

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.040.

尚雅婕, 王蕾, 贾佳, 等. 宾县三生空间格局演变的碳流转路径动态研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 326-335.

Shang Yajie, Wang Lei, Jia Jia, et al. Study on Carbon Flow Transfer Path of the Evolution of the Spatial and Temporal Pattern of the Production-Living-Ecological Space in Bin County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 326-335.

宾县三生空间格局演变的碳流转路径动态研究

尚雅婕^{1,2}, 王蕾^{1,2}, 贾佳^{1,2}, 翟雅琳^{1,2}, 陈媛媛^{1,2}

(1.东北林业大学, 哈尔滨 150040; 2.黑龙江省寒区园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 揭示宾县碳流转空间分布与碳要素转移关键路径, 把握宾县三生空间生态环境现存问题, 进而为宾县地区未来低碳乡村规划和土地利用弹性规划管理决策提供理论支持。[方法] 以宾县为例, 构建乡村“碳要素”整体代谢网络模型, 识别与掌握三生空间格局演变规律, 定量测度宾县碳源、碳汇特征以及碳要素时空动态变化。[结果] (1) 耕地生产空间仍是主要利用类型, 其他土地利用类型的规模呈不同的波动模式, 生态环境受到影响。(2) 宾县生活空间的扩张导致总碳排放量呈现先增长后下降的趋势, 2010 年宾县总碳排放量增长了 3.07 倍并达到峰值, 2020 年宾县排放量相比减少 225 万 t; 碳汇量则呈现增加趋势, 与生态空间面积的变化相关。(3) 高碳汇—源密度空间分布主要聚集在宾县中部及西部。耕地生产空间与城镇生活空间分别是两个时期碳流转的关键分室, 同时两个用地之间相互碳流转也是不同时期的主导转移路径。[结论] 宾县碳流转空间分布与碳要素转移关键路径主要集中在城市化进程较快的地区, 生态环境存在较严重问题, 未来土地利用弹性规划可通过制定可持续的乡村低碳减排战略以促进区域的可持续发展。

关键词: 三生空间; 碳流转; 土地利用; 格局演变; 宾县

中图分类号: X321, F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0326-10

Study on Carbon Flow Transfer Path of the Evolution of the Spatial and Temporal Pattern of the Production-Living-Ecological Space in Bin County

Shang Yajie^{1,2}, Wang Lei^{1,2}, Jia Jia^{1,2}, Zhai Yalin^{1,2}, Chen Yuanyuan^{1,2}

(1. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Lab for Garden Plant Germplasm Development & Landscape Eco-Restoration in Cold Regions of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] It reveals the spatial distribution of carbon flow and the key path of carbon element transfer in Bin County, grasps the existing problems of Bin County's Production-Living-Ecological (PLE) space ecological environment, and then provides theoretical support for the future low-carbon rural planning and land-use resilience planning and management decisions in Bin County area. [Methods] Bin County was taken as an example. The overall metabolic network model of rural 'carbon elements' was constructed to identify and master the evolution law of the PLE spatial pattern, to quantitatively measure the characteristics of carbon sources, carbon sinks and the spatial-temporal dynamic changes of carbon elements in Bin County. [Results] (1) The predominant use of land continued to be for cultivation, while other types of land use displayed varying degrees of change, impacting the ecological environment. (2) Bin County's expanding residential areas had resulted in an initial surge, followed by a decrease in overall carbon emissions. In 2010, carbon emissions of Bin County spiked to 3.07 times of their previous levels, marking a crescendo. In 2020, the emissions of Bin County decreased by 2.25 million tons. The increase in the carbon sink was associated

收稿日期: 2023-09-11

修回日期: 2023-10-16

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项项目(2572022DX12); 黑龙江省生态文明建设与绿色发展智库(ZKKF2022181); 黑龙江省哲学社会科学规划项目(21GLB061)

第一作者: 尚雅婕(1999—), 女, 甘肃景泰人, 硕士生, 研究方向为景观规划与生态修复。E-mail: shangyajie@nefu.edu.cn

通信作者: 王蕾(1983—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字景观规划与乡村振兴。E-mail: wanglei@nefu.edu.cn

<http://stbcy.paperonce.org>

with the alteration in the area of the ecological space. (3) The spatial distribution of high carbon sink and source density mainly concentrated in the central and western parts of Bin County. The cultivated land production space and urban living space were the key components of carbon transfer in the two periods, respectively, and the mutual carbon transfer between the two land uses was also the dominant transfer path in different periods. [Conclusion] The spatial distribution of carbon flow and key paths of carbon element transfer in Bin County mainly concentrate in the areas with rapid urbanization process, where the ecological environment has serious problems. In the future, land use elasticity planning can promote regional sustainable development by formulating sustainable rural low-carbon emission reduction strategy.

Keywords: production-living-ecological space; carbon transfer; land use; pattern evolution; Bin County

在2020年底发布的《国民经济十四五规划》中,我国提出在2030年前达到碳排放达峰,2060年前实现碳中和的目标。为实现这一目标,通过优化和调整土地利用结构以减少碳排放已成为实现社会经济可持续发展关注的重点^[1]。三生空间格局演变会通过改变用地能源消耗方式对三生系统内部的碳循环过程产生动态变化影响^[2]。因此,研究乡村三生空间内部的碳流转路径可以满足对乡村三生空间各类要素进行统筹管理,同时可以解决低碳愿景下的乡村三生空间资源利用与协同发展之间的问题^[3]。

在对三生空间静态空间格局变化的基础上,国内学者开展对不同尺度的区域三生空间随时间演变的动态空间格局的深入研究^[4]。这些研究涵盖国家、省域以及市县层面的三生空间分布数据,分析了不同时期三生空间的时空格局变化,以揭示其结构以及数量变动的特征^[5-10]。国内学者们在研究方法方面包括应用土地利用动态度、土地利用转移矩阵,景观格局指数和热点分析等方法^[11]。当前研究表明,三生空间的演化特征尚未成为主要研究关注点。在现有的乡村三生空间演化研究中,鲜有关于三生空间内部要素在此过程中的研究以及乡村空间中碳元素动态的相关研究。

