

碳中和目标下的广西边境地区“三生”空间 转型及碳储量效应

韦绍音¹, 陆汝成^{1,2}, 张利国¹, 林晓楠¹, 陈雨欣¹, 杨新¹

(1. 南宁师范大学 自然资源与测绘学院, 广西 南宁 530100;

2. 南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530100)

摘要: [目的] 系统分析“三生”空间转型下的碳储量效应, 以期优化空间布局与提升边区生态系统固碳能力, 助推国家实现“碳中和”的战略目标。[方法] 采用“三生”空间动态度、“三生”空间转移矩阵刻画边境“三生”空间分布格局和转型特征, 借助 InVEST 模型和“三生”空间碳储量贡献率揭示边境 1990—2020 的碳储量时空分异及“三生”空间转型对碳储量的影响。[结果] ① 1990—2020 年边境地区以绿被生态空间占绝对主体, 农业生产空间和水域生态空间为辅的组合特点, 分布上呈现“南北两翼高, 中部低”特征。② 研究期内边境地区“三生”空间转型呈现出初期稳定、中期波动、后期剧烈的发展态势, 除水域生态空间外, 其余空间均于 2010—2020 年动态度变化最为显著。③ 1990—2020 年, 边境地区碳储量整体呈现逐期持续递减, 研究初期与中期变动幅度不大, 末期碳储量深刻变化; 40 a 间碳储量共计损失 4.13×10^6 t, 绿被生态空间与农业生产空间的相互转换主导着广西边境地区碳储量的变化。[结论] 应调整与优化区域“三生”空间用地结构, 促进“三生”空间融合, 并以“碳中和”为目标导向, 强化空间用途管制, 为提升区域碳储资源提供精确保障。

关键词: “三生”空间; 土地利用转型; InVEST 模型; 碳储量; 广西边境地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0399-10

中图分类号: F301.2, F205

文献参数: 韦绍音, 陆汝成, 张利国, 等. 碳中和目标下的广西边境地区“三生”空间转型及碳储量效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 399-408. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.005; Wei Shaoyin, Lu Rucheng, Zhang Ligu, et al. Transition of productional-living-ecological space and carbon storage effect in Guangxi border area under carbon neutrality goal [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 399-408.

Transition of Productional-Living-Ecological Space and Carbon Storage Effect in Guangxi Border Area Under Carbon Neutrality Goal

Wei Shaoyin¹, Lu Rucheng^{1,2}, Zhang Ligu¹, Lin Xiaonan¹, Chen Yuxin¹, Yang Xin¹

(1. School of Natural Resources and Surveying and Mapping, Nanning

Normal University, Nanning, Guangxi 530100, China; 2. Key Laboratory of Environment

Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning, Guangxi 530100, China)

Abstract: [Objective] The effect of carbon storage under the transition of the productional-living-ecological space was systematically analyzed in order to optimize the spatial layout and increase the carbon sequestration capacity of the Guangxi border area ecosystem so that the strategic goal of “carbon neutrality” could be achieved in China. [Methods] This study used a land change dynamic attitude model and land use transfer matrix to describe the spatial distribution pattern and transformation characteristics of the productional-living-ecological space along the Guangxi border. Based on the InVEST model and the contribution rate of productional-living-ecological space carbon storage, the spatio-temporal variation of carbon storage and the impact of the productional-living-ecological space transition on carbon storage in the border area during 1990—2020 were determined. [Results] ① From 1990 to 2020, the border area was dominated by green

收稿日期: 2022-07-22

修回日期: 2022-10-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“‘四维度’的边境耕地多功能利用与国家战略农田划定研究: 以广西边境地区为例”(42061043)

第一作者: 韦绍音(1997—), 男(瑶族), 广西壮族自治区都安县人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与区域发展。Email: 2621682099@qq.com。

通信作者: 陆汝成(1972—), 男(汉族), 广西壮族自治区临桂区人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土地规划与区域发展研究。Email: 710912213@qq.com。

ecological space, supplemented by agricultural production space and water ecological space, with a distribution pattern of “high in the north and south regions, and low in the central region”. ② During the study period, the transition of the productional-living-ecological space in the border area showed a stable development in the early stage, fluctuating development in the middle stage, and drastic development in the late stage. Except for the ecological space of the water area, the change of dynamic attitude in other areas was most significant from 2010 to 2020. ③ From 1990 to 2020, overall carbon storage in the border area showed a continuous decline over time, with a small change in the early and middle stages, and a profound change in the late stage. In the past 40 years, a total of 4.13×10^6 t of carbon storage has been lost. The conversion of green ecological space and agricultural production space dominated the change of carbon storage in the Guangxi border area. [Conclusion] It will be necessary to adjust and optimize the land use structure of regional productional-ecological space, promote the integration of productional-ecological space, and strengthen the regulation of space use with the goal of “carbon neutrality” so as to accurately guarantee improvement of regional carbon storage resources.

Keywords: productional-living-ecological space; land use transition; InVEST model; carbon storage; Guangxi border area

土地作为重要的生产资料与承载区域发展的核心空间场所,从其功能视角构成生产、生活及生态空间^[1]。20 世纪 90 年代以来,在促进沿边贸易交流,强化中国与周边国家间区域合作与扩大对外开放的背景下也推动着土地利用的结构、方式及强度发生深刻转型和空间重构,诱致区域出现温室效应、生态系统脆弱、酸雨污染等问题^[2-3]。自然生态系统的碳储存功能通过地表植被的光合作用不断吸收 CO₂,一定程度上可以减缓温室效应、维持碳平衡、调节局部微气候^[4-7]。2021 年,国家印发《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》标志着中国生态文明建设迈入了降碳为导向的关键节点,为发挥边境生态系统固碳功能以抵消经济活动中的碳排放,这亟待优化空间布局,定量评估“三生”空间转型与碳储量的内在关联与发展趋势,促使“三生”空间的协调发展为“双碳”目标的实现加以支撑^[8]。

