

基于PLUS-InVEST模型的黄河流域河南段三生空间演变多情景模拟与碳储量评估

闫怡晨, 郜 颖, 刘雨欣, 郝万康, 刘春雨, 张静静*

郑州师范学院地理与旅游学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年7月8日; 录用日期: 2026年8月20日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

在我国“双碳”战略与黄河流域生态保护和高质量发展战略叠加推进的背景下, 三生空间格局转型深刻影响区域碳平衡。以黄河流域河南段为研究区, 整合土地利用、自然环境与社会经济等多源数据, 耦合PLUS-InVEST模型, 开展三生空间演变多情景模拟与碳储量评估, 旨在揭示三生空间转型的碳储量效应, 为区域低碳发展提供科学支撑。结果显示: 1) 2000~2020年研究区生产空间和生态空间缩减、生活空间扩张, 空间转移以生产空间转向生活空间为主。2) 近20年, 研究区碳储量累计减少 9.6×10^6 t, 生活空间侵占生产空间是碳储量下降主要因素。3) 多情景模拟显示, 耕地保护情景下碳储量最大, 为 373.21×10^6 t, 城镇发展情景下碳储量最小, 为 366.59×10^6 t。2020~2040年4种发展情景下的碳储量均呈现不同程度的衰减特征。其中, 城镇发展情景下碳损失风险最高, 碳储量减少量达 12.51×10^6 t(降幅3.41%)。耕地保护情景碳损失风险最低, 碳储量减少量为 5.89×10^6 t(降幅1.58%), 但对城镇发展约束较强。可持续发展模式能在保障发展需求的同时最大限度维系碳汇功能(降幅为2.75%), 为流域国土空间低碳优化提供了最优路径参考。

关键词

黄河流域河南段, 三生空间, 碳储量, PLUS-InVEST模型, 多情景模拟

Multi-Scenario Simulation of the Evolution of the Production, Living and Ecological Spaces and Carbon Storage Assessment in the Henan Section of the Yellow River Basin Based on the PLUS-InVEST Model

Yichen Yan, Ying Gao, Yuxin Liu, Wankang Hao, Chunyu Liu, Jingjing Zhang*

*通讯作者。

文章引用: 闫怡晨, 郜颖, 刘雨欣, 郝万康, 刘春雨, 张静静. 基于 PLUS-InVEST 模型的黄河流域河南段三生空间演变多情景模拟与碳储量评估[J]. 地理科学研究, 2026, 15(4): 732-744. DOI: 10.12677/gser.2026.154066

Abstract

Against the backdrop of China's dual carbon goals and the Yellow River Basin's ecological protection and high-quality development strategy, the transformation of the tripartite spatial structure—production, living, and ecological spaces—has profoundly influenced regional carbon balance. Taking the Henan section of the Yellow River Basin as the study area, this research integrates multi-source data on land use, natural environment, and socioeconomic factors, and couples the PLUS-InVEST model to simulate multiple scenarios of tripartite space evolution and assess carbon storage. The aim is to reveal the impacts of spatial transformation on carbon storage and provide scientific support for low-carbon regional development. Results show: 1) From 2000 to 2020, production and ecological spaces decreased while living space expanded in the study area, with the primary spatial shift being from production to living space. 2) Over the past two decades, total carbon storage in the region declined by 9.6×10^6 tons, primarily due to living space encroaching upon production space. 3) Scenario simulations indicate that carbon storage was the highest under the farmland protection scenario at 373.21×10^6 tons, and the lowest under the urban development scenario at 366.59×10^6 tons. From 2020 to 2040, all four development scenarios showed varying degrees of carbon storage decline. Among them, the urban development scenario carried the highest risk of carbon loss, with a reduction of 12.51×10^6 tons (a 3.41% decrease). The farmland protection scenario had the lowest carbon loss risk, with a reduction of 5.89×10^6 tons (1.58% decrease), although it imposed strong constraints on urban development. The sustainable development scenario achieved the best balance, maintaining carbon sequestration functions to the greatest extent while meeting development needs (a 2.75% decrease), offering an optimal reference for low-carbon optimization of territorial space in the basin.

