高于吉林省,呈现“两侧较高,中部较低”的特征,同时土地利用碳排放量呈现以省会为中心,向四周城市扩散增长的趋势。随时间推移,碳排放量的

上升呈“北上”态势。即由辽宁省沈阳市经由吉林省四平市、长春市“北上”到黑龙江省哈尔滨市,再由哈尔滨市“北上”直至黑龙江省全部。

表4 Granger因果检验类型  
Table 4 Types of Granger causality tests

假设类型	是否具有因果关系		作用关系
	ESC→Z <sub>i</sub>	Z <sub>i</sub> →ESC	
增长型		✓	单向因果关系
保护型	✓		单向因果关系
中立型	×	×	无影响关系
反馈型	✓	✓	双向因果关系

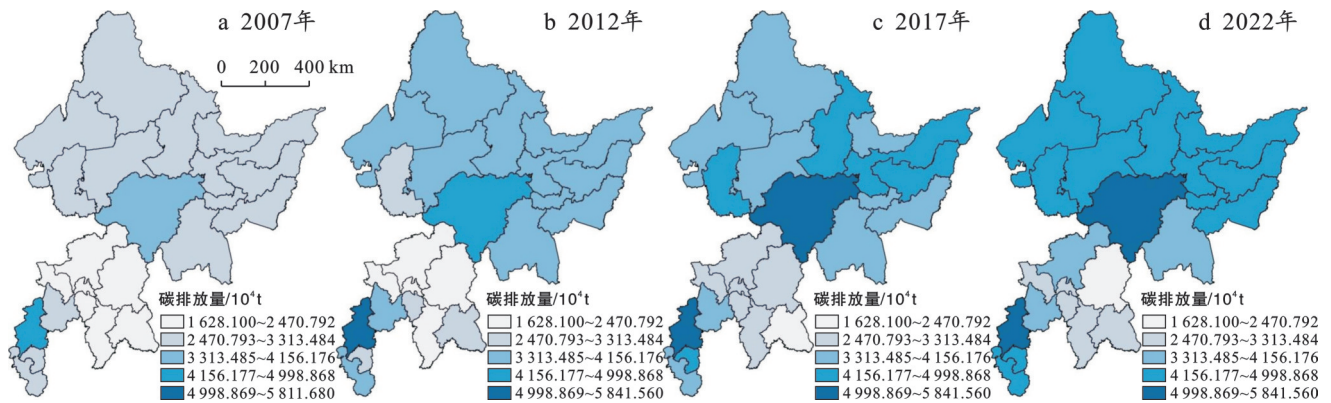


图3 2007—2022年黑土地覆盖的地级市典型年份碳排放空间格局

Fig.3 Spatial pattern of carbon emissions in typical years in black soil areas from 2007 to 2022

碳平衡能力表示碳排放吸收能力的强弱,其值越大碳平衡能力越强。由图4可知,曲线波峰始终为单峰波形,表明碳平衡能力处于极化。在研究时段内,曲线最高峰值位于0.80~0.85之间,而波峰高度呈现逐渐下降的趋势,说明黑土地区域的碳平衡能力在逐年下降,曲线在0.85~0.95之间较为密集,高度随时间推移而上升。通过波峰的移动趋势来看,曲线波峰逐渐向左移,碳平衡能力水平逐渐降低。从曲线右拉尾来看,随着时间推移逐渐减弱,碳平衡能力差异程度逐渐减小。从时空差异来看,黑土地区域的碳平衡能力呈现逐渐减弱的趋势,在空间上碳平衡能力的减弱呈现“由南及北”的扩张趋势,且在2012—2017年东北黑土地区域的碳平衡能力集体下降,尤其是省会城市下降尤为明显;2017—2022年黑土地区域地级市碳平衡近乎全为“弱”等级(图5)。

#### 3.2 黑土地区域碳平衡能力与城镇化的关系

##### 3.2.1 黑土地区域城镇化水平时空格局

根据黑土地城镇化水平测算结果,将城镇化水平分为5级(图6)。可以看出,城镇化综合水平呈现

上升趋势,在空间上形成“南高北低”的格局,呈现以省会为中心“较强”的城镇化水平,以及省会周围城市“中等”以上的城镇化水平。同时,形成“以省会为中心,向周围发散”的增长趋势,尤其是在2007—2017年,城镇化水平显著增加,3个省会城市于2022年皆达到“强”等级。