“三生”空间转型衍生于土地利用转型理论,通常伴随一定的区域环境效益^[9],目前“三生”空间转型对生态环境效益的研究主要集聚在对生境质量^[10]、生态服务功能^[11]、区域气候、景观生态格局^[12]等方面,而土地利用转型通过影响生态系统中植被与土壤的碳储量,已然成为影响整个区域碳储量变动的关键,当前,众多学者探讨了森林^[13]、农田^[14]、海洋^[15]、湿地等单一生态系统中碳储量的估算,无法体现一个复合生态系统的完整性,且通过“三生”空间视角结合碳中和目标下的碳效应为切入点的研究较为鲜见。国外学者多基于实地采样调查、数理统计方法、多元数据建模等对土壤及人工林进行碳储量的估算^[16-17]。国内学者对于陆地碳储量的研究主要集中在区域碳储量的动态评估^[18]、时空演化特征^[19]、模拟预测^[20]、影响因素探究,识别出土地利用类型转换是碳储量变

动的重要因素,为明晰碳储量以及空间影响形成有益的探索。在量化碳储量上,小尺度区域上主要运用土壤样品的采集及测算,在中大尺度上通常采用碳收支模型 FORCCHN, HASM 模型及 LPJ-GUESS 模型^[21]等,在诸多模型中,InVEST 模型基于 Carbon 模块并以土地利用数据为主要数据源,通过碳库中的碳密度来测算和绘制研究区域的碳总量,为碳储量测定提供了一种便捷、直观的方法,表现出较强的区域适用性,被广泛应用在国内外重要区域的碳储量时空变化研究^[22]。在研究范围上,已有的实证研究较多从政策保护角度入手,测定了中国南北过渡带^[23]、国家公园、黄土高原^[24]、流域^[25]及城市群^[26]等区域碳储量的动态变化及其对土地利用转型响应程度,尺度不一,涌现出丰硕的研究成果,但偏向于个案的普遍性规律的分析,对重要的生态保护屏障与具备国土安全功能的边境地区的深入研究较为缺乏。此外,针对“三生”空间主导功能转型与生态系统的关联作用逐渐成为地理学和生态学领域学者关注的焦点,碳储存服务作为生态服务功能的核心要素之一,为缓和生态系统服务损失及退化,增强碳汇能力,系统估算边境地区生态系统的碳储量,探明“三生”空间转型及其碳储量变化显得十分必要。

本文以广西壮族自治区(以下简称广西)边境地区为例,基于 1990,2000,2010,2020 年共 4 期土地利用数据,利用“三生”空间变化动态度、“三生”空间转移矩阵、InVEST 模型、“三生”空间碳储量贡献率等方法,基于“三生”空间格局与演变—区域碳储量变化—“三生”空间转型的碳储量贡献率”的逻辑与框架下,系统分析“三生”空间转型下的碳储量效应,以期优化空间布局提升边区生态系统固碳能力,助推国家实现“碳中和”的战略目标。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

广西边境地区位于广西西南部,地处云贵高原南缘至北部湾海岸,共包含百色、崇左及防城港 3 个地级市,下辖 23 个县域单元,国土面积达 $6.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。其地势由西北向东南逐级倾斜下降,地貌以丘陵山地为主,属亚热带季风气候。作为国家对外开放的重要门户与开放合作的前沿阵地,特殊的地缘优势与经济活动塑造着边境地区经济发展新格局,城镇化的进程促进人口的流动与建设用地需求的扩增,一定程度上加剧了对城镇周边优质良田的蚕食,加之人为活动的干预,易于造成集聚经济与生态双脆弱边境地区水土流失,生态失衡等问题,引致生态服务功能骤降,碳储量功能弱化等问题,影响区域的可持续高质量发展,边区作为祖国南疆重要的生态保护生态廊道,选取边境地区为研究对象,是凸显区域新时期城乡一体化进程生态系统保护的新模式,亦是探析区域发展历程中碳排放规律的一类形式,具有一定的代表性。

1.2 数据来源

本文以广西边境地区为研究案例,主要数据包括研究区 1990, 2000, 2010, 2020 年共 4 期的土地利用数据,数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m,包含 7 个一级类和 26 个二级类,而结合广西边境地区实际,区域无永久性冰川雪地、戈壁、沼泽地、其他未利用地、海洋共 5 种土地利用类型,最终得到二级类 21 个。通过选取交叉验证点的方式进行精度验证和实地调研分析,经检测总体成果精度为 88.82%。相关行政区划数据来源于中国国家基础地理信息中心。参考相关成果,结合“三生”空间的主导功能,建立“三生”空间类型与土地利用类型相衔接的方法,搭建广西边境地区“三生”空间分类体系,共形成城镇生活空间(城镇用地)、工矿生产空间(工矿用地及交通用地);农业生产空间(水田、旱地)、乡村生活空间(农村居民点);绿被生态空间(有林地、灌木林、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地);水域生态空间(河渠、湖泊、水库坑塘);其他生态空间(沙地、盐碱地、裸土地、裸岩石质地)7 种类型。

2 研究方法

2.1 “三生”空间变化动态度

选用“三生”空间动态度模型反映城镇、农业、生态空间的变化状况,是体现边境“三生”空间稳定性的重要指标,“三生”空间动态度越高,则表示其空间稳定性越弱^[27]。其表达式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为“三生”空间中某一空间类型的动态度; U_a 与 U_b 分别为研究初期与末期某一空间类型的面积; T 为研究时段。

2.2 “三生”空间转移矩阵

“三生”空间转移矩阵阐述研究期间内系统中状态与状态的转移,可以较为宏观又清晰地明晰出区域各类空间变化特征,反映了各类空间转化的流向与数量,可以揭穿不同空间类型之间面积流动的时空演变特征^[28]。其表达式为:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: S_{ij} 为研究期初与期末的“三生”空间状态; n 为“三生”空间类型数。

