

厦漳泉都市圈“三生”空间转型的 碳储量效应及影响因素

徐国良¹, 蔡一阳¹, 万春燕²

(1.江西财经大学 财税与公共管理学院, 江西 南昌 330013; 2.江西财经大学 信息管理学院, 江西 南昌 330032)

摘要: [目的] 探究厦漳泉都市圈“三生”空间转型的碳储量效应, 分析其过程中的驱动因素, 为新形势下厦漳泉都市圈高质量发展提供科学依据。[方法] 综合运用空间分析、InVEST及地理探测器模型, 揭示厦漳泉都市圈“三生”空间转型特征、碳储量效应及其影响因素。[结果] ①2000—2020年, 厦漳泉都市圈生活空间持续扩张, 生产及生态空间持续缩减, “三生”空间转型主要表现为农业生产空间、林地和草地生态空间转向工业生产空间和城镇生活空间。②20 a间厦漳泉都市圈碳储量共减少 1.57×10^7 t, 林地生态空间转向工业生产空间(34.75%)和草地生态空间(16.73%), 以及农业生产空间转向工业生产空间(12.92%)和城镇生活空间(7.63%)是导致碳储量减少的重要原因。碳储量空间分布呈现出自西部丘陵山区向东部沿海平原递减的特征。③自然环境和社会经济对区域碳储量的影响较大, 区位条件的影响较小。其中二三产业总产值、坡度始终是影响厦漳泉都市圈碳储量的重要因素, 且各因子间的交互作用对碳储量的影响力显著增强。[结论] 厦漳泉都市圈的未来发展应锚固都市圈生态空间本底, 同时发挥作为区域经济增长极的带动作用, 推动固碳减排与经济协同共进。

关键词: “三生”空间; 碳储量; InVEST模型; 地理探测器; 厦漳泉都市圈

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0327-10

中图分类号: F301.2

文献参数: 徐国良, 蔡一阳, 万春燕. 厦漳泉都市圈“三生”空间转型的碳储量效应及影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 327-336. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.035; Xu Guoliang, Cai Yiyang, Wan Chunyan. Carbon storage effect and influencing factors of productive-living-ecological space transformation in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 327-336.

Carbon Storage Effect and Influencing Factors of Productive-Living-Ecological Space Transformation in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Metropolitan Area

Xu Guoliang¹, Cai Yiyang¹, Wan Chunyan²

(1.School of Finance and Public Administration, Jiangxi University of

Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2.School of information

Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi 330032, China)

Abstract: [Objective] The carbon storage effect and the driving factors in the transformation of productive-living-ecological space in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area were analyzed in order to provide scientific reference for the high-quality development of the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area under new circumstances. [Methods] Spatial analysis, InVEST, and GeoDetector were comprehensively utilized to reveal the transformation characteristics of the productive-living-ecological space, carbon storage effect, and main influencing factors in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area. [Results] ① From 2000 to 2020, the living space in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area continued to expand, while the production and ecological spaces continued to shrink. The transformation of the production-living-ecological space primarily manifested in the shift from agricultural production,

收稿日期: 2023-10-29

修回日期: 2024-04-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“乡村旅游地农户耕地非粮化行为决策机制及优化调控研究”(42161047)

第一作者: 徐国良(1986—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 副教授, 主要从事为土地利用与区域发展研究。Email: xuguoliang210@126.com。

通信作者: 蔡一阳(1999—), 女(汉族), 福建省三明市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与土地生态。Email: 1109468299@qq.com。

woodland ecological, and grassland ecological spaces to industrial production and urban living spaces. ② Over the past 20 years, carbon storage in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area decreased by 1.57×10^7 t. The shift of forest ecological space to industrial production (34.75%) and grassland ecological (16.73%) spaces, as well as the shift of agricultural production space to industrial production (12.92%) and urban living (7.63%) spaces, were significant reasons for the decrease in carbon storage. The spatial distribution of carbon storage exhibited a decreasing trend from the hilly mountains in the west to the coastal plains in the east. ③ The natural environment and social economy emerged as the primary factors influencing regional carbon storage, with location conditions exerting minimal influence. Notably, the gross output value of the secondary and tertiary industries, along with slope consistently played significant roles in carbon storage in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area. Moreover, the interaction among all factors significantly amplified their impact on carbon storage. [Conclusion] Future efforts should prioritize the protection of ecological space and promote the region's role as a leading economic growth pole to achieve the coordinated progress of carbon emission reduction and economic development in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area.

Keywords: productive-living-ecological space; carbon storage; InVEST; GeoDetector; Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area

长期以来,中国在经济高速发展的同时也面临着国土开发秩序失衡、生态环境持续恶化等问题^[1]。面对中国的资源环境状况,党的十八大报告对“三生”空间提出发展要求,即“促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”。党的二十大报告进一步指出,深入实施区域协调发展战略、主体功能区战略、新型城镇化战略,构建优势互补、高质量发展的区域经济布局和国土空间体系。当前,相关研究在“三生”空间的概念界定^[2]、分类体系构建^[3]、时空演化^[4]、驱动因素^[5]等方面开展了丰富的探索。

同时,陆地生态系统碳储量在缓解全球温室效应、维持区域碳氧平衡中发挥着举足轻重的作用。在全球气候持续变暖的背景下,中国政府作出了 2030 年之前实现碳达峰,2060 年之前实现碳中和的承诺,并在“十四五”规划中纳入碳达峰、碳中和方案。“三生”空间反映了人地关系格局在空间形态上的映射^[6],基于“三生”空间视角的土地利用转型及其生态环境效应已是学术研究的热点话题^[7-8],因此,探究“三生”空间转型过程中的碳储量效应,是“三生”空间生态环境效应研究体系中的重要组成部分,可以为国土空间规划背景下优化“三生”空间格局、实现双碳目标提供有益参考。