国内低碳发展研究逐渐聚焦于低碳化利用土地模式方面,目前国内研究的前沿领域主要涵盖城市低碳总体战略等方面^[12]。国外学者则关注不同尺度下的区域碳排放特征差异的变化^[13-14]。虽然碳排放相关研究已取得了较为丰富的成果,理论基础也趋于完善,但国内外学者侧重研究大尺度区域碳排放的驱动机制、时空特征以及格局变化等,缺乏对小尺度区域碳排放与乡村人居环境方面的统筹研究,与三生空间格局变化的协同研究也相对有限。

在碳要素流转方面研究中,其中对碳代谢过程的探索显得尤为重要。学者们将碳代谢概念用于分析经济社会活动的碳代谢过程^[15-16],揭示与碳排放相关

的主要流转路径。目前,碳排放与储量已在不同领域得到深入研究,国内外学者侧重于研究土地利用变化与生态系统效应之间的关系^[17]以及碳循环的相互作用^[18]。尽管与城市社会或自然代谢相关的研究已包含部分碳代谢与三生空间用地生态关系,但对乡村地区碳要素变化的整体空间尺度研究仍相对不足。

本研究以黑龙江省农业典型县域哈尔滨市宾县为研究区,通过土地利用转移矩阵分析宾县三生空间时空格局变化,定量测度宾县碳源、碳汇核算数据,并在此基础上从碳要素时空分布特征与碳要素流动动态变化特征两方面入手,揭示宾县碳流转空间分布与碳要素转移关键路径,对把握宾县三生空间生态环境现存问题,实现减碳目标的主要环节、模式和路径,为碳中和目标下的乡村发展中资源协同运用、乡村三生空间格局优化提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

宾县位于黑龙江省南部,总面积3 843 km²。地理坐标为126°55′41″—128°19′17″E, 45°30′37″—46°01′20″N。宾县资源富集,地理位置优越,气候适宜,具有较高的生态碳汇潜力。但随着宾县的经济的发展,宾县的农业经济发展与土地生态保护矛盾突出,开发不当致使宾县碳排放量大幅增加。宾县作为典型农业发展区,农业生产是首要产业之一,随社会发展农作物产量增高,同时相应的农药与化肥施用也急速上升,农用地开垦与耕作力度也增大。然而开发缺乏合理规划与政策调控导致宾县地区碳收支失衡。因此,探究宾县三生空间格局演变的碳流转对生态环境影响十分重要。

本研究采用中国多时期土地利用遥感监测数据集,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,同时也使用对应年份的《中国能源年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》和《宾县国民经济统计资料》(<http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>)(表1)。

表 1 研究使用空间数据和统计数据

Table 1 Spatial data and statistics required for research

数据类型	具体指标	简要介绍	来源
空间数据	土地利用数据	2000 年、2010 年和 2020 年宾县土地利用数据,包括耕地、草地、水体、林地、城镇用地、农村用地和其他用地 7 个土地类型	中国科学院资源环境科学数据中心
统计数据	农业数据	包括宾县主要农作物种植面积、农业灌溉面积、产量、主要牲畜饲养量和农业机械总动力	《中国能源年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》和不同年份的《宾县国民经济统计资料》
	能源数据	包括不同工业能源消费量	
	人口数据	包括农村常住人口和城镇常住人口	

2 研究方法

2.1 乡村三生空间土地利用转移矩阵

三生空间土地利用转移矩阵能将宾县 20 年间土地利用时序演变特征以不同空间转移的形式进行表达,其表达式为^[18]:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 代表从空间 i 转换成空间 j 的面积; i, j 指转移过程前后的空间类别; n 代表空间类型数。

2.2 乡村三生空间“碳要素”代谢整体模型核算

本文主要研究讨论的是基于土地利用方式变化所导致的碳元素流变化,研究对象主要包括耕地、草地、水体、林地、城镇用地、农村用地和其他用地 7

种土地利用类型的碳排放与碳吸收。由于农业生产活动向大气排放的同时,农作物进行光合作用^[19],故对耕地进行碳排放与碳吸收核算。碳排放的主要用地除耕地外,还包括城镇用地与农村用地。而碳吸收主要计算草地、水域、林地和其他用地(其他用地主要为未利用地,由于未利用地的植被覆盖稀少,没有人类活动,因此只计算碳吸收量)。具体研究方法见表 2^[20-21]。

2.2.1 碳汇计算:

(1) 土地利用碳汇系数法^[3]。

$$E = \sum \lambda_i = \sum S_i \cdot \delta_i \quad (2)$$

式中: E 代表碳排放总量(t); λ_i 为第 i 种土地利用方式产生碳汇量(t); S_i 为第 i 种土地利用面积(hm²),其中涵盖各类生态空间; δ_i 为第 i 种生态空间的碳吸收系数(t/hm²)。

表 2 土地利用分类与碳要素通量计算方法

Table 2 Land use classification and carbon factor flux calculation method

三生空间用地类型	碳排放计算	碳吸收计算	碳吸收系数
耕地生产空间	农业生产活动和牲畜呼吸排放	农作物生长碳吸收估算	—
林地生态空间	—	土地利用碳汇系数法	—0.578
草地生态空间	—	土地利用碳汇系数法	—0.021
水体生态空间	—	土地利用碳汇系数法	—0.252
城镇生活空间	城镇居民呼吸、能源消耗	碳排放间接估算	—
农村生活空间	农村居民呼吸、秸秆燃烧	碳排放间接估算	—
其他生态空间	—	土地利用碳汇系数法	—0.005

(2) 农作物生长碳吸收间接估算法。

耕地碳汇计算采用农作物生长碳吸收间接估算法^[20]。在运算过程中,本研究根据宾县的实际情况,主要选取水稻、玉米、豆类作为宾县主要农作物进行间接估算,计算公式如下:

$$C_d = C_f \cdot D_w = C_f \cdot Y_w / H_i \quad (3)$$

式中: C_d 代表耕地碳吸收总量; C_f 代表各类农作物的碳吸收率; Y_w 代表各类农作物的经济产量; D_w 为各类农作物的生物产量; H_i 为第 i 种作物的经济系数,经济系数与吸收率见表 3^[21]。

2.2.2 碳源计算 耕地生产空间主要计算农业生产各环节中不同农业活动产生的碳排放,计算公式为:

$$E_a = C \cdot k_c + M \cdot k_m + W \cdot k_w + F \cdot k_f + G \cdot k_g \quad (4)$$

$$M = S \cdot D \quad (5)$$

式中: E_a 代表耕地生产空间碳排放总量; C 代表化肥施用折纯量; M 代表农业用地种植面积; W 代表农业机械的总动力; F 代表农膜使用量; G 代表农业用地灌溉面积; S 代表农业用地总面积; D 为复种指数。不同农业活动所对应的不同排放系数见表 4^[21-23]。