2.3 InVEST 碳储量估算

本研究采用 InVEST 模型估算边境地区的碳储量,InVEST 模型中的碳储存模块将陆地生态系统中碳储划分为 4 类基本碳库,即地上生物量中所含碳、地下生物量中所含碳、土壤碳库和死亡的有机物质中所含碳,综合以上 4 类碳库,便得到区域碳储总量^[29]。为确保碳密度数据的一致性和碳储量的准确性,本研究碳密度数据重点参考广西范围内的前人研究成果^[30-34],其中绿被生态空间中二级用地类型的碳密度尚未形成可供参考的数据支持,因此将绿被生态空间划分为林地和草地,并结合边境地区植被特征、土壤状况、气候条件加以修正为切合边境地区实际的碳密度(表 1)。其表达式为:

$$C_x = C_{x_above} + C_{x_below} + C_{x_soil} + C_{x_dead} \quad (3)$$

$$C_{x_total} = C_x \times S_x \quad (4)$$

式中: C_x 为 x 类空间的碳密度; C_{x_above} 为地上生物量中所含碳密度, C_{x_below} 为地下生物量中所含碳密度; C_{x_soil} 为土壤碳库中所含碳密度; C_{x_dead} 为死亡有机物质中所含碳密度; C_{x_total} 为第 x 类空间的碳储量; S_i 为第 x 类空间的面积。

2.4 “三生”空间碳储量贡献率

本研究基于生态贡献率计算方式,探究每一类“三生”空间转换引发的碳储量变动占总碳储量变化的比重,可以直观展示边境地区碳储量变化的主要敏感因素^[35]。其表达式为:

$$R = \frac{(C_j - C_i)S_x}{\Delta TC} \quad (5)$$

式中: R 为碳储量贡献率; C_j 与 C_i 分别为研究期初与期末的综合碳密度; S_x 为变化类型 x 的“三生”空间面积; ΔTC 为研究期间总碳储量的变化量。

表 1 广西边境地区“三生”空间各单元碳密度

Table 1 Carbon density of each unit of productional-living-ecological space in Guangxi border area

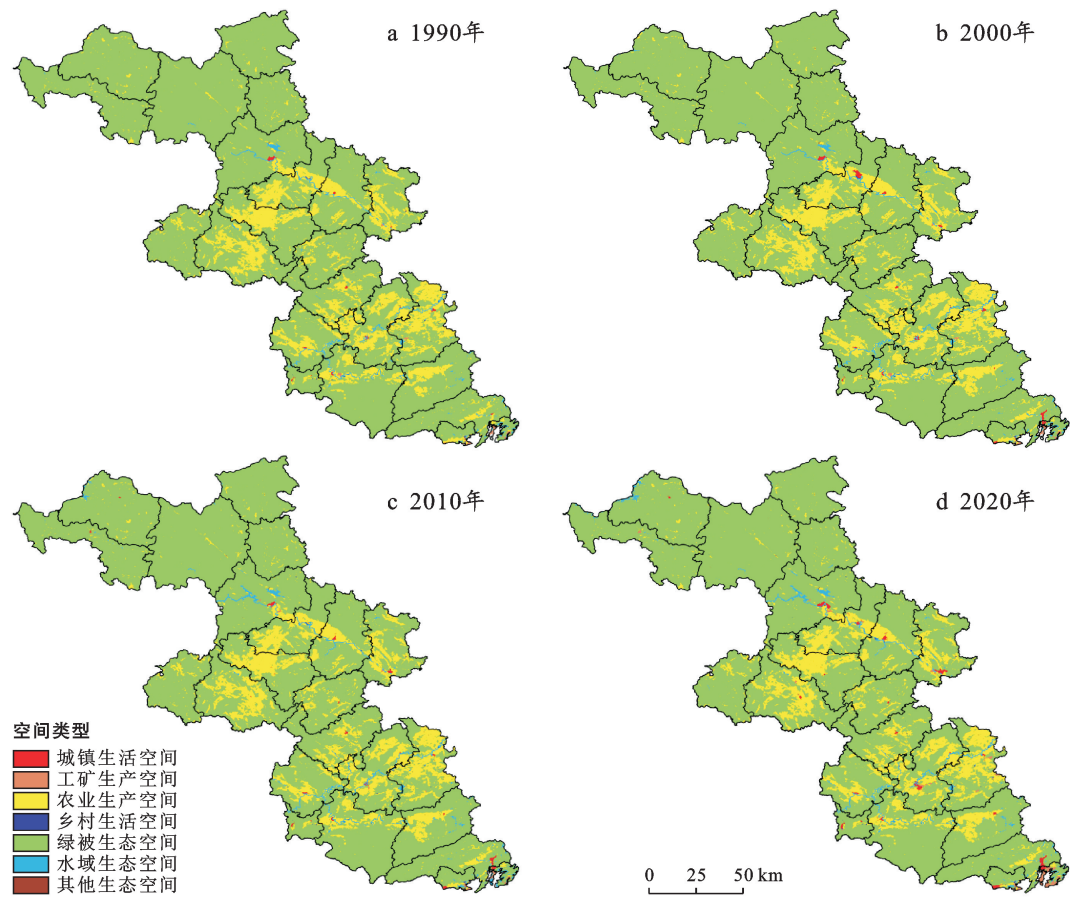
“三生”空间类型	二级地类	地上生物量	地下生物量	死亡有机物	土壤有机质	资料来源
城镇生活空间	城镇用地	11.45	0.93	1	0	张凯琪等 ^[31] ,朱鹏飞 ^[33]
工矿生产空间	工矿及交通用地	10.30	0.85	1	0	吴佩君等 ^[34]
农业生产空间	水田	13.49	2.68	32.3	1	张凯琪等 ^[31] ,荣检 ^[32] ,朱鹏飞 ^[33]
	旱地	13.65	2.62	33.3	1	张凯琪等 ^[31] ,荣检 ^[32] ,朱鹏飞 ^[33]
乡村生活空间	农村居民点	11.45	0.93	1	0	张凯琪等 ^[31] ,朱鹏飞 ^[33]
绿被生态空间	林地	58.3	14.58	96	3.5	陈曦等 ^[30] ,荣检 ^[32] ,朱鹏飞 ^[33]
	草地	3.01	13.53	60	1	张凯琪等 ^[31] ,荣检 ^[32] ,朱鹏飞 ^[33]
水域生态空间	水域	2.8	2.4	0	0	张凯琪等 ^[31] ,朱鹏飞 ^[33]
其他生态空间	未利用地	3.4	0	0.87	0	朱鹏飞 ^[33]