Keywords

Henan Section of the Yellow River Basin, Production, Living, and Ecological Spaces, Carbon Storage, PLUS-InVEST Model, Multi-Scenario Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候治理与我国双碳战略深入推进背景下,国土空间开发保护模式持续转型,三生空间(生产空间、生活空间、生态空间)作为国土空间功能核心载体,其格局演变通过改变土地利用结构,直接影响区域生态系统碳循环与碳储量变化,成为支撑碳中和目标的关键研究方向[1][2]。黄河流域是我国重要生态安全屏障与经济发展带,生态脆弱、人类活动强度高,其三生空间演变多情景模拟与碳储量评估,对统筹生态保护与高质量发展具有重要现实意义。

当前学界普遍认为,土地利用变化是驱动陆地生态系统碳储量变化的核心因素,而三生空间转型是土地利用格局演变最综合、最直观的体现[3][4]。相关研究已从三生空间识别分类、时空格局演化[5][6],逐步拓展到生态环境效应评估,其中碳储量效应因与气候变化直接关联成为研究热点[7][8]。大量实证表明,三生空间功能与碳收支高度关联,城镇化、工业化驱动的空间转型易造成碳储量净损失[9][10],这

一规律在黄河流域已得到充分验证[11]。在方法体系上, InVEST 模型因参数简便、空间表达直观, 成为碳储量核算的主流工具[12]-[14]。同时, 为提升模拟与预测精度, 学者广泛将其与 PLUS、FLUS、CA-Markov 等土地利用模拟模型耦合, 用于时空演化分析与未来情景预测[15]-[18]。基于 PLUS-InVEST 模型预测陕北粗沙区 2033 年碳储量及经济价值[19], 采用该模型开展黄河流域三生空间多情景模拟与碳储量评估。在驱动机制分析中, PLUS-InVEST 耦合框架已成为流域碳储量研究的主流范式[20]-[22]。

针对黄河流域, 现有研究已覆盖全流域、中游、内蒙古段、水源涵养区等多个尺度[14][17][23]-[25], 且对黄河流域河南段碳储量时空演变与影响因素开展了初步探索, 揭示了土地利用、社会经济对区域碳库的显著影响。但整体来看, 现有研究多局限于传统土地利用分析, 缺乏三生空间功能视角下“转型-碳效应-情景响应”的系统性研究, 且对黄河流域河南段的精细化模拟、碳储量定量关联刻画不足, 难以支撑国土空间精准调控与规划落地。为此, 本文耦合 PLUS-InVEST 模型, 从三生空间功能维度开展演变模拟与碳储量评估, 构建空间转型与碳储量变化的定量关联, 为黄河流域生态保护和高质量发展国家战略落地提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

黄河流域河南段横跨中国中部, 自西向东贯穿山地丘陵至黄淮海平原, 是暖温带向亚热带过渡的典型区域(图 1)。地势西高东低, 地貌依次涵盖西部伏牛山-太行山生态屏障区、中部丘陵过渡带及东部黄淮海冲积平原与黄河滩区湿地, 形成森林、灌丛、农田、湿地等多样生态系统。该区域三生空间结构复杂且转型剧烈, 西部以生态空间为主, 东部平原为集约化农业生产空间, 城镇生活空间沿黄河及交通干线快速扩张。高强度人类活动驱动下, 土地利用覆被变化显著, 生态、农业、城镇空间相互转化频繁, 这一过程深刻影响着植被与土壤碳储量的时空格局与稳定性。因此, 开展该区域三生空间演变多情景模拟与碳储量评估, 既能够为区域国土空间格局优化提供科学依据, 也可为黄河流域协同推进生态保护与碳汇能力提升提供支撑, 这也是本研究选取该区域作为研究对象的核心原因。

