

辽宁省“三生”功能时空演变及其碳排放效应

黄栋^{1,2}, 刘跃宗^{1,2}, 刘建宁⁴, 李一博³

(1.教育部人文社会科学重点研究基地, 辽宁师范大学 海洋经济与可持续发展研究院, 辽宁 大连 116029; 2.辽宁省“海洋经济高质量发展”高校协同创新中心, 辽宁 大连 116029; 3.辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 4.辽宁省地质矿产调查院有限责任公司 辽宁 沈阳 110031)

摘要: [目的] 探究辽宁省“三生”功能时空演变及其碳排放效应, 为“双碳”目标下的国土空间规划提供依据。[方法] 基于土地利用多功能性分类识别辽宁省国土“三生”功能, 结合直接和间接排放因子法核算碳排放量, 探索“三生”功能与碳排放量空间关系及其时空分异性, 揭示“三生”功能时空演变的碳排放效应。[结果] ①2005—2020年辽宁省“三生”功能空间分布格局总体变化不大, 大部分地区以生产和生态功能为主, 生活功能区扩张明显, 各地级市中心与周边区域空间差异明显。②2005—2013年, 辽宁省各县域碳排放量增长迅速, 2013—2020年增速缓慢, 但空间差异愈发显著, 碳排放高值明显集中在沈阳市和大连市。③辽宁省“三生”功能与碳排放量空间布局及数量变化的相关性总体较强, 但空间差异明显且影响因素复杂。[结论] 辽宁省各县域需要在自然地理条件约束和经济社会发展需求引导下, 在明确各自土地主导功能定位的基础上, 依托自身区域优势与资源禀赋, 加强区域协作, 以实现全域碳减排。

关键词: “三生”功能; 时空演变; 碳排放; 地理加权回归; 辽宁省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0421-11

中图分类号: F301.2

文献参数: 黄栋, 刘跃宗, 刘建宁, 等. 辽宁省“三生”功能时空演变及其碳排放效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 421-431. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240019.003; Huang Dong, Liu Yuezong, Liu Jianning, et al. Spatial-temporal evolution of productional-living-ecological functions and their carbon emission effects in Liaoning Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 421-431.

Spatial-temporal Evolution of Productional-Living-Ecological Functions and Their Carbon Emission Effects in Liaoning Province

Huang Dong^{1,2}, Liu Yuezong^{1,2}, Liu Jianning⁴, Li Yibo³

(1. Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 2. University Collaborative Innovation Center of Marine Economy High-Quality Development of Liaoning Province, Dalian, Liaoning 116029, China; 3. School of Geographic Sciences, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 4. Liaoning Geological and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110031, China)

Abstract: [Objective] The carbon emission effect on changes of the productional-living-ecological functions was determined in order to provide a reference for territorial and spatial planning meeting the “dual carbon” goals of “carbon peak” and “carbon neutrality”. [Methods] The evaluation assignment method, the energy consumption method, and a geographical weighted regression model were used to determine the spatial-temporal evolution characteristics of the productional-living-ecological functions and their effects on carbon emissions in Liaoning Province from 2005 to 2020. [Results] ① The spatial distribution pattern of the productional-living-ecological functions in Liaoning Province did not change much from 2005 to 2020. Most of the areas were dominated by productional and ecological functions, the living function areas expanded significantly, and the spatial differences mainly occurred between the central urban area and the surrounding

收稿日期: 2023-06-12

修回日期: 2023-08-07

资助项目: 辽宁省教育厅青年项目“辽宁沿海经济带土壤侵蚀时空演变及其对自然和人类活动的响应研究”(LQ2020030); 辽宁省社会科学规划基金青年项目“辽宁省‘三生空间’耦合协调度及其与区域社会经济的协同发展研究”(L20CJY004)

第一作者: 黄栋(1989—), 女(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士, 讲师, 主要从事资源环境与GIS应用方面的研究。Email: imdon@126.com.

areas. ② From 2005 to 2013, the carbon emissions of counties in Liaoning Province increased rapidly, and from 2013 to 2020, the growth rate was slower but its spatial differences became more obvious. The high carbon emissions were significantly concentrated in Shenyang and Dalian cities. ③ The overall correlations between the productional-living-ecological functions and carbon emissions were strong. The spatial differences were obvious and the influencing factors were complex. [Conclusion] Under the constraints of natural conditions and guided by their social and economic development needs, counties in Liaoning Province need to clearly define the main functions of the land and promote regional cooperation on the basis of their own advantages and resource endowments so as to realize carbon emission reductions over the entire region.

Keywords: productional-living-ecological function; spatial-temporal evolution; carbon emissions; geographically weighted regression; Liaoning Province

2020 年联合国大会上,中国提出“双碳”目标^[1],力保“绿水青山”,力求兼顾经济发展和绿色转型,为国土空间规划提供了新的视角。为满足人类需求、利用土地资源、协调土地矛盾、兼顾绿色生态,探讨如何科学合理进行国土空间规划对区域可持续发展尤为重要^[2]。为此,与时俱进整合土地功能概念,借鉴功能分区思想,注重经济、社会、生态三方效益和谐的“三生”空间(生产、生活、生态空间)理念应运而生并被关注^[3]。中国共产党的十九大报告提出“坚定走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路”,这坚定了学者们基于“三生”空间理念,实现土地利用类型“提质增效”和“转型升级”,也为达成“双碳”目标提供独到的空间治理思路。

国内外学者已针对“三生”空间和“三生”功能(生产、生态、生活功能)开展了大量研究。现有研究主要集中在两方面:①涵盖具体分类^[4-5]、识别方法^[6-7]、功能测度^[8-9]、空间分布等^[10-11]国土空间土地利用背景下的“三生”空间研究,如李广东等^[12]通过“三生”空间功能定量测度法,识别杭州市余杭区“三生”空间,并完成集聚分析;刘继来等^[13]依据现有土地利用类别国家标准,构建“三生”空间分类与评价体系,分析中国“三生”空间变化趋势;②结合“三生”空间理念扩宽其他人文地理学问题的研究思路,比如基于“三生”空间的城市化^[14-15]、生态环境效益优化^[16-17]、人居环境分析^[18-19]、乡村振兴路径^[20-21]、地区综合承载力^[22-23]测算等方面的研究。在“双碳”目标下,国土空间规划应关注与土地利用功能相关的碳排放效应,“三生”功能作为土地利用功能的具体体现,是探究土地利用碳排放效应的重要切入点,但目前有关“三生”功能与碳排放关系的研究尚不多见。