3 结果与分析

3.1 广西边境地区“三生”空间特征分析

研究期间边境地区“三生”空间格局呈现明显的“层次性”，绿被生态空间具有极大的优势，加以农业生产空间和地域生态空间为核心总体态势（图 1）。其中，1900—2000 年，绿被生态空间总体减少，其余

空间均逐步扩展，其中农业生产空间与城镇生活空间增幅较大。2000—2010 年，绿被生态空间与农业生产空间呈现萎缩的趋势，而水域生态空间则保持增加；2010—2020 年，该时期边境“三生”空间变化愈发剧烈，绿被生产空间与农业生产空间不断缩减，减少面积远大于前两段时期，城镇生活空间与工矿生产空间扩展趋势明显。



注：审图号 GS(2019)1822 号。下同。

图 1 广西边境地区“三生”空间格局分布特征

Fig.1 The pattern and distribution characteristics of productional-living-ecological in Guangxi border area

整体来看,研究期间绿被生态空间与农业生产空间分别减少 285.01,143.09 km² 外,剩余各类空间都呈现不同程度的增加趋势,工矿生产空间提速与规模扩张最为明显,增加量为 262.40 km²,其次为水域生态空间、城镇生活空间,乡村生活空间与其他生态空间相对保持稳定。究其根本:近 30 a 以来,广西边境地区在“一带一路”倡议、“全面开放”“东盟”“兴边富民行动”的联动共赢要求下,基于边境日趋特殊且重要的门户地位,充分利用地域特征与政策导向直接对区域施加影响、加强对外贸易合作、不断开拓新兴市场、提升发展内在动力,强化区域自身建设,工矿生产空间与城镇生活空间以蚕食绿被生态空间和占据农业生产空间逐渐向外蔓延。

广西边境地区“三生”空间形成“南北两翼高中部低”的格局特征。绿被生态空间重点分布于边境地区北部西林县、隆林县、田林县以及凌云县,边境南部的宁明县、上思县、防城区等地区,共同承担重要的生态保护屏障作用,边境北部地处云贵高原南段,属于典型山区,森林资源禀赋优越,多数县域森林覆盖率超过 75%,是广西林业资源“富矿区”;边境南部濒临十万大山山系,区域素有“森林海洋”“天然氧吧”之美誉,生态质量较好。

边境地区中部主要以农业生产空间呈“片状”分布的特征,重点分布于靖西市、德保县、龙州县、江州区以及扶绥县等区域,区域地势较为平缓,耕地分布广泛,左右江流域贯穿其中,又受到城市发展中心一定程度上的辐射作用,人口集聚化程度相对较高,适宜农业生产,是重要的农业区。此外,城镇生活空间在东兴市、防城区、江州区、右江区等区域分布较为集中,工矿生产空间分布在城镇生活空间边缘,以东兴市、江州区和港口区最为显著。

3.2 广西边境地区“三生”空间转型分析

为直观探究“三生”空间类型间的转换情况,综合运用“三生”空间变化动态度与“三生”空间转移矩阵来分析边区“三生”空间转型特征(图 2)。“三生”空间变化是度量“三生”空间稳定性的重要手段,1990—2020 年,边境地区“三生”空间变化呈现出初期缓慢、中期波动、后期剧烈的发展态势。从时段上来看,除水域生态空间在 2000—2010 年动态度达最高值,末期变化动态度稍有回落外,其余空间动态变化均在 2010—2020 年达到峰值,表明末期“三生”空间变化较为频繁。总体来看,研究期间各类空间动态度保持在中等水平,工矿生产空间和城镇生活空间动态度变化激烈,动态度分别为 0.078 5,0.036 2,其余空间动态度较小,“三生”空间稳定性较强。

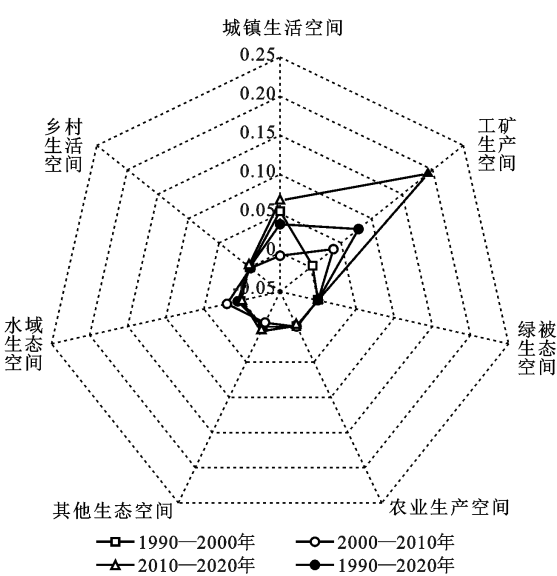


图 2 1990—2020 年广西边境地区各类“三生”空间动态度变化
Fig.2 Changes of dynamic attitudes of various kinds of production-living-ecological space in Guangxi border areas from 1990 to 2020

如表 2 所示,广西边境地区“三生”空间转型总体呈现“生态空间剧烈转换,生产与生活空间大幅变动”的变化趋势。从空间结构转入上看,在生产空间类型上,工矿生产空间与农业生产空间重点受绿被生态空间与农业生产空间的向其转移形成,比例分别为 48.59%,46.34%,而转入农业生产空间的几乎来源于绿被生态空间,其比例高达 89.63%;在生活空间类型上,城镇生活空间与乡村生活空间主要由农业生产空间转换得来,表明为满足城乡生活发展需求,耕地是生活空间侵吞的主要用地类型;在生态空间方面,各类生态空间的最大转入类型均为农业生产空间。从空间结构转出上来看,在生产空间类型中,工矿生产空间主要转至农业生产空间与绿被生态空间,两者总流出占比为 82.63 km²,而农业生产空间主要流向绿被生态空间,二者之间的互换在研究期间最为频繁;在生活空间上,城镇生活与乡村生活空间主要流至农业生产空间;在生态空间上,绿被生态空间重点流向农业生产空间,水域生态空间与其他生态空间主要转入绿被生态空间。