近年来关于“三生”空间转型下的碳效应问题已引起了一定程度的关注,主要表现为:①在研究视角上,相关研究对“三生”空间转型下的碳代谢^[9]、碳排放^[10]等话题予以了重点关注,其中关于碳储量效应问题受到越来越多的关注^[11];②在研究尺度上,多集中在省级^[12]、市县级^[13]等行政单元,对区域层面尤其是人地关系变化剧烈的城市群、都市圈等地区的

尚有待更多的实证探究;③在研究方法上,相关研究基于土地利用现状分类开展“三生”空间的功能识别,并进一步开展空间特征分析及计量经济分析^[14-15]。

厦漳泉都市圈是中国东南沿海重要的经济发展区域,2023 年《中华人民共和国国民经济和社会发展“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》提出发展壮大“粤闽浙城市群”,厦漳泉都市圈正是这一新兴城市群的重要版块。但厦漳泉地区在发展过程中既面临水土流失、台风洪涝等自然灾害的威胁,也存在“三生”空间布局失衡、碳储能力下降等生态环境问题^[16]。鉴于此,选取厦漳泉都市圈为研究区域,以 2000,2010 和 2020 年 3 期土地利用数据为基础并构建“三生”空间分类体系,综合运用空间分析法、InVEST 模型的碳储量子模块以及地理探测器,探讨厦漳泉都市圈“三生”空间转型特征、碳储量效应及其影响因素,以期为指导都市圈“三生”空间协调发展、提升区域碳汇能力提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

厦漳泉都市圈位于福建省东南部,包括厦门市、漳州市、泉州市 3 个地级市及下辖县市区(不包含金門县)。陆域面积约为 2.50×10^4 km²,属亚热带海洋性季风气候,地势西北高、东南低,地貌类型复杂,山地、丘陵与海岸平原错落相间,晋江水系和九龙江水系为境内主要水系。厦漳泉都市圈拥有珍稀海洋物种、漳江口红树林以及虎伯寮 3 个国家级自然保护区。

改革开放后,民营经济的快速发展吸引了大量人口,并加速了产业和资本的集聚,作为福建省重要的

经济增长极,厦漳泉都市圈地区生产总值为 2.10×10^{12} 元,常住人口达 1.90×10^7 ,分别占全省的 48.17% 和 45.66%,2021 年《福建省国土空间规划(2021—2035 年)》提出要“强化厦漳泉都市圈辐射带动作用”。经济社会的快速发展带来区域生产、生活、生态空间转型剧烈,生态系统碳存储能力面临较大挑战,因此,选取厦漳泉都市圈作为研究区域,探究其“三生”空间转型特征的碳储量效应,能够为优化都市圈“三生”空间分布格局,制定都市圈固碳汇策略提供参考和借鉴。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 “三生空间”数据 本文所涉及的 2000,2010,2020 年共 3 期“三生”空间数据由土地利用数据转化而成,该数据来自中国科学院资源环境科学与数据中

心(<https://www.resdc.cn/>),包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个一级地类和 27 个二级地类,遥感解译精度达到 95% 以上,空间分辨率为 30 m。运用 ArcGIS 软件对该数据集进行重投影、拼接、裁剪、重分类等预处理,确保三期“三生”空间数据具有一致的空间坐标系与地理范围。

构建“三生”空间分类体系可为评估区域国土空间的开发利用状况提供支撑,在参考《土地利用现状分类标准(GB/T21010—2007)》等国家分类标准,及现有研究成果^[17-18]的基础上,建立“三生”空间分类体系(表 1)。首先,以土地利用主导功能为原则,划分出 3 个一级地类;其次,基于土地利用多功能性,对一级地类进一步细分,并将土地利用数据的二级地类进行归并与整合,以此划分出 8 个二级地类。

表 1 “三生”空间分类体系

Table 1 Classification system of productive-living-ecological space

一级分类	二级分类	《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》的二级地类
生产空间	农业生产空间	水田、旱地
	工业生产空间	工矿用地、交通建设用地
生活空间	城镇生活空间	城镇用地
	农村生活空间	农村居民点
生态空间	林地生态空间	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
	草地生态空间	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、永久性冰川雪地、滩涂、滩地
	其他生态空间	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其他未利用地、海洋

1.2.2 碳密度数据 由于碳密度存在区域差异性,因此在参考与厦漳泉都市圈处于同一气候带的碳密度数据^[19-20],并对比全国尺度^[21-22]碳密度数据的基础上,进一步根据当地年均气温和年均降水量进行校正,最终确定研究区碳密度数据详见表 2。

表 2 厦漳泉都市圈“三生空间”碳密度

Table 2 Carbon intensity of productive-living-ecological space in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area t/hm²

“三生空间”类型	地上生物量	地下生物量	土壤有机质	总碳密度
农业生产空间	13.51	2.75	51.20	67.46
工业生产空间	1.85	0.32	12.50	14.67
农村生活空间	1.53	0.95	15.15	17.63
林地生态空间	129.75	25.50	98.00	253.25
草地生态空间	2.95	13.25	72.25	88.45
水域生态空间	0.00	0.00	0.00	0.00
其他生态空间	2.10	10.36	60.50	72.96