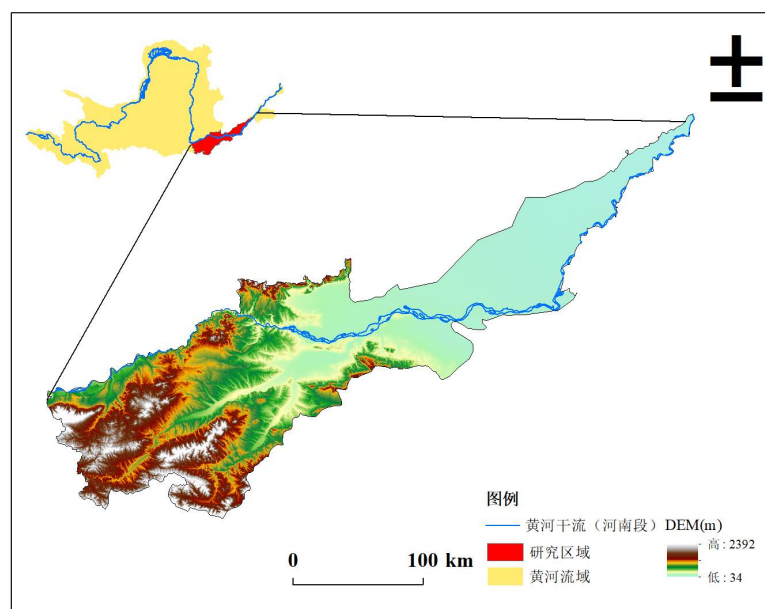


Figure 1. Study area profile map
图 1. 研究区域概况图

2.2. 数据来源

1) 三生空间数据

本文所用三生空间数据,是由中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)发布的 2000、2010 和 2020 年土地利用数据转化而得。土地利用数据包括 27 个二级地类,分辨率为 1000 m。依据科学性、实用性以及主导功能原则,将 27 个二级地类划分为 3 种一级空间类型,从而构建黄河流域河南段三生空间分类体系(表 1)。

Table 1. Spatial classification system of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin
表 1. 黄河流域河南段三生空间分类体系

三生空间土地利用功能分类	
一级分类	二级地类
生产空间	水田、旱地
	工矿用地、交通建设用地
生活空间	城镇用地
	农村居民点
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
	河渠、湖泊、永久性冰川雪地、水库坑塘、滩地、滩涂
	沙地、裸岩石质地、盐碱地、沼泽地、戈壁、其他未利用地、裸土地、海洋

2) 三生空间碳密度数据

本研究碳密度数据遴选遵循区域为主、近邻辅助的选取原则,优先采用河南省境内相关研究成果[26],提取区域碳密度基础数值;针对现有资料未涵盖的范畴,参照研究区周边同类研究参数予以补充整合[27],形成黄河流域河南段三生空间碳密度参数(表 2)。

Table 2. The spatial carbon density of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
表 2. 黄河流域河南段三生空间碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

三生空间类型	地上生物量	地下生物量	土壤有机质	死亡有机质
生产空间	7.39	0.77	91.62	0.00
生活空间	4.76	2.64	15.64	0.00
生态空间	12.79	4.13	98.81	1.99

2.3. 研究方法

2.3.1. 转移矩阵

本研究借助转移矩阵反映黄河流域河南段在不同时间段内各空间类型之间的相互转化过程,能够清晰地识别出各空间类型在研究期间的变化转移方向和转移规模[8]。表达式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S 为“三生空间”面积; S_{ij} 为由第 i 类“三生空间”转换为第 j 类“三生空间”的面积。矩阵中每

一行表示由第 i 类“三生空间”类型转向其他类型的流向信息，每一列表示由其他“三生空间”类型转向第 j 类的来源信息。

2.3.2. InVEST 模型

本研究基于 InVEST 模型碳储量模块，通过整合黄河流域河南段三生空间碳密度与不同时期三生空间数据，揭示黄河流域河南段三生空间碳储量时空演变规律。该模型考虑陆地生态系统的 4 个基本碳库 [20]，计算原理如下：

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_dead} + C_{i_soil} \tag{2}$$

式中： C_i 为第 i 类空间类型的综合碳密度； C_{i_above} 、 C_{i_below} 、 C_{i_dead} 、 C_{i_soil} 分别为第 i 类空间类型的地上、地下、死亡有机质以及土壤有机质碳密度。

