

DOI: 10.20103/j.stxb.202303240566

袁建勋, 方斌, 阚红云, 何莎莎. 基于自然-经济综合视角的碳排放强度与生态盈亏多情景模拟研究——以淮海经济区为例. 生态学报, 2024, 44(6): 2199–2215.

Yuan J X, Fang B, Kan H Y, He S S. Multi-scenario simulation of carbon emission intensity and ecological profit and loss from the perspective of nature and economy in Huaihai Economic Zone. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2199–2215.

基于自然-经济综合视角的碳排放强度与生态盈亏多情景模拟研究

——以淮海经济区为例

袁建勋^{1,2,3}, 方斌^{1,2,3,*}, 阚红云⁴, 何莎莎^{1,2,3}

1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2 南京师范大学新型城镇化与土地问题研究中心, 南京 210023

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

4 华中师范大学公共管理学院, 武汉 430079

摘要:生态盈亏与碳排放强度是衡量生态环境质量与经济发展水平的重要指标,分析两者时空关联并预测未来演进方向对提升区域生态环境质量健康水平具有指导作用。以淮海经济区为研究对象,以 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期土地利用数据为基础,运用 PLUS 模型、双变量自相关、耦合协调度及面板计量回归模型等方法,预测并分析淮海经济区 2000—2036 年 3 种情景下碳排放强度、生态盈亏的演化特征及时空关联。结果表明:(1)常规发展情景下,淮海经济区生态性呈下降趋势,强耕地保护情景下生态性微有下降,强生态保护情景下,生态性有所上升,自然要素是主导。(2)常规发展情景下,淮海经济区碳排放量逐渐加大,强耕地保护及强生态保护情景下,则呈下降趋势;三种状态下,碳排放强度均呈下降趋势,时间轴 2010—2020 年降幅较大,空间序河流域地区碳排放强度降幅较大。(3)淮海经济区碳排放强度与生态盈亏呈负相关关系,低低和低高聚类主要分布在城镇建设用地周边,高低和高高聚类分布在人类干扰较少的自然区域;高高聚类主要位于河流域交汇区,表明水域有效降低碳排放强度的功能。(4)淮海经济区的碳排放强度与生态盈亏之间的耦合协调度呈东西高、中部低的态势,高耦合协调度主要分布于低高聚类,即自然地区,低耦合协调度主要分布于西部平原区;科学技术、经济发展水平及二产占比对耦合协调度呈正影响,城镇化率、道路密度呈负影响。研究认为,淮海经济区当前的土地利用方式,不利于区域环境质量的改善,建议进一步强化建设用地管控,大力推进高标准农田建设和水域保护,以耕地质量提升和水域保护加强提升粮食主产区环境质量健康水平。

关键词:土地利用;多情景;碳排放强度;生态盈亏;淮海经济区

Multi-scenario simulation of carbon emission intensity and ecological profit and loss from the perspective of nature and economy in Huaihai Economic Zone

YUAN Jianxun^{1,2,3}, FANG Bin^{1,2,3,*}, KAN Hongyun⁴, HE Shasha^{1,2,3}

1 College of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Research Center for New Urbanization and Land Issues, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu Collaborative Innovation Center of Geographic Information Resources Development and Utilization, Nanjing 210023, China

4 School of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

基金项目:国家自然科学基金项目(42071229, 41671174);江苏省高校优势学科建设工程项目(164320H116);江苏省自然资源科技项目(2023021)

收稿日期:2023-03-24; **网络出版日期:**2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenyangfang731@163.com

Abstract: Ecological profit and loss and carbon emission intensity are important indicators to measure ecological environment quality and economic development level. Analyzing the temporal and spatial correlations between the two and predicting the future evolution have a guiding effect on improving the health level of regional eco-environmental quality. This paper takes the Huaihai Economic Zone as the research object. The patch-generating land use simulation model, bivariate autocorrelation, coupling coordination and panel econometric regression model are used to predict and analyze the spatial and temporal correlations of carbon emission intensity and ecological profit and loss under three scenarios from 2000 to 2036, based on the land use data of 2000, 2010 and 2020. The results show that: (1) under the conventional development scenario and cultivated land protection, the ecology of Huaihai Economic Zone shows a downward trend. The ecological environment rises only in the ecological protection scenario, where the natural element is the dominant factor. (2) Under the conventional development scenario, the carbon emission in Huaihai Economic Zone gradually increases, while the cultivated land protection scenario and ecological protection scenario show a decreasing trend. Under all three states, the carbon emission intensity shows a decreasing trend, with a larger decrease in 2010—2020 and a larger decrease in the river water system area. (3) The carbon emission intensity and ecological profit and loss in Huaihai Economic Zone are negatively correlated. The low-low and low-high clusters are mainly distributed around urban construction land, high-low clusters are distributed in natural areas with less human interference. The high-high clusters are mainly located in the river area, which indicates the function of watershed to effectively reduce carbon emission intensity. (4) The coupling coordination between carbon emission intensity and ecological profit and loss in the Huaihai Economic Zone is high in the east and west, low in the middle area. The high coupling coordination is mainly distributed in low-high clusters, i.e., natural land areas, while the low coupling coordination degree is mainly distributed in the western plain region. Science and technology, economic development level, and the proportion of secondary production have positive effects on the coupling coordination, and urbanization rate and road density have negative effects. According to the study, the current land use mode in Huaihai Economic Zone is not conducive to the improvement of regional environmental quality. It is suggested to further strengthen the management and control of construction land, vigorously promote the construction of high-standard farmland and water area protection, and enhance the environmental quality and health level of major grain-producing areas by improving the quality of cultivated land and water area protection.

Key Words: land use; multiple scenarios; carbon emission intensity; ecological profit and loss; Huaihai Economic zone

自改革开放以来,中国城镇化率从 17.9% 增加到了 63.89%^[1],处于较快发展期,快速城镇化进程中高强度的资源开发利用,导致耕地资源和生态空间缩减过快、生态系统功能退化^[2]、碳排放持续增加^[3]等问题。1987 年以来,我国碳排放量年均增速达到了 5.2%^[4],2006 年后更是成为世界上碳排放量最大的国家^[5];生态系统“超载”严重,生态足迹持续增长,生态承载力持续下降^[6],有研究表明中国人的生态需求是当今中国生态环境供给量的 3.4 倍^[7]。为此,中国政府确定了 2035 年美丽中国战略目标^[8],并承诺 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和^[9]。在“双碳”目标和美丽中国建设的双重背景下,经济增长与生态保护的双重需求正成为当前中国可持续发展亟待解决的矛盾。

碳排放强度,一般用单位 GDP 所产生的碳排放量加以表达,是区域能源利用效率及科学技术水平的重要标志,因其包含了经济与生态双重属性而成为破解经济增长与生态保护效率的重要指标^[10],也成为了中国碳减排的重要指标,并确定 2030 年碳排放强度下降 60%—65%^[11]。当前学界对于碳排放强度的测度主要采取碳排放系数^[12]及投入产出^[13]两种方法,并逐渐从单一的能源消耗^[14]变式为基于农业^[15]、旅游业^[16],交通^[17]及居民消费^[18]等多领域测度,同时,考虑到碳排放强度具备较强的空间依赖性^[19],学者们对中国不同区域碳排放强度进行了测度,证实了其明显的地域差异性和“南高北低”空间格局^[20—21],并认为经济增长、产业结构、能源结构、城市化水平等因素是碳排放强度的重要影响因素^[22—23]。总体上,碳排放强度的研究较为

丰富,但它与生态环境间的相互关系却较少被关联。生态盈亏,可作为表征生态环境质量的重要指标,反映的是生态系统的供需平衡关系,学界多以生态承载力与生态足迹的差值衡量生态盈亏,方法上多运用 William E. Rees 提出的生态足迹模型^[24]进行核算,Wackernagel^[25]完善了该概念并测算了全球尺度下的生态供需关系,运用“投入产出”法^[26]、能值法^[27]估算生态足迹,在流域^[28]、城市^[29]等尺度取得了较丰富的研究成果。此外,郭慧等^[30]将生态系统服务价值引入生态足迹模型,从经济和自然两个维度对生态系统生态盈亏进行测算,取得了较好的研究成果。综上可知,过往研究从不同视角和尺度分别对碳排放强度与生态盈亏进行了大量研究,取得了很多有价值的成果,但将二者作为统一体进行研究却着墨较少,本研究以土地利用状态为中间变量建立二者时空关联,以期为中国经济发展与碳中和目标实现提供理论支撑。

淮海经济区人口多、耕地资源丰富,是我国重要粮食主产区之一。同时,淮海经济区接壤东部沿海地区,是承接其产业转移的理想地带,也是城镇化建设的潜力地带。保障粮食安全、保护经济发展、保育生态健康既是“双碳”目标的需要,也是国家健康稳定发展的需要,为此,本研究以淮海经济区 2000、2010 和 2020 三期土地利用数据为基底,从格网尺度分析并预测不同情景下生态盈亏与碳排放强度的时空演化,在此基础上探讨两者的时空关联特征及影响因素。研究结果可为淮海经济区解决好城市发展与生态保护的关系、粮食主产区妥善处理好区经济发展与耕地保护的关系提供案例支持。