如图 3 所示,边境地区“三生”空间转型随时间变迁其空间转移状态愈发显著。从转移总面积上看,2000—2010 年与 2010—2020 年的转型程度高于 1990—2000 年。1990—2000 年,各类空间之间转型力度较低,以生态空间转向生产空间为主,转移面积为 90.61 km²,整体上零星分布在边境各区域,主要原因为受边界屏蔽效应的影响,边境地区人口较为稀疏,边民为稳边戍边需要开垦农田以满足生活农产品需求,致使城镇郊区的林地及草地等生态用地转型农

用地。2000—2010 年与 2010—2020 年两个阶段中,生产空间向生态空间转移范围最广,主要分布在广西中部靖西市、田阳区、江州区和扶绥县等地呈块状分布,其次为生态空间转移为生产空间,在边境北部隆林、田林、凌云县、边境中部天等县及大新县,随着生

态文明建设迈出的新步伐,广西边境地区以绿色发展推动高质量发展,坚持生态护边,通过实施石漠化综合治理工程、倡导多功能森林经营及造林更新,对生态环境脆弱的农用地实行“退耕还林还草”,进而转移为生态空间。

表 2 1990—2020 年广西边境地区“三生”空间转移矩阵
Table 2 Transfer matrix of productional-living-ecological space in Guangxi border area from 1990 to 2020

1990 年 面积/hm ²	2020 年面积/hm ²							期内 转出量
	城镇 生活空间	工矿 生产空间	农业 生产空间	乡村 生活空间	绿被 生态空间	水域 生态空间	其他 生态空间	
城镇生活空间	6 720.31	5.48	626.22	14.34	360.49	94.25	0.00	1 100.79
工矿生产空间	74.17	6 161.90	1 265.25	229.96	520.64	70.96	0.44	2 161.43
农业生产空间	8 432.69	12 067.56	966 773.76	6 417.59	86 421.14	6 203.67	32.58	119 575.23
乡村生活空间	694.44	328.10	5 899.88	39 085.18	1 990.48	467.41	0.22	9 380.53
绿被生态空间	3 016.76	12 653.57	94 070.65	2 630.97	4 609 100.91	12 309.75	142.34	124 824.05
水域生态空间	198.01	984.43	3 066.55	232.40	4 234.98	43 474.57	15.26	8 731.64
其他生态空间	0.00	1.98	22.88	0.08	130.14	73.23	1257.12	228.30
期内转入量	12 416.07	26 041.12	104 951.44	9 525.34	93 657.87	19 219.26	190.85	—
转入转出量差	11 315.29	23 879.70	—14 623.79	144.81	—31 166.18	10 487.63	—37.45	—

基于 3 个研究时段转换趋势可以管窥到,广西边境地区“三生”空间转型在 40 a 的历程中,在新型城镇化与乡村振兴的双轮驱动调控与“一带一路”战略

背景下,边区森林覆盖率达 65.89%,构建健康自然的生态体系,形成了以城镇经济发展建设为主导转至“生产—生活—生态”齐步协调发展的步调。

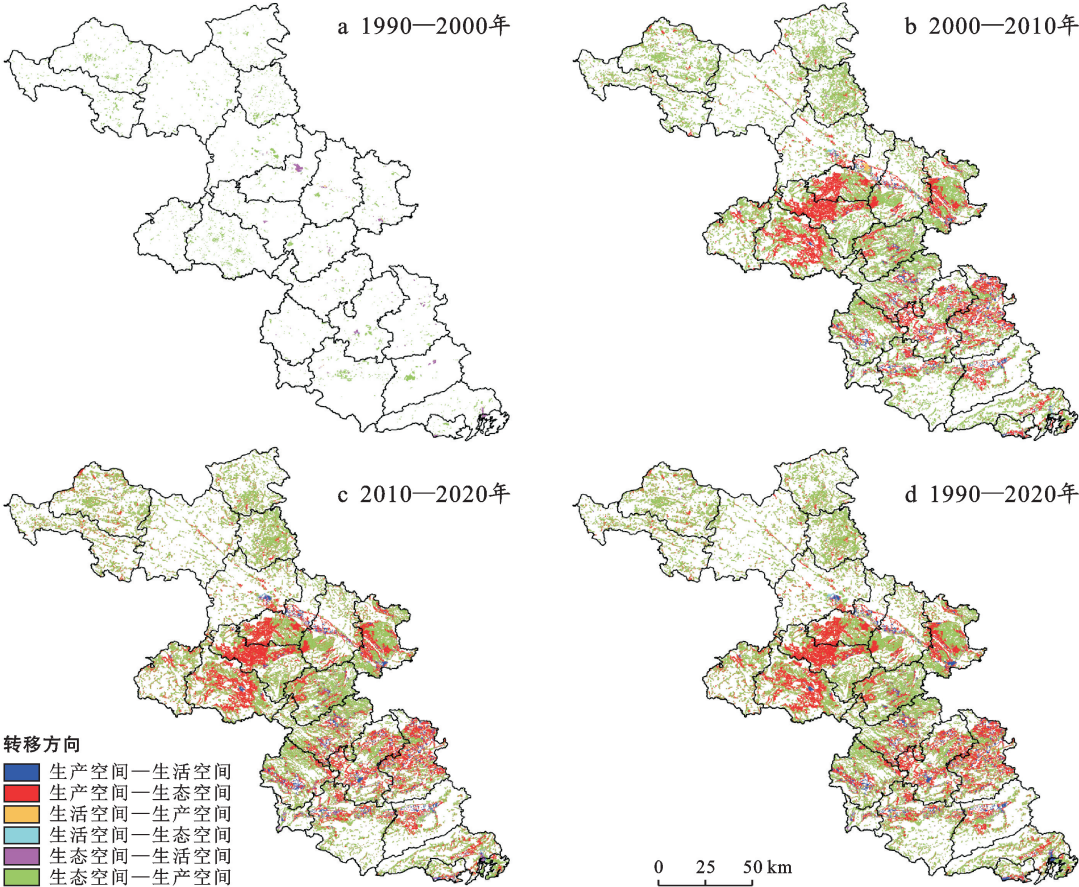


图 3 广西边境地区“三生”空间转型格局特征
Fig.3 Characteristics of the transformation pattern of productional-living-ecological space in Guangxi border area