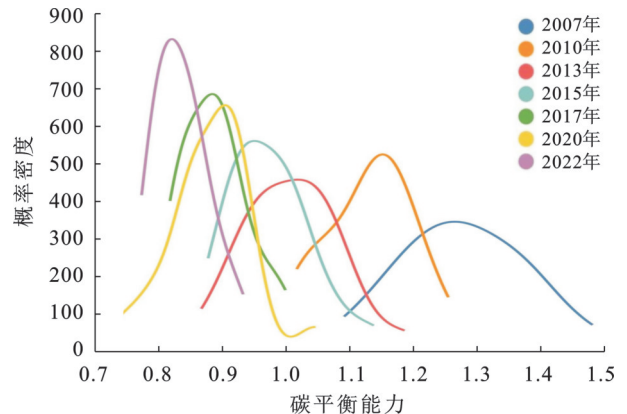


图4 2007—2022年黑土地覆盖的地级市碳平衡能力时间序列演变

Fig.4 Time series evolution of carbon balance capacity in black soil areas from 2007 to 2022

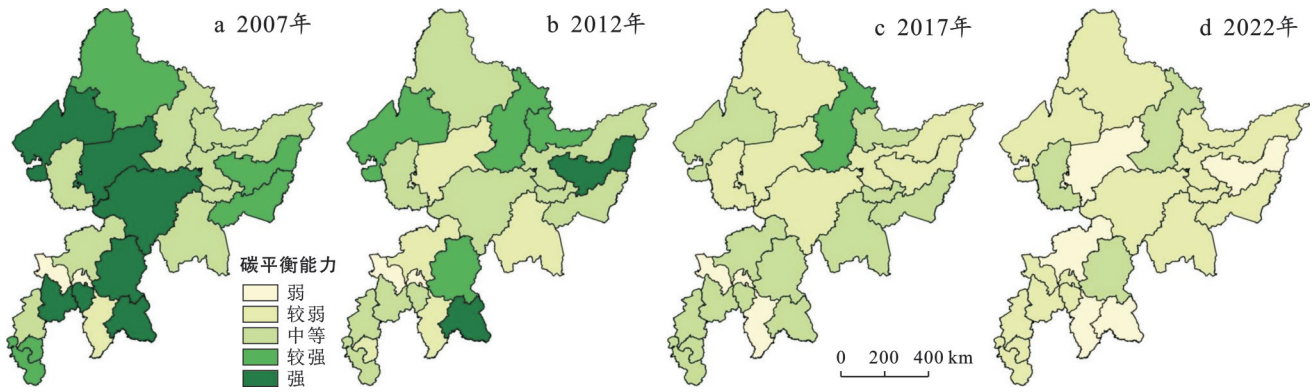


图 5 2007—2022 年黑土地覆盖的地级市碳平衡能力空间格局

Fig.5 Spatial pattern of carbon balance capacity in black soil areas from 2007 to 2022

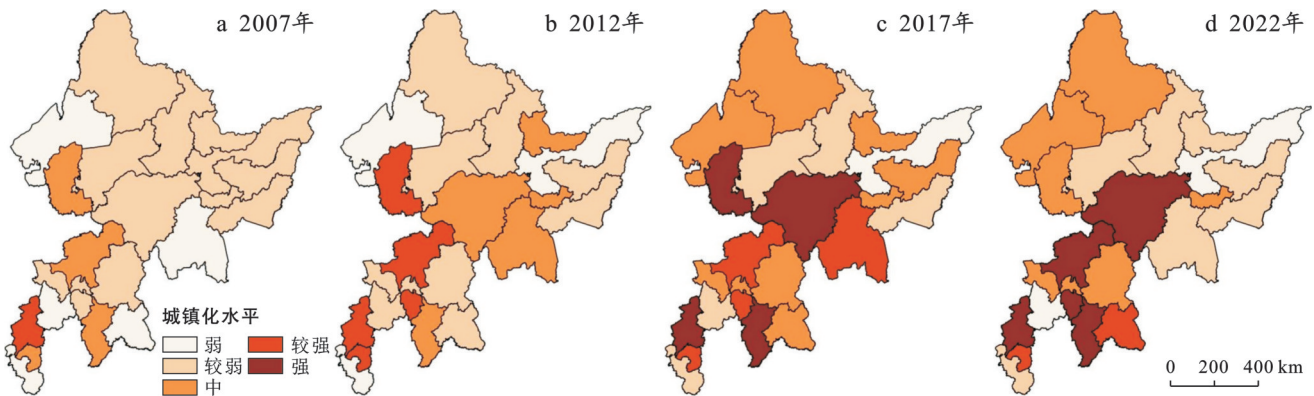


图 6 2007—2022 年黑土地覆盖的地级市城镇化水平时空格局

Fig.6 Spatial and temporal pattern of urbanization levels in black soil areas from 2007 to 2022