在碳排放方面,现阶段“双碳”相关研究大多数选取中国或其各省市为基本单元,主要利用地区、产业或企业统计数据^[24-25],结合环境影响评估模型^[26]、Kaya 恒等式模型^[27]、一般均衡计算模型等^[28]计量模型,进行碳达峰时期的预测、探究碳排放量的影响因

素等相关研究^[29]。现有研究在尺度上囿于自然和人文要素的复杂性,以县域为基本单元的指标体系难以具备客观性和可比性,且指标多有缺失,时效性和完整性堪忧;在对象上往往将碳排放仅作为人类活动或者自然代谢现象,未兼顾其自然社会双重属性,忽视空间载体特征,缺失区域减排路径。可见,以区县为单位,以“三生”空间为“减排”新策源,以区域通道为“减排”新路径,研究辽宁省“三生”空间和碳排放量分布特征,对辽宁省优化国土空间、美化人居环境有现实意义。因此,本研究基于“三生”空间视角,在土地利用多功能的基础上分类识别辽宁省国土“三生”功能,以能耗法核算碳排放量,探索县域“三生”功能与碳排放量空间关系及其时空分异性,揭示“三生”功能时空演变的碳排放效应,以期基于“三生”空间和碳排放视角的辽宁省国土空间优化提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

辽宁省地处中国东北地区南部,西南毗连河北,西北接壤内蒙古,东北毗邻吉林,东南与朝鲜隔鸭绿江相望。辽宁省地貌呈“马蹄”形,地势呈东西高、中部低,山地丘陵位列东西,中部平原向南倾斜,辽东半岛为黄渤海分界线。辽宁省境内主要为温带季风气候,雨量不均,东湿西干。根据第七次全国人口普查,2020 年辽宁省的常住人口 4.26×10^7 人。辽宁产业基础雄厚,是中国重要的工业基地,工业门类齐全、体系完备,其中,以数控机床、工业机器人、输变电设备、冶金矿山、石化通用装备、通用航空、汽车、造船为代表的装备制造业,以石油化工、钢铁为代表的原材料工业,在全国占有重要位置。《辽宁省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》提出“广泛形成绿色生产生活方式,生态环境根本好转,基本建成人与自然和谐共生的美丽辽宁”实现全面全方位振兴。

1.2 数据来源与预处理

本文所用数据包括 2005, 2013, 2020 年土地利用数据, 各市区能源消费数据和人口数据。其中: 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 (<http://www.resdc.cn/>), 土地利用类型有耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类和 25 个二级类, 主要用于国土“三生”功能的分类识别; 2005, 2013, 2020 年建成区碳排放能源消耗数据来源于《中国能源统计年鉴》; 各县人口数据来源于各地区《人口普查公报》《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》, 该类数据主要用于县域碳排放量的核算。

2 研究方法

2.1 “三生”功能评价赋值法

土地利用方式评定应兼顾综合性和突出性, 权衡不同土地利用方式间的各类土地功能, 为科学分类土地利用方式, 需明确土地主导功能, “三生”空间的划分基于生产、生活、生态功能与土地利用类型主导功能的内在联系。参考刘继来等^[13]、张红旗等^[30]的“三生”空间划定方法, 基于土地利用类型判别承载三大产业活动的生产功能、满足居民生活多方需求的生活功能、具有生态价值或需重点保护的生态功能。并借鉴金星等^[31]构建“三生”空间评价体系, 依据辽宁省现状, 将生产功能、生活功能、生态功能划分为 4 种层级, 分别对应 5, 3, 1, 0 这 4 类数字 (见表 1), 进一步依据本研究赋值特征, 将生产、生活、生态功能 1: 1: 0.5 的方式相加计算“三生”功能, 将其划分为 7 类 (表 2)。

2.2 排放因子法

排放因子法是计算碳排放量的一种较为常用方法^[32], 排放因子即某一能源或土地利用类型对应的碳排放系数, 该系数是经过实证研究的单位能源或土地一般碳排放量。一般认为碳源主要为耕地和建设用地, 其余土地利用方式为碳汇。从宏观视角, 除建设用地外的其他地类碳排放因子具有普适性和可参考性, 因此, 在利用排放因子法计算某一地区碳排放量时, 耕地、林地、草地、水域和未利用土地采用各自固定的排放因子 (表 3), 为直接排放因子法, 而建设用地则需依据各类能源排放系数先推算各类能源碳排放量, 后汇总为地区碳排放量 (表 4), 为间接排放因子法。本研究综合直接和间接排放因子的选择主要参考孙赫等^[32]综合判定方法, 并且结合辽宁省未利用土地以沼泽为主的特点, 具体方法如下所述。

2.2.1 直接排放因子法, 计算公式为:

$$E_i = T_i \cdot \delta_i \quad (1)$$

式中: E 为碳排放量; i 为土地利用类型, 包括耕地、林地、草地、水域和未利用土地; T_i 为 i 地类面积; δ_i 为 i 地类碳排放系数。

表 1 土地利用类型“三生”功能评定

Table 1 Evaluation of production-living-ecological function of land use types

一级类	二级类	生产功能	生活功能	生态功能
1 耕地	11 水田	3	0	3
	12 旱地	3	0	3
2 林地	21 有林地	0	0	5
	22 灌木林	0	0	5
	23 疏林地	0	0	5
	24 其他林地	0	0	5
3 草地	31 高覆盖度草地	0	0	5
	32 中覆盖度草地	0	0	5
	33 低覆盖度草地	0	0	5
4 水域	41 河渠	0	0	1
	42 湖泊	0	0	5
	43 水库坑塘	1	0	1
	44 永久性冰川雪地	0	0	5
	45 滩涂	1	0	5
	46 滩地	0	0	5
5 城乡、工矿、居民用地	51 城镇用地	0	3	0
	52 农村居民点	0	3	0
	53 其他建设用地	3	1	0
6 未利用土地	61 沙地	0	0	5
	62 戈壁	0	0	5
	63 盐碱地	0	0	5
	64 沼泽地	0	0	5
	65 裸土地	0	0	5
	66 裸岩石质地	0	0	5
	67 其他	0	0	5

表 2 “三生”功能地类

Table 2 Functional land categories of production-living-ecological

地类	“三生”功能	生产功能	生活功能	生态功能
1	4.5	3	0	3
2	4.0	3	1	0
3	3.5	1	0	5
4	3.0	0	3	0
5	2.5	0	0	5
6	1.5	1	0	1
7	0.5	0	0	1