$$C_{i_total} = C_i \times S_i \tag{3}$$

式中， C_{i_total} 为第 i 类空间类型的碳储量； S_i 为第 i 类空间类型的面积。

2.3.3. PLUS 模型

PLUS 模型基于栅格数据挖掘土地扩张驱动因素，开展土地利用模拟预测，可从时空维度刻画土地利用的动态演变过程，核心包含 LEAS 与 CARS 两大模块 [28] [29]。其中，LEAS 模块采用随机森林算法，挖掘土地利用扩张与驱动因子间的关联规律，获取各类用地的发展概率与驱动因子权重；CARS 模块基于邻域权重、转换矩阵和土地利用需求等关键参数，完成土地利用格局的预测模拟 [30]。本研究基于 2000、2010 和 2020 年河南省土地利用数据，模拟 2040 年土地利用分布情况。首先，在 LEAS 模块下获取各地类的发展概率，其次，在 CARS 模块基于 2010 年土地利用数据、土地发展概率等关键参数，得到 2020 年土地利用预测数据。将 2020 年实际数据与预测数据进行精度检验，得出 Kappa 系数为 0.91，整体精度为 0.95，认为 PLUS 模型总体模拟精度较高，适用于黄河流域河南段土地利用的多情景预测。在此基础上，以 2020 年土地利用现状为基准，设置 10 年为模拟步长，模拟 2040 年河南省在自然发展、耕地保护、城镇发展、可持续发展 4 种情景下的土地利用结构与空间格局。该策略保留了模型在一定时间内分析土地利用变化机制的能力，具有更好的解释性。考虑到数据的可获得性和科学性，同时结合研究区的实际情况，本研究选取人口密度、夜间灯光、GDP、距高速公路距离、距铁路距离、距县政府距离、土壤类型、DEM、坡度、年均温、年降水共 11 个驱动因子作为土地利用变化的驱动因素。邻域权重参数表示地类扩张强度，取值范围为 0~1，越接近 1，代表该地类的扩张能力越强，越不容易转化为其他地类 [27] (转移矩阵见表 3)。具体计算公式为：

$$X^* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{4}$$

式中， X^* 表示离差标准化值， X 表示两期土地利用数据间各地类的变化面积； $X_{\max}$ 表示 6 种 6 地类面积变化的最大值， $X_{\min}$ 表示 6 种地类面积变化的最小值。根据上述公式，根据先前计算出来的用地需求，每个情景的结果与上一个年份的数据计算差值，再计算权重，领域权重的计算结果如表 4 所示：

Table 3. The transformation matrix of the ecological-production-living spaces under natural circumstances

表 3. 自然情境下三生空间转换矩阵

	生产空间	生活空间	生态空间
生产空间	1	1	1
生活空间	0	1	0
生态空间	1	1	1

1 表示可以发生地类转换，0 表示不可以发生地类转换。

Table 4. Domain weights
表 4. 领域权重

类型	生产空间	生活空间	生态空间
自然发展	0.51	0.15	0.34
城镇发展	0.51	0.15	0.34
耕地发展	0.54	0.13	0.33
可持续发展	0.92	0.02	0.06

3. 结果与分析

3.1. 黄河流域河南段三生空间转型特征

3.1.1. 时间演变特征分析

由图 2 发现，黄河流域河南段整体以生产空间为主，占比约为 55%。2020 年生产空间占 55.4%，生态空间次之(约 33%)，生活空间占比最小(约 11%)。2000~2020 年生产空间和生态空间面积以减少为主，生活空间面积逐渐扩张。具体看，生产空间呈现持续减少趋势，2000~2010 年减少 481 km²，2010~2020 年减少 521 km²，累计减少 1002 km²；生活空间面积不足研究区整体的 12%，但 2000~2020 年城镇化的快速发展，使得生活空间快速扩张，从 3067 km² 增至 4370 km²，增长幅度为 42.5%。生态空间为黄河流域主要的土地类型之一，但 2000~2020 年生态空间面积先增后减，总体略减 282 km²。生态空间虽有减少，但整体基底稳定，2000~2020 年保留率较高；生产空间向生活、生态用地的转移强度在 2010~2020 年明显提升，成为生活空间扩张的核心来源。