在对碳平衡能力与城镇化关系进行 Granger 因果检验前,需要对涉及数据进行单位根检验,以保证数据平稳性。表 5 表明,经济城镇化( $Z_2$ )、空间城镇化( $Z_3$ )、生态城镇化( $Z_4$ )展现为平稳序列。在经过一阶差分后碳平衡能力、人口城镇化指标( $Z_1$ )表现为平稳序列,再进行二阶差分后,城镇化综合指标( $C$ )表现为平稳序列。

3.2.2 碳平衡能力与城镇化的互动关系

Granger 因果检验结果(表 6,图 7)表明,碳平衡能力与人口城镇化因果检验中,中立型城市占比为

73%,保护型城市占比 23%。增长型城市只有沈阳市,增长型作为人口城镇化影响碳平衡能力的表征方式,主要特点表现为城镇化水平高、经济增速处于区域较高水平、城镇从业人员占比高,导致能源使用量上升,碳排放量随之增多。从人口结构角度来看,增长型城市拥有较高比例的技术型人才,能够助力城市增固减碳技术创新,加速减碳进度,促进区域碳平衡能力增强。中立型作为占比最高的因果类型,主要表现在人口负增长、人口流失严重的城市,对碳平衡能力影响较弱。

表 5 各指标单位根检验结果  
Table 5 Unit root test results for each indicator

变量	$\Delta ESC$	$\Delta Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\Delta\Delta C$
ADF 检验	-6.027(0.00)	-12.474(0.00)	-10.519(0.00)	-6.348(0.00)	-4.538(0.00)	-18.981(0.00)
检验结果	平稳	平稳	平稳	平稳	平稳	平稳

注:① $\Delta$ 为变量一阶差分值, $\Delta\Delta$ 为变量二阶差分值。②括号里的数字为  $p$  值。

碳平衡能力与经济城镇化因果检验中,中立型城市占比 45%,多为省内经济发展较迟缓的资源型城市,例如鸡西市,经济发展缓慢,相应减碳增汇方面资金较少,城市存有污染严重的支柱产业,绿色创新发展水平有限,生产过程中难以实现“零污

染”,减少碳排放多依赖于关闭或停业整改等途径,因此,碳平衡能力的提升会对城市经济发展构成限制。增长型城市占比 41%,这类城市多为工业型城市,政府在生态治理方面的资金充足,对于减碳增固的经验充足。

表 6 黑土地碳平衡能力与各类城镇化 Granger 因果检验结果

Table 6 Granger causality test results for carbon balance capability and various types of urbanization in black soil areas