2.2.2 间接排放因子法, 计算公式为:

$$E_t = \sum E_{ti} = \sum E_{ni} \cdot \theta_i \cdot f_i \quad (2)$$

式中: E_t 为建设用地碳排放量; t 为建设用地; E_{ni} 为建设用地消耗的 i 类能源; i 为各类能源; n 为能源

量; E_{ni} 为 i 类能源数量; θ_i 为 i 类能源转化为标准煤的系数; f_i 为 i 类能源标准煤化后的碳排放系数。

表 3 土地利用类型对应的碳排放系数

Table 3 Carbon emission coefficients corresponding to land use types t/hm²

地类	耕地	林地	草地	水域	未利用土地
碳排放系数	0.422	-0.578	-0.021	-0.252	-0.021

表 4 各类能源标准煤化和碳排放系数

Table 4 Coal conversion and carbon emission coefficients for various energy standards

能源类型	标准煤换算系数	碳排放系数/ (kg · kg ⁻¹)
原煤/10 ⁴ t	0.714 3 kg/kg	0.755 9
焦炭消费量/10 ⁴ t	0.971 4 kg/kg	0.855 0
石油/10 ⁴ t	1.142 9 kg/kg	0.585 7
汽油消费量/10 ⁴ t	1.147 1 kg/kg	0.553 8
煤油消费量/10 ⁴ t	1.147 1 kg/kg	0.571 4
柴油消费量/10 ⁴ t	1.571 4 kg/kg	0.591 2
燃料油消费量/10 ⁴ t	1.428 6 kg/kg	0.618 5
液化石油气消费量/10 ⁴ t	1.714 3 kg/kg	0.504 2
天然气消费量/10 ⁸ m ³	1.214 3 kg/m ³	0.448 3
电力消费量/(10 ⁸ kW · h)	0.122 9 kg/(kW · h)	2.525 5

2.3 地理加权回归分析

地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 是 GIS 中一种空间关系建模工具, 通过构建数据集中各要素的独立方程, 探测各目标要素带宽范围内要素因变量和解释变量相关关系, 带宽形状和范围依需求而定, GWR 适用于大型空间数据集。能反映研究区整体情况, 兼顾研究对象的局部空间特征, 能准确地反映变量间的空间关系。GWR 模型计算公式为:

$$y_i = \beta_0(p_i, q_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(p_i, q_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (3)$$

式中: y_i 为碳排放量; $\beta_0(p_i, q_i)$ 为截距; x_{ik} 为样本 i 的第 k 个“三生”功能; (p_i, q_i) 为 i 的空间坐标; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为样本 i 的第 k 个“三生”功能系数; ϵ_i ($i = 1, 2, 3 \dots k$) 为随机扰动项。

分别探测“三生”功能碳排放的空间关系, 可从观测所得 y 值中减去拟合 y 值计算残差值, 对残差进行标准化, 标准化残差的平均值为零, 标准差为 1。标准残差值越接近 0 说明 GWR 模型预测值与实际值越接近, 表明目标变量之间的回归关系越显著。GWR 模型结果共有 7 种区间, 4 类范围, 即回归关系最强的 $[-0.5, 0.5]$, 较强的 $[-1.5, -0.5)$ 和 $(0.5, 1.5]$, 一般的 $[-2.5, -1.5)$ 和 $(1.5, 2.5]$ 和较弱的 $(-\infty, -2.5)$ 和 $(2.5, +\infty)$ 。GWR 模型标准差值反映了“三生”功能与碳排放量相关性强弱, 为进一步探

究二者间空间关系类型, 进一步计算“三生”功能与碳排放量间的回归系数, 回归系数为正, 说明“三生”功能与碳排放量为正相关, 反之为负相关; 回归系数越接近 0, 说明影响越弱, 反之越强。

3 结果与分析

3.1 辽宁省“三生”功能时空分异

3.1.1 2005, 2013, 2020 年辽宁省生产功能空间分布

2005—2020 年辽宁省生产功能空间格局总体变化不大 (图 1), 大致分为东、中、西 3 个区域。中部十分集中, 东西呈散点状, 在滨海地区更密集。生产功能与地形息息相关, 平原地区生产功能较高。生产功能主要在城乡聚落周边减少、沿海地区增加, 2005—2013 年变化较 2013—2020 年明显。总体来看, 2005—2020 年辽宁省生产功能比较稳定, 在保持耕地优秀生产功能的同时, 也发掘了部分沿海地区滩涂经济价值。

3.1.2 2005, 2013, 2020 年辽宁省生活功能空间分布

2005—2020 年辽宁省生活空间明显扩张 (图 1), 总体空间分布为极点分散式, 在全省范围内分散, 存在几个集聚点, 均位于市级中心, 在阜新市、沈阳市、营口市、大连市中心聚集最明显。此外, 部分沿海地区有明显波动, 如 2013 年辽河入海口处生产功能较低的地区明显减少, 至 2020 年又大量增加。生活功能集聚与辽宁省主要城镇分布基本一致, 反映出随着经济发展, 在人口“推拉”作用下, 城市化水平不断提升, 农村人口向城市转移。

3.1.3 2005, 2013, 2020 年辽宁省生态功能空间分布

2005—2020 年辽宁省生态空间格局总体稳定 (图 1)。相较于 2005 年, 生态功能为 1 的区域在海岸线附近自 2013 年起有明显扩张。生态功能值为 3 的区域受地形影响明显, 分东、中、西 3 个区域, 在辽河平原和沿海地区十分集中, 东西部分散。生态功能值为 5 的区域广泛分布于西部内蒙古高原过渡区和东部长白山余脉, 少量分布于中部平原以及沿海地区, 辽宁省自然资源本底优势明显, 滨海地理位置、多山地地形条件、适宜气候条件造就了优良的生态空间。

3.1.4 2005, 2013, 2020 年辽宁省“三生”功能空间分布

2005 年辽宁省“三生”功能值从 0 到 6 共有 7 类 (图 1), 从规模上看, 以一类 (生产生态空间) 和 5 类地区 (生态空间) 为主。对照表 2, 5 类地区包括林地、草地和未利用土地, 其中未利用土地在全省占比不足百分之一; 一类地区以耕地为主。空间差异主要体现在山地与平原地区、沿海与内地地区, 山地生态功能强、平原生产功能好, 沿海地区生产功能强于内地。