1 理论框架分析

土地是关联自然生态系统和社会经济系统的媒介,也是承载人类活动的关键要素,人类对经济发展的谋求会导致土地利用/覆被变化,进而改变陆地表层的物质循环和能量流动^[31]。

作为其子系统的土地生态系统具备类似的作用机理(图1):自然效益主导的土地利用类型(林地、草地、水域等)与经济效益主导的土地利用类型(耕地及建设用地等)之间的相互转换会通过改变生物多样性、生态系统功能等生态要素^[32],从而影响土地生态系统所能提供的各项服务,所展现出的状态是盈余还是亏损,取决于受人类活动的影响程度。而当前的土地生态系统处于人类主导之下,因此呈现出更强的供给服务以满足人类社会经济活动的需求^[33],使得调节服务和支撑服务能力下降,土地生态系统的供需结构发生改变,最终导致生态盈亏状态呈负向增长趋势。与人类活动息息相关的碳排放强度是生态系统结构改变的重要成因之一,本质上碳排放这一过程是由土壤及植被碳储量的变化和社会经济活动强度的变化两重因素所引起^[34],分

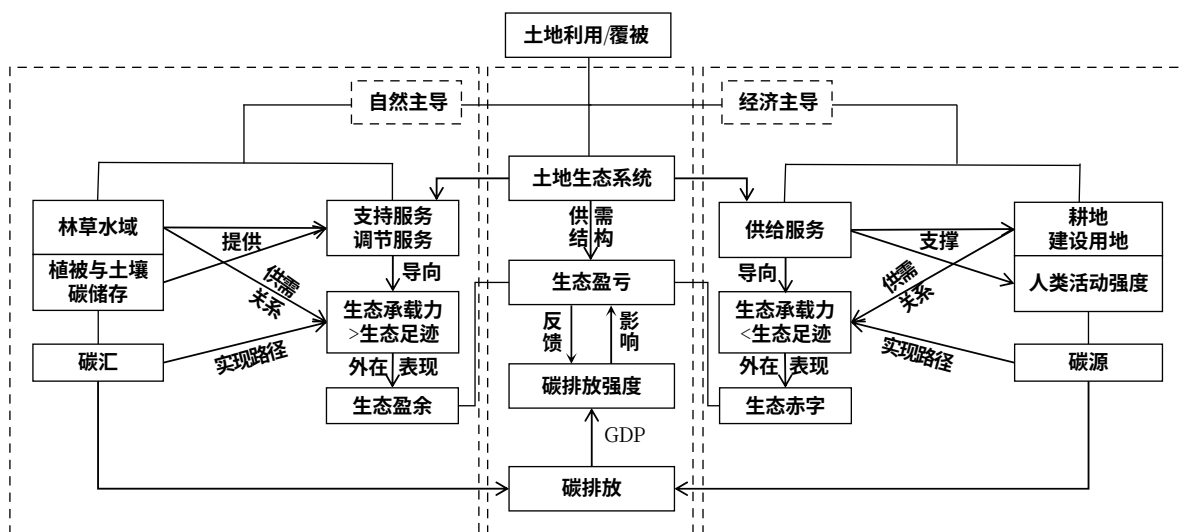


图1 生态盈亏与碳排放强度理论框架

Fig.1 Theoretical framework of ecological profit and loss and carbon emission intensity

GDP:国内生产总值

别代表着土地利用的直接碳排放效应和间接碳排放效应^[35],与纯经济效益的 GDP 指标结合使其兼具了生态和经济两种属性,因此碳排放强度也是一个“自然-经济”的综合体^[36]。

从上述分析可知,碳排放强度与生态盈亏在本质上都是土地利用/覆被改变所引起的“自然-经济”系统复合变化,两者之间互相影响,探究二者间的量化关系及时空关系也需要从自然和经济两个层面分析。自然主导的土地利用,包括林地、草地及水域等,其本身是碳汇及生态承载力的主要来源,且土壤和植被中的碳储存在生态系统中为调节服务和支持服务提供重要的基础支撑^[37],这就使得自然主导的区域生态承载力大于生态足迹,呈现为生态盈余状态,反馈在碳排放强度上即为增强碳吸收能力;而受经济主导的土地利用,包括耕地及建设用地等,其本身是碳源和生态足迹的主要来源,提供了人类经济活动所需要的基础物资,生态足迹大于生态承载力,呈现为生态赤字状态,反馈在碳排放强度上即为增强碳排放能力。综上所述,生态盈亏与碳排放强度在空间上会形成互动反馈机制,两者在受到土地利用/覆被变化影响的同时又相互作用,研究其关联及影响态势可以为“自然-经济”系统协调发展提供帮助。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

淮海经济区,总占地面积 17.81 万 km²(图 2),由江苏苏北五市、山东鲁南六市、河南豫东三市、安徽皖北六市共二十个地级市组成,徐州是其中中心城市。其北接环渤海经济圈,南临长三角城市群,地理区位优势,可承接长三角城市群和环渤海经济圈产业转移方。该区域人多地多,尤其是农村人口多,2020 年常住农业人口仍有 5260 万人,为区域总人口的 43.96%,户籍人口超过了 50%;耕地面积约 1200 万 hm²,占全国耕地面积近 10%,区域内黄淮平原是我国七大粮食主产区之一。因此,该区域是我国乡村城镇化的重要潜力区、粮食安全重要保障区、生态安全重要管护区。如何促进该区域经济增长、城镇化加速的同时,保障好粮食安全和生态环

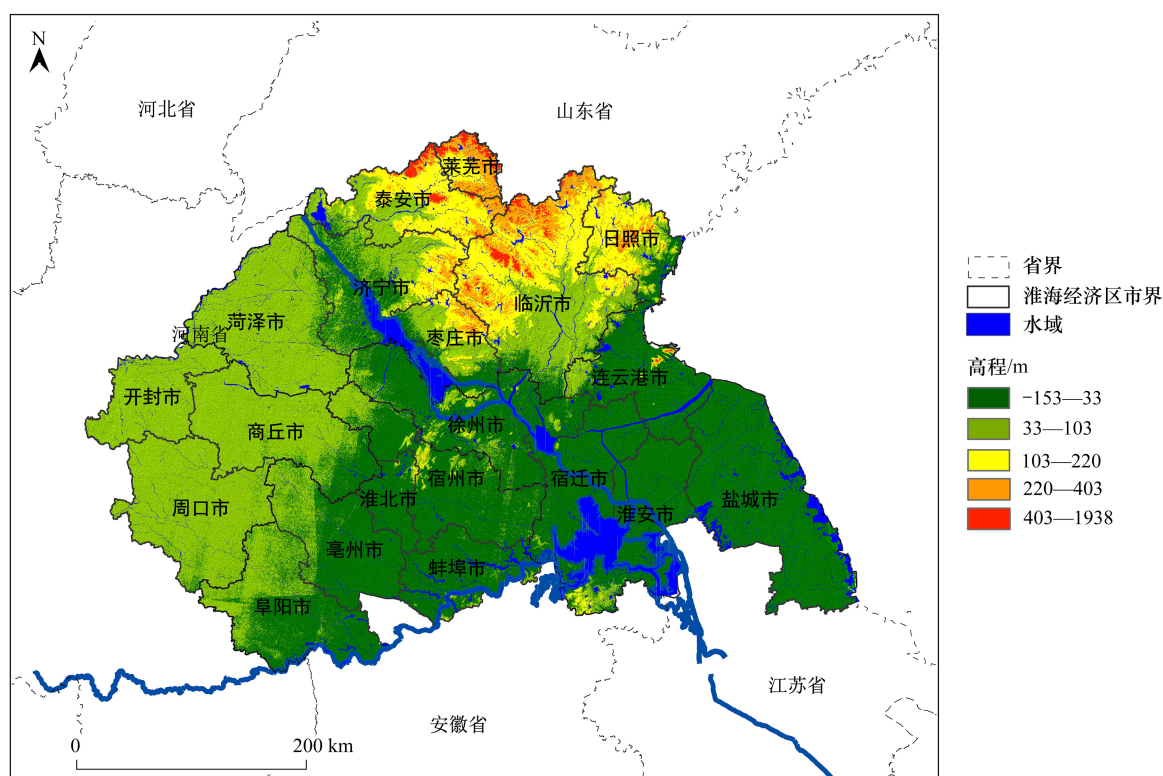


图 2 研究区地理位置

Fig.2 Geographical location of the study area

境健康区域能否可持续发展的关键。

2.2 数据来源

本文所用数据如表 1 所示,其中,淮海经济区 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据的空间分辨率为 30m,并根据我国最新土地利用现状分类标准,并结合研究目的,将原始土地利用数据重新划分成耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类;社会经济数据以市域为单位,包括人口、GDP 及其构成、能源消耗及公路里程等数据;各类距离是利用 ArcGIS 10.7 中的欧氏距离工具计算而得,坡度和坡向是 ArcGIS 10.7 中以高程为基底通过坡度和坡向模块计算而得;各驱动因子数据均用于土地利用多情景模拟中,且为栅格数据。