3.3 “三生”空间转型的碳储量变化分析

从碳储量数值演变特征上看,广西边境地区碳储量整体呈现逐期持续递减的发展态势(表 3)。1990,2000,2010,2020 年的碳储量分别为 8.26×10^8 , 8.25×10^8 , 8.25×10^8 , 8.22×10^8 t,40 a 间共计损失 4.13×10^6 t,年均减少 1.03×10^5 t,1990—2010 期间碳储量整体上变化起伏不大,2010—2020 年碳储量深刻变化,说明近 10 a 来边境地区在经济发展、开放合作、生态护边等方面的引导对“三生”空间格局的产生深刻影响,从而引致碳储量产生的动态过程和演化趋势,究其原因,边境地区在实施强基固边、产业兴边的过程中部分用地对生态空间的侵占诱致碳储量有所损失,同时,边境地区依托于“广西生态优势金不换”的嘱托,坚持生态护边,通过高质量推进植树造

林、国土绿化和林业生态建设,夯实绿色本底,不断扩大高碳密度的空间类型范围,从生态系统空间恢复实现部分区域的碳储量收益。从空间类型上看,除绿被生态空间碳储量减少 1.20×10^7 t 外,其余空间类型在研究期间均呈现不同程度的增加。其中,农业生产空间和工矿生产空间增加量较大,分别为 3.81×10^6 t, 2.21×10^6 t。整体而言,受亚热带湿润季风气候的作用,林地与草地生长及保育条件优越,其组成的绿被生态空间所积存的生物量稳定增长,碳储量值占总值的 $90.86\% \sim 91.86\%$,是区域最主要的碳库;其次为农业生产空间,边境地区水田和旱地多种植水稻、甘蔗、木薯及玉米等农作物,蕴含较高的地上与地下生物量,固碳能力较强;其他生态空间因其空间面积比例较低,且碳密度不高,因此碳储量较低。

表 3 广西边境地区不同空间类型碳储量结构及变化
Table 3 Carbon storage structure and changes of different spatial types in Guangxi border areas 10⁴ t

年 份	城镇生活空间	工矿生产空间	农业生产空间	乡村生活空间	绿被生态空间	水域生态空间	其他生态空间	总 计
1990	13.87	14.25	6 474.00	112.96	75 901.01	102.73	2.36	82 621.17
2000	21.67	15.13	6 578.80	120.55	75 635.25	113.71	2.53	82 487.63
2010	20.22	22.06	6 483.78	111.16	75 714.95	122.52	2.21	82 476.90
2020	74.11	235.67	6 860.80	144.57	74 697.60	189.22	6.25	82 208.23
1990—2020	60.25	221.42	386.80	31.61	—1203.40	86.49	3.89	—412.94

3.4 “三生”空间转型的碳储量空间格局特征

从碳储量空间布局上看,广西边境地区在研究区整体上呈现出“南北两翼高,中部低”的空间分布特征(图 4)。碳储高值区重点呈片状分布在边境山区林区一带,重点分布在桂西南生态功能区的田林县、乐业县、那坡县及十万大山生态保护区的宁明县、上思县、防城区等,区域以石漠化治理、森林生态、保护植被为主的生态建设植被覆盖度高,易于占据优势的生态位,具备优越的固碳能力。碳储量低值区呈点状及斑状分布在港口区、扶绥县、江州区、右江区及田东县和田阳县的中心地段,该区域作为区级重点开发区及农产品主产区,地势相对平坦,水系发达,碳储量体现出极大的非均衡性,呈现逐步扩张的趋势,这主要和人类社会生产活动与植被密度有重大关联。研究期间,仅有乐业县、那坡县及扶绥县实现碳储量总量的增加,分别增加 123 719.71,19 126.98,702.14 t,其余县市区均彰显出不同程度的下降,尤其以右江区、港口区及隆林县减少规模最广,共占研究区总减少量的 41.77%。

3.5 “三生”空间转型对碳储量贡献率的影响

广西边境地区“三生”空间转型驱动着区域碳储量的变化,主要呈现出碳储量增加与碳储量减少两种趋势,即存在正效应与负效益,综合来看,研究期间绿被生态空间与农业生产空间的互转主导着广西边境地区碳储量的变化(图 5)。1990—2020 年,推动边境地区碳储量增加的“三生”空间转型类型较为集中,主要是农业生产空间转向绿被生态空间,其正效应贡献值为 2.35,贡献占比为 35.48%,其次是水域生态空间转至绿被生态空间,其贡献值为 0.16,正效应贡献率占比为 2.35%。在转型的负效益中,绿被生态空间转至农业生产空间诱致的碳储量损失量最多,其贡献率占比为 38.28%;其次为绿被生态空间转向水域生态空间与工矿生产空间,贡献率占比为 6.65%,6.45%。可以看出,当其他空间类型转化为绿被生态空间时有助于提高生态系统的碳储存,因而,边境地区应当统筹自然资源全要素,严守“生态保护红线”,谨防耕地及建设用地的侵占,谋划生态系统补偿机制,保障森林生态系统质量、稳定性和碳汇能力稳步提高。