城镇生活空间碳源主要由城镇居民呼吸碳排放以及能源碳排放构成,其中呼吸碳排放为人口数量与人体呼吸碳排放系数乘积得到^[24];能源碳排放计算公式为^[25]:

$$E_t = \sum E_{ti} = \sum E_{ni} \cdot \theta_i \cdot f_i \tag{6}$$

$$CE_t = P_c / P_s \cdot E_t \tag{7}$$

式中： E_t 代表城镇生活空间碳排放量； E_{ti} 代表不同种类化石能源的总碳排放量； E_{ni} 代表不同种类化石能源的消耗量； θ_i 代表不同种类化石能源转换为标准煤系数； f_i 代表不同种类化石能源的碳排放系数，其中标准煤转换系数如表 5 所示。 CE_t 代表县域的碳排放量； P_c 代表县域内人口总量； P_s 代表省域内

表 4 农业活动对应的碳排放系数

Table 4 Carbon emission factors corresponding to various agricultural activities in Bin County

活动	化肥施用排放系数(k_c)	农业机械排放系数(k_w)	农膜排放系数(k_f)	农业种植排放系数(k_m)	农业灌溉排放系数(k_g)
系数	0.8956 t/t	0.00018 t C/kW	5.18 kg/kg	0.01647 t C/hm ²	0.26648 t C/hm ²

农村生活空间碳源主要计算秸秆燃烧和呼吸碳排放。计算公式如下：

$$C_s = \sum P_i \cdot S_c \cdot \theta_i \cdot a \cdot b \tag{8}$$

式中： n 表示农作物种类的数量； P_i 表示第 i 种农作物产量(kg)； S_c 代表第 i 种农作物谷草比值； θ_i 表示第 i 种农作物秸秆燃烧的碳排放系数； a 为秸秆露天燃烧比值，为 0.165； b 为秸秆燃烧效率，值为 0.8^[26]。

表 5 不同能源类型的标准煤转换系数与碳排放系数

Table 5 Standard coal conversion coefficient and carbon emission coefficient of different energy types

能源类型	标准煤转换系数 (kgce/kg, kgce/10 ⁶ kJ, kgce/kW·h)	碳排放系数 (tC/t)
原煤	0.7143	0.7559
焦炭	0.9714	0.8550
原油	1.4286	0.5857
汽油	1.4714	0.5538
煤油	1.4714	0.5714
柴油	1.5714	0.5912
燃料油	1.4286	0.6185
液化石油气	1.7143	0.5042
天然气	1.2143	0.4483
电力	0.1229	2.5255

2.2.3 乡村三生空间碳转移量计算 三生空间碳流转指由三生空间格局演变引起的三生空间内部发生的碳要素转移作用,包括碳排放、碳吸收与碳转移^[2]。将三生空间单位面积的净碳排放或净碳汇定义为碳转移密度,通过碳转移密度差和土地利用转移面积的乘积即为三生空间碳流转过程产生的碳转移量(即碳流量)。计算公式如下^[3]：

$$f_{ij} = \Delta W \cdot \Delta S \tag{9}$$

$$\Delta W = W_j - W_i = \frac{V_i}{S_j} - \frac{V_i}{S_i} \tag{10}$$

式中： f_{ij} 表示从用地 j 流向用地 i 的碳转移量(kg C)；

的人口总量。

表 3 宾县主要农作物经济系数与碳吸收率

Table 3 Economic coefficients and carbon uptake rates of major crops in Bin County

农作物	H	C_f
水稻	0.45	0.4144
玉米	0.40	0.4709
豆类	0.34	0.4500

ΔW 表示碳转移密度差(kg C/hm²)； ΔS 表示用地 j 向用地 i 转移的面积(hm²)； W_i 和 W_j 表示用地 i 和用地 j 水平方向上的净碳转移密度(kg C/hm²)； V_i 和 V_j 表示用地 i 和用地 j 垂直方向上的净碳转移量(kg C)； S_i 和 S_j 表示用地 i 和用地 j 的面积(hm²)。当 $f_{ij} > 0$ 时,表示这是一个积极的碳转移(即正碳流),当 $f_{ij} < 0$,表示这是一个消极的碳转移(即负碳流)。

3 结果与分析

3.1 宾县三生空间时空格局变化分析

利用 ArcGIS 10.7 对 2000 年、2010 年、2020 年宾县三生空间景观类型分类数据进行叠加分析,建立 2000—2010 年和 2010—2020 年宾县三生空间土地利用面积转移矩阵,利用 Origin 绘制宾县三生空间土地利用桑基图(图 1)。

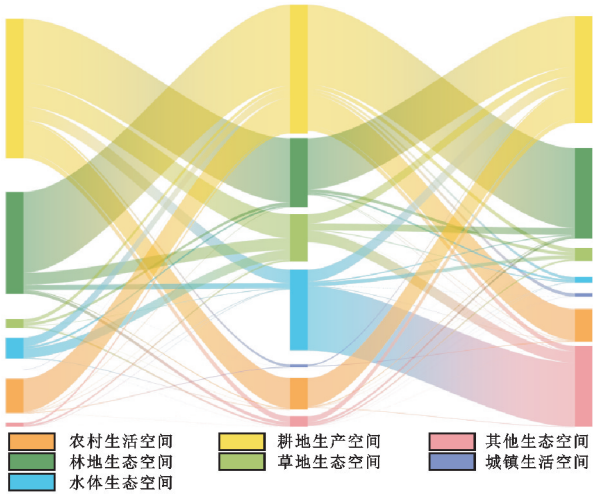


图 1 宾县 2000—2020 年三生空间桑基图

Fig. 1 Sanji diagram of Production-Living-Ecological Space in Bin County from 2000 to 2020

2000—2010 年,宾县耕地生产空间主要流入林地生态空间及农村居民生活空间,面积为 99.53 km² 与 46.77 km²,同时林地生态空间与农村居民生活空

间也向耕地生产空间转化,且林地转化为耕地的面积为 125.87 km²,说明宾县对农业生产用地的需求开始逐步上升。宾县草地生态空间的变化面积主要由耕地生产空间变换而成,变化面积为 37.16 km²,相比发现转出面积较少,可以看出宾县的地方管理机构开始关注生态环保意识。宾县农村生活空间主要转化为耕地生产空间,面积为 51.19 km²,同时耕地生产空间也转为农村生活空间 46.77 km²,转出转入面积大致相当,但仍存在个别的用地流转差异与空间分布的动态变化。说明宾县的农业生产与居民生活发展基本能保持稳定状态。