表 1 数据来源信息表
Table 1 Data source information table

数据类型 Data types	数据名称 Data names		数据来源 Data sources
基础数据 Basic datas	行政界线	淮海经济区行政边界	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn/)
	土地利用	2000、2010 及 2020 年 3 期土地利用数据	中国科学院资源环境与数据中心 (http://www.resdc.cn/DOI)
	社会经济数据	2000、2010 及 2020 年各类社会经济数据	统计年鉴与政府工作报告
PLUS 模型驱动因子 Driving factors of patch-generating land use simulation model	自然环境条件	年平均降水量	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)
		年平均气温	
		高程	中国科学院资源环境与数据中心 (http://www.resdc.cn/DOI)
		坡度	
		坡向	
		土壤侵蚀程度	
	社会经济条件	土壤类型	
		地均 GDP	
		人口	WorldPopHub (https://hub.worldpop.org/)
		到铁路距离	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
		到道路距离 (一级路、二级路、三级路)	
		到政府中心距离	
		到河流水域距离	

2.3 研究方法

2.3.1 生态盈亏模型

本研究利用生态足迹模型测算生态盈亏,以衡量研究区域的可持续发展状况。生态足迹是指能够提供某一时段人类日常生活发展所消耗的资源 and 容纳所产生废弃物所需的生物生产性土地面积^[29],其生态盈亏公式如下:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^m (a_i \times r_i)$$

(1)

$$ECC = N \times \sum_{i=1}^m ecc_i = N \times \sum_{i=1}^m (a_i \times r_i \times y_i)$$

(2)

$$ED = ECC - EF$$

(3)

式中, EF 是生态足迹(hm^2); N 为区域总人口数(人); ef 为人均生态足迹($\text{g hm}^{-2}\text{人}^{-1}$); a_i 是人均占有 i 类生物生产性土地面积(hm^2); r_i 是均衡因子; ECC 是生态承载力(hm^2); ecc_i 是人均生态承载力($\text{g hm}^{-2}\text{人}^{-1}$); y_i 是产量因子。 ED 代表生态盈亏, $ED \geq 0$, ED 是生态盈余(hm^2); $ED < 0$, ED 是生态赤字(hm^2)。

在生态足迹和生态承载力的计算中, 由于生物生产性土地具备类型和地域差异, 需要利用均衡因子将不同类型生物生产性土地面积转换为可比的标准面积; 利用产量因子将不同区域的同类生物生产性土地面积转化为可比的标准面积。本研究采用郭慧等^[30]基于生态系统服务价值的方法构建产量因子及均衡因子, 公式如下:

$$r_j = \frac{P_j}{P_{NP}} = \frac{D_t \times F_j}{\sum (D_t \times F_j \times S_j)} \quad (4)$$

$$y_j = \frac{P_j}{E_j} = \frac{D_t \times F_j}{D_t \times F_j} \quad (5)$$

式中, r_j 是均衡因子; P_j 是第 j 类生态系统单位面积的生态系统服务价值量(元 $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$); $\overline{P_{NP}}$ 是全部用地类型的单位面积平均生态系统的服务价值(元); D_t 是第 t 年一个标准当量因子的生态系统服务价值(元/ hm^2); F_j 是研究范围内第 j 类生态系统服务价值当量因子之和; S_j 是第 j 类生态系统面积(hm^2); y_j 是产量因子, $\overline{E_t}$ 是第 j 种土地的全国平均单位面积生态系统服务价值; $\overline{D_t}$ 是全国第 t 年 1 个标准当量因子的生态系统服务价值(元/ hm^2)。其中, 生态系统服务价值参照谢高地等^[38]的当量因子法, 并利用淮海经济区 20 个市 1 hm^2 农田每年粮食平均产量的经济价值及 NPP 进行修正^[39]得到; 2036 年的预测人口利用 2000—2020 人口密度进行预测而得, 模型采用 ARIMA(1, 1, 0), 预测模拟结果 R^2 为 0.907, AIC 为 265.698, 结果可信; 预测的产量因子和均衡因子根据杨屹等^[40]的研究, 采用 2020 年农产品价格计算出的产量因子和均衡因子。

2.3.2 碳排放强度估算

本研究中, 将碳排放量与 GDP 的比值作为碳排放强度^[41], 其中, 碳排放量的计算是利用各个土地类型的面积和相应的碳排放系数相乘并求和, 耕地、林地、草地、水域和未利用地公式如下:

$$E_k = \sum e_i = \sum S_i \times \delta_i \quad (6)$$

式中, E_k 是碳排放量(t); e_i 是 i 用地类型的碳排放量(t); S_i 是用地类型 i 的面积(hm^2); δ_i 是第 i 类土地的碳排放系数, 各系数如表 2:

表 2 用地类型碳排放系数
Table 2 Carbon emissions coefficient of land-use type

土地利用类型 Land-use type	碳排放系数 Carbon emission factor/(t/ hm^2)	数据来源 Data source	土地利用类型 Land-use type	碳排放系数 Carbon emission factor/(t/ hm^2)	数据来源 Data source
耕地 Cultivated land	0.422	李颖等 ^[42]	水域 Water	-0.253	段晓南等 ^[44]
林地 Forest	-0.644	方精云等 ^[43]	未利用 Unused land	-0.005	赖力等 ^[45]
草地 Grassland	-0.022				

2000—2020 年建设用地碳排放量根据淮海经济区的化石能源消耗量来计算, 化石能源主要包括煤、石油和天然气三个部分^[46], 计算公式如下:

$$E_t = \sum et = \sum \eta_i \times \theta \times \alpha \times \beta_i \quad (7)$$

式中, E_t 是建设用地总碳排放量(t); e_i 是各类化石能源的碳排放量(t); η_i 是各类化石能源转化为标准煤的系数; θ 是有效氧化系数, 为 0.982; α 是标准煤含碳量, 为 0.73257(t); β_i 表示在获得相同热能下各类能源释放 CO_2 为煤释放 CO_2 量的倍数, 煤为 0, 石油为 0.813, 天然气为 0.561。

2036 年预测情景下碳排放量是根据顾汉龙等^[47]的研究,采用 2020 年建设用地碳排放量与建设用地面积的比值作为碳排放系数来估算预测年份各个情景下的碳排放量;预测年份 GDP 根据 2000—2020 年 GDP,采用灰色预测模型 GM(1,1)模拟得到,后验差比 C 值为 0.003,预测精度高。

2.3.3 土地利用模拟预测

本研究采用斑块生成土地利用变化模拟模型(Patch-generating Land Use Simulation Model, PLUS)进行土地利用预测,这是一种基于元胞自动机模型,用于模拟多类土地利用斑块级的变化及挖掘其诱因的软件。本文选取如表 1 所示的 15 项驱动因子,同时将水域作为限制区。

领域权重参数,是用来表示不同土地利用类型的用地扩张强度,参数范围是 0—1,数值大小反映不同土地利用类型用地的侵占水平,本研究领域权重如表 3:

表 3 领域权重参数

Table 3 Realm weight parameters						
土地利用类型 Land types	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
领域权重 Neighborhood weight	0.4	0.1	0.2	0.32	1	0.15

不同发展情景下土地利用变化是有差别的,本文设定常规发展、强耕地保护、强生态保护三种情景,并以成本矩阵表示各类用地之间能否互相转换,1 代表可以转换,0 代表不能转换。常规发展情景遵循一般经济规律,仅将水域设置为限制区,同时由于建设用地转换为其他地类的难度与成本较大,实际发生情况较少,所以设置建设用地不轻易向其他用地转换;强耕地保护情景中,将耕地和水域设置为限制区,两者之间不相互转换同时不轻易转向其他地类;强生态保护情景中,设置水域为限制区,林地草地不向其他地类转移。成本矩阵如表 4:

表 4 情景模拟成本矩阵

Table 4 Cost matrix of scenario simulation																		
情景 Scenario 土地类型 Land types	常规发展 Normal development						强耕地保护 Cultivated land protection						强生态保护 Ecological protection					
	耕地	林地	草地	水域	建设	未利用	耕地	林地	草地	水域	建设	未利用	耕地	林地	草地	水域	建设	未利用
耕地 Cultivated land	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
林地 Forest	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
草地 Grass land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
水域 Water area	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
建设 Construction land	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
未利用 Unused land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

2.3.4 空间相关性分析

碳排放和生态盈亏都是衡量区域生态状况的指标,为探究两者在空间上的联系,本文采用空间自相关分析中的局部空间自相关法。空间自相关分析是地统计学中分析地理要素空间关联性的的重要手段,其中的局部空间自相关是用于反映相邻空间单元之间各个变量的相关性关系^[48]。局部空间相关性的分析结果可划分为 5 种集聚类型,分别是高高、高低、低高、低低及不显著。其中高高型和低低型为正相关,表明空间集聚程度高;高低和低高型为负相关,表明空间集聚程度低,呈现离散分布;不显著即表明无集聚或离散分布特征。

2.3.5 耦合协调度

耦合协调度是指系统受自身和外部作用下形成的综合作用关系。其耦合度通常用来衡量系统间的作用强弱程度,协调度则着重分析相互作用中良性耦合程度的大小,具体模型如下^[49],

$$C = 2 \left[\frac{U_1 U_2}{(U_1 + U_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \tag{9}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{10}$$