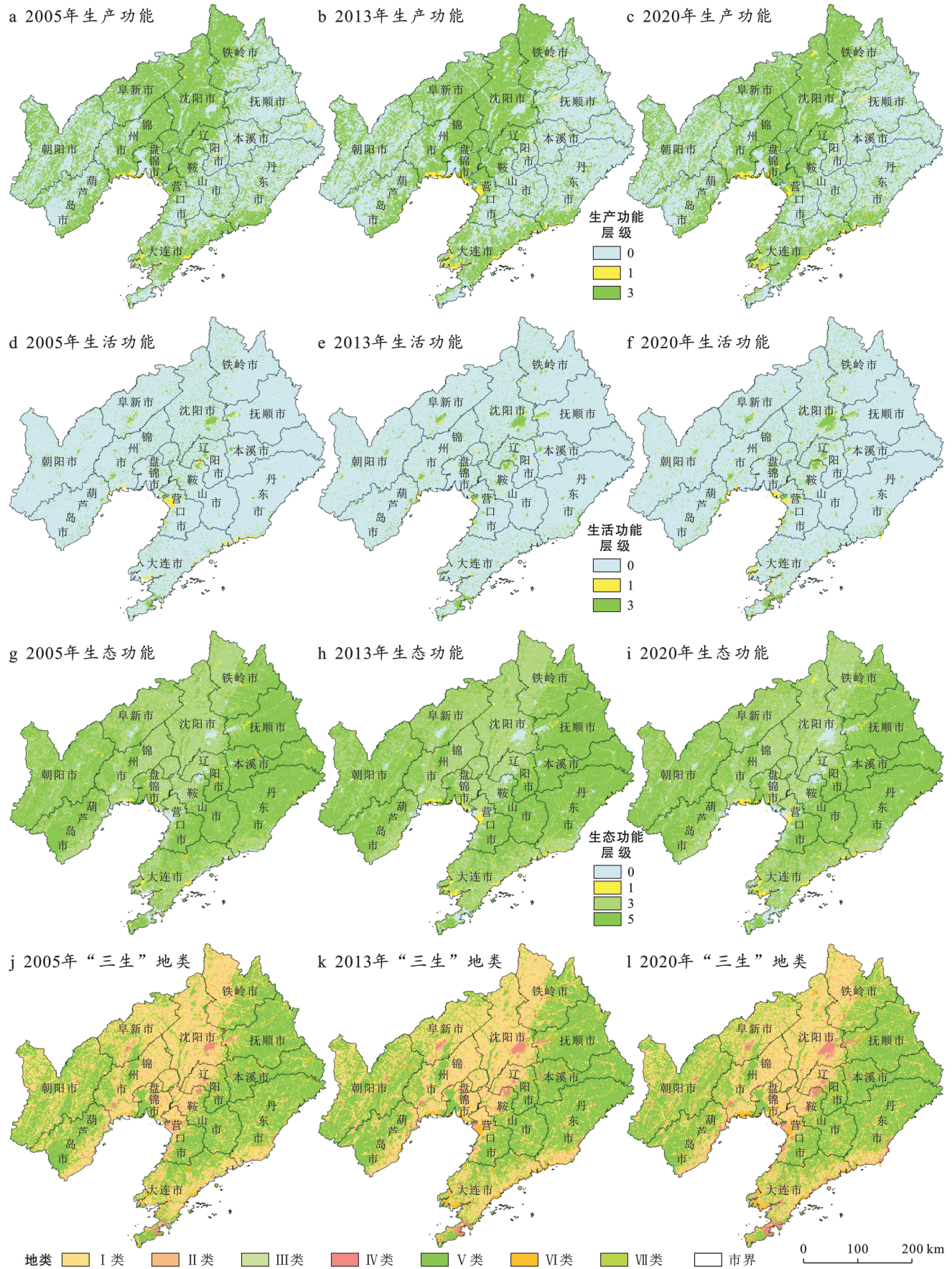


图 1 2005—2020 年辽宁省“三生”功能评价空间分布

Fig.1 Spatial distribution of production-living-ecological function evaluation in Liaoning Province from 2005 to 2020

2013, 2020 年辽宁省“三生”功能总体特征与 2005 年类似(图 1), 以 I 类和 V 类地区为主, I 类地区占比有所下降, V 类地区变化不大, IV 类地区(生活空间)明显扩张。沿海部分区域出现生态功能下降的情况, 究其原因, 在辽宁省提出构建以沈阳和大连为核心的“双核一圈一带两区”区域发展格局后, 以沈阳市和大连市为代表的城乡社区在原有基础上发展迅速, 城市化水平快速提高, 城市边界不断扩张, 居民生活水平提高的同时对环境造成了压力; 海洋经济愈发得到重视, 对海岸带进一步开发利用导致其生态空间被挤占。

3.2 辽宁省县域碳排放量时空分异

如图 2a 所示, 2005 年辽宁省碳排放量南部高于北部, 西部大于东部。一些地级市范围内碳排放量差异显著, 如: 抚顺市抚顺县周边地区明显高于抚顺市其他地区, 铁岭市昌图县和开原市明显高于铁岭其他地区。2005 年辽宁省所有区县的碳排放平均值为 9.90×10^5 t, 有一半的区县碳排放量低于平均水平, 排放量最少的为阜新市清河门区和本溪市南芬区, 分别为 1.80×10^5 , 1.70×10^5 t; 碳排放量突破 2.00×10^6 t 的有 5 个区县, 最高的为鞍山市海城市 and 铁岭昌图县, 分别为 2.74×10^6 , 2.61×10^6 t。