2010—2020 年,宾县耕地生产空间主要流入至林地生态空间及农村居民生活空间,面积分别为 124.06 km² 与 48.52 km²,同时林地生态空间也向耕地生产空间转入 79.19 km²。与上个时期相比,转入林地生态空间的面积增加了 1.24 倍,林地转向耕地的面积也减少了 1.58 倍。说明宾县延续了上一阶段退耕还林的政策,生态保护的意识逐渐深入人心。在此研究期间的草地生态空间主要流入至其他生态空间和耕地生产空间,其面积分别为 17.42 km² 和 14.34 km²。相较于前一阶段,草地生态空间的流向用地由耕地生产空间转换为其他生态空间,且流出面积显著增长。说明草地生态空间的生态保护重要性目前未受到重视,是未来重要的保护对象之一。此外,农村生活空间向耕地生产空间流入的面积也由 51.19 km² 减少

至 43.71 km²,同时农村生活空间也向各类生态空间进行较少面积的土地转移,其中向林地生态空间的转化由 0.66 km² 增加至 1.27 km²。说明虽然城市发展对生产空间有所影响,但是政府与管理部门对生态环境的保护开始付诸实践。

总体来看,20 年间耕地生产空间在宾县仍占据主要地位。随着乡村振兴政策的提出,耕地生产空间变化增幅最大,农村生活空间面积也同样增长,城镇扩展对周边农业生产空间进行归并的现象,人口增加带来的城镇扩张对周边生态环境带来一定程度的影响,但是宾县生态空间面积也实现有效增加,展现出城乡与自然生态统筹协调发展的局面。

3.2 宾县三生空间碳源—汇核算

结合宾县的土地利用数据估算得出宾县 20 年来的三生空间碳排放量与碳吸收量,测算结果如表 6 所示。

由表 6 可知,2000—2020 年内城镇居民生活空间碳排放分别占当年碳排放量的主导地位,且所占碳排放比例在不断上升,依次为 204.2 万 t C,654.1 万 t C,607.1 万 t C,分别贡献了总碳排放量的 69.83%,72.99%,90.44%。总碳排放量方面,研究区 2000—2020 年期间呈现先增长后下降的趋势,在 2010 年达到峰值,2010 年宾县总碳排放量为 896.16 万 t C,与 2000 年的 292.41 万 t C 相比增长了 3.07 倍;总排放量到达峰值后则开始下降,2020 年宾县排放量为 671.25 万 t C,与 2010 年相比减少了 224.90 万 t C。

表 6 宾县 2000—2020 年三生空间碳排放量与碳吸收量

Table 6 Carbon emissions and carbon absorption of Production-Living-Ecological Space in Bin County from 2000 to 2020

三生空间 用地类型	2000 年		2010 年		2020 年	
	碳排放量/ t C	碳吸收量/ t C	碳排放量/ t C	碳吸收量/ t C	碳排放量/ t C	碳吸收量/ t C
耕地生产空间	838303.89	352024.58	2370254.82	1006794.54	593803.90	1175286.13
林地生态空间	—	70452.82	—	67481.93	—	70542.97
草地生态空间	—	30.89	—	157.19	—	106.70
水体生态空间	—	4953.79	—	4909.89	—	1969.40
城镇生活空间	2042356.62	—	6540966.70	—	6072356.61	—
农村生活空间	43417.52	—	50337.53	—	46356.65	—
其他生态空间	—	4.26	—	9.31	—	64.70

碳汇量方面,2000—2020 年宾县总碳汇量分别为 42.75 万 t C,107.94 万 t C 和 124.80 万 t C。虽然宾县总碳汇量呈现递增趋势,但是由于宾县碳汇主要由耕地、林地、草地、水体与其他生态空间构成,其中耕地生产空间碳汇量占当年总碳汇量的重要地位,依次占 82.35%,93.28%,94.18%。其他生态空间如草地和生态空间碳汇量在 2010 年达到峰值后开始减少。

结合表 7 可以发现宾县两个时期的碳排放量均大于碳吸收量,同时碳排放总量与净碳排放量呈现先

增长后下降的趋势,碳汇总量呈现逐步上升趋势。由于社会经济迅速发展,宾县碳收支整体呈现失衡状态,整体区域受到碳排放主导,通过合理控制碳排放强度是解决宾县三生空间生态问题的重要环节。

3.3 宾县三生空间碳要素流动动态变化

3.3.1 宾县碳要素空间分布特征 通过计算宾县各三生空间用地的碳吸收量、碳排放量,并结合宾县三生空间的土地利用数据,研究得出 2000 年、2010 年和 2020 年宾县各类用地的碳源碳汇密度空间分布图。

表 7 宾县 2000—2020 年碳源碳汇变化情况
Table 7 Changes of carbon sources and carbon sinks in Bin County from 2000 to 2020

时间	碳源/ 万 t C	碳汇/ 万 t C	总碳排放量/ 万 t C	净碳排放量/ 万 t C
2000 年	292.41	42.75	292.41	264.75
2010 年	896.16	107.94	896.16	802.73
2020 年	671.25	124.80	671.25	677.29
2000—2010 年变化	603.75	65.19	1188.56	1067.48
2010—2020 年变化	-224.90	16.86	1567.41	1480.02

注:负号代表碳源或碳汇为减少量。

结合图 2,图 3 和图 4 可以看出,2000—2020 年期间,林地、草地、水体与其他用地在宾县生态系统中为主要碳汇分室,而耕地生产空间、城镇居民空间与农村居民空间则为碳源分室。碳源分室中的城镇居民空间和农村居民空间面积占比虽小,但碳排放量却占总碳排放