式中, C 是耦合度; T 是综合协调指数; U_1, U_2 分别代表碳排放强度与生态盈亏的标准化数据; α, β 是两个系统的贡献份额,本文认为碳排放强度与生态盈亏同等重要,因此均设定为 0.5。

2.3.6 面板回归计量模型分析

本研究在模型构建中,首先参考 STIRPAT 模型,从人口、财富和技术三方面因素考虑影响因子^[50](表 5),并将碳排放强度和生态盈亏的耦合协调度作为因变量。同时,为减少异方差,消除变量量纲影响,对文中变量进行自然对数处理面板数据模型可以有效反映数据变量在时间和截面两个维度上的信息,可将个体的异质性考虑在,本研究采用 Tobit 模型,适用于因变量在某种限制下取值的情景,以克服传统 OLS 回归可能面临的估计结果出现偏差的不足,具体公式如下所示:

表 5 影响因素
Table 5 Influencing factors

变量 variable	说明 Explanation	简写 Abbreviation	单位 Unit
道路密度 Roads density	公路里程与市域面积的比例	RD	km/km ²
经济发展水平 Gross Domestic Product	国内生产总值	GDP	万元
外商投资 Foreign direct investment	外商直接投资占 GDP 总值的比例	FDI	—
技术进步 Technology	单位 GDP 能源消耗	TEC	t/万元
产业结构 Industrial structure	第二产业生产总值占 GDP 比例	IS	—
城镇化率 Urbanization rate	城镇常住人口占总人口的比重	UR	—

$$Y_{it} = \begin{cases} Y_{it} = \beta_0 + \sum_{t=1}^T \beta_t x_{it} + \varepsilon_{it}, & Y_{it} > 0 \\ 0, & Y_{it} \leq 0 \end{cases} \tag{11}$$

式中, Y_{it} 为被解释变量,表示 i 市在第 t 年碳排放强度与生态盈亏的耦合协调度; β_0 是常数项; β_t 是被解释变量的 x_{it} 的回归系数, t 是解释变量的数量, $t = 1, 2, 3 \cdots, T, \varepsilon_{it}$ 是扰动项,且 ε_{it} 。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化及预测

3.1.1 2000—2020 土地利用格局

从 2000—2020 年,研究区耕地、建设用地和草地的面积变化最为显著。耕地和草地面积呈减少趋势,分别减少了 3.87% 和 32.59%,建设用地面积呈上升趋势,增加了 30.12%;各类用地均在 2000—2010 变化幅度较大,分别占各自变化量的 67.7%、62.92% 及 64.63%。

3.1.2 2036 年土地利用预测

用 PLUS 模型以 2000—2020 年土地利用数据为基础对 2036 年土地利用情况进行预测,结果表明,与 2020 年相比,2036 年,耕地和建设用地面积变化最为显著,建设用地增加,耕地减少。三种情景(图 3):常规发展情景,建设用地面积相较于强生态保护情景增长最多,增长了 9.54%,以苏北和豫东区域增长较为显著;

强耕地保护和强生态保护情景较常规发展情景,建设用地面积分别下降了 8.71%和 8.62%,主要是苏北和鲁南区域下降显著。耕地在强耕地保护情境下增长最为显著,增长了 2.62%,主要分布在豫东和苏北区域;水域在强生态保护情景下增长最为显著,增长了 4.84%,主要分布在苏北区域。

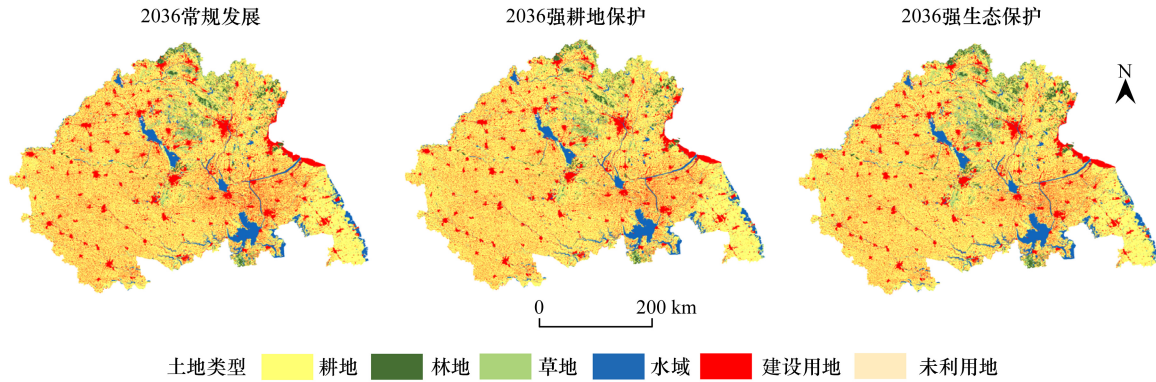


图 3 2036 年淮海经济区不同情景土地利用变化图

Fig.3 Land use change of Huaihai Economic Zone under different scenarios in 2036

3.2 碳排放强度分析

3.2.1 碳排放量演变分析

淮海经济区整体呈现为碳排放状态(表 6),2000—2020 年间碳排放从 19715.72 万 t 增加到了 67786.06 万 t,年平均增长率为 12.19%。其中,2000—2010 年增长幅度较高,达到了 187.47%;2010—2020 年增长率为 19.61%,总体呈现为先速增后缓的特点。建设用地是主要碳源,且呈现逐年增长的态势,贡献了碳源增长的 99.56%。碳汇整体上呈现下降趋势,林地和水域是主要碳汇,贡献了 91.27%。

预测结果:常规发展情景下,碳排放量将会上升 8.3%,强耕地保护和强生态保护情景由于控制了建设用地的增长,碳排放量相较于常规发展情景下分别下降了 8.54%和 9.19%。常规发展情景下,建设用地是主要碳源,碳排放量会上升 8.23%;强耕地保护情景和强生态保护情景下,虽然建设用地仍然是主要碳源,但是碳源会分别下降 8.62%和 10.1%。常规发展和强耕地保护情景下,林地作为主要碳汇分别下降了 1.9%和 0.8%;强生态保护情景下,林地和水域作为主要碳汇将分别上升 8.69%和 20.64%。

表 6 淮海经济区土地利用碳排放量核算结果/10⁴t

Table 6 Calculation results of carbon emissions from land use in Huaihai Economic Zone

土地利用类型 Land-use type	2000	2010	2020	2036		
				常规发展 Normal development	强耕地保护 Cultivated land protection	强生态保护 Ecological protection
耕地 Cultivated land	554.14	545.51	532.72	523.11	536.83	526.7
林地 Forest	-35.71	-31.47	-31.07	-30.47	-30.21	-33.12
草地 Grassland	-1.5	-1.21	-1.02	-1.14	-1.14	-1.22
水域 Water	-22.92	-22.78	-22.54	-22.38	-22.47	-27
建设用地 Construction land	19221.72	56186.64	67307.98	70546.7	64466.43	64023.18
未利用地 Unused land	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
碳源 Carbon source	19775.86	56732.15	67840.68	71069.81	65003.25	64549.88
碳汇 Carbon sink	-60.14	-55.47	-54.64	-54	-53.83	-61.36
碳净排放量 Net carbon emissions	19715.72	56676.68	67786.06	71015.81	64949.42	64488.53

3.2.2 碳排放强度时空演化分析

淮海经济区碳排放强度整体呈下降态势,2000—2020 总碳排放强度从 2.437 下降到了 1.087,其中 2010—

2020 年下降幅度较大,达到了 44.31%。空间分布上(图 4),2000 年高值区主要分布在鲁南菏泽市、皖北及苏北各市,其分布特点呈现为沿河排布;皖北与苏北碳排放高值区集中在各市的淮河水系及京杭运河流域,菏泽市作为黄河入鲁第一市,区域内水系分布较多;2010 年碳排放强度的高值区明显减少,仅在皖北阜阳市、亳州市及宿州市出现碳排放强度高值区集聚;2020 年碳排放强度进一步减少,全域高值区中值区减少幅度较大,基本呈中低值分布,中低值区主要分布在豫东、皖北及苏北各市,鲁南东部山地丘陵地区呈低值区。

预测结果:2036 年,常规发展情景,碳排放强度相较于 2020 年中值区和中低值区进一步减少,仅在临沂市和莱芜市的市中心范围有中值区集聚,豫东和鲁南地区低值区明显增多,皖北和苏北仍多呈中低值区。强耕地保护和强生态保护情景,低值区基本覆盖所有区域,仅鲁南临沂市的市中心及苏北连云港市的沿海区域仍有高值区分布。

总体来看,淮海经济区碳排放强度呈现为下降趋势,强耕地保护情景和强生态保护情景下碳排放强度基本呈现为低值区,表明生态保护情景和耕地保护情景可以在实现生态安全和粮食安全的基础上更为有效的降低碳排放强度。