1.2.3 碳储量影响因素数据 参考碳储量影响因素的相关研究^[23-24],并考虑数据的可获取性,从自然环

境、社会经济和区位条件 3 个维度出发,共选取 11 个碳储量的影响因素。

自然环境因素中,高程(X_1)、坡度(X_2)数据从 DEM 数据上提取生成。在 ArcGIS 软件中,对 DEM 数据进行重投影、拼接、配准、裁剪、去噪等预处理后,进一步运用表面分析工具,提取高程、坡度的栅格数据,该过程所用的 DEM 数据为 ASTER GDEM,空间分辨率为 30 m,来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);土壤类型(X_3)数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;年平均气温(X_4)、年平均降水量(X_5)数据来自国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)。社会经济因素中,人口密度(X_6)数据来自 Landsat 全球人口数据库(<https://landsat.ornl.gov/>),空间分辨率为 1 km;第一产业总产值(X_7)、二三产业总产值(X_8)数据来自研究区各市县区的国民经济和社会发展统计公报。区位条件因素中,道路矢量数据来自 Open Street Map(<http://www.openstreetmap.com>),到行政中心的距离(X_9)、

到高速公路的距离(X_{10})、到铁路的距离(X_{11})由 ArcGIS 软件欧氏距离分析得出。

2 研究方法

2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵的数学形式为:

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

式中: S 为“三生”空间面积; i, j 分别为研究初期和末期的“三生”空间类型; n 为“三生”空间的类型数。

2.2 碳储量测算

基于 InVEST 模型评估碳储量的计算公式为:

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead} \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 类“三生”空间的综合碳密度; C_{i_above} , C_{i_below} , C_{i_soil} , C_{i_dead} 分别为第 i 类“三生”空间的地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤有机质碳密度和死亡有机质碳密度。

$$C_{i_total} = C_i \times S_i \quad (3)$$

式中: C_{i_total} 为第 i 类“三生”空间的碳储量, S_i 为第 i 类“三生”空间的面积。

2.3 碳储量贡献率

碳储量贡献率是指区域内每一类“三生”空间转型所引发的碳储量变动程度。本文参考陈美景等^[1]构建的碳储量贡献率计算方法,探究“三生”空间转型的碳储量效应。其计算公式为:

$$R = \frac{(C_b - C_a) \times S_x}{\Delta TC} \quad (4)$$

式中: R 为碳储量贡献率; C_a, C_b 分别为研究初期和末期“三生”空间转型前后对应的总碳密度; S_x 为某类“三生”空间变化的面积; T_c 为总碳储量的变化量。

2.4 地理探测器

目前,地理探测器已成为探测空间分异性的重要工具。地理探测器主要包括 4 个模块,根据研究主题,本文运用因子探测及交互探测这两个模块,分析厦漳泉都市圈碳储量空间分异的影响因子。

因子探测模块主要用于探测 Y 的空间分异性,及探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。该模块以 q 值的大小衡量某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异性^[25]。其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: L 为某一驱动因素的分层; N_h, N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别是层 h 和全区的碳储量方差。

交互探测模块主要用于识别不同因子之间的交互作用,即评估某因子和其他因子共同作用时对因变量的解释力。该模块通过分别计算和比较各因子的 q 值及两因子叠加后的 q 值,来评估这些因子两两交互时对因变量的解释力是增加、减弱还是相互独立的,具体而言还可细分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、非线性增强和独立 5 种类型^[25]。

3 结果与分析

3.1 “三生”空间演变特征

3.1.1 “三生”空间时空特征 2000—2020 年,厦漳泉都市圈以生态和生产空间为主。其中,林地生态空间占比最大,农业生态空间次之,再次为草地生态空间。从不同时段上看,2000—2010 年,生产和生态空间总体呈缩减趋势,面积共减少了 436.68 km²;生活空间总体呈扩张趋势,面积增加了 422.06 km²。其中,农业生产空间减少的幅度最大,其减幅为 11.94%;草地生态空间与林地生态空间减少的幅度较大,减幅分别为 3.12%, 2.78%;城镇生活空间和工业生产空间急剧增长,二者的增幅高达 144.02%, 195.49%。2010—2020 年,厦漳泉都市圈生活空间面积增加 175.92 km²,呈进一步扩张态势;生产空间和生态空间面积共减少 102.81 km²,呈持续缩减态势。其中,农业生态空间持续减少,其减幅为 3.90%;工业生产空间、城镇生活空间和农村生活空间呈持续增加态势,三者的增幅均在 10% 以上;其他生态空间减幅较大,其减幅为 2.48%。

2000—2020 年,厦漳泉都市圈“三生”空间分布格局总体保持一致,主要特征如下(图 1): ①生产空间中,农业生产空间主要分布于泉州平原及九龙江中下游平原等沿海平原和沿河流域;工业生产空间多分布于民营经济发达的地区,如晋江市、石狮市、南安市等县级市的近郊和集镇外围的工矿区。②生活空间中,城镇生活空间集中分布于思明区、湖里区、鲤城区、晋江市等东部沿海平原,以及芴城区、龙文区等中心城区;农村生活空间整体呈离散分布,多位于地势较为平缓的河谷平原和山麓地区。③生态空间中,林地与草地生态空间分布广泛,主要集中于戴云山脉和博平岭等西部丘陵山区,包括德化县、永春县、安溪县以及华安县、南靖县等区域;水域生态空间总体沿晋江和九龙江两大水系及其支流分布;其他生态空间零星分布于诏安县与云霄县等部分县区。