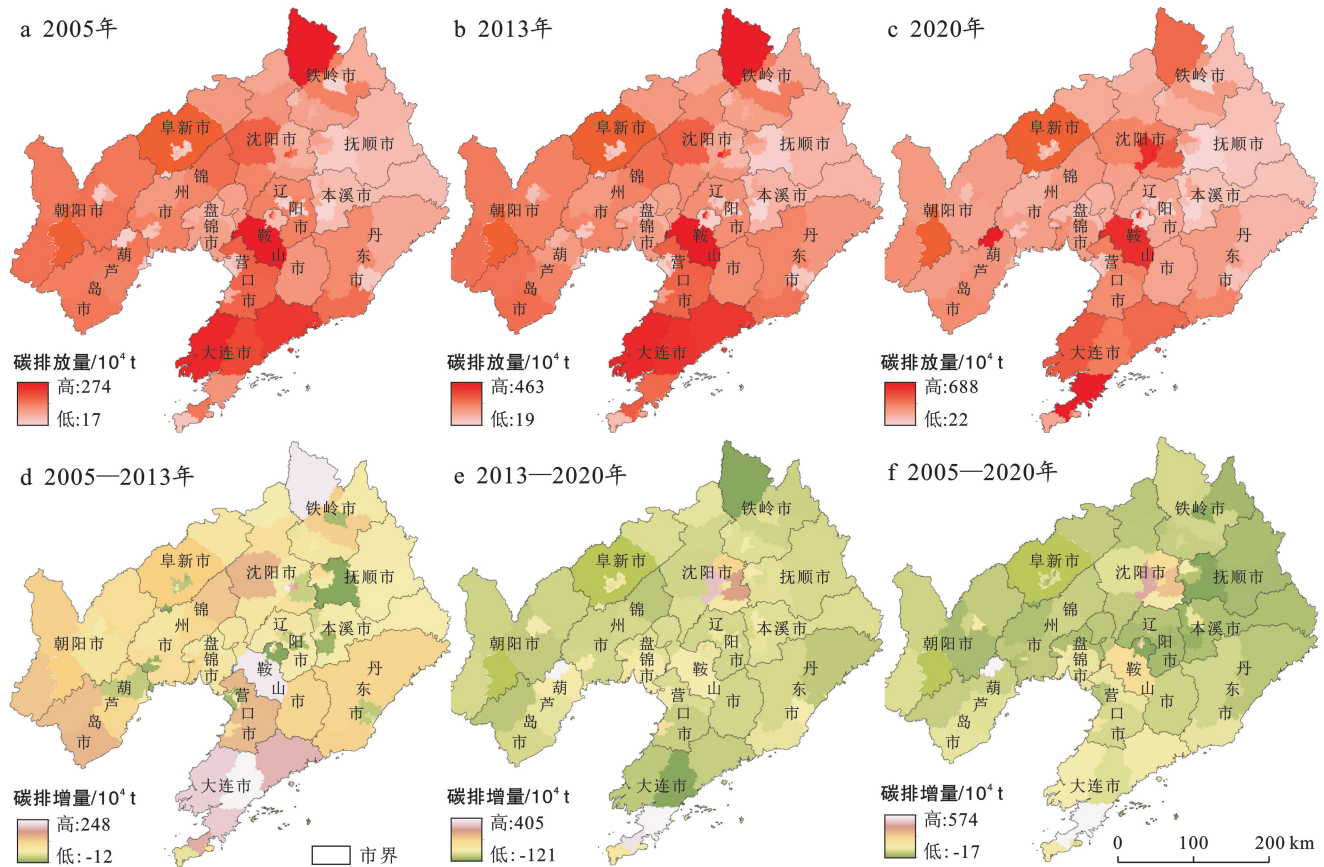


图 2 2005—2020 年辽宁省县区碳排放量及其变化空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon emissions of Liaoning Province from 2005 to 2020

如图 2b 所示, 2013 年辽宁省碳排放量仍是南部高于北部, 地区差异扩大, 碳排放平均值为 1.76×10^6 t, 相较于 2005 年大幅度上升, 碳源能力大幅加强, 有一半区县碳排放量低于平均水平, 排放量最少的为阜新市清河门区 (1.90×10^5 t); 碳排放量突破 3.00×10^6 t 的有 11 个区县, 最高的为鞍山市的海城市 and 铁岭市昌图县 (超过 4.50×10^6 t)。

如图 2c 所示, 2020 年辽宁省县区碳排放量空间差异较 2005 年更为显著, 以沈阳为中心的中部地区和大连为龙头的沿海地区明显高于其他地区。2020 年县区

碳排放量平均值为 1.88×10^6 t, 相较于 2005 年增加了近一倍 (2005 年碳排放量平均值 9.90×10^5 t), 相较于 2013 年增加了不足 10%。碳排放上升缓慢, 其中一半多地区碳排放量小于平均值, 碳排放量最低的本溪市南芬区和阜新市清河门区 (2.20×10^5 t), 此类地区境域面积小, 境内以山地丘陵为主, 森林覆盖率高, 人口不足 1.00×10^5 人, 故碳源能力较弱; 碳排放量突破 3.00×10^6 t 的有 14 个区县, 碳排放量最大的为大连市金州区和甘井子区, 大于 6.80×10^6 t, 高于 2005 年的 4 倍, 且高于 2013 年的 2 倍, 近些年来, 大

连市发展重心北移,生产生活空间的扩张挤占生态空间,碳源能力明显增强。

2005—2013—2020 年辽宁省县区碳排放量先后平均增加 7.60×10^5 , 1.20×10^5 t(图 2),约 6 成县区碳排放新增值小于平均值,各区县碳排放量变化的空间差异较大。2013 年仅有鞍山市千山区一地为负增长,碳排放量减少 1.20×10^5 t,分析原因在于千山区 2005 年有 2.60×10^5 左右常住人口,2013 年人口下降至 1.00×10^5 人左右,人口的骤降导致建成区碳排放量随之下降;至 2020 年辽宁省有 54 个县区碳排放量负增加,有 7 个县区碳排放量增加超过 1.00×10^6 t;在 15 a 间平均增加了 8.80×10^5 t,增加量最多的为大连市金州区和甘井子区(超过 5.00×10^6 t),负增加的仅有鞍山市千山区和抚顺市抚顺县。中部沈阳和南部大连其他县区的碳排放增量明显高于其他地区,分析原因在于在辽宁省“双核”发展战略下,以沈阳为中心的中部经济圈和以大连为龙头的沿海经济带是全省碳排放量增加的主要贡献者;其他地区在极化作用下,面对区域竞争力下降、人口流失、产业转变等难题,发展速度较慢,致使碳排放区域差异不断扩大。