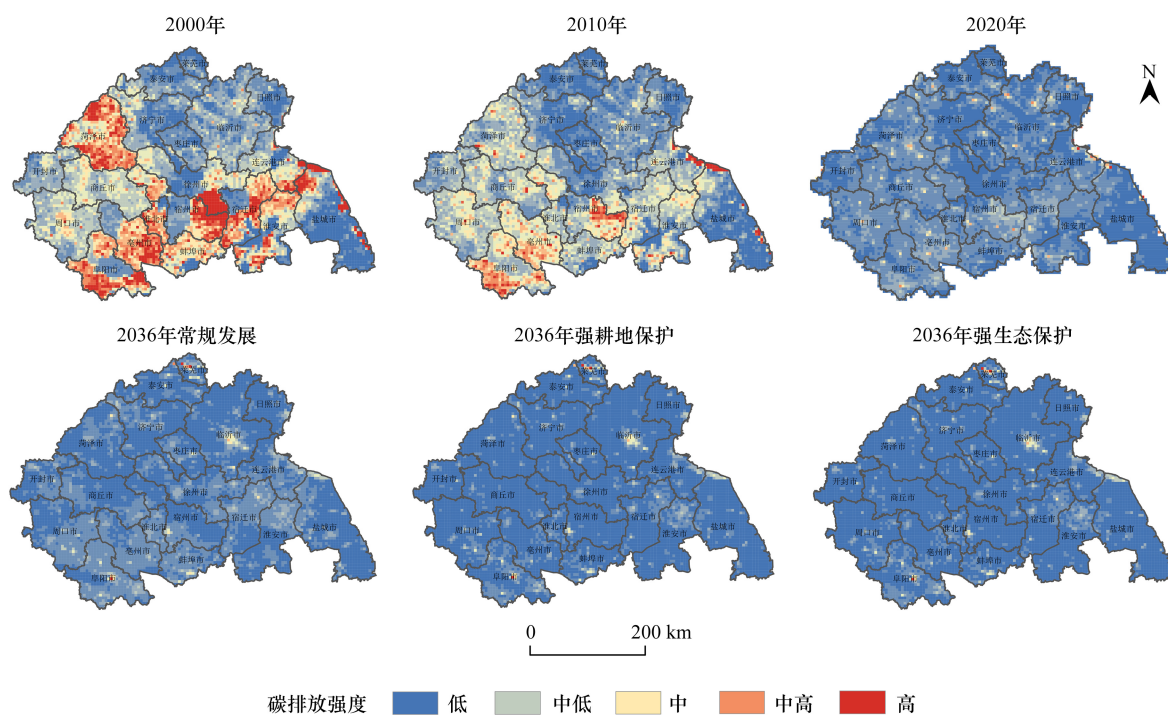


图 4 淮海经济区碳排放强度空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of carbon emission intensity in Huaihai Economic Zone

3.3 生态盈亏分析

2000—2020 年,耕地和水域的生态承载力和生态足迹呈先升后降趋势(图 5),可能与 2010—2020 年间的人口增长率远高于 2000—2010 年,导致人均耕地和人均水域面积显著下降相关。林地、草地的生态承载力和生态足迹整体呈下降趋势,建设用地整体呈上升趋势,未利用地在 20 年内变化幅度较小。淮海经济区整体呈现为生态赤字状态,2000—2020 年间的生态赤字增长 58.13%,其中,水域的生态赤字增长较为严重,达到了 $95.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占总增长的 68.87%。可见,水域面积的减少是淮海经济区生态盈亏变化的主要因素。空间分布上(图 6),豫东和皖北各市以及鲁南的菏泽市与济宁市生态赤字情况明显加重;鲁东南的山地丘陵区域、苏北的洪泽湖及淮安市生态保护区以及盐城的滩涂区域始终保持生态赤字低值,各市中心城镇周边的高值区有所增加。

预测结果:2036 年,强耕地保护情景下,耕地面积相较于常规发展情景下增加较多,水域面积有所下降,总体生态赤字仍然处于上升趋势,增加了 $0.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$;强生态保护情景下,林地、草地和水域生态赤字情况

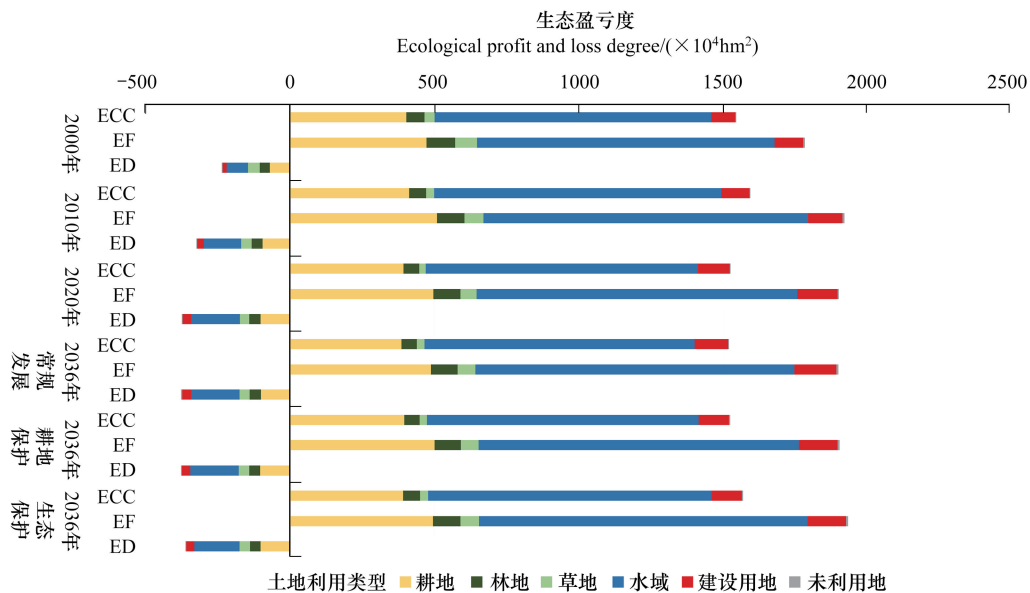
图5 淮海经济区各用地类型生态承载力及生态足迹/ 10^4hm^2

Fig.5 Ecological carrying capacity and ecological footprint of land use types in Huaihai Economic Zone

ECC:生态承载力;EF:生态足迹;ED:生态盈亏

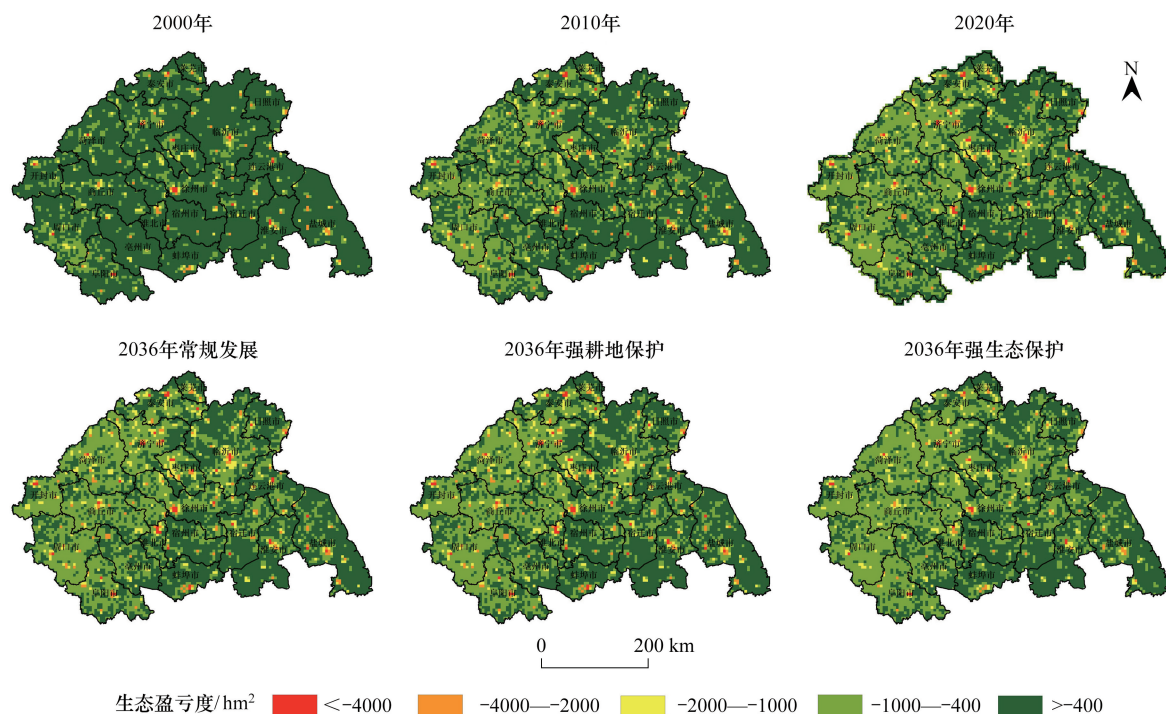


图6 淮海经济区生态盈亏空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of ecological profit and loss in Huaihai Economic Zone

相较于常规发展情景有小幅度的下降,分别为 $1.55 \times 10^4 \text{hm}^2$ 、 $0.58 \times 10^4 \text{hm}^2$ 、 $12.02 \times 10^4 \text{hm}^2$, 总体生态赤字情况相比于常规发展和强耕地保护情况下降了 $14.97 \times 10^4 \text{hm}^2$ 和 $15.16 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。结果表明,强生态保护情景下生态赤字情况可以得到明显改善。空间分布上,强耕地保护与常规发展情景下的生态盈亏空间分布相较于2020年的变化均不明显;强生态保护情景下,城市周边的高值区明显减少,且西部的低值区以及东部鲁东南山地丘陵区低值区有小幅增加。