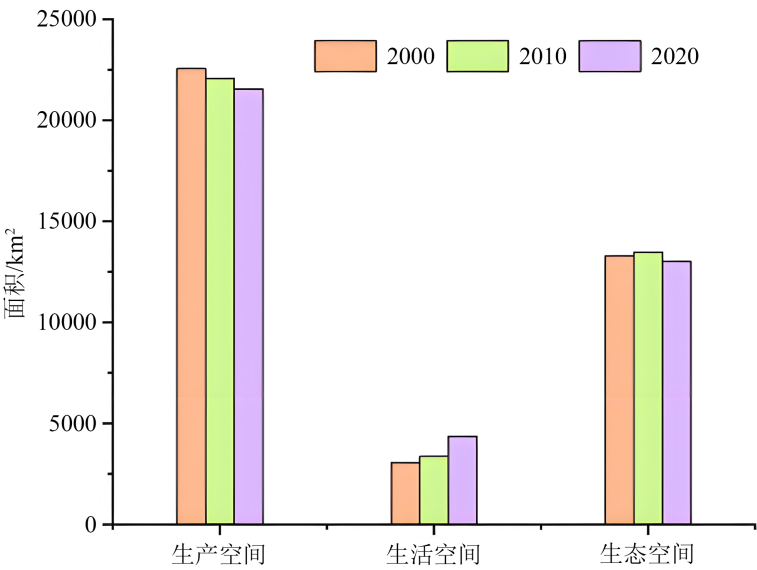


Figure 2. The spatial area and proportion of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin
图 2. 黄河流域河南段三生空间面积和占比

2000~2020 年黄河流域河南段三生空间各地类的转移情况如图 3 所示，可见，2000~2010 年三生空间的转移以生产空间与生态空间的相互转化为核心特征，其中生产空间转出规模尤为显著。相比 2000~2010 年(图 3(a))，2010~2020 年(图 3(b))各类空间转移活跃度进一步提升；生产空间持续向生活空间、生态空间转出，同

时生活空间扩张速率明显加快。2000~2020 年(图 3(c))累计转移面积 8849.12 km², 生产、生活空间净变化较大, 生产与生态空间转出较为剧烈。分地类来看, 生产空间净转出 1014.76 km², 向生活空间的转移量占转出总量的 54.4%, 向生态空间的转移量占 45.6%, 表明生产空间减少受生活空间和生态空间扩张的共同影响; 生产空间的转入量主要来源于生态空间, 占转入总量的 61.8%。生活空间以转入为主, 净转入 1305.91 km², 其转入主要来源于生产空间和生态空间, 分别占转入总量的 92.6%和 7.4%, 黄河流域河南段的城镇化水平在这一时期实现快速提升。生态空间净转出 291.16 km², 主要转为生产空间和生活空间, 同时生态空间也从生产空间转入 2186.80 km², 从生活空间转入 68.48 km², 整体转出略大于转入。生态空间保留率高达 80.65%, 表明区域生态空间总体基底较为稳定, 但局部生态空间向生产、生活空间的转化问题仍不容忽视。

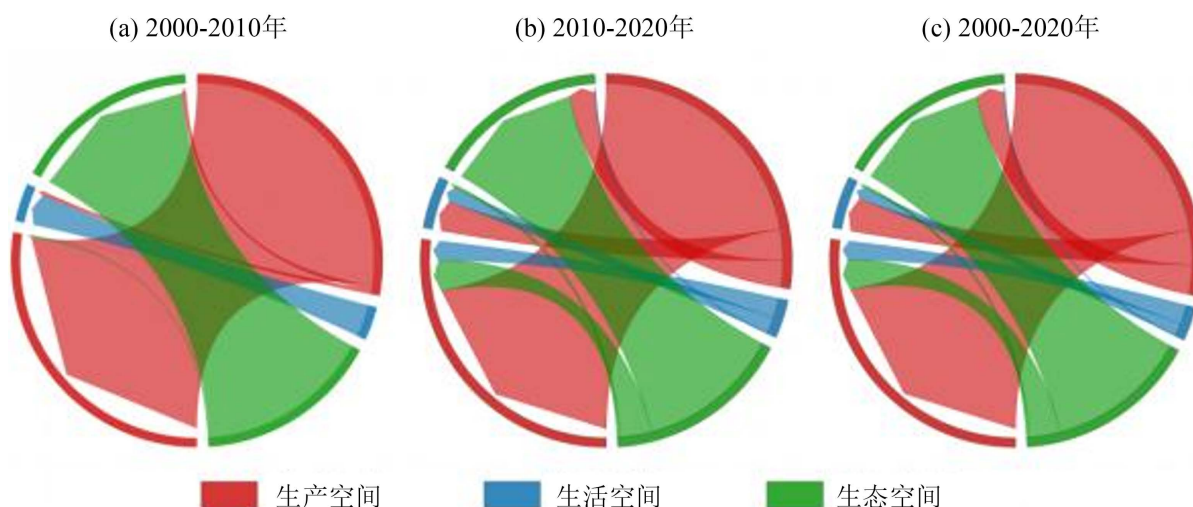


Figure 3. Squad transfer chord diagram of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin
图 3. 黄河流域河南段三生空间转移弦图