的 72%,大约为碳汇分室净固碳量的 6.8 倍。主导碳源分室的碳排放量增加,将直接导致高碳源密度斑块随着城市化的发展而不断扩张。高碳汇密度空间与高碳源密度均主要分布于宾县中心区域,主要包括糖坊镇、满井镇、永和乡、乌和乡、经建乡、宾安镇与常安镇的部分区域。宾县整体高碳汇密度随时间变化呈现逐年增长趋势,由 2000 年最高 154 t C/km² 增长到 2020 年 525 t C/km²;而宾县整体高碳源密度随时间变化呈现先增长后下降趋势,先是由 2000 年最高 2 621 t C/hm² 增长到 5 424 t C/hm²,后又下降到 4 194 t C/hm²。其中 2000 年碳源密度分布情况与 2020 年碳源密度相比较为明显,其原因是因为 2020 年碳源产生多集中于生活空间。整体来看碳源碳汇密度变化趋势与碳排放碳吸收总量变化趋势基本一致,高碳汇密度空间与高碳源密度空间主要聚集在宾县中心地区,是未来需要重视低碳发展调控的研究对象。

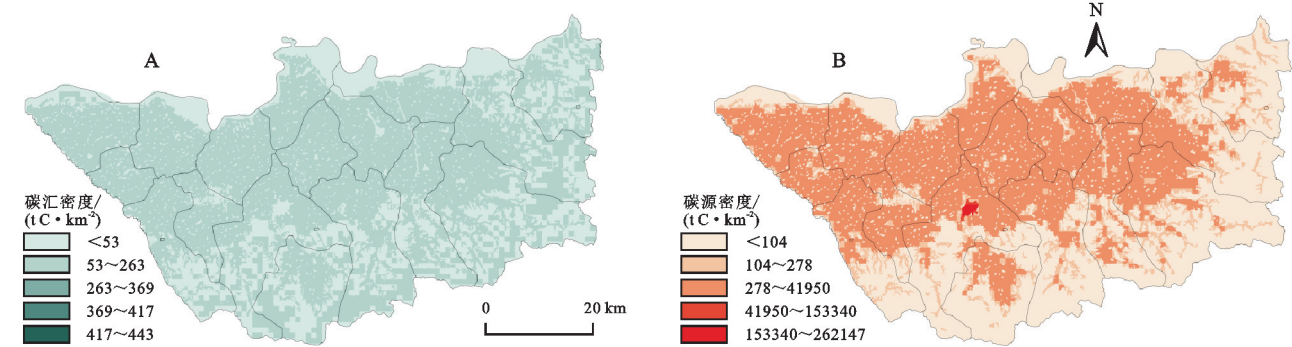


图 2 2000 年宾县碳汇密度与碳源密度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of carbon sink density and carbon source density in Bin County in 2000

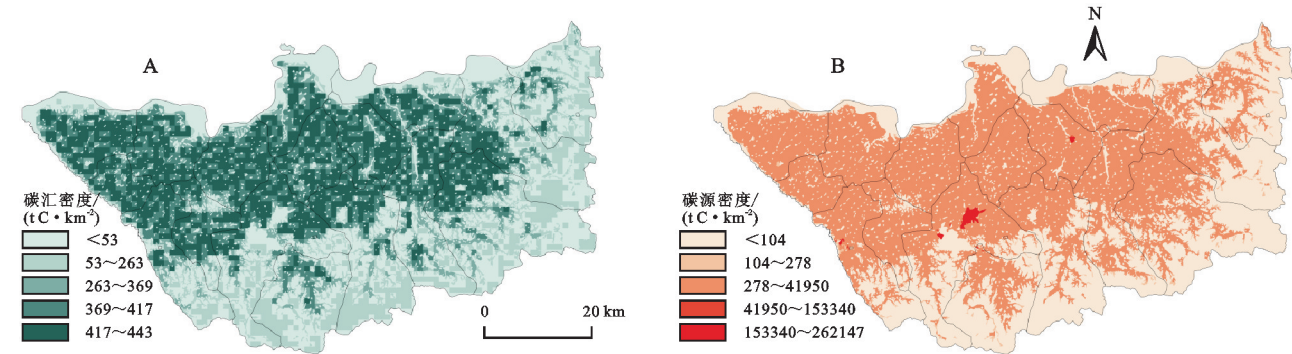


图 3 2010 年宾县碳汇密度与碳源密度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon sink density and carbon source density in Bin County in 2010

3.3.2 宾县碳要素动态变化时空特征 根据碳转移密度及土地利用转移矩阵,得到 2000—2020 年宾县各类三生空间用地的水平方向上碳转移量,如表 8 和表 9 所示。

结合图 5 可以发现,2000 至 2010 年碳转移有 3 条主要路径,且均为负碳转移,依次为耕地生产转向城镇生活空间、农村生活空间转向城镇生活空间、林地生态空间转向耕地生产空间,转移量依次为 188.77

万 t C,54.97 万 t C 和 6.8 万 t C。其中耕地、林地是关键碳转移输出分室,农村生活空间与城镇生活空间为主要的碳转移输入分室。2000—2010 年,正碳转移路径主要为城镇生活空间转向耕地生产空间和耕地生产空间转向林地生态空间,转移量为 8.4 万 t C 和 1.5 万 t C。2010—2020 年,碳转移的主要路径有两条,分别是负碳转移的耕地生产空间转向城镇生活空间与正碳转移的耕地生产空间转向林地生态空

间,转移量依次是 210.43 万 t C 和 6.7 万 t C。与前一时期相比,2010—2020 年各分室之间相互转移作用更加明显,整体碳转移量增多,且碳转移路径呈现出多样化的特点。

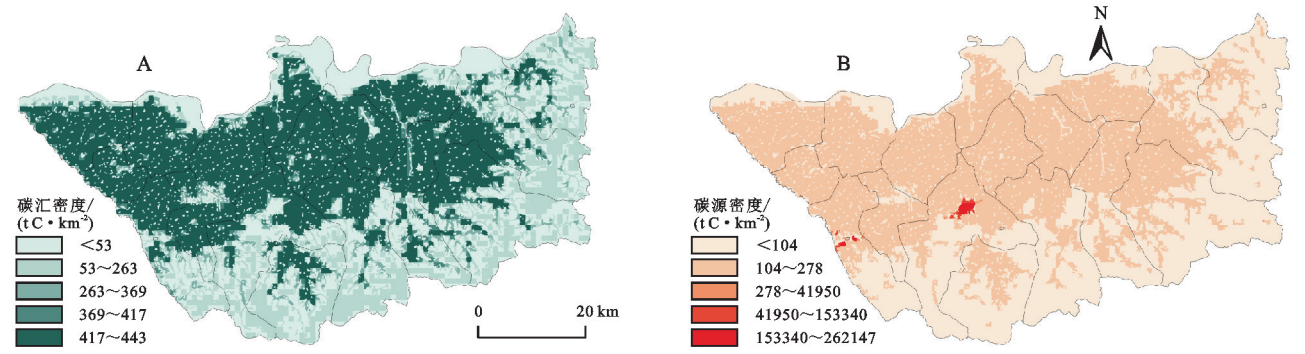


图 4 2020 年宾县碳汇密度与碳源密度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon sink density and carbon source density in Bin County in 2020