截面单位	ESC→Z <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> →ESC	因果 类型	ESC→Z <sub>2</sub> Z <sub>2</sub> →ESC	因果 类型	ESC→Z <sub>3</sub> Z <sub>3</sub> →ESC	因果 类型	ESC→Z <sub>4</sub> Z <sub>4</sub> →ESC	因果 类型	ESC→C C→ESC	因果 类型
沈 阳	0.678 4.625*	增长	0.447 3.653	中立	3.455 1.326	中立	0.157 304.106*	增长	0.459 4.559*	增长
鞍 山	0.084 0.105	中立	0.844 1.219	中立	8.245* 4.619*	反馈	1.047 0.494	中立	0.490 0.616	中立
辽 阳	2.990 0.214	中立	0.012 4.423*	增长	0.056 19.212**	增长	7.200* 3.356	保护	0.023 5.199*	增长
铁 岭	0.896 0.827	中立	1.720 2.256	中立	8.015* 1.022	保护	3.242 8.369*	增长	0.336 5 6.810*	增长
长 春	1.094 0.230	中立	0.002 6.355*	增长	0.447 1.217	中立	0.169 0.727	中立	0.313 6.468*	增长
吉 林	0.944 1.797	中立	2.146 12.602**	增长	0.700 0.707	中立	0.531 0.907	中立	0.374 6.414*	增长
四 平	0.637 0.333	中立	1.733 0.452	中立	9.473* 0.000	保护	2.436 0.008	中立	4.196* 0.256	保护
辽 源	1.497 0.994	中立	4.842* 1.989	保护	0.549 11.174**	增长	20.291** 0.343	保护	1.357 5.258*	增长
通 化	0.303 0.323	中立	0.315 10.365**	增长	0.245 11.272**	增长	0.038 0.579	中立	0.048 8.099*	增长
白 山	0.069 0.027	中立	1.232 7.790*	增长	10.805** 5.877*	反馈	0.613 3.203	中立	1.047 5.218*	增长
哈尔滨	4.618° 0.479	保护	4.848° 4.303	保护	1.042 6.850*	增长	0.648 6.133*	增长	4.853° 2.501	保护
齐齐哈尔	9.562** 1.827	保护	3.347 6.518*	增长	0.301 5.125*	增长	0.815 7.481*	增长	2.629 7.052*	增长
鸡 西	1.416 1.365	中立	0.882 0.276	中立	1.475 6.520*	增长	1.352 0.177 1	中立	0.444 0.656	中立
鹤 岗	4.500° 0.763	保护	0.925 9.840**	增长	0.010 8.649*	增长	1.475 0.285	中立	0.629 7.405*	增长
双鸭山	1.606 0.434	中立	0.637 1.576	中立	13.872** 2.862	保护	0.338 5.325*	增长	0.126 5.890*	增长
大 庆	0.219 0.808	中立	0.759 7.206*	增长	4.384 0.867	中立	0.141 7.644*	增长	0.334 2.321	中立
伊 春	7.448° 0.148	保护	0.613 1.484	中立	0.535 0.826	中立	0.952 0.504	中立	1.221 0.135	中立
佳木斯	3.290 0.313	中立	1.541 6.931*	增长	0.140 16.248**	增长	0.545 0.839	中立	1.967 7.983*	增长
七台河	4.864° 0.663	保护	2.278 1.187	中立	0.024 4.032	中立	0.094 1.572	中立	0.386 0.888	中立
牡丹江	0.128 3.123	中立	5.089° 0.326	保护	1.560 0.331	中立	4.674° 2.440	保护	3.709 1.770	中立
黑 河	0.823 0.202	中立	0.319 2.216	中立	0.519 13.209**	增长	2.149 6.643*	增长	6.729° 6.880*	反馈
绥 化	1.287 0.086	中立	1.941 0.619	中立	0.801 6.698*	增长	0.305 0.703	中立	9.627** 2.434	保护
黑土地 总体	0.621 0.912	中立	5.183° 0.677	保护	2.414 0.874	中立	0.292 6.256*	增长	0.365 8.271*	增长