3.3 辽宁省“三生”功能时空演变的碳排放效应

为更好的结合社会经济发展因素的影响,以县域为基本单元,采用 GWR 模型揭示辽宁省“三生”功能与碳排放的空间关系,从而进一步探讨“三生”功能演变的碳排放效应,其中县域碳排放量如图 2,县域“三生”功能值为对图 1 中的结果作区域统计得到。GWR 运行结果显示“三生”功能与碳排放量标准化残差值主要分布在(-0.5,0.5)之间,表明二者间相关性总体较强。相关性较弱地区主要为城市中心及周边地区。分析原因在于:大部分地区在辽宁省区域发展模式 and 分工比较单一,属于中心—外围结构的外围地区,根植性强导致区域发展较慢,区内产业结构和布局单一而稳定,人口数量无明显扩张甚至有不同程度的流失,“三生”功能与碳排放量的关系较为单一;核心城市中心地区经济增速高、极化作用强、区域发展基本脱离农业,二、三产业比重大,支柱产业集中在工业,对人口的吸引力强,城市化水平高,居民生活方式多元化,市场需求广大,在供需端都对碳排放量有重要影响,碳排放量影响因素较为复杂。

分别计算辽宁省 2005—2020 年“三生”功能与碳排放量的 GWR 模型回归系数(见图 3)。2005—2020 年辽宁省“三生”功能与碳排放量的空间关系具有显著的时空异质性。从数量特征来看:2005 年辽宁省

县域生产、生活、生态与碳排放量回归系数为正的的区域分别占比 61.2%,40.9%,39.2%;2013 年分别占比为 33.6%,49.5%,66.4%;2020 年分别占比 57.8%,47.2%,49.7%。从空间特征来看,生产功能与碳排放量回归系数为正的的区域在 2005 年主要分布于中西部与东北部,在 2013 年分布较为分散但高值区在中部辽阳、鞍山市聚集,在 2020 年仍分散但高值区位于大连市;生活功能与碳排放量回归系数为正的的区域在 2005 年主要集中于沈阳市及其周边的铁岭、抚顺和本溪市,在 2013 年正值聚集区向南移动,在 2020 年正值聚集区大幅扩张;生态功能与碳排放量回归系数为正的的区域在 2005 年主要聚集于辽东湾北部沿海城市,在 2013 年向周边分散且高值区南移至辽东湾东部沿海城市,在 2020 年向非沿海城市扩散。结合前文分析,2005—2020 年,辽宁省处于“振兴东北”战略实施后的转型发展期,城市扩张的同时,除沈阳和大连外的其他城市人口均有不同程度的流失,土地和能源集约作用下降,生产生活低碳绿色转型受阻,导致生产和生活功能的提升导致碳排放量的新增。部分地区生态功能与碳排放呈现正相关,以本溪市为例,一方面符合生态功能和碳排放量双双上升的客观现实,一方面佐证环境库涅茨曲线上期特点,在该时期生态功能的提升能延缓环境恶化速度,但是并未扭转碳排放量上升趋势,表明辽宁省生态功能仍具有很大的提升空间。

4 结论

通过“三生”功能评价和排放因子法,分类识别辽宁省国土“三生”功能、核算各县域单元碳排放量,揭示 2005—2020 年“三生”功能和碳排放时空分异特征,通过对国土“三生”功能与碳排放量空间关系的探索,丰富了土地利用变化的碳排放效应研究,对“双碳”背景下的辽宁省国土空间优化有一定的参考价值,基于以上研究结果,有以下结论:

(1) 2005—2020 年辽宁省“三生”功能受自然本底、城市扩张、环境政策等共同影响,空间差异显著,生产功能在平原地区较高,生活功能在部分城市中心较高,生态功能在大部分偏远县市较高。

(2) 2005—2020 年辽宁省各县域碳排放量发生了巨大变化,且与“三生”功能变化有较强的相关性,除鞍山市千山区因人口大幅下降致碳排放量有所下降外,大部分地区碳排放受生产功能提高和生活空间扩张的影响而上升。