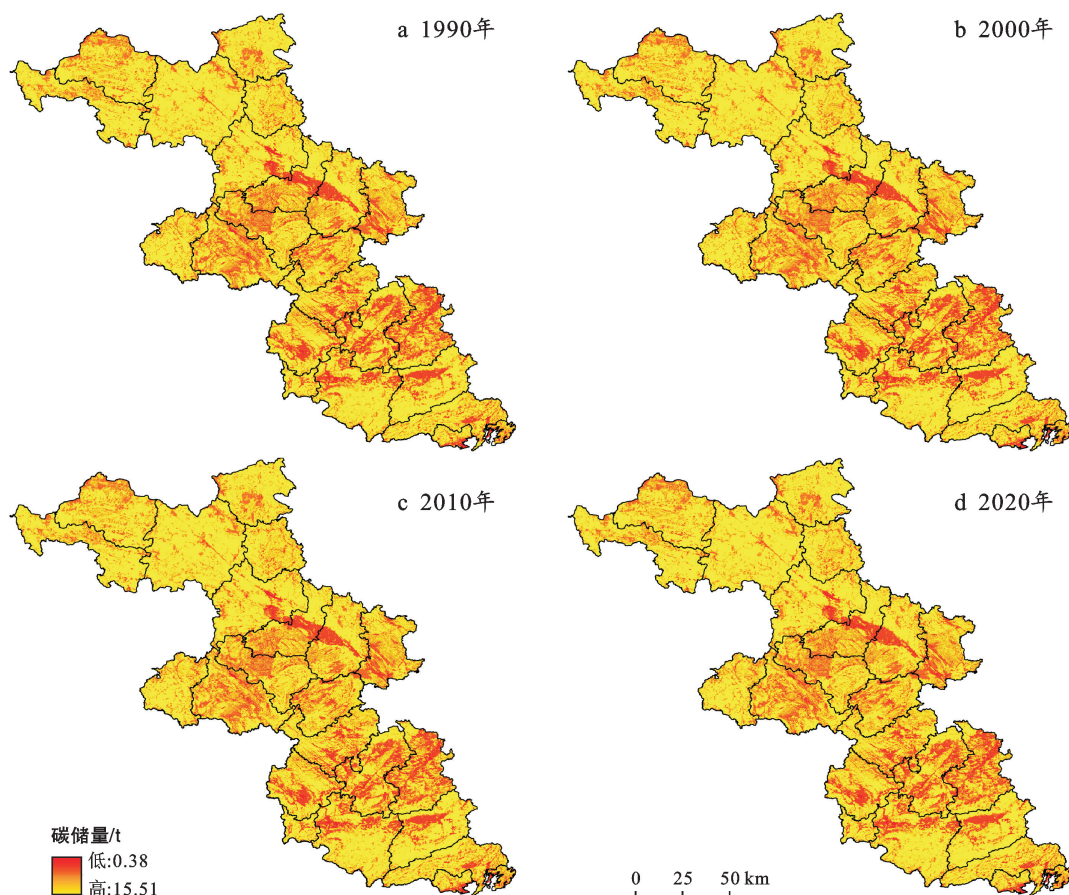


图 4 广西边境地区“三生”空间碳储量分布图

Fig.4 Distribution of carbon storage in productional-living-ecological space in Guangxi border area

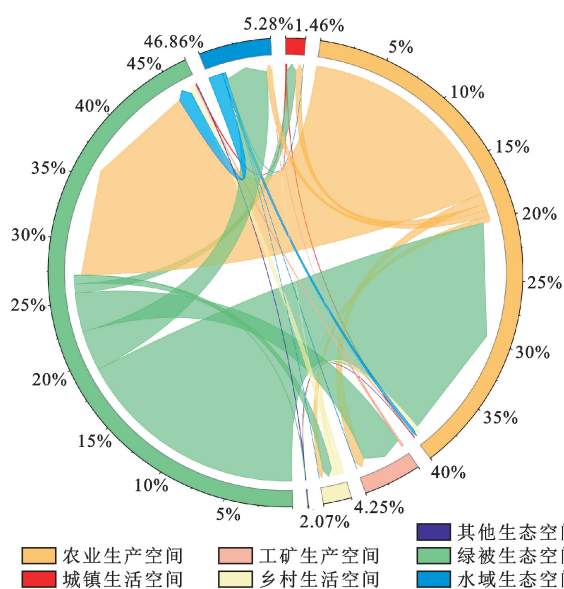


图 5 广西边境地区“三生”空间碳储量贡献率的弦图可视化表达

Fig.5 The string diagram visualization of the contribution rate of carbon storage in productional-living-ecological space in Guangxi border area

4 讨论与结论

4.1 结论

本文以“三生”空间为切入点,采用 1990—2020 年

4 期土地利用数据,通过“三生”空间变化动态度及转移矩阵对广西边境三市“三生”空间格局及转型特征进行研究、进一步引入碳密度并借助 InVEST 模型测算区域碳储量变化及其空间格局演化趋势,最后根据对“三生”空间转型对碳储量的作用程度进行识别。

(1) 研究期间广西边境地区“三生”空间呈现“一主两辅”“南北两翼高一中部低”的格局特征。总体上以绿被生态空间为主导,农业生产空间及水域生态空间为辅的形态特征,绿被生态空间重点集聚在边境北部高植被覆盖度的山区与南部重点生态保护功能区,二者协同肩负重要的生态保护屏障作用,农业生产空间在地势平缓、土壤肥沃的中部区域呈“片状”分布;1990—2020 年绿被生态空间与农业生产空间有所萎缩,其余各类空间均呈现不同程度的增加趋势,而工矿生产空间提速与规模拓展最为明显,扩张量为 262.40 km²,主要与区域独特地缘区位、经济社会的提速发展有较强的关联性。

(2) 1990—2020 年边境地区“三生”空间转型呈现出初期平缓、中期波动、后期剧烈的发展态势。各类空间动态度水平均保持在中等水平,除水域生态空间外,其余空间均在 2010—2020 年动态度变化最为

显著;2000—2010年与2010—2020年两个时期“三生”空间转型力度高于1990—2000年,整体上彰显出生态空间转型剧烈,农业空间与城镇空间大幅变动的变化情况。

(3) 1990—2020年,边境地区碳储量整体呈现逐期持续递减,研究初期与中期变动幅度不大,末期碳储量深刻变化。40 a间共计碳储量损失 4.13×10^6 t,年均减少 1.03×10^5 t,受边境强边兴边,产业兴边等政策的交叉影响,绿被生态空间碳储量减少 1.20×10^7 t,其余空间类型碳储量总体上有所增加;碳储量空间布局整体上呈现出“南北两翼高,中部低”的空间分布特征,碳储量高值区域多布局在植被类型和物种丰富度较高、人为活动相对较小的区域;而低值区重点聚集在地势平缓、人类活动和建设用地扩张剧烈的区域。