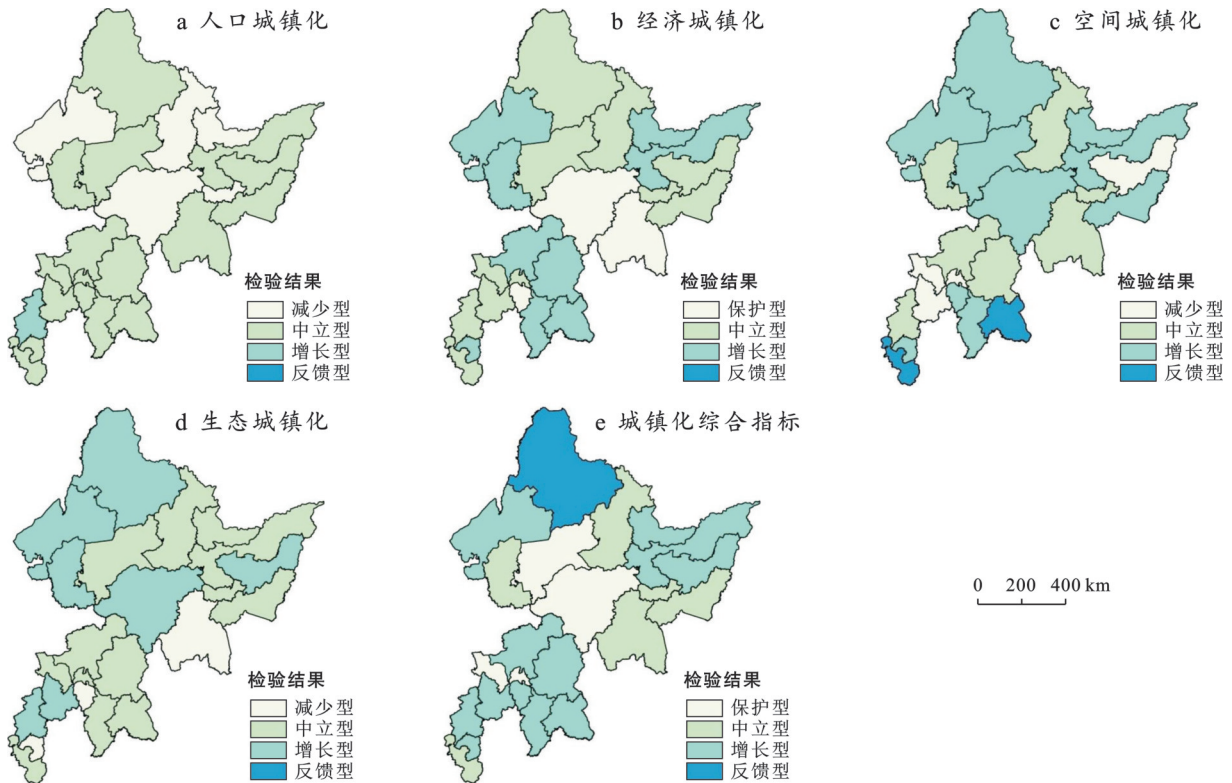


图 7 黑土覆盖的地级市碳平衡能力与城镇化 Granger 因果检验结果

Fig.7 Granger causality test results between carbon balance capability and urbanization in black soil areas

碳平衡能力与空间城镇化因果检验中,增长型占比 45%,其中哈尔滨市作为黑龙江省省会,为满足经济发展需要,城市规模不断扩大,基础设施建设逐渐完善,城市碳排放量逐年增加,影响城市碳平衡能力。中立型占比 31%,其中沈阳市作为引领东北三省的重要城市,经济发展相对繁荣且政策执行高效,严格限制城市扩张速度,重视城市环境问题,最大程度减少对环境的影响;牡丹江市作为四线城市,城市空间框架已经固定,城市扩张速度缓慢,因此空间城镇化对碳平衡能力水平影响较小。

碳平衡能力与生态城镇化因果检验结果中,中立型占比 55%,主要为经济发展缓慢的城市,生态环保经费少,环保设施覆盖率较低,此类城市要增加碳平衡能力,需增加减碳增固方面的投资,因此限制碳平衡能力提高,对生态城镇化影响或被生态城镇化影响较弱。增长型占比 32%,为黑土地区域经济较为发达城市,生态环保资金相对充足,专项环保措施实施精准,城市环保设施覆盖广泛,可有效提升碳平衡能力。

碳平衡能力与城镇化综合指标因果检验结果中,增长型占比 55%,这些城市人口结构、经济水平、空间扩张及生态治理等因素综合影响碳平衡能力水平。保护型城市占比 14%,增强这些城市碳平衡能力,可显著提高城市对人力资源配置、低碳经济活

动、生态产业构建及清洁能源利用的标准,推动城镇化全面综合发展。中立型占比 27%,由于城市经济发展较为缓慢,政府对人才资源把控不到位、城市扩张速度较慢、生态环保投资较少,碳平衡能力的提高离不开财政的支持,因此限制碳平衡能力的提高,对城镇化的综合发展水平影响微弱。

综合对比其他学者的研究发现,黑土地的碳平衡能力强于红壤、黄壤等土地。尽管黑土地碳排放量逐年增加、碳平衡能力逐年降低,但黑土覆盖的地区碳平衡能力仍远高于与黑土覆盖地区经济水平、人口城镇规模、生态水平相当的地区<sup>[12]</sup>,这与黑土地有机质含量高、碳汇能力强有密切关系。

### 4 讨论

通过构建城镇化指标体系,同时提出因果关系假设,将碳平衡能力与城镇化互动关系结果分为 4 类。研究表明,城镇化的发展往往伴随着土地利用不合理、温室气体与污染物大量排放等问题,黑土地城镇化发展基本呈现以增长型、反馈型城市为中心,向周围保护型、中立型城市发散的特征。大城市群集中,以消耗资源为代价的高排放,高投入,高增长的发展模式有待进一步优化。

(1) 城镇化所涉及的土地利用转换,对黑土区碳平衡能力的负向贡献高于其他区域。与南方、东部

沿海快速城镇化区域相比,东北黑土地同样面临城镇扩张压力,但由于人口减少等因素,引发的直接碳排放相对较低<sup>[11]</sup>;Zhang等<sup>[30]</sup>研究表明城镇化会限制林地等生态系统土地的碳汇能力,城镇化导致黑土地直接占用,使高碳汇能力的自然、农田生态系统不可逆损失,这种“碳汇损失”效应在黑土地区域尤为突出。相比之下,南方红壤区等地也会导致自然、农田生态系统减少,但其被占用的土地有机质含量和碳汇潜力远低于黑土,因此单位面积占用的碳汇损失相对较小。