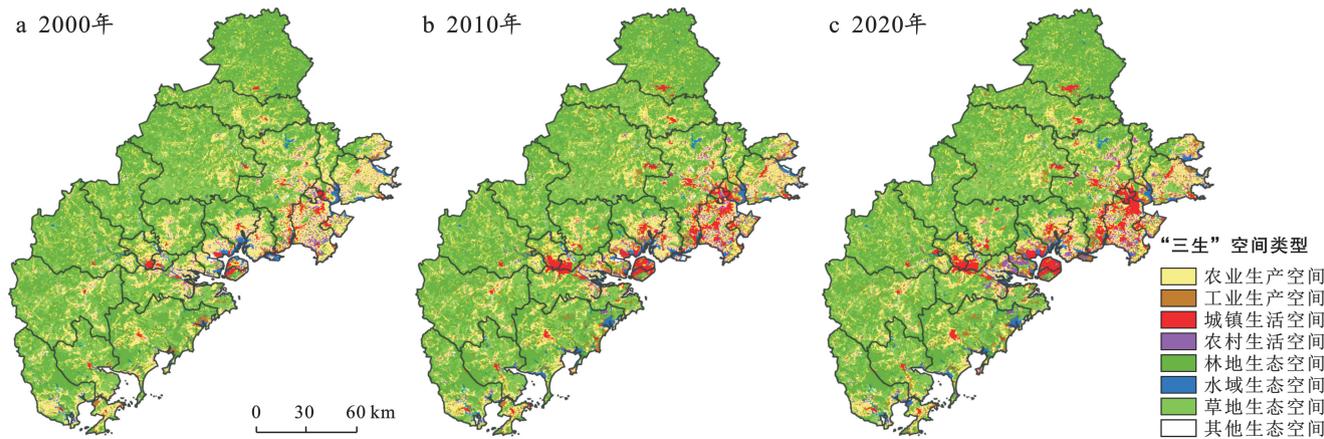


图 1 2000—2020 年厦漳泉都市圈“三生”空间分布格局

Fig.1 Distribution pattern of productive-living-ecological space in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area during 2000—2020

3.1.2 “三生”空间转型特征 基于土地利用转移矩阵, 深入分析厦漳泉都市圈“三生”空间转型特征, 结果如表 3 所示。2000—2020 年, 转型规模最大的为农业生产空间, 面积净减少 993.88 km², 其中有 496.78 km² 转变为工业生产空间, 298.45 km² 转变为城镇生活空间。工业生产空间的转型规模位居第二, 面积净增加 847.99 km², 主要由农业生产空间和林地生态空间转

入, 二者分别转入 496.78 和 292.00 km², 由工业生产空间转出为其他生活和生态空间的面积较小。城镇生活空间的扩张规模较大, 面积净增加 498.17 km², 主要由农业生产空间、农村生活空间和林地生态空间转入。林地生态空间 20 a 间面积减少了 398.21 km², 主要转出为工业生产空间、农业生产空间和草地生态空间。其他“三生”空间的内部转型相对不明显。

表 3 2000—2020 年厦漳泉都市圈“三生”空间转移矩阵

km²

Table 3 Transition matrix of productive-living-ecological space in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area during 2000—2020

项 目	2020 年								总 计
	农业生产空间	林地生态空间	生态空间		生活空间		业生产空间	其他生态空间	
			草地	水域	城镇	农村			
农业生产空间	5 182.96	179.79	61.06	54.74	298.45	191.60	496.78	0.50	6 465.86
林地生态空间	168.35	12 166.60	206.02	24.61	57.14	32.58	295.63	1.49	12 952.41
草地生态空间	66.21	181.25	3 664.17	8.00	12.71	8.22	144.29	1.78	4 086.63
水域生态空间	10.07	7.96	3.20	468.14	23.26	6.97	63.50	5.21	588.30
城镇生活空间	3.99	1.33	0.48	0.78	278.06	1.00	4.17	0.01	289.81
农村生活空间	33.09	9.56	4.00	3.46	90.13	512.54	16.32	0.04	669.13
工业生产空间	7.05	6.90	2.85	55.08	28.21	7.53	194.22	0.05	301.88
其他生态空间	0.27	0.81	1.57	0.29	0.04	0.62	0.65	18.35	22.59
总 计	5 471.98	12 554.19	3 943.34	615.09	787.98	761.06	1 215.56	27.42	25 376.61
面积变化	-993.88	-398.21	-143.29	26.79	498.17	91.92	913.68	4.83	—

3.2 “三生空间”转型的碳储量效应

3.2.1 碳储量时空演变特征 从时间上看, 厦漳泉都市圈碳储量呈持续减少的趋势, 固碳能力不断下降。2000—2020 年, “三生”空间转型使区域碳储量共减少 1.57×10⁷ t, 其中 2000—2010 年为碳储量变化最大的时段, 10 a 间共减少 1.37×10⁷ t。从各类“三生”空间的碳储量变化上看, 农业生产空间和林地、草地生态空间的碳储量持续下降, 20 a 间分别减少 6.71×10⁶ t, 1.01×10⁷ t 和 1.24×10⁶ t; 工业生产空间和城镇、农村生活空间的碳储量不断上升, 三者共增加

2.25×10⁶ t; 水域生态空间和其他生态空间的碳储量较小且变化不显著。

运用 InVEST 模型得出厦漳泉都市圈的碳储量时空分布图, 并在 ArcGIS 软件中采用自然断点法, 将各县市区的碳储量运算结果划分为低、中、高 3 个级别, 结果如图 2 所示。2000—2020 年厦漳泉都市圈碳储量均以中高值区为主, 且东西方向呈现出较为明显的海陆差异。碳储量高值区主要分布于西部内陆县市, 包括德化县、永春县、安溪县、华安县、南靖县等 11 个县, 这些县市地形以丘陵、山地为主, 林地、草

地广布,具有较强的碳储能力;碳储量中值区主要分布于和平县、云霄县、漳浦县、诏安县、长泰县等 7 个中部和南部县市;碳储量低值区集中分布于东部沿海平原,包括思明区、湖里区、龙文区、芗城区、丰泽区、