(4) 探讨“三生”空间转型对碳储量的贡献率发现,研究时段内绿被生态空间与农业生产空间的转换决定着边境地区碳储量的数量。农业生产空间与水域生态空间转入绿被生态空间是引起碳储量正效益的关键因素,而绿被生态空间向农业生产空间的转出是诱发碳储量负效益的主要空间类型。

4.2 讨论

探究“三生”空间转型及碳储量效应,为深入揭示边境地区“三生”空间的发展过程、空间格局与效益变动,谋求“三生”空间优化的科学途径与国土空间管制方案,探寻人地关系协调发展提供案例基础。相较于内陆区域,广西边境地区有丰富的水资源、林业资源、山地资源、河道矿产资源,在中越“两廊一圈”经济带、中国—东盟开放合作的战略方向和独特区位优势下^[36],沿边一带各类空间活动引致的建设用地与耕地扩张势必加剧区域碳储量的损失,使得生态系统更为脆弱,且“三生”空间变化特征更为剧烈,并随时间推移呈现增强趋势。本文运用InVEST模型对“三生”空间类型的碳储量进行定量估算,模型认定同一地类的碳密度是均质不变,然而,受气温、降水、环境、时间及人类活动方式等诸多因素变化的综合影响^[37],不同区域的土地类型碳密度变化具有一定的差异,因此,应加强对碳密度的实地采样及进行持续监测,并对碳密度值的合理性进行验证以提高碳储量估算结果的精确性将是未来的研究重点与主要方向。为此,亟待以坚定生态优先、绿色低碳为导向,强化生活空间的管控力度,充分挖掘城镇生活空间潜力、在生产效率改进的基础上提升工业生产空间紧凑度与集约利用程度,减缓对生态空间的挤压,为“三生”空

间转型朝着有利于提升生态系统固碳能力的方向演进。

[参考文献]

- [1] 周浩,金平,夏卫生.省级国土空间“三生”功能评价及其分区研究:以河南省为例[J].中国土地科学,2020,34(8):10-17.
- [2] 曹小曙.基于人地耦合系统的国土空间重塑[J].自然资源学报,2019,34(10):2051-2059.
- [3] Sarkodie S A, Owusu P A, Leirvik T. Global effect of urban sprawl, industrialization, trade and economic development on carbon dioxide emissions [J]. Environmental Research Letters, 2020,15(3):034049.
- [4] Kauffman J B, Adame M F, Arifanti V B, et al. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients [J]. Ecological Monographs, 2020,90(2):e01415.
- [5] Mori A S. Advancing nature-based approaches to address the biodiversity and climate emergency [J]. Ecology Letters, 2020,23(12):1729-1732.
- [6] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J].地理学报,2016,71(1):21-34.
- [7] 方精云,于贵瑞,任小波,等.中国陆地生态系统固碳效应:中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J].中国科学院院刊,2015,30(6):848-857.
- [8] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229,239.
- [9] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].地理研究,2019,38(9):2173-2187.
- [10] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(1):97-106.
- [11] 勾蒙蒙,刘常富,李乐,等.“三生空间”视角下三峡库区土地利用转型的生态系统服务价值效应[J].应用生态学报,2021,32(11):3933-3941.
- [12] 李明珍,李阳兵,冉彩虹.土地利用转型背景下的乡村景观格局演变响应:基于草堂溪流域的样带分析[J].自然资源学报,2020,35(9):2283-2298.
- [13] 兰秀,杜虎,宋同清,等.广西主要森林植被碳储量及其影响因素[J].生态学报,2019,39(6):2043-2053.
- [14] 贾海霞,汪霞,李佳,等.新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J].生态学报,2019,39(14):5106-5116.
- [15] 李翠华,蔡榕硕,颜秀花.2010—2018年海南东寨港红树林湿地碳收支的变化分析[J].海洋通报,2020,39

- (4):488-497.
- [16] Wang Yinyin, Deng Lei, Wu Gaolin, et al. Estimates of carbon storage in grassland ecosystems on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2018, 164:23-31.
- [17] Zhao Miaomiao, Yang Jilin, Zhao Na, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013 [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 448:528-534.
- [18] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. *地理学报*, 2019, 74(3):446-459.
- [19] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. *资源科学*, 2016, 38(8):1585-1593.
- [20] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测: 以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(12):2262-2270.
- [21] Zhao Mingwei, Yue Tianxiang, Zhao Na, et al. Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2):249-268.
- [22] Li Lu, Song Yan, Wei Xuhua, et al. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:106064.
- [23] 张平平, 李艳红, 殷浩然, 等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5):1183-1197.
- [24] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(17):6786-6799.
- [25] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(1):267-274.
- [26] 郭晓敏, 揣小伟, 张梅, 等. 扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2):269-280.
- [27] 满卫东, 刘明月, 王宗明, 等. 1990—2015 年东北地区草地变化遥感监测研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(5):2246-2253.
- [28] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. *资源科学*, 2020, 42(3):460-473.
- [29] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应: 以贵州省为例[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(11):101-111.
- [30] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(10):1247-1253.
- [31] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6):2799-2809.
- [32] 荣检. 基于 InVEST 模型的广西西江流域生态系统产水与固碳服务功能研究[D]. 广西南宁: 广西师范学院, 2017.
- [33] 朱鹏飞. 基于 InVEST 模型的广西沿海地区土地利用/覆被变化的生态效应研究[D]. 广西南宁: 广西师范学院, 2018.
- [34] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5):22-28.
- [35] 苑韶峰, 唐奕钰, 申屠楚宁. 土地利用转型时空演变及其生态环境效应: 基于长江经济带 127 个地级市的实证研究[J]. *经济地理*, 2019, 39(9):174-181.
- [36] 汪瑾, 韩佳伶. “一带一路”下广西与越南边境贸易发展研究[J]. *广西社会科学*, 2018(10):59-62.
- [37] 张萌萌, 刘梦云, 常庆瑞, 等. 1985—2015 年陕西黄土台塬表层土壤有机碳空间分布[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11):2032-2045.