3.1.2. 空间转型模式分析

图 4 展示了黄河流域河南段三生空间的格局变化特征。可见, 生产空间集中连片分布于黄河下游平原区及鹤壁、濮阳等农业优势区, 并主要围绕郑州等中心城市、沿陇海、京广等交通干线集聚分布。生产空间整体沿主要河流与交通廊道呈带状延展, 表现出“以线串点、以带扩面”的蔓延式增长特征。生活空间以郑州都市圈为核心向外围辐射扩展, 形成“单核引领、多点联动”的空间格局, 同时呈小规模散点状分布, 与生产空间交错共生。生活空间整体嵌套于生产空间之中, 并在时序上演进为向城市建成区及区域性交通节点进一步集聚的态势。生态空间长期稳定分布于黄河流域河南段西部和南部山地丘陵地带, 以及黄河湿地、南水北调中线干渠等水域生态敏感区, 共同构成环绕中部平原的生态屏障, 其空间分布与区域地形起伏、水系格局具有显著耦合关系。

由图 5 可见, 2000~2020 年, 黄河流域三生空间转型规模显著扩大, 且 2010~2020 年的扩张幅度(转移总量 8506.58 km²)显著高于 2000~2010 年(转移总量 876.79 km²), 呈现出由局部零星分布向全域扩散的演变特征。整体来看, 在各类空间转型中, 生产空间的转出最为突出, 其最大流向为转向生活空间, 累计达 2606.11 km², 且主要集中在郑州、新乡周边地区, 显示出生活空间的扩张趋势, 其次转向生态空间, 转出面积为 2186.80 km², 反映了生产空间向生活与生态空间的结构调整。生产空间与生态空间之间呈现双向转换, 生态空间转为生产空间面积为 2336.87 km², 生产空间转为生态空间达 2186.80 km², 主要集中在三门峡、洛阳及济源等地, 反映了生态演替与生态空间和生产空间之间的动态平衡关系。生活空间向生产空间的转换面积累计为 1441.29 km², 集中于城乡接合部, 揭示了用地功能调整的新趋势。

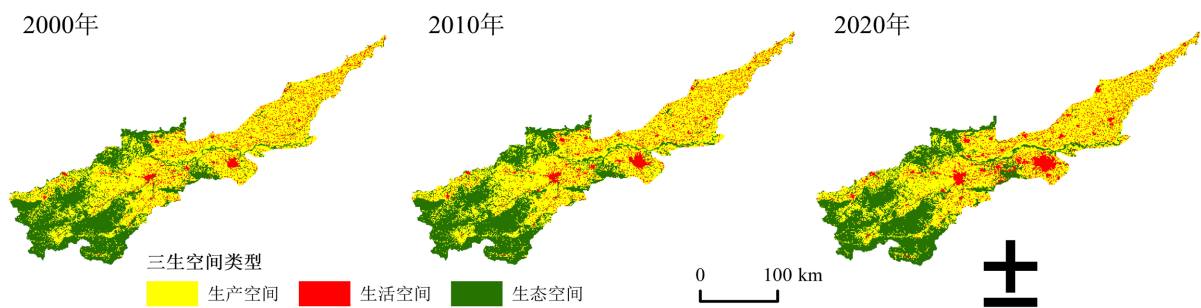


Figure 4. Spatial distribution of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin
图 4. 黄河流域河南段三生空间分布状况