3.4 碳排放强度与生态盈亏时空关联分析

由空间自相关分析可得,2000—2036 年各情景下的碳排放强度和生态盈亏的 Moran's I 均呈现为负值,为负相关,即淮海经济区碳排放强度越高,生态赤字情况越严重。

在空间分布上(图 7),高高聚类,即碳排放强度高,生态赤字程度较好,主要分布在皖北的蚌埠亳州、苏北的宿迁市、淮安市及盐城市,且主要围绕淮河和京杭运河的水系较多处分布;高低聚类和低低聚类是生态赤字情况较为严重的聚类,主要分布在各市的城镇区域,也即各市碳排放量较大的区域;低高聚类,即碳排放强度低,生态赤字情况较好,主要分布在鲁东南的山地丘陵地区、苏北淮安市的洪泽湖及自然保护区以及盐城的滩涂湿地区域。

在时空演化上,2000—2020 年,低低聚类和低高聚类显著减少,高低聚类和高高聚类增多,低低聚类和低高聚类的增减都发生在各市城镇地区,均是碳排放强度较高,生态环境急需治理的区域,低高聚类明显减少,表明自然主导地类呈减少趋势;2036 年预测情景中,常规发展情景下高低聚类进一步增加,高高聚类出现小幅度减少。强生态保护和强耕地保护情景下,高低聚类都呈现出减少的趋势,尤其是生态保护情景下,高低聚类显著减少,低低聚类和低高聚类有小幅增加,表明生态环境出现一定程度的改善。

综上所述,淮海经济区主要的碳排放强度与生态盈亏聚类分布情况基本符合自然和经济主导地类的排布,其中较为特殊的是淮海经济区的南部淮河水系及京杭运河交汇处以及盐城与连云港的淮河水系入海口处,碳排放强度与生态盈亏均呈现为高值,这表明水域对淮海经济区生态环境优化起到了至关重要的作用。

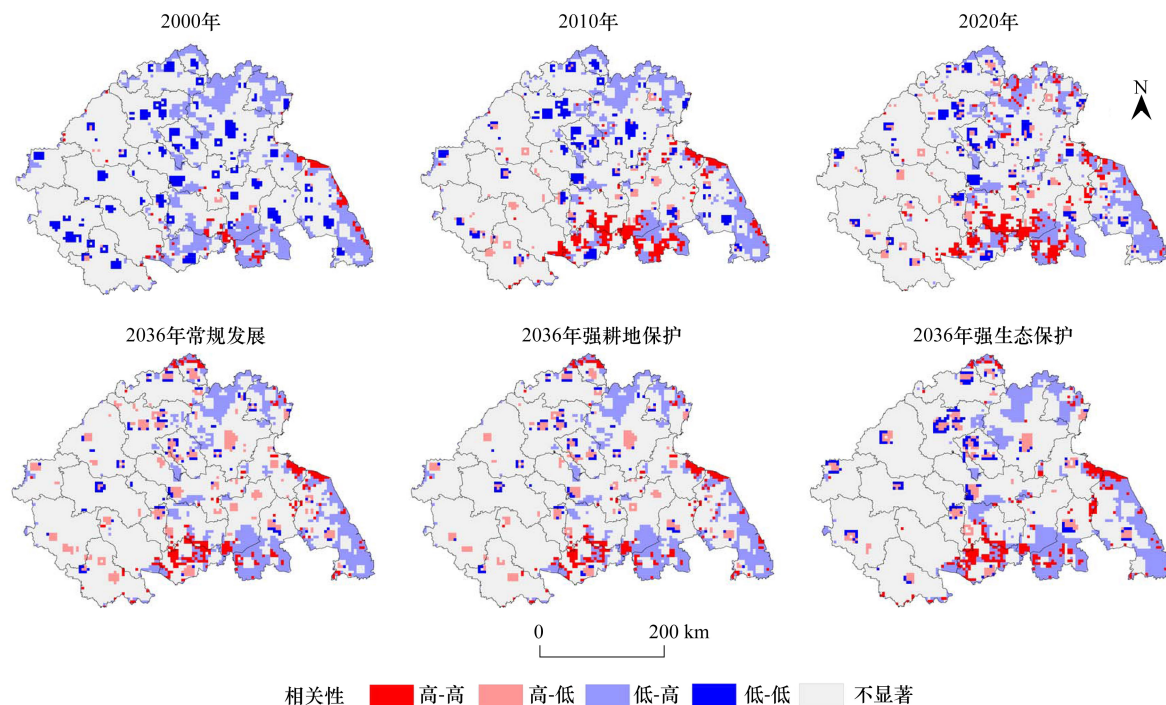


图 7 淮海经济区碳排放强度与生态盈亏双变量空间自相关图

Fig.7 Bivariate spatial autocorrelation of carbon emission intensity and ecological profit and loss in Huaihai Economic Zone

3.5 时空关联机制分析

生态盈亏及碳排放强度在时空上呈现出一定的关联性,为探究这种关联性的具体特征及机制,本文对生态盈亏和碳排放强度的耦合协调性及其影响因素进行分析,为便于研究,仅采用 2000 年、2010 年、2020 年期变化情况数据,并以淮海经济区二十个市为单位进行分析。

3.5.1 耦合协调度分析

淮海经济区耦合协调度在空间上呈东西高中部低的格局(图 8),其变化格局具体可分为两种:(1)保持

不变。主要是临沂市、开封市等,且各市都处于高度耦合协调。(2)上升趋势。区域内各市基本都处于上升趋势,其中皖北各市上升幅度显著,宿州市和亳州市由低度耦合协调上升到高度耦合协调,鲁南和苏北各市在 2000—2020 年间呈先升后平稳的趋势。

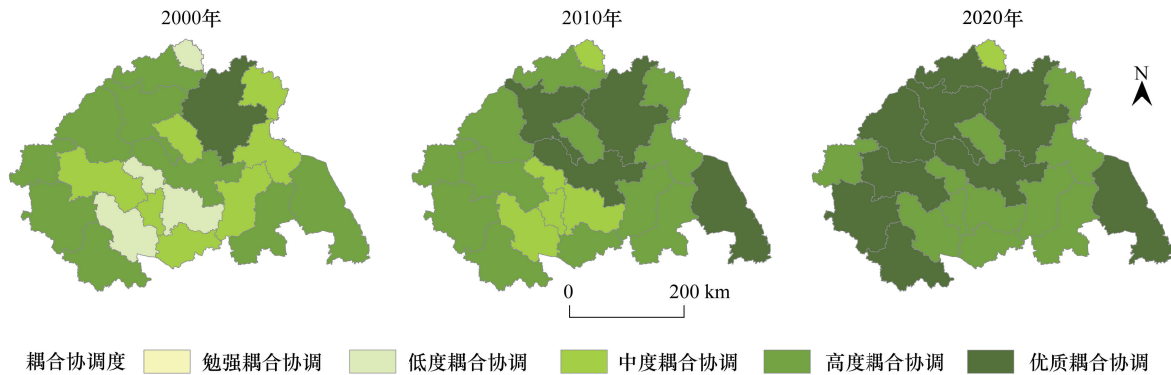


图 8 淮海经济区碳排放强度与生态盈亏耦合协调度图

Fig.8 Coupling coordination of carbon emission intensity and ecological profit and loss in Huaihai Economic Zone

综合空间相关性关系分析可得,淮海经济区早期的高度耦合协调和后期的优质耦合协调区域多位于沿靠水系周边、山地丘陵及自然保护区,与低高聚类和高高聚类分布区域相似;中低度耦合协调区域多分布于商丘淮北等粮食主产区,与高低聚类和低低聚类分布区域相似。

综上可得,淮海经济区耦合协调度总体呈上升趋势,各生态用地较多的地区耦合协调度有较好的提升,尤其是沿靠水系的各市,表明水域对碳排放强度与生态盈亏的耦合协调度影响较大;其次各生态赤字的高值区表现出较低的耦合协调度,其中包括了豫东和皖北的黄淮海平原粮食主产区。

3.5.2 影响因素分析

(1) 经济发展水平(GDP)对碳排放强度与生态盈亏耦合协调度(CED)的影响呈现为正相关(表 7),表明较高的经济发展水平可以有效降低碳排放强度并降低生态赤字。区域 GDP 直接与该地域的各项发展指标挂钩,经济可以为生产提供更强的动力,无论是推动科技发展或是改善生态环境都需要经济的大力支持,且较高的 GDP 一般表明社会发展水平和居民生活水平处于较高水平,居民对美好生活的向往会促进城市生态环境条件的优化。

表 7 Tobit 回归系数

Table 7 Tobit regression results

项 Item	回归系数 Regression coefficient	项 Item	回归系数 Regression coefficient
截距 Intercept	-0.550 ** (-3.305)	外商投资 Foreign direct investment	-0.006 (-0.548)
城镇化率 Urbanization rate	-0.105 *** (-3.204)	道路密度 Roads density	-0.030 ** (-2.317)
经济发展水平 Gross domestic product	0.193 *** (13.617)	技术进步 Technology	0.028 ** (2.106)
产业结构 Industrial structure	0.063 * (1.491)	log(Sigma)	-2.741 ** (-30.021)
样本量 Samples	60		
似然比检验 likelihood-ratio test	0.000		
McFadden R ²			
McFadden R ²	-1.827		