表 8 宾县 2000—2010 年三生空间水平方向碳流转移矩阵

Table 8 Spatial horizontal carbon flow transfer matrix of Bin County from 2000 to 2010		t C						
项 目		2010 年						
		C	F	G	L	Ur	R	Un
2000 年	C	0.00	15407.43	7821.81	3921.52	−1887703.0	−11564.00	1868.19
	F	−68308.80	0.00	1033.29	257.64	−46921.0	−532.16	286.11
	G	−3397.25	−236.00	0.00	−16.02	0.0	−111.39	4.18
	L	−7798.95	−95.76	343.82	0.00	−4011.1	−380.10	2.85
	Ur	84434.68	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
	R	−11260.20	213.14	117.59	207.62	−549735.0	0.00	39.09
	Un	−2027.48	0.00	−4.33	−10.86	0.0	−5.97	0.00

表 9 宾县 2010—2020 年三生空间水平方向碳流转移矩阵

Table 9 Spatial horizontal carbon flow transfer matrix of Bin County from 2010 to 2020		t C						
项 目		2020 年						
		C	F	G	L	Ur	R	Un
2010	C	0.00	67326.00	3879.81	2318.87	−2104298.10	9432.92	4779.42
	F	−15975.99	0.00	268.71	92.37	−22345.06	−203.71	32.06
	G	−3690.44	−586.78	0.00	−29.50	0.00	−77.87	27.88
	L	−4244.77	−46.39	129.17	0.00	−35070.18	−219.63	2455.33
	Ur	1053636.31	39161.65	0.00	5519.25	0.00	518745.52	0.00
	R	8756.42	510.01	116.97	118.61	−47609.65	0.00	285.53
	Un	−2221.92	−207.12	−4.10	−5.50	−53528.71	−44.57	0.00

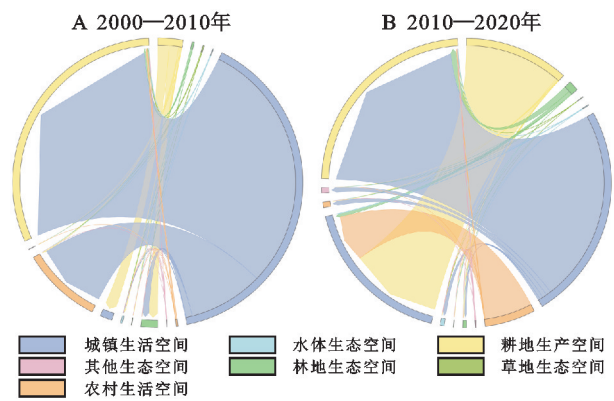


图 5 2000—2020 年宾县碳转移弦图

Fig. 5 Carbon transfer chordal diagram of Bin County from 2000 to 2020

由表 10 可知,2000—2020 年,宾县的净碳转移量均为负值,表明 20 年间的土地利用变化对宾县的碳转移产生了负面影响。从负碳转移分室向正碳转移分室转换的土地数量较大。其中 2000—2010 年的正碳转移量最少,只有 11.60 万 t C,正碳转移的主要来源是城镇生活空间转向耕地生产空间,为 8.44 万 t C,是此时期正碳转移的主要来源。而负碳转移量是正碳转移量的 22 倍多,耕地生产空间转向城镇生活空间导致的负碳转移量为 188.77 万 t C,贡献了 72.77%,净碳转移量达到最大值 247.82 万 t C。这两时期主导负碳转移的土地利用变化均来自耕地生产空间转向城镇生活空间,意味着城镇生活空间的高碳排放是阻碍

宾县碳平衡的重要区域,在 2010—2020 年达到峰值,为 210.43 万 t C,占负碳转移的 91.87%。

据 ArcGIS 自然断点法的最优结果将所有碳流划分为 3 个等级,由此分析土地—碳转移的整体空间结构。由图 6 与图 7 可以看出,在 2000—2010 年,负碳流集中在宾县的中心区域,负碳转移较为明显,且负碳转移的高值区域分布在宾县的中部,包括宾西镇和宾州镇等地区。此时期正碳流的高值区域则分布

在宾县的东南部,包括平坊镇、三宝乡常安镇、宁元镇、胜利镇和摆渡镇等地区。

在 2010—2020 年间,相较上一时期,负碳转移情况开始减少,尤其是宾县中心区域与西北区域的负碳转移分布情况明显降低,但是负碳转移量却呈现上升趋势,高值区域面积也随之增加。同时正碳流分布情况较上一时期也发生了扩张现象,集中于民和乡、新甸乡和胜利镇。

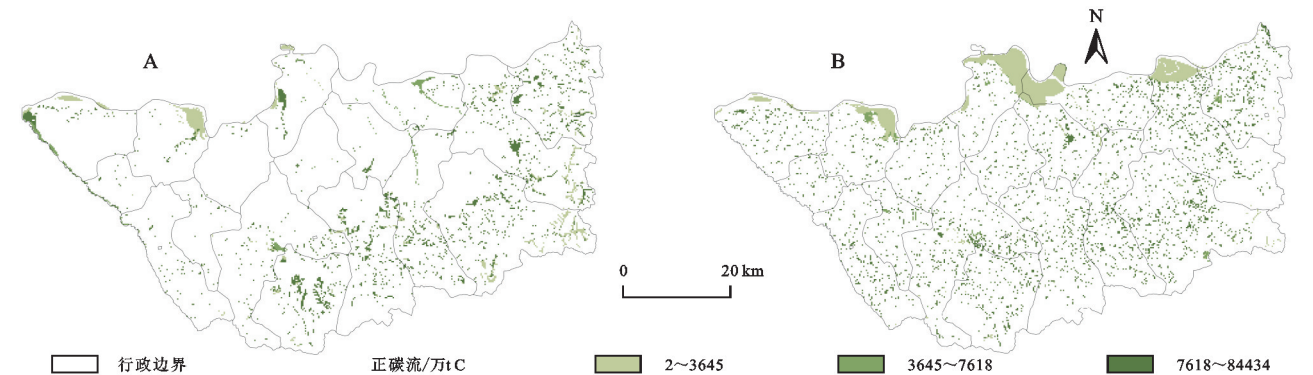


图 6 2000—2020 年宾县正碳流空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of positive carbon flow in Bin County from 2000 to 2020