(2) 反馈型城市应严格把控城市建设用地供给,限制城市扩张速度,为提高碳平衡能力做前瞻布局。一方面,加快实施新型城镇化是提高土地碳平衡能力的突破口,有序推进乡村用地入市改革,在保证乡村全面振兴用地需求的基础上,引导黑土地合理利用,将增强土地碳平衡能力与黑土地保护相统一;另一方面,此类城市应发挥减碳“领头羊”作用,带动周边城市加快实现低碳经济和新型城镇化快速推广、升级与发展。

(3) 保护型城市应积极推进黑土地资源高效利用和低碳转型。一方面,要规避传统“先污染后治理”的工业化老路,以布局低碳产业体系为重点,鼓励创新及发展战略性新兴产业,加快淘汰落后产能;另一方面,建立有效的激励和约束机制推动增固减碳,充分借助此类城市生态、地理环境的作用,加快探索碳中和路径。

(4) 中立型城市应提高黑土地利用效率,将增强固碳功能与黑土地保护相统一。一方面,从大城市引进人才、技术和先进管理经验,支持城镇低碳可持续发展,推动城市建设及城市支柱产业绿色发展;另一方面,准确把握地区的发展现状和自然禀赋,加强对耕地、林地和草地的保护,在积极推动新型城镇化转型的同时维护土地生态系统健康运行,提升区域固碳减排功能。

(5) 增长型城市应利用现有优势进一步优化增固减碳格局。一方面,依托城市现有人口规模及人才架构、生态治理以及经济基础,为实现“双碳”目标提供人才、技术、政策和资金支持;另一方面,需进一步探索黑土地碳平衡能力与城镇化相互协调、相互促进的优化机制,从能源结构、土地利用结构等方面维持良性循环。

## 5 结论

(1) 2007—2022年黑土地碳排放量总体呈现逐年上升的趋势。在空间分布上呈现南北高、中部低

的特征,表现为黑龙江省、辽宁省的土地利用碳排放量大于吉林省。

(2) 黑土地碳平衡能力逐年下降,各城市碳平衡能力差距逐渐缩小,在空间上碳平衡能力的减弱呈现“由南及北”的扩张趋势。城镇化综合水平呈现以省会城市为中心,向周围城市发散的上升趋势。黑龙江省城镇化水平尽管逐步提高,但仍存在城市之间城镇化水平差异较大的问题。吉林省城市城镇化水平实现稳步提升,并表现出较高的城镇化水平。到2022年,吉林省大部分城市呈现“较强”以上的城镇化水平。辽宁省城市城镇化水平起步较早,城镇化水平在2007年已达到平均水平之上,且城镇化水平始终高于其他两省。

(3) Granger因果检验结果表明,黑土地城市总体碳平衡能力与经济城镇化、生态城镇化以及城镇化综合指标存在因果关系。部分省会城市、各省经济增长状况较好城市碳平衡能力与人口城镇化、经济城镇化、生态城镇化存在因果关系,多数经济发展缓慢城市与人口、经济、生态城镇化不存在因果关系。各省内工业型城市碳平衡能力与空间城镇化存在因果关系;黑土地大部分城市碳平衡能力与城镇化综合指标存在因果关系。

## 参考文献 (References)

- [1] Hong Chaopeng, Burney J A, Pongratz J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961—2017 [J]. *Nature*, 2021, 589(7843): 554-561.
- [2] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 1-6.  
Qin Dahe, Thomas S. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10(1): 1-6.
- [3] 严金海, 王彬, 郑文博. 乡土依恋、城市融入与乡城移民宅基地退出意愿: 基于福建厦门的调查 [J]. *中国土地科学*, 2022, 36(1): 20-29.  
Yan Jinhai, Wang Bin, Zheng Wenbo. Homeland attachment, urban integration and rural-urban migrants' Willingness to withdraw rural residential land: A survey in Xiamen, Fujian Province [J]. *China Land Science*, 2022, 36(1): 20-29.
- [4] 郭旭东, 常青, 刘筱, 等. 基于碳储量视角的城镇土地利用模式与生态效益分异特征 [J]. *中国土地科学*, 2017, 31(4): 61-70.  
Guo Xudong, Chang Qing, Liu Xiao, et al. Urban land use pattern and its ecological benefit from the perspective of carbon storage [J]. *China Land Science*, 2017, 31(4):