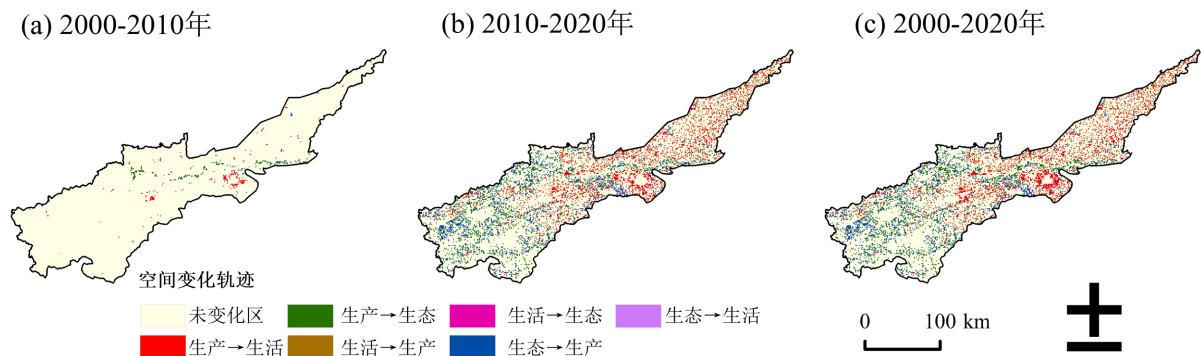


Figure 5. The transfer of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin
图 5. 黄河流域河南段三生空间面积转移情况

3.2. 黄河流域河南段碳储量时空演变特征

3.2.1. 黄河流域河南段碳储量时间演变特征

由表 5 可以发现，生态空间是黄河流域碳储量的主要来源，其次是生产空间，生活空间产生的碳储量很少。2000~2020 年黄河流域河南段三生空间碳储量保持减少趋势，累计减少 9.6×10^6 t，主要受生产空间和生态空间减少、生活空间扩张影响，人类城镇化的建设与开发不断侵占生态和生产空间，导致植被覆盖面积减少，固碳能力下降。分地类看，生产空间的碳储量呈现持续减少趋势，累积减少 13.4×10^6 t。生活空间面积不断扩大，碳储量保持增长态势，2000~2020 年累计增加 5.5×10^6 t，其中 2010~2020 年增幅较大，增加 3.9×10^6 t。生态空间碳储量先增后减，2000~2010 年增加 1.1×10^6 t，2010~2020 年减少 2.8×10^6 t，累计净减少 1.7×10^6 t。整体碳储量变化在 2010~2020 年减少量显著大于 2000~2010 年，表明用地转换对碳储量的负面效应在后期加速显现。

Table 5. Structure and changes of carbon storage in production-living-ecological space of Henan section of the Yellow River Basin from 2000 to 2020 ($\times 10^6$ t)

表 5. 2000~2020 年黄河流域河南段三生空间碳储量结构及变化($\times 10^6$ t)

年份	生产空间	生活空间	生态空间	总计
2000	226.4	6.1	156.2	388.7
2010	220.9	7.7	157.3	385.9
2020	213	11.6	154.5	379.1
2000~2010	-5.5	1.6	1.1	-2.8
2010~2020	-7.9	3.9	-2.8	-6.8
2000~2020	-13.4	5.5	-1.7	-9.6

3.2.2. 黄河流域河南段碳储量空间演变特征

将碳储量运算结果划分为低(碳密度小于 55 t/hm²)、中(碳密度介于 55~100 t/hm²)、高(碳密度大于 100 t/hm²)3 个级别(图 6)。由图可知, 2000~2020 年黄河流域河南段碳储量呈“西高东低、南高北低”的空间特征。高值区作为区域碳储量的主体, 广泛覆盖东部与中部大部分区域, 主要是因为研究区西部以山地、丘陵为主, 植被覆盖度高, 碳汇能力强。2000~2020 年间整体分布格局稳定, 仅在城市周边被低值区逐步侵占。中值区在 2000 年主要沿黄河干流(三门峡-郑州段)呈条带状分布, 2010 年向豫西北丘陵(济源一带)扩张, 2020 年则与低值区的边界愈发模糊, 这是因为草地、水域生态空间的碳储量有所下降, 原有中值区逐渐被更低碳储量的用地类型替代。由于东部及城镇周边区域受建设用地扩张、水域分布影响, 低值区碳汇能力弱, 使其呈零星或条带状分布, 且多与城市建成区、河流水系的空间范围高度重合。从 2000~2020 年的动态变化来看, 高值区变化相对较小, 中值区在黄河流域河南段中部有小范围扩张, 城市周边较高值区被低值区逐步侵占, 范围逐步缩减, 低值区进一步扩大。这主要是因为 2000~2020 年期间黄河流域河南段碳储量下降, 建设用地扩张侵占了部分碳储量较高或中等的区域, 而高值区因受开发影响小生态较好, 所以变化不大。