***、**、* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平;表中括号内数据代表的是回归系数的 *t* 值,用以检验回归系数有无意义

(2)道路密度(RD)对CED的影响呈现为负相关,表明伴随道路密度的上升会提高碳排放强度且提升生态赤字情况。道路密度的提升是城市发展的必然结果,城市建设需要道路来增强连通性,淮海经济区的城市多为单核城市,这就导致了路网密度的提升以应对因生活或工作需求带来的汽车数量增加,汽车会不可避免的带来二氧化碳及其他温室气体,因此政府在城市建设中,可以进行多中心发展模式,分担单一中心所带来的职能压力及交通运输情况,多中心发展同样会增加道路密度,但会提升城市交通运行的流畅性,从而减少因堵车带来的二氧化碳排放问题;同时,应对发展公共交通、轨道交通等低碳交通模式,环境因交通带来的碳排放压力。

(3)技术进步(TC)对CED的影响呈现为正相关,表明技术进步可以有效降低碳排放强度并降低生态赤字。技术进步表明对于能源利用效率的提高,而当前各类化石能源是最主要的碳源,因此提高能源的利用效率,积极开发清洁能源,对区域生态环境改善具备重要意义,且技术进步在高分位地区影响较为显著,前文中作为淮海经济区发展情况最好的苏北地区CED在2000—2020年都呈上升趋势且最终均达到高值区,表明技术进步是寻求快速发展地区在处理经济增长和生态环境保护之间的矛盾时所需考虑的重要方向。

(4)产业结构(IS)对CED的影响呈现为正相关。二产占比,从理论角度看是会增加二氧化碳排放并增强生态赤字情况,但对于粮食主产区而言,其本身产业结构以一产为主,地类上耕地占据主要用地类型,粮食种植所产生的秸秆焚烧问题在早期是二氧化碳的重要来源之一,因此在粮食主产区地域发展粮食加工业作为第二产业,可以在一定程度上减少秸秆焚烧所带来的环境污染问题,且由于在高质量发展和乡村振兴的双重背景下^[51],粮食产业的三产融合发展成为粮食主产区寻求经济发展、确保粮食和生态安全的重要抓手。

(5)城镇化率(UR)对CED的影响呈现为负相关,表明城市发展会提升碳排放强度及生态赤字情况。城市化水平的提升是人口与经济发展作用的结果,城市人口的聚集会显著增加区域碳排放强度,造成生态环境水平下降,城市需要将单纯的人口集聚转化为人才的集聚效应^[52],需要将人口规模转化为人口集聚,将人口带来的高碳排经济增长改变为科学技术进步及高质量发展式经济增长,促进城市发展过程中对于人才的吸引以及优质产业的承接。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)淮海经济区碳排放在2000—2036常规发展情景下连年上升,但碳排放强度呈下降趋势,时间上,2010—2020年碳排放强度降幅较大,空间上,河流水系地区碳排放强度降幅较大;2036年强耕地保护和强生态保护情景下,碳排放量与排放强度均呈下降趋势,且两种情景间差别较小。表明控制建设用地扩张可以有效的降低碳排放量及碳排放强度,在此基础上,加强对于水域的保护是平衡经济发展与生态保护的关键要素。

(2)淮海经济区2000—2036年常规发展情景下,生态足迹和生态承载力均呈同向增长态势,但生态足迹涨幅高于生态承载力,导致研究区生态赤字情况不断加大。而在强生态保护和强耕地保护情景下,生态赤字情况有所改善,且自然主导地类生态赤字情况明显优于经济主导地类。

(3)淮海经济区碳排放强度与生态盈亏呈负相关关系,低低和低高聚类主要分布在城镇建设用地周边,高低和高高聚类主要分布在自然主导用地区域。其中,2000—2036年常规发展情景下,低低和低高聚类呈下降趋势,高低和高高聚类呈上升趋势,强耕地保护和强生态保护情景下,高低聚类下降,以城镇与河流水系区域改善情况最为显著。

(4)淮海经济区耦合协调度整体由西向东递增,高耦合协调度主要处在自然主导的各类用地区域,低耦合协调度地区则较多分布于淮海经济区西侧的平原粮食产区。而在影响耦合协调度的各种因素中,科学技术及经济发展水平在整体“自然-经济”协调发展起到重要作用,对于粮食主产区而言,在此基础上更需要加强对于粮食加工业及三产融合发展的建设。

4.2 讨论

本文立足于淮海经济区,通过测算生态盈亏和碳排放强度来衡量土地利用变化对生态环境的影响程度,

在此基础上对未来三种不同土地利用情景下的二者进行预测,并分析碳排放强度与生态盈亏在空间上的相关性关系及关联机制。结果表明:淮海经济区整体碳排放强度呈下降趋势,且在 2010—2020 年降幅较大,这与王少剑等^[53]的研究结果相符;而随着其建设用地的扩张,碳排放量上升,生态赤字程度加剧,这表明建设用地扩张会干扰原有生态用地完整性,进而破坏生态系统功能结构,致使生态环境问题日益严峻,这与魏乐等^[54]、刘志涛等^[55]的研究结果相符;在模拟的情况中,强耕地保护和强生态保护都能降低碳排放强度,而只有在生态保护情景下生态赤字情况才出现好转,这与欧阳晓等^[56]对于生态系统服务价值的探究有共通之处,这其中,水域是两种情景下生态环境有所改善的关键点所在。依据上述的初步结论,本研究将对以下内容进行深入探讨。

(1) 合理管控建设用地,稳定粮食主产区粮食安全保障职能

淮海经济区在研究期内建设用地快速扩张,其推动经济增长的同时,也带来碳排放量的激增,从而给生态环境带来了巨大压力。常规发展趋势下,建设用地面积持续增长,大量侵占耕地和各类自然主导用地,城镇化率以及路网密度与生态环境质量呈负相关,在预测的强生态保护和强耕地保护情景下,建设用地扩张受到了控制,耕地面积和生态环境才出现改善。淮海经济区作为粮食主产区之一,同时也肩负着长三角产业承接的重任,未来建设用地增加不可避免,如何科学合理的进行建设用地管控,实现经济增长与粮食安全保障协调发展,是淮海经济区作为粮食主产区在未来发展的重心^[57]。苏北作为淮海经济区最发达、建设用地分布最密集的区域,要加强土地供应管理,建立总量控制下的质量型绩效管理方式^[58],并严格控制基本农田红线区域土地类型不变动,更加注重建设用地审批与经济发展质量之间的联系;豫东和皖北作为重要粮食产区,肩负粮食安全和粮食品质的重任,建设用地指标紧张,则需要科学合理划定允许建设区和有条件建设区,守住限制建设区和禁止建设区底线,用柔性但不失底线的建设用地监管方式^[59],平衡地区耕地保护和经济发展的矛盾;鲁南部泰安等市是山地丘陵地区,南部包含了临港经济带和运河经济带,因此既是生态保护重点区域又是产业发展产业承接的优势区域,所以需要合理划分生态保护红线和城镇开发边界,严格污染型企业审批,推动区域绿色产业发展。

(2) 加强高标准农田建设,促进粮食品质与生态环境质量协调发展

在耕地保护情景下,淮海经济区的耕地面积有所增长,碳排放量和碳排放强度也出现了显著的下降,这表明耕地保护具备保障粮食安全和维护生态健康的双层意义^[60]。而现在城市化建设以侵占最具生产力的农田为特征,因此,作为粮食主产区之一的淮海经济区需要平衡城市发展和耕地保护之间的矛盾。加强高标准农田的建设是目前最有效的解决办法,尤其对于苏北地区和鲁南地区,在经济发展和生态环境保护的双重压力下,需要将生态位引入高标准农田建设,不仅要改善耕地土壤的各项理化性质及基础设施和景观生态条件,还需要考虑各类影响耕地的空间稳定性因素^[61]和生态约束性条件,推广绿色农业技术,在提高粮食品质的同时优化农田生态格局。皖北和豫东的黄淮海平原是粮食的核心产区,经济发展相对落后,粮食安全任务又更为艰巨,因此相较于苏北和鲁南则需要发展不同方向的高标准农田建设。高标准农田建设的关键在于集中连片,因此皖北和豫东需要加强宅基地腾退和土地复垦工程,建设成规模的家庭农场式高标准农田^[62];其次,在“自然-经济”协调发展的影响因素中,二产是粮食主产区区别于其他地域的关键因素,在粮食主产区推动以县为单位发展粮食加工业,最大程度发挥粮食的经济价值,在将粮食价值留在本地区的同时,弱化传统粮食秸秆焚烧等对环境的破坏,实现耕地保护、经济发展与生态保护三丰收。