- 61-70.
- [5] 李国煜,王嘉怡,曹宇,等.碳排放约束下的福建省城镇建设土地利用效率动态变化与影响因素[J].中国土地科学,2020,34(4):69-77.  
Li Guoyu, Wang Jiayi, Cao Yu, et al. Dynamic changes and influencing factors of urban construction land use efficiency under carbon emission constraint in Fujian Province [J]. China Land Science, 2020,34(4):69-77.
- [6] Shu Hui, Xiong Pingping. Reallocation planning of urban industrial land for structure optimization and emission reduction: A practical analysis of urban agglomeration in China's Yangtze River delta [J]. Land Use Policy, 2019,81:604-623.
- [7] 王宇飞,王语宽.重视农业土壤固碳,助力“双碳”目标实现:积极应对农业土壤“千分之四”计划[J].环境保护,2021,49(S2):61-64.  
Wang Yufei, Wang Yukuan. Attention to agricultural soil carbon sequestration and help to achieve the targets of carbon peak and carbon neutrality: Positively respond to the “the 4 per 1000 initiative for agricultural soils” [J]. Environmental Protection, 2021,49(S2):61-64.
- [8] 马常宝,王慧颖.国内外黑土地保护利用现状与方向研究[J].中国农业综合开发,2022(11):7-11.  
Ma Changbao, Wang Huiying. Research on the present situation and direction of protection and utilization of black land at home and abroad [J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2022(11):7-11.
- [9] 程鹏,王灏,吴诗嫚,等.新型城镇化与耕地利用碳排放空间交互与脱钩效应分析:以长江经济带三大城市群为例[J].生态经济,2025,41(7):101-114.  
Cheng Peng, Wang Hao, Wu Shiman, et al. Analysis of spatial interaction and decoupling effect between new-type urbanization and carbon emissions from cultivated land utilization: A case study of three major urban agglomerations in the Yangtze River economic belt [J]. Ecological Economy, 2025,41(7):101-114.
- [10] 周涛,王亚娟,刘小鹏.宁夏沿黄城市群新型城镇化与低碳发展的耦合交互研究[J].干旱区地理,2025,48(8):1457-1468.  
Zhou Tao, Wang Yajuan, Liu Xiaopeng. Coupling interaction study of new-type urbanization and low-carbon development in Ningxia urban agglomeration along the Yellow River [J]. Arid Land Geography, 2025,48(8):1457-1468.
- [11] 赵荣钦,张帅,黄贤金,等.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J].地理学报,2014,69(10):1425-1437.  
Zhao Rongqin, Zhang Shuai, Huang Xianjin, et al. Spatial variation of carbon budget and carbon balance zoning of Central Plains economic region at county-level [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(10):1425-1437.
- [12] 李竹,王兆峰,吴卫,等.碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系[J].自然资源学报,2022,37(12):3136-3152.  
Li Zhu, Wang Zhaofeng, Wu Wei, et al. The relationship between China's provincial carbon balance capacity and urbanization under carbon neutrality target [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(12):3136-3152.
- [13] 刘康,张寒,王玲,等.新型城镇化对土地利用碳排放效率的影响机制研究:以黄土高原为例[J].中国土地科学,2024,38(7):109-119.  
Liu Kang, Zhang Han, Wang Ling, et al. Research on the influencing mechanism of new-type urbanization on land use carbon emission efficiency: Taking the Loess Plateau as an example [J]. China Land Science, 2024,38(7):109-119.
- [14] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J].中国土地科学,2022,36(6):100-112.  
Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission [J]. China Land Science, 2022,36(6):100-112.
- [15] 陈玉娟,王思佳,王志斌,等.县域城镇化背景下浙江省碳排放绩效的空间分异及其影响因素[J].浙江大学学报(理学版),2025,52(4):444-458.  
Chen Yujuan, Wang Sijia, Wang Zhibin, et al. Spatial differentiation and influencing factors of county carbon emission performance in Zhejiang Province under the background of county urbanization [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2025,52(4):444-458.
- [16] 何淼,肖伟,李莹,等.新型城镇化视角下中国森林碳汇效率的时空分异、驱动及响应特征[J].生态经济,2025,41(6):127-135.  
He Miao, Xiao Wei, Li Ying, et al. Spatio-temporal differentiation, driving force and response characteristics of China's forest carbon sink efficiency from the perspective of new urbanization [J]. Ecological Economy, 2025,41(6):127-135.
- [17] 冯薇,赵荣钦,谢志祥,等.碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局:以黄河流域72个地级市为例[J].中国土地科学,2023,37(1):102-113.  
Feng Wei, Zhao Rongqin, Xie Zhixiang, et al. Land use carbon emission efficiency and its spatial-temporal pattern under carbon neutral target: A case study of 72 cities in the Yellow River basin [J]. China Land Science, 2023,37(1):102-113.