鲤城区、晋江市等 10 个区市,这些地区经济发达、城镇化水平较高且人口高度集聚,是厦漳泉都市圈工业生产空间和城镇生活空间的主要分布区,因而碳储量低于植被覆盖程度较高的内陆山区。

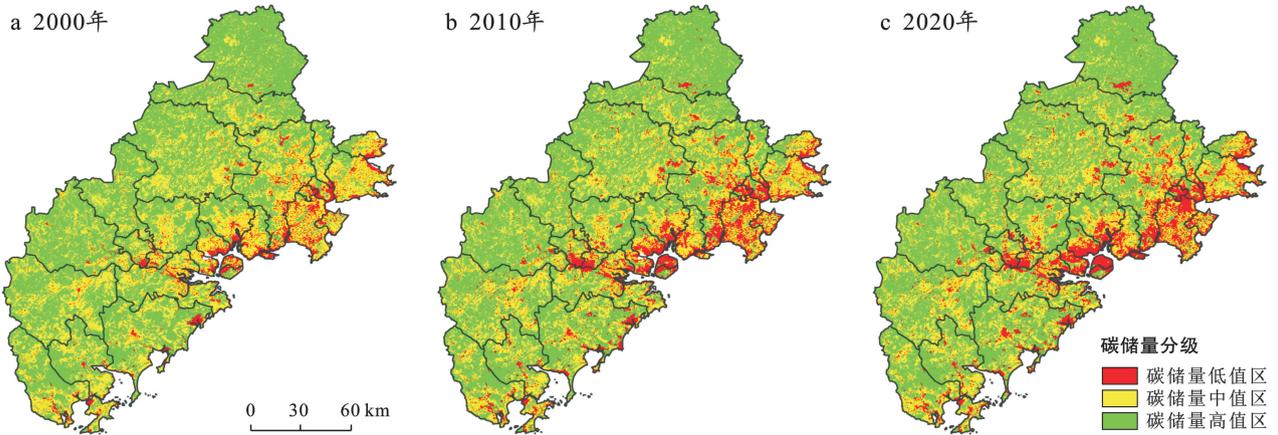


图 2 2000—2020 年厦漳泉都市圈碳储量分布格局

Fig.2 Distribution pattern of carbon storage in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area during 2000—2020

3.2.2 “三生空间”转型的碳储量效应 通过测算“三生”空间转型的碳储量贡献率可以发现(表 4),导致厦漳泉都市圈碳储量增加的“三生”空间转型主要为农业生产空间、草地生态空间、农村生活空间和水域生态空间转变为林地生态空间,以及农村生活空间转变为农业生产空间,这 5 类占贡献率比重之和为 90.45%。在导致碳储量减少的“三生”空间转型中,由林地生态空间转变为工业生产空间的贡献率最大,

其次为林地生态空间转变为草地生态空间,再次为农业生产空间转变为工业生产空间,三者占贡献率比重之和为 64.4%。除此以外,农业生产空间、林地生态空间转变为城镇生活空间,也导致区域碳储量显著减少。

总体而言,2000—2020 年,厦漳泉都市圈碳储量增加与减少这两种趋势并存,然而碳储量减少的趋势始终强于增加的趋势,因此二者相互抵消后,区域碳储量不断下降。

表 4 影响碳储量的主要空间转型及其贡献率

Table 4 Contribution rate of carbon storage in transformation of productive-living-ecological space

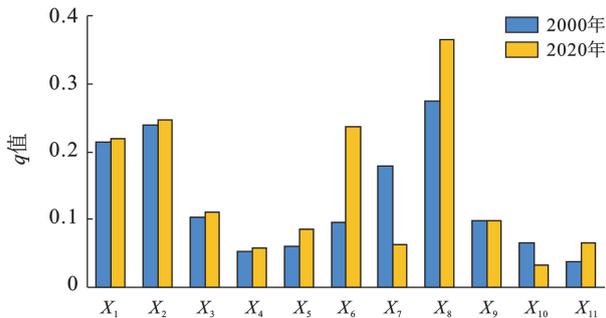
导致碳储量增加			导致碳储量减少		
“三生空间”结构转型	贡献率	贡献比重/%	“三生空间”结构转型	贡献率	贡献比重/%
农业生产空间—林地生态空间	0.244	43.67	林地生态空间—工业生产空间	-0.515	34.75
草地生态空间—林地生态空间	0.218	39.05	林地生态空间—草地生态空间	-0.248	16.73
农村生活空间—林地生态空间	0.016	2.94	农业生产空间—工业生产空间	-0.191	12.92
水域生态空间—林地生态空间	0.015	2.63	农业生产空间—城镇生活空间	-0.113	7.63
农村生活空间—农业生产空间	0.012	2.16	林地生态空间—城镇生活空间	-0.099	6.69
工业生产空间—林地生态空间	0.012	2.15	草地生态空间—工业生产空间	-0.078	5.24
农业生产空间—草地生态空间	0.009	1.68	农业生产空间—农村生活空间	-0.070	4.70
水域生态空间—工业生产空间	0.007	1.20	林地生态空间—农村生活空间	-0.056	3.78
水域生态空间—农业生产空间	0.005	0.89	林地生态空间—水域生态空间	-0.045	3.07
水域生态空间—其他生态空间	0.003	0.49	农业生产空间—水域生态空间	-0.027	1.81
总计	0.540	96.85	总计	-1.441	97.33

3.3 碳储量效应的影响因素识别

3.3.1 因子探测结果与分析 因子探测结果(图 3)显示,不同时期各项驱动因素均通过 1%水平的显著性检验,且各项驱动因素在不同时期对碳储量的影响程度发生了较大变化。