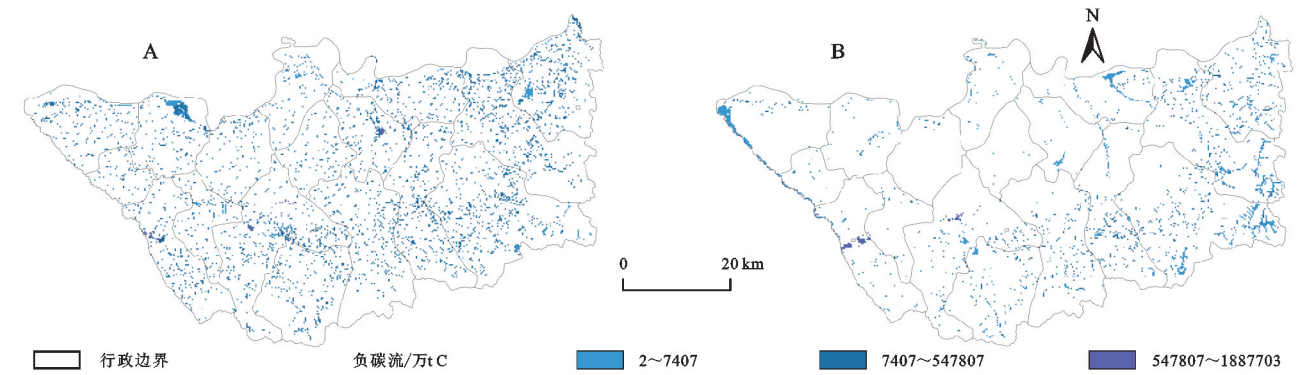


图 7 2000—2020 年宾县负碳流空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of negative carbon flow in Bin County from 2000 to 2020

表 10 三生空间格局演变过程中占主导地位的碳转移

Table 10 The dominant carbon transfer in the evolution of spatial pattern

项目	2000—2010 年		2010—2020 年	
	转移量/万 t C	方向	转移量/万 t C	方向
正碳转移	11.60	正	171.76	正
负碳转移	-259.41	负	-229.04	负
净碳转移	-247.82	负	-57.28	负
H1	8.44	Ur→C	105.36	Ur→C
贡献比	72.81%	—	61.34%	—
H2	-188.77	C→Ur	-210.43	C→Ur
贡献比	72.77%	—	91.87%	—

注: H1 代表主要正碳转移路径, H2 代表主要负碳转移路径。

4 宾县乡村低碳可持续发展路径探讨

(1) 三生空间碳要素流转的动态变化受三生空间格局演变与碳转移之间相互作用的影响。其中碳

通量作为关键因素之一,对于三生空间内部碳转移密度的调控具有重要作用。碳通量的变化会直接影响到碳要素在不同空间分室之间的动态流动,从而引发碳流转。这种过程进一步受到格局演变与碳密度差的相互关系影响,即三生用地类型的变化与不同空间分室内碳密度的差异,这种差异作为动力机制会进一步促使碳要素的转移过程发生。制定乡村低碳减排战略时,必须综合考虑多个因素,其中格局演变规律作为整个过程的重要驱动因素之一,对碳要素动态变化产生较大影响。此类综合分析能够帮助制定可持续的乡村低碳减排战略,促进区域的可持续发展。

(2) 宾县的生态系统整体上呈现出较高的碳汇稳定性,耕地生产空间需提升潜在碳固定能力。宾县需提升潜在的碳固定能力同时改善耕地用途以增强碳汇,如保持碳汇增量,合并各类生态空间的碳汇斑

块,以完善生态空间体系。应当重视生态区域的全局规划,将相对较小的碳汇区域合并为一个系统,让各种生态区域融入生产和生活空间,使得宾县的碳汇系统更为完备,分布更加均匀,既保证了碳汇的减碳效果,也可以充分发挥其碳汇功能。

(3) 有效建立涵盖多个镇的协同碳减排机制,并同时重视区域之间的碳流转现象。碳流转的关键路径变化体现了碳要素在不同分室之间的动态流动过程。其中耕地生产空间以及城镇生活空间之间的相互关系呈现高度紧密。在宾县未来的土地利用弹性规划中需重视对耕地生产空间和城镇生活空间协同发展,以调整碳要素流动路径。如可以通过优化能源结构、加强耕地保护以增加碳汇等手段实现,从而达到有效的低碳减排目标。

5 结论

宾县地类主要以耕地生产空间为主,林地生态空间次之,土地利用格局发生较大变化。农业建设空间变化增幅最大,农村生活空间面积逐步增长,同时宾县生态空间面积也有效增加,展现出城乡与自然生态统筹协调发展的局面。2000—2020年宾县碳排放量均大于碳吸收量,碳排放总量与净碳排放量呈现先增长后下降趋势,碳汇总量呈现上升趋势,宾县碳收支不平衡加剧。碳源碳汇密度变化趋势与碳排放碳吸收总量变化趋势基本一致,高碳汇密度空间与高碳源密度空间主要聚集在宾县中心地区,是未来需要重视低碳发展调控的研究对象。2000—2020年净碳转移均为负值,表明土地利用变化对该区域的碳平衡产生消极影响。耕地生产空间和城镇生活空间是碳转移的关键节点,耕地生产空间转为城镇生活空间和城镇生活空间转向耕地生产空间分别是两个时期正、负碳转移的关键路径。然而,目前的研究还存在一些限制性因素,其中主要问题是尚未深入探索土地利用碳要素代谢的驱动机制,在后续的研究中需要对此方向继续开展研究。

参考文献(References):