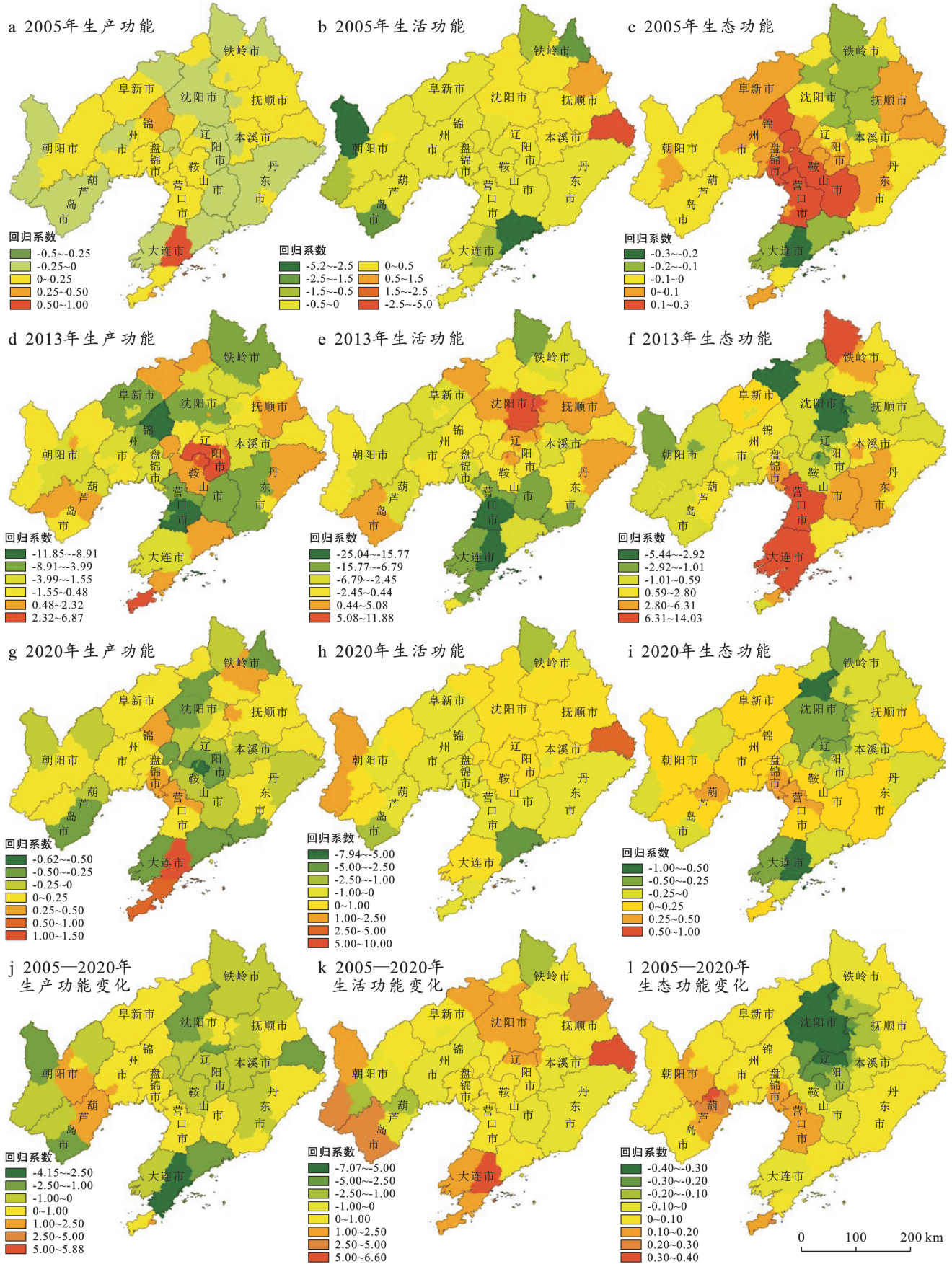


图 3 2005—2020 年辽宁省“生产—生活—生态”功能与碳排放量 GWR 模型回归系数

Fig.3 GWR Results of production-living-ecological function and carbon emissions in Liaoning Province from 2005 to 2020

(3) 辽宁省“三生”功能与碳排放量空间分布特征类似,均于少数城市中心集聚;县域“三生”功能与碳排放量相关性很强,受自然条件、资源禀赋、区位特征和宏观调控等因素共同影响具有较强的时空异质性。

5 讨论

研究表明辽宁省“三生”功能与碳排放量空间布局及数量变化的相关性总体较强,但空间差异明显且影响因素复杂。

(1) 应关注国土“三生”空间碳排放效应,因地制宜推动“固碳减排”措施:大力开发生产空间低碳环保新技术,提高资源利用率和污染物处理率;防止生活功能空间过度城市化,提高核心地区资源利用率和普及率;深入山地丘陵、湖河湿地、海岸带等生态空间生态保护和修复,综合治理生态区内污染、侵占、退化等问题。

(2) 应针对地方区位条件,在“双核一圈一带两区”区域发展格局下,明确各自“双碳”目标定位,突破城市壁垒、共创经济产业、共享社会服务、共治生态环境,实现全域互补协调,实现全域碳减排。

(3) 受制于县域单元相关数据的可获得性,本文采取的“三生功能”赋值法和直接与间接相结合的碳排放因子法能在一定程度解决数据不足的问题,但是针对局部空间,数据精度需进一步提升,因此后续研究应注重不同尺度下的数据获取与处理,力求更加科学准确地表征“三生”功能与碳排放特征。另外,研究发现辽宁省“三生”功能与碳排放量空间关系的时空异质性较为复杂,其背后的影响因素值得进一步探索,将是下一步研究的重点方向。

[参 考 文 献]

- [1] Deng Lingfeng. Current situation and reflections of environmental accounting information disclosure in China's iron and steel industry under the background of "double carbon" [J]. *Pacific International Journal*, 2022, 5(4): 119-131.
- [2] Zeng Qinghua, He Lingyun. Study on the synergistic effect of air pollution prevention and carbon emission reduction in the context of "dual carbon": Evidence from China's transport sector [J]. *Energy Policy*, 2023, 173: 113370.
- [3] Zhou Zhijie, Liu Yunlong, Du Jianjian. Analysis on the constraint mechanism of transportation carbon emissions in the Pearl River Deltabased on 'Dual carbon' goals [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2022, 10(1): 854-864.
- [4] Guo Qingran, Wu Zhuo, Jahanger A, et al. The spatial impact of digital economy on energy intensity in China in the context of double carbon to achieve the sustainable development goals [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(13): 35528-35544.
- [5] Du Wenxing, Wang Yuxia, Qian Dingyi, et al. Process and eco-environment impact of land use function transition under the perspective of production-living-ecological spaces-case of Haikou City, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(24): 16902.
- [6] Hu Zhiqiang, Wu Zhilei, Yuan Xiaomin, et al. Spatial-temporal evolution of production-living-ecological space and layout optimization strategy in eco-sensitive areas: A case study of typical area on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(33): 79807-79820.
- [7] Cui Xinghua, Xu Ning, Chen Wanxu, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of the coupling coordination degree of production-living-ecological space in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 10370.
- [8] Xiao Pengnan, Xu Jie, Zhao Chong. Conflict identification and zoning optimization of production-living-ecological space [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(13): 7990.
- [9] Zhang Zuo, Li Jiaming. Spatial suitability and multi-scenarios for land use: Simulation and policy insights from the production-living-ecological perspective [J]. *Land Use Policy*, 2022, 119: 106219.
- [10] 徐文飞. 皖南丘陵地区乡村“三生”空间的形态布局与功能耦合研究:以安徽省桐城市青草镇为例[D]. 湖北武汉:华中科技大学, 2020.
Xu Wenfei. Research on the spatial form layout and functional coupling of the rural "production-living-ecological" space in the hilly areas of Southern Anhui: Taking Qingcao Town, Tongcheng City, Anhui Province as an example [D]. Wuhan Hubei: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [11] 王庆,王承武.大数据视角下的城市“三生”空间识别及分布特征研究:以乌鲁木齐市中心城区为例[J].资源开发与市场, 2022, 38(2): 142-147.
Wang Qing, Wang Chengwu. Research on spatial identification and distribution characteristics of "production-living-ecological" in cities from the perspective of big data: A case study of Urumqi City [J]. *Resource Development & Market*, 2022, 38(2): 142-147.
- [12] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报, 2016, 71(1): 49-65.