在社会经济因素中,二三产业总产值对碳储量的影响力始终居于首位,其 q 值在 2000 和 2020 年均大于 0.2,是引发区域碳储量变化的主导因素。这是因为 20 a 来在经济发展的过程中,由于不合理的用地模式和资源开发方式,使区域自然环境遭受较大冲

击,进而持续影响陆地生态系统碳储量;人口密度的 q 值由 2000 年的 0.095 提升至 2020 年的 0.237。随着工业化和城镇化的推进,厦漳泉都市圈人口集聚程度日益提升,人类活动对于生态系统的扰动更加剧烈,从而对区域碳储量的影响力逐渐增强;第一产业总产值的 q 值从 1.179 降至 0.062,对碳储量的影响力逐渐减弱。



注: X₁ 为高程; X₂ 为坡度; X₃ 为土壤类型; X₄ 为年平均气温; X₅ 为年平均降水; X₆ 为人口密度; X₇ 为第一产业总产值; X₈ 为第二三产业总产值; X₉ 为到行政中心的距离; X₁₀ 为到高速公路的距离; X₁₁ 为到铁路的距离。下同。

图 3 厦漳泉都市圈碳储量因子探测结果

Fig.3 Factor detection results of carbon storage in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area

在自然环境因素中,坡度、高程、土壤类型的 q 值始终大于 0.1,是影响区域碳储量的重要因素。其中,坡度、高程反映了区域地形条件,二者通过影响光照

强度、地表侵蚀程度以及物种丰富度,进一步影响区域碳储量;而不同的土壤类型,其土壤性质不同,生长于其上的植被也不尽相同,因此土壤类型会显著影响区域碳储量。年平均气温和降水量对区域碳储量的影响程度较小。

在区位条件因素中,到行政中心的距离、到高速公路的距离以及到铁路的距离这 3 项因子的 q 值始终小于 0.1,对区域碳储量的影响程度较弱,但在不同时间点均通过显著性检验,说明交通条件能够在一定程度上影响区域碳储能力。

3.3.2 交互探测结果与分析 地理探测器具有无需考虑数据标准化的优势,可有效避免传统模型在数据量纲方面的局限性^[25]。因此,即使各因子的单位不一致,也可进行交互探测分析。交互探测结果显示(图 4),各项因子两两交互后呈现出双因子增强或非线性增强的交互类型,这表明各要素对于区域碳储量的影响并不是独立的,任意两个因子交互后的影响力均高于单一因子的影响力。纵观整个研究时期,二三产业总产值与分别坡度、高程、第一产业总产值以及土壤类型交互后的影响力始终位于前四位。由此可知,区域碳储量的变化并非仅受自然地理因素或社会经济因素的单独影响,以二三产业总产值为代表的社会经济因素与高程、坡度等自然地理因素之间的协同作用,对区域碳储量产生了重要影响。

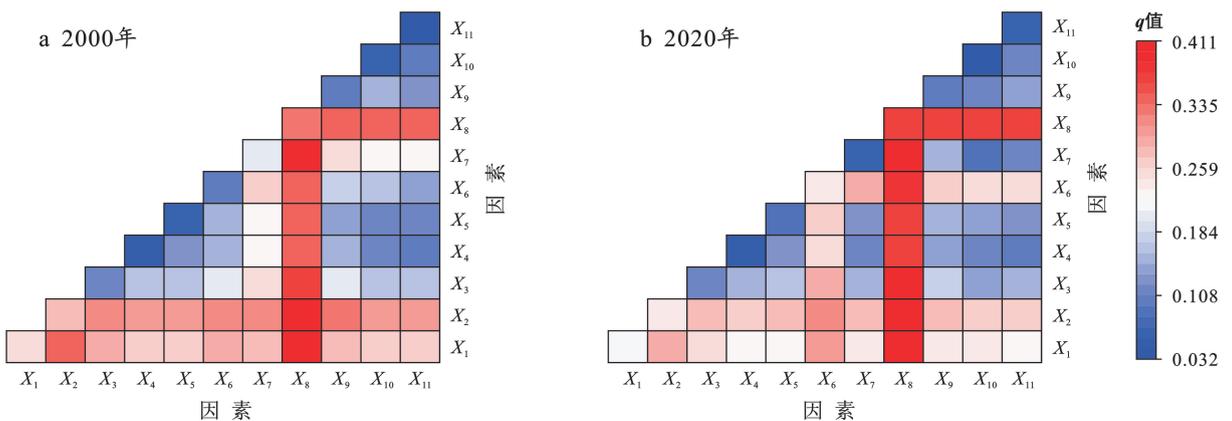


图 4 厦漳泉都市圈碳储量交互探测结果

Fig.4 Interactive detection results of carbon storage in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area

此外,相较于 2000 年,2020 年二三产业总产值与到铁路的距离、到省道的距离交互后的 q 值显著提升,表明随着时间的推移,区位条件因素发挥着越来越重要的作用,其与社会经济因素之间的交互作用对区域碳储量的影响力逐渐增强。

总而言之,社会经济因素与自然地理因素、区位条件因素之间的交互作用,对区域碳储量具有重要影响。因此,区域碳汇管控需要全面考虑多种因素的交

互作用,并采取综合性的管理措施。

4 结论与对策

4.1 结论

(1) 2000—2020 年,厦漳泉都市圈生活空间不断扩张,生产、生态空间持续缩减。区域“三生”空间转型以农业生产空间、林地和草地生态空间转向工业生产空间和城镇生活空间为主。