- [18] 崔宁波,王婷,董晋.“双碳”目标下东北黑土区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J].水土保持研究,2024,31(1):335-344.  
Cui Ningbo, Wang Ting, Dong Jin. Temporal-spatial pattern and evolutionary trend of ecological efficiency of cultivated land use in northeast black soil areas under the ‘carbon peak neutrality’ target [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):335-344.
- [19] 尹鹏,王富喜,段佩利.中国基本公共服务效率与城镇化质量的时空耦合关系研究[J].地理科学,2021,41(4):571-579.  
Yin Peng, Wang Fuxi, Duan Peili. Spatial-temporal coupling relationship between basic public service efficiency and urbanization quality in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021,41(4):571-579.
- [20] 姜旭,卢新海.长江中游城市群城镇化与人居环境耦合协调的时空特征研究[J].中国土地科学,2020,34(1):25-33.  
Jiang Xu, Lu Xinhai. Temporal and spatial characteristics of coupling and coordination degree between urbanization and human settlement of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. China Land Science, 2020,34(1):25-33.
- [21] 吴春英,陈飞平,徐先堂,等.长江中游经济区土地利用碳排放变化及协调分区[J/OL].环境科学,2025:1-16.(2025-03-10). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411054>.  
Wu Chunying, Chen Feiping, Xu Xiantang, et al. Land use carbon emission change and coordination zoning in the middle reaches of Yangtze River economic zone [J/OL]. Environmental Science, 2025: 1-16. (2025-03-10). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411054>.
- [22] 薛建春,张安录,曹力博,等.黄河流域产业集聚与产业结构对城市土地利用效率的影响效应研究[J].统计与决策,2023,39(14):119-124.  
Xue Jianchun, Zhang Anlu, Cao Libo, et al. Study on the effect of industrial agglomeration and industrial structure on urban land use efficiency in the Yellow River basin [J]. Statistics & Decision, 2023,39(14):119-124.
- [23] 腾云,孙铭遥,孙雨薇,等.东北三省黑土地碳排放时序特征及减排空间分析[J].中国农业大学学报,2025,30(3):232-244.  
Teng Yun, Sun Mingyao, Sun Yuwei, et al. Temporal characterization of carbon emissions and spatial analysis of emission reduction of black soil in northeast China [J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(3):232-244.
- [24] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].经济地理,2015,35(3):154-162.  
Sun He, Liang Hongmei, Chang Xueli, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China [J]. Economic Geography, 2015,35(3):154-162.
- [25] 范建双,虞晓芬,周琳.南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J].地理研究,2018,37(11):2177-2192.  
Fan Jianshuang, Yu Xiaofen, Zhou Lin. Carbon emission efficiency growth of land use structure and its spatial correlation: A case study of Nanjing City [J]. Geographical Research, 2018,37(11):2177-2192.
- [26] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J].自然资源学报,2019,34(5):1003-1015.  
Li Lu, Dong Jie, Xu Lei, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A case study of Wuhan urban agglomeration [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(5):1003-1015.
- [27] 武新姣,袁金国,赵锋,等.滹沱河流域碳排放与生态系统服务价值时空关系[J/OL].环境科学,2025:1-15.(2025-02-07). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411111>.  
Wu Xinjiao, Yuan Jinguo, Zhao Feng, et al. Spatial-temporal relationship between carbon emission and ecosystem service value in Hutuo River basin [J/OL]. Environmental Science, 2025: 1-15. (2025-02-07). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411111>.
- [28] 王子超,熊灵,王子岚.陆地边疆省份旅游发展与经济增长的互动效应研究:基于面板数据的Granger因果检验[J].中国软科学,2016(12):172-181.  
Wang Zichao, Xiong Ling, Wang Zilan. The interactive effect between tourism development and economic growth in borderland provinces: A granger causality test based on panel data [J]. China Soft Science, 2016(12):172-181.
- [29] Dumitrescu E I, Hurlin C. Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels [J]. Economic Modelling, 2012,29(4):1450-1460.
- [30] Zhang Xiaoxin, Brandt M, Tong Xiaowei, et al. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China [J]. Nature Sustainability, 2022,5(4):321-328.