- Li Guangdong, Fang Chuanglin. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1):49-65.
- [13] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J]. *地理学报*, 2017, 72(7):1290-1304.
- Liu Jilai, Liu Yansui, Li Yurui. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of “production-living-ecological” spaces in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7):1290-1304.
- [14] 梁晨, 李建平, 李俊杰. 基于“三生”功能的我国农村人居环境质量与经济发展协调度评价与优化[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(10):19-30.
- Liang Chen, Li Jianping, Li Junjie. The evaluation of the quality of rural human settlements and its coordination with regional economy in China based on the production-living-ecological theory [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(10):19-30.
- [15] 张春荣. 兰州市三生空间共生现状与优化研究[D]. 甘肃兰州: 西北师范大学, 2021.
- Zhang Chunrong. Research on symbiosis status and optimization of eco-ecological space in Lanzhou [D]. Lanzhou Gansu: Northwest Normal University, 2001.
- [16] 刘顺鑫, 黄云. “三生空间”视角下万州区景观生态安全评价及其耦合特征分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6):308-316.
- Liu Shunxin Huang Yun. Evaluation and coupling coordination analysis of landscape ecological security of Wanzhou District from the perspective of “production-life-ecological space” [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6):308-316.
- [17] 张馨雨. 三生空间竞争下生态红线实施成效评估及提升路径研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- Zhang Xinyu. Evaluation of implementation effect and improvement path of ecological red line under production-life-ecological space competition [D]. Tianjin: Tiangong University, 2021.
- [18] 张永蕾, 栾乔林, 熊昌盛, 等. 基于多源空间数据的“三生”空间异质性评价与分区划定[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10):214-223.
- Zhang Yonglei, Luan Qiaolin, Xiong Changsheng, et al. Spatial heterogeneity evaluation and zoning of production-living-ecological space based on multi-source spatial data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(10):214-223.
- [19] 胡兴定. 基于人居环境的采矿复垦区“三生”空间优化研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- Hu Xingding. Optimization for the production, living and ecological space based on human settlements in reclamation area of coal mine [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [20] 沈潇. 山地乡村“三生空间”发展水平及优化策略研究: 以大悟县宜化店镇为例[D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2017.
- Shen Xiao. Research on the “production-life-ecology space” development level and optimization strategy in mountainous villages: A case study of Xuanhuadian Town, Dawu County [D]. Wuhan Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [21] 刘鹏. 基于“三生”协调的农地整治效应评价[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- Liu Peng. Evaluation of farmland consolidation effect based on production, living and space [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [22] 张琴琴, 瓦哈甫·哈力克, 麦尔哈巴·麦提尼亚孜, 等. 基于SD模型的吐鲁番市生态—生产—生活承载力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4):54-60.
- Zhang Qinqin, Wahap Halik, Marhaba Matniyaz, et al. Evolution trends of the ecological-economic-social capacities based on SD model in Turpan city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(4):54-60.
- [23] 赵瑞, 刘学敏. 京津冀都市圈“三生”空间时空格局演变及其驱动力研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(4):201-208.
- Zhao Rui, Liu Xuemin. Analysis on spatial-temporal changes and driving forces of “production-living-ecological” spaces in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area [J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(4):201-208.
- [24] 涂玮, 刘钦普. 长江经济带旅游碳排放与旅游碳承载力关系研究[J]. *生态科学*, 2023, 42(2):219-227.
- Tu Wei, Liu Qinpu. Study on the relationship between tourism carbon emission and tourism carbon carrying capacity in the Yangtze River economic belt, China [J]. *Ecological Science*, 2023, 42(2):219-227.
- [25] 陈炜, 殷田园, 李红兵. 1997—2015年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(2):37-44.
- Chen Wei, Yin Tianyuan, Li Hongbing. Spatiotemporal distribution characteristics of carbon emission from plant industry and the relationship with agriculture development in China from 1997 to 2015 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2):37-44.
- [26] 刘健强, 马晓钰. 人口老龄化、产业结构升级与碳排放: 基于STIRPAT模型的空间计量分析[J]. *金融与经济*, 2021(7):54-62.
- Liu Jianqiang, Ma Xiaoyu. Population aging, industrial

- structure upgrading and carbon emissions: Spatial measurement analysis based on STIRPAT model [J]. *Finance and Economy*, 2021(7):54-62.
- [27] 胡振, 龚薛, 刘华. 基于 BP 模型的西部城市家庭消费碳排放预测研究: 以西安市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(7):82-89.
Hu Zhen, Gong Xue, Liu Hua. Prediction of household consumption carbon emission in western cities based on BP model: case of Xi'an City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(7):82-89.
- [28] 王长建, 汪菲, 张虹鸥. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素: 基于扩展的 Kaya 恒等式[J]. *生态学报*, 2016, 36(8):2151-2163.
Wang Changjian, Wang Fei, Zhang Hongou. The process of energy-related carbon emissions and influencing mechanism research in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8):2151-2163.
- [29] 王瑛, 何艳芬. 西部地区中心城市碳排放与经济发展关系研究: 以西安市为例[J]. *生态科学*, 2019, 38(4):217-224.
Wang Ying, He Yanfen. A study on the relationship between carbon emissions and economic development in the central region of Western China: A case of Xi'an City [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(4):217-224.
- [30] 张红旗, 许尔琪, 朱会义. 中国“三生用地”分类及其空间格局[J]. *资源科学*, 2015, 37(7):1332-1338.
Zhang Hongqi, Xu Erqi, Zhu Huiyi. An ecological-living-industrial land classification system and its spatial distribution in China [J]. *Resources Science*, 2015, 37(7):1332-1338.
- [31] 金星星, 陆玉麒, 林金煌, 等. 闽三角城市群生产—生活—生态时空格局演化与功能测度[J]. *生态学报*, 2018, 38(12):4286-4295.
Jin Xingxing, Lu Yuqi, Lin Jinhuang, et al. Research on the evolution of spatiotemporal patterns of production-living-ecological space in an urban agglomeration in the Fujian Delta region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4286-4295.
- [32] 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.
- (上接第 409 页)
- [29] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(1):353-360.
Yuan Yinghong, Li Huixin, Huang Qianru, et al. Effects of long-term fertilization on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1):353-360.
- [30] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455:123-130.
- [31] Rodríguez Rodríguez A, Guerra J A, Gorrín S P, et al. Aggregates stability and water erosion in Andosols of the Canary Islands [J]. *Land Degradation & Development*, 2002, 13(6):515-523.
- [32] Wang Shaoqiang, Fan Jiangwen, Song Minghua, et al. Patterns of SOC and soil ¹³C and their relations to climatic factors and soil characteristics on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2):243-255.
- [33] Campbell J E, Fox J F, Davis C M, et al. Carbon and nitrogen isotopic measurements from southern Appalachian soils: assessing soil carbon sequestration under climate and land-use variation [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(6):439-448.
- [34] 胡伟. 我国主要侵蚀土壤溅蚀和片蚀特征与机理研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
Hu Wei. Characteristics and Mechanisms of Splash Erosion and Sheet Erosion on Hillslope of Main Typical Eroded Soils in China [D]. Beijing: Research Center for Eco-environments and Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, 2016.