(2) 厦漳泉都市圈碳储量呈持续减少态势, 20 a 间共减少 1.57×10^7 t, 导致区域碳储量减少的“三生”空间转型主要为林地生态空间(34.75%)、草地生态空间(16.73%), 以及农业生产空间转向工业生产空间(12.92%)和城镇生活空间(7.63%)。研究区碳储量总体呈现出自西部山区向东部沿海平原递减的趋势, 存在较为明显的空间异质性。

(3) 厦漳泉都市圈碳储量受自然环境、社会经济、区位条件的共同影响。其中二三产业总产值($q > 0.2$)、坡度、高程和土壤类型($q > 0.1$)是影响区域碳储量的重要因子, 因子间的交互作用对区域碳储量的影响力显著增强。

4.2 对策

衔接已有的土地利用现状分类标准, 基于土地利用主导功能构建“三生”空间分类体系, 并采用 InVEST 模型及地理探测器等分析技术, 揭示 2000—2020 年厦漳泉都市圈“三生”空间转型特征及其产生的碳储量效应。研究表明在经济社会快速发展进程中, 厦漳泉都市圈的“三生”空间转型对碳储量效应产生了重要影响, 且影响因素在时间上呈现出异质性特征。长期来看, 为促进厦漳泉都市圈“三生”空间的协调发展, 需要在土地利用及空间功能方面考虑以下几个方面。

(1) 作为福建省“两极”“两带”“三轴”“三湾区”空间开发战略格局中的重要组成部分, 厦漳泉都市圈的未来发展应锚固都市圈生态空间本底。从已有碳储量空间格局来看, 厦漳泉都市圈碳储量的中、高值区主要分布于西部丘陵山区, 低值区集中分布于地势平坦、经济发达的沿海地区, 社会经济因素始终是影响厦漳泉都市圈碳储量的主导因素。快速城镇化发展造成农业生产空间、林地生态空间持续转向工业生产空间和城镇生活空间^[11], 未来厦漳泉都市圈面临同样的发展风险, 因此厦漳泉都市圈未来应稳定林地生态空间格局, 建立严格的自然保护区和生态修复区, 推进沿海红树林自然保护地建设, 提升区域碳汇能力。从管控措施上来看, 建立健全“三生”空间冲突风险预警机制对于预估都市圈发展风险具有积极意义^[26]。

(2) 在国土空间开发战略格局下, 厦漳泉都市圈需立足自身资源禀赋, 发挥作为区域经济增长极的带动作用, 引导要素在“山海”协作、城乡融合等方面的高效流动, 在绿色发展理念下推进形成城镇化发展与固碳减排协调共进局面。“山海”一体的自然本底属性是造成厦漳泉都市圈发展差异的重要因素, 在“全方位高质量发展超越”的目标导向下, 厦漳泉都市圈应在尊重山海分异的客观规律基础上, 挖掘转型发展

中的新动力和新抓手, 统筹推进经济发展与固碳减排的耦合协调。在技术应用方面, 通过绿色技术创新、支持低碳产业发展, 推动传统产业的转型升级; 在城镇建设方面, 应坚持严控增量、盘活存量, 积极推进城市更新, 提升工业用地节约集约利用水平; 在农业发展方面, 严守永久基本农田保护红线并探索农业多元价值功能的现实路径^[27], 推动农地利用从趋于边际转向高质量、绿色化发展^[28], 提升农业生态系统固碳功能。

参考文献 (References)

- [1] 方创琳. 改革开放 40 年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 1-9.
Fang Chuanglin. Important progress and prospects of China's urbanization and urban agglomeration in the past 40 years of reform and opening-up [J]. Economic Geography, 2018, 38(9): 1-9.
- [2] 江曼琦, 刘勇. “三生”空间内涵与空间范围的辨析[J]. 城市发展研究, 2020, 27(4): 43-48.
Jiang Manqi, Liu Yong. Discussion on the concept definition and spatial boundary classification of “production-living-ecological” space [J]. Urban Development Studies, 2020, 27(4): 43-48.
- [3] 邹利林, 王建英, 胡学东. 中国县级“三生用地”分类体系的理论构建与实证分析[J]. 中国土地科学, 2018, 32(4): 59-66.
Zou Lilin, Wang Jianying, Hu Xuedong. An classification systems of production-living-ecological land on the county level: Theory building and empirical research [J]. China Land Science, 2018, 32(4): 59-66.
- [4] 王娟娟, 毋兆鹏. 乌鲁木齐市 2000—2018 年“三生”空间格局演变及其风险评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 318-326.
Wang Juanjuan, Wu Zhaopeng. Evolution on patterns and risk assessment of productive-living-ecological space in Urumqi City during 2000—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 318-326.
- [5] 王柱莲, 王平, 支林蛟. 环滇池地区 2000—2020 年“三生”空间格局演变及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 265-273.
Wang Zhulian, Wang Ping, Zhi Linjiao. Evolution and driving forces of ecological-productive-living space pattern in Dianchi Lake area during 2000-2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 265-273.
- [6] 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.
Chen Meijing, Wang Qingri, Bai Zhongke, et al. Transition of “production-living-ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutraliza-