- [1] 廖霄梅.新型城镇化建设与产业结构优化协调发展的机制、问题及对策[J].生态经济,2018,34(6):111-116.
Liao X M. The mechanism, problems and countermeasures of the new urbanization construction and the optimization and coordinated development of industrial structure[J]. Ecological Economy, 2018,34(6):111-116.
- [2] 林刚,江东,付晶莹,等.“三生”空间格局演化“碳流”分析:以唐山市为例[J].科技导报,2020,38(11):107-114.
Lin G, Jiang D, Fu J Y, et al. Carbon flow analysis for production-living-ecological space: A case study of Tangshan, China[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(11):107-114.
- [3] 李晶,陈松林,李晨欣,等.基于生态网络分析的厦漳泉地区土地碳代谢[J].应用生态学报,2023,34(5):1375-1383.
Li J, Chen S L, Li C X, et al. Land carbon metabolism in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou region based on ecological network analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(5):1375-1383.
- [4] 李凯,侯鹰,付奇,等.都市圈“三生空间”协同变化及其对生态系统服务的影响[J].水土保持研究,2023,30(3):430-439.
Li K, Hou Y, Fu Q, et al. Synergistic changes of production-living-ecology spaces and their influences on ecosystem services in the metropolitan area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):430-439.
- [5] 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.
Li J L, Liu Y S, Li Y R. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of ‘production-living-ecological’ spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7):1290-1304.
- [6] 崔家兴,顾江,孙建伟,等.湖北省三生空间格局演化特征分析[J].中国土地科学,2018,32(8):67-73.
Cui J X, Gu J, Sun J W, et al. The spatial pattern and evolution characteristics of the production, living and ecological space in Hubei Province [J]. China Land Science, 2018,32(8):67-73.
- [7] Liu Y S, Lu S S, Chen Y F. Spatio-temporal change of urban-rural equalized development patterns in China and its driving factors[J]. Journal of Rural Studies, 2013, 32:320-330.
- [8] 李明薇,鄢雨早,陈伟强,等.河南省“三生空间”分类与时空格局分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(9):13-20.
Li M W, Yun Y H, Chen W Q, et al. Classification and spatial-temporal analysis of “production-living-ecological” spaces in Henan Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018,39(9):13-20.
- [9] 雷嫦,周国富,黄启芬,等.都市市域“三生空间”结构的时空格局[J].水土保持研究,2021,28(5):380-386.
Lei C, Zhou G F, Huang Q F, et al. Spatial and temporal Pattern of Level Production-Living-Ecological(PLE) space in village of Duyun City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):380-386.
- [10] 万将军,邓伟,张少尧,等.喀斯特山区国土空间类型划分及其变化特征研究[J].生态经济,2018,34(10):184-190.
Wan J J, Deng W, Zhang S Y, et al. Land space type classification and variation study on its change in Karst

- Mountain County[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(10):184-190.
- [11] 林伊琳,赵俊三,张萌,等.滇中城市群国土空间格局识别与时空演化特征分析[J].*农业机械学报*, 2019, 50(8):176-191.
- Lin Y L, Zhao J S, Zhang M, et al. Identification of territory space pattern and spatio-temporal evolution analysis of urban agglomeration in central Yunnan[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8):176-191.
- [12] 樊文平,单宝艳,蔡菲.基于ESDA-GIS的山东省碳排放空间格局研究[J].*山东建筑大学学报*, 2017, 32(4):322-326.
- Fan W P, Shan B Y, Cai F. Study on spatial pattern of carbon emission in Shandong Province based on ESDA-GIS[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2017, 32(4):322-326.
- [13] Kim Y, Worrell E. International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry[J]. *Energy Policy*, 2002, 30(10):827-838.
- [14] Li Y, Shen J Y, Xia C Y, et al. The impact of urban scale on carbon metabolism: A case study of Hangzhou, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292:126055.
- [15] Espirito-Santo F D B, Gloor M, Keller M, et al. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance[J]. *Nature Communications*, 2014, 5:3434.
- [16] Chuai X W, Yuan Y, Zhang X Y, et al. Multiangle land use-linked carbon balance examination in Nanjing City, China[J]. *Land Use Policy*, 2019, 84:305-315.
- [17] 王永洵,王亚飞,张静文,等.海岸带土地利用转型及其生态环境效应:以福建海岸带为例[J].*环境科学学报*, 2021, 41(10):3927-3937.
- Wang Y X, Wang Y F, Zhang J W, et al. Land use transition in coastal area and its associated eco-environmental effect: A case study of coastal area in Fujian Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10):3927-3937.
- [18] 杨旭,刘贤赵.长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测[J].*环境科学*, 2022, 43(12):5850-5860.
- Yang X, Liu X Z. Temporal and spatial differences in carbon conduction and prediction effect of land type transfer in Chang-Zhu-tan urban agglomeration [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12):5850-5860.
- [19] 田云,张俊彪.中国农业生产净碳效应分异研究[J].*自然资源学报*, 2013, 28(8):1298-1309.
- Tian Y, Zhang J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8):1298-1309.
- [20] 路昌,雷国平,张慧,等.黑龙江省哈尔滨市不同土地利用类型的碳排放效应分析[J].*水土保持研究*, 2014, 21(6):245-250.
- Lu C, Lei G P, Zhang H, et al. Effects of different land use patterns on carbon emission in Harbin city of Heilongjiang Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6):245-250.
- [21] 张赫,彭千芮,王睿,等.中国县域碳汇时空格局及影响因素[J].*生态学报*, 2020, 40(24):8988-8998.
- Zhang H, Peng Q R, Wang R, et al. Spatiotemporal patterns and factors influencing county carbon sinks in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24):8988-8998.
- [22] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/2/3):217-232.
- [23] 王格,董会忠,张慧.基于ArcGIS和SD的山东省碳排放演化格局及低碳经济发展战略仿真[J].*科技管理研究*, 2017, 37(1):249-256.
- Wang G, Dong H Z, Zhang H. Evolution pattern of carbon emission and simulation strategy analysis of low carbon economy development in Shandong Province based on ArcGIS and SD[J]. *Science and Technology Management Research*, 2017, 37(1):249-256.
- [24] 匡耀求,欧阳婷萍,邹毅,等.广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J].*中国人口·资源与环境*, 2010, 20(12):56-61.
- Kuang Y Q, Ouyang T P, Zou Y, et al. Present situation of carbon source and sink and potential for increase of carbon sink in Guangdong Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(12):56-61.
- [25] 舒心,夏楚瑜,李艳,等.长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系[J].*生态学报*, 2018, 38(17):6302-6313.
- Shu X, Xia C Y, Li Y, et al. Relationships between carbon emission, urban growth, and urban forms of urban agglomeration in the Yangtze River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17):6302-6313.
- [26] 刘刚,沈镭.中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J].*自然资源学报*, 2007, 22(1):9-19.
- Liu G, Shen L. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1):9-19.