(3) 加强水域保护,充分发挥水域对粮食生产与生态环境的支撑作用

淮海经济区的河流水系地区具备较好的生态情况,且区域南部的水系交汇处有效的降低了高碳排放强度对于生态环境的影响,因此,淮海经济区的生态环境治理重心就在于“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”^[63],充分发挥水域的多重属性,对于生态保护地区,要重点发挥水域的生态属性,重点协调经济社会用水和生态用水之间的矛盾;对于平原粮食产区,则需要侧重于水域的资源属性,维持水资源的可再生性^[64],严格管控坑塘水面转化为其它地类,保障永久基本农田区域所需用水量,实现旱情时期粮食产量不下降、品质不影

响的目标;对于城镇地区及工业区,需要将水域的资源和水质属性放在重要位置,首先控制城镇化发展及工业区建设对于水域的侵占,再者要加强水污染治理与管控,地方生态环境部门严格把控工业给排水情景,从源头控污,降低河湖水体的污染风险,提升水质。

参考文献(References):

- [1] 赵美凤,汪德根.中国中西部地区就近城镇化空间分异格局及机理.地理学报,2021,76(12):2993-3011.
- [2] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [3] Liu K, Xue M Y, Peng M J, Wang C X. Impact of spatial structure of urban agglomeration on carbon emissions: an analysis of the Shandong Peninsula, China. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 161: 120313.
- [4] Wang R, Zheng X X, Wang H Q, Shan Y L. Emission drivers of cities at different industrialization phases in China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 109494.
- [5] 卢娜,曲福田,冯淑怡,邵雪兰.基于STIRPAT模型的能源消费碳足迹变化及影响因素——以江苏省苏锡常地区为例.自然资源学报,2011,26(5):814-824.
- [6] 熊鹰,艾赣雄,周晨,姚颖,谢庆.基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究.生态学报,2022,42(3):1165-1179.
- [7] 洪顺发,郭青海,李达维.基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态.资源科学,2020,42(5):980-990.
- [8] 中共中央,国务院:关于深入打好污染防治攻坚战的意见.2021. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/202111/t20211108_959456.shtml
- [9] 中华人民共和国国务院新闻办公室.中国应对气候变化的政策与行动白皮书.2021. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/44689/47315/index.htm>
- [10] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋.中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析.地理学报,2010,65(09):1048-1057.
- [11] 中华人民共和国国务院新闻办公室.中国应对气候变化的政策与行动——(2021年10月)人民日报,2021-10-28(14).
- [12] 王丹,荆延德,韩善梅,高明秀.基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析.生态学报,2022,42(23):9604-9614.
- [13] Holland E A, Brown S. North American carbon sink. *Science*, 1999, 283(5409): 1815.
- [14] Albrecht J, François D, Schoors K. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. *Energy Policy*, 2002, 30(9): 727-736.
- [15] 李波,张俊彪,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解.中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [16] 陶玉国,黄震方,吴丽敏,余凤龙,王坤.江苏省区域旅游业碳排放测度及其因素分解.地理学报,2014,69(10):1438-1448.
- [17] 弓媛媛.武汉市交通碳排放足迹测算及其驱动因素分析.中国人口·资源与环境,2015,25(S1):470-474.
- [18] 张丽娜,郝宵,庞庆华,陈其勇,徐洁,张陈俊.城乡分异视角下居民食品消费碳排放驱动效应研究——以江苏省为例的实证分析.软科学,2021,35(2):54-59.
- [19] Wong D W S, Lee J. Statistical analysis of geographic information with Arc View GIS and ArcGIS. John Wiley and Sons. 2005. 337.
- [20] 尹伟华,张亚雄,李继峰,徐丽萍,王玢.基于投入产出表的中国八大区域碳排放强度分析.资源科学,2017,39(12):2258-2264.
- [21] 卢俊宇,黄贤金,戴靓,陈志刚,李月.基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析.自然资源学报,2012,27(12):2006-2017.
- [22] 刘晔,刘丹,张林秀.中国省域城镇居民碳排放驱动因素分析.地理科学,2016,36(5):691-696.
- [23] 王正,周侃,樊杰.西部地区县域碳排放核算及主体功能区解析——以四川省为例.生态学报,2022,42(21):8664-8674.
- [24] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4/5/6): 223-248.
- [25] Jorgenson A K, Rice J J, Crowe J A. Unpacking the ecological footprint of nations. *International Journal of Comparative Sociology*, 2005, 46: 241-260.
- [26] 刘某承,王斌,李文华.基于生态足迹模型的中国未来发展情景分析.资源科学,2010,32(1):163-170.
- [27] 张芳怡,濮励杰,张健.基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例.自然资源学报,2006,21(4):653-660.
- [28] 武翠芳,徐中民.黑河流域生态足迹空间差异分析.干旱区地理,2008,31(6):799-806.
- [29] 官冬杰,姜亚楠,严聆云,周健,和秀娟,殷博灵,周李磊.基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算.生态学报,2022,42(20):8169-8183.
- [30] 郭慧,董士伟,吴迪,裴顺祥,辛学兵.基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算.生态学报,2020,40(4):1405-1412.
- [31] Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K H, Hertel T W. Globalization of land use: distant drivers of land change and geographic displacement of land use. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 438-444.
- [32] 章茹,蒋元勇,万金保,戴年华,李述.城镇化过程对鄱阳湖流域生态系统的影响.长江流域资源与环境,2014,23(3):400-406.

- [33] 王永琪, 马姜明. 基于县域尺度珠江-西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7826-7839.
- [34] Herne K. Decoy alternatives in policy choices: Asymmetric domination and compromise effects. *European Journal of Political Economy*, 1997, 13(3): 575-589.
- [35] 杨皓然, 吴群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 121-126.
- [36] 张苗, 吴萌. 土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析——基于结构方程模型的实证检验. 中国土地科学, 2022, 36(3): 96-103.
- [37] Assesment M E. Ecosystems and human well-being: synthesis. *Physics Teacher*, 2005, 34(9): 534-534.
- [38] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [39] 陈阳, 张建军, 杜国明, 付梅臣, 刘凌露. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2015, 35(18): 6157-6164.
- [40] 杨屹, 加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化. 生态学报, 2015, 35(24): 7987-7997.
- [41] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 张东水, 谢金宁, 宋焱, 王志强. 中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究. 地理科学, 2018, 38(5): 681-690.
- [42] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 102-107.
- [43] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [44] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469.
- [45] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 赵登辉. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏省经济为例. 生态学报, 2006, 26(4): 1285-1292.
- [46] 孙伟, 乌日汗. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异. 地理研究, 2012, 31(12): 2220-2228.
- [47] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 蔡玉梅. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析. 农业工程学报, 2022, 38(9): 288-296.
- [48] 刘芳锐, 张正栋, 王欣怡, 毛源远, 董剑彬, 黄楚珩, 刘钰坤. 粤港澳大湾区生态系统健康时空变化及其对城镇化的响应. 生态学报, 2023, 43(7): 2594-2604.
- [49] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [50] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [51] 郝爱民, 刘育廷. 三产融合对主产区粮食产业高质量发展的外溢效应研究. 农林经济管理学报, 2022, 21(5): 509-517.
- [52] 刘贤赵, 高长春, 宋炎, 张勇, 宿庆, 田艳林. 湖南市域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2476-2487.
- [53] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [54] 魏乐, 周亮, 孙东琪, 唐相龙. 黄河流域城市群扩张的时空格局演化及情景模拟——以呼包鄂榆城市群为例. 地理研究, 2022, 41(6): 1610-1622.
- [55] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制. 地理学报, 2021, 76(11): 2797-2813.
- [56] 魏佳豪, 温玉玲, 龚志军, 王晓龙, 蔡永久. 近 30 年鄱阳湖滨岸缓冲带土地利用变化及生态系统服务价值. 生态学报, 2022, 42(22): 9261-9273.
- [57] 瞿诗进, 胡守庚, 李全峰. 中国城市建设用地转型阶段及其空间格局. 地理学报, 2020, 75(7): 1539-1553.
- [58] 孙欣, 姜海, 姜怡航. 建设用地管控对经济增长质量的影响——基于 2005—2017 年省级面板数据实证分析. 中国土地科学, 2021, 35(11): 52-60, 122.
- [59] 王青, 陈志刚. 区域经济发展不平衡与土地违法: 基于地方政府经济增长激励的视角. 中国土地科学, 2019, 33(1): 32-39.
- [60] Li Y Y, Tan M H, Hao H G. Impacts of global cropland change on the value of terrestrial ecosystem services from 1992-2015. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(03): 323-333.
- [61] 王成, 何焱洲. 重庆市乡村生产空间系统脆弱性时空分异与差异化调控. 地理学报, 2020, 75(8): 1680-1698.
- [62] 韩杨, 陈雨生, 陈志敏. 中国高标准农田建设进展与政策完善建议——对照中国农业现代化目标与对比美国、德国、日本经验教训. 农村经济, 2022(5): 20-29.
- [63] 王浩, 许新发, 成静清, 周祖昊, 褚俊英, 张静文. 水资源保护利用“四水四定”: 基本认知与关键技术体系. 水资源保护, 2023, 39(1): 1-7.
- [64] Ren B B, Sun B A, Shi X H, Zhao S N, Wang X A. Analysis of the cooperative carrying capacity of ulan suhai lake based on the coupled water resources-water environment-water ecology system. *Water*, 2022, 14(19): 3102.