- tion: A case study of Guizhou Province [J]. *China Land Science*, 2021, 35(11):101-111.
- [7] 滑雨琪, 马彩虹, 阿斯文, 等. 固原市原州区 2000—2018 年“三生”用地及生态系统服务变化[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6):295-302.
- Hua Yuqi, Ma Caihong, An Siwen, et al. Changes in productive-living-ecological land and ecosystem services in Yuanzhou district of Guyuan City during 2000—2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6):295-302.
- [8] Cao Yukun, Huang Xianqiao, Liu Xiangyue, et al. Spatio-temporal evolution characteristics, development patterns, and ecological effects of “production-living-ecological space” at the city level in China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(2):1672.
- [9] 杜金霜, 付晶莹, 郝蒙蒙. 基于生态网络效用的昭通市“三生空间”碳代谢分析[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5):1208-1223.
- Du Jinshuang, Fu Jingying, Hao Mengmeng. Analyzing the carbon metabolism of “production-living ecological” space based on ecological network utility in Zhaotong [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5):1208-1223.
- [10] 李效顺, 李志鑫, 谢晓彤, 等. 河南省城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11):256-265.
- Li Xiaoshun, Li Zhixin, Xie Xiaotong, et al. Analysis of the interaction mechanism of urbanization, carbon emissions, and production-living-ecological space in Henan Province of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11):256-265.
- [11] 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.
- Wei Shaoyin, Lu Rucheng, Zhang Liguang, et al. Transition of production-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.
- [12] 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.
- Huang Dong, Liu Yuezong, Liu Jianning, et al. Spatial-temporal evolution of production-living-ecological functions and their carbon emission effects in Liaoning Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1):421-431.
- [13] 刘天昊, 冀正欣, 段亚明, 等. “双碳”目标下张家口市“三生”空间格局演化及碳效应研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(3):513-522.
- Liu Tianhao, Ji Zhengxin, Duan Yaming, et al. Spatial pattern evolution and carbon effect of production-living-ecological space in Zhangjiakou City under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2023, 59(3):513-522.
- [14] Xia Nan, Hai Wenyue, Tang Mengying, et al. Spatio-temporal evolution law and driving mechanism of production-living-ecological space from 2000 to 2020 in Xinjiang, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154:110807.
- [15] Wang Jianying, Sun Qi, Zou Lilin. Spatial-temporal evolution and driving mechanism of rural production-living-ecological space in Pingtan Islands, China [J]. *Habitat International*, 2023, 137:102833.
- [16] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2):342-355.
- Hu Qiyu, Chen Songlin. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2):342-355.
- [17] 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.
- [18] 孔冬艳, 陈会广, 吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5):1116-1135.
- Kong Dongyan, Chen Huiguang, Wu Kongsun. The evolution of “production-living-ecological” space, eco-environmental effects and its influencing factors in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5):1116-1135.
- [19] Zhu Liya, Song Ruixiang, Sun Shuang, et al. Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109178.
- [20] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. *环境科学*, 2023, 44(6):3343-3352.
- Ding Yue, Wang Liuzhu, Gui Feng, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay area based on InVEST and PLUS models [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6):3343-3352.
- [21] 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, 37(6):804-812.
- Fang Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Esti-

- mation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(6):804-812.
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5):687-699. Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):687-699.
- [23] 王晓, 于兵, 李继红. 土地利用和土地覆被变化对土壤有机碳密度及碳储量变化的影响: 以黑龙江省大庆市为例[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(11):76-83. Wang Xiao, Yu Bing, Li Jihong. Effects of land use and land cover change on soil organic carbon density and carbon storage: A case study of Daqing, Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(11):76-83.
- [24] Li Yonghua, Jiang Hezhou, Zhang Bo, et al. Comparative evaluation of multi-scale spatiotemporal variability and drivers of carbon storage: An empirical study from 369 cities, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110568.
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134. Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [26] 李晨欣, 陈松林, 李晶, 等. 基于“三生”空间的土地利用冲突时空演变特征研究: 以厦门、漳州和泉州城市群为例[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3):247-254. Li Chenxin, Chen Songlin, Li Jing, et al. Evolution of Spatio-temporal characteristics of land use conflict based on Productional-living-ecological space: A case study at Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou urban agglomeration [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):247-254.
- [27] 万沛钰, 徐国良, 万春燕. 乡村旅游地土地利用功能结构演变及模拟: 以江西省三坪村为例[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(9):1769-1782. Wan Peiyu, Xu Guoliang, Wan Chunyan. Evolution and simulation of land use functional structure in rural tourism destinations: A case study of Sanping Village in Jiangxi Province [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(9):1769-1782.
- [28] 李焕. 农地边际化研究导论: 新理论、新方法、新思路 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2023. Li Huan. Introduction to the Study of Marginalization of Agricultural Land: New theories, New methods, and New ideas [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2023.
- ~~~~~
- (上接第 326 页)
- [28] 潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. *地理学报*, 2021, 76(1):206-222. Pan Jinghu, Zhang Yongnian. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1):206-222.
- [29] 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 Xueqiang, Liu Huimin, Zhang Yuesong. 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.
- [30] 郭爱君, 张传兵. 数字经济如何影响碳排放强度?: 基于产业结构高级化与合理化的双重视角[J/OL]. *科学与科学技术管理*, 1-28[2024-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1117.G3.20231130.1033.004.html>. Guo Aijun, Zhang Chuanbing. How does the digital economy affect the intensity of carbon emissions?: Based on the dual perspectives of industrial structure upgrading and rationalization [J/OL]. *Science and Management of S. & T.*, 1-28[2024-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1117.G3.20231130.1033.004.html>.
- [31] 张娜, 孙芳城, 胡钰苓, 等. 长江经济带三大城市群土地利用碳排放的区域差异及空间收敛性[J]. *环境科学*, 2024, 45(8):4656-4669. Zhang Na, Sun Fangcheng, Hu Yuling, et al. Regional difference and spatial convergence of land use carbon emissions in three urban agglomerations of Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8):4656-4669.
- [32] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(23):9483-9498. Hou Ruiping, Xia Chaozong, Chen Jian, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River economic belt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23):9483-9498.
- [33] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 等. 长江经济带生态系统格局特征及其驱动力分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(11):1779-1789. Shi Nana, Xiao Nengwen, Wang Qi, et al. Spatial pattern of ecosystems and the driving forces in the Yangtze River economic zone [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(11):1779-1789.