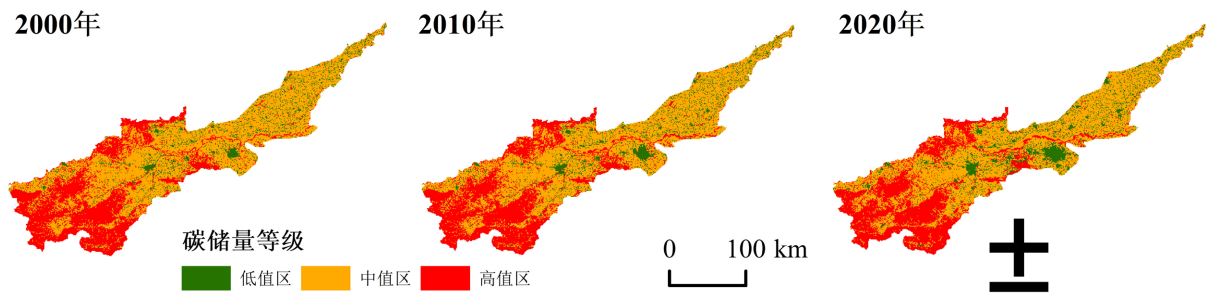


Figure 6. Spatial distribution of carbon storage in the Henan section of the Yellow River Basin
图 6. 黄河流域河南段碳储量空间分布

3.2.3. 黄河流域河南段三生空间转型引起的碳储量变化

由图 7 可知, 研究区碳储量变动集中于中部与东部地区, 空间分布较为零散, 整体呈现碳储量缩减态势。碳储量增加地区主要位于黄河流域河南段沿岸地区, 沿岸的碳储量增加主要源于生产生活空间向生态空间的转移。碳储量减少地区分布较广, 主要在城市周围有所分布, 碳储量减少主要源于城镇的发展, 建设用地快速扩张, 生产空间向生产空间和生活空间的转移。

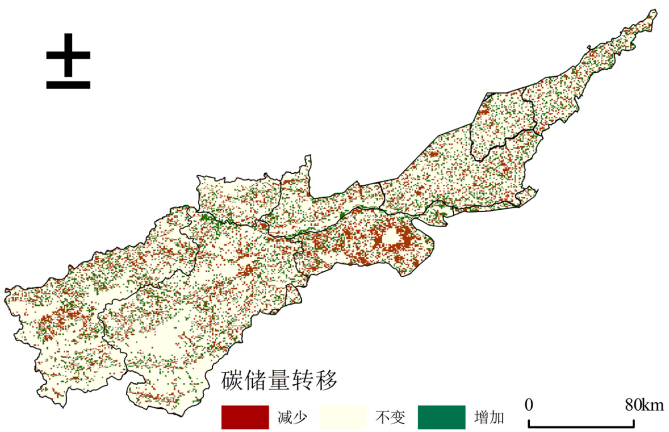


Figure 7. The annual increase or decrease of carbon storage in the Henan section of the Yellow River Basin from 2000 to 2020
图 7. 2000~2020 年黄河流域河南段碳储量增减状况

3.3. 多情景模拟下三生空间与碳储量预测

3.3.1. 多情景模拟下三生空间的发展演变

多情景模拟结果显示(图 8), 耕地保护情景下生产用地规模达 20978.65 km², 较自然发展情景增长 4.26%, 成为唯一扩张类型。城镇发展情景下城镇扩张优先, 生产用地缩减至 19892.6 km², 降幅 1.13%; 可持续发展情景兼顾发展与保护, 生产用地微增 0.37%, 保持基本稳定。生活用地规模与城镇化进程高度相关, 城镇发展情景下生活用地扩张至 5911.08 km², 增幅 4.24%, 成为增长最快的类型。耕地保护情景为严控城镇扩张, 生活用地被压缩至 5006.46 km², 降幅 11.71%。可持续发展情景通过集约利用, 生活用地仅微降 1.17%, 满足合理需求。生态用地在多数情景中保持稳定, 自然、城镇、可持续发展情景下规模波动不足 0.1%, 仅耕地保护情景因补充耕地需求, 部分低质量生态用地被开发, 规模下降 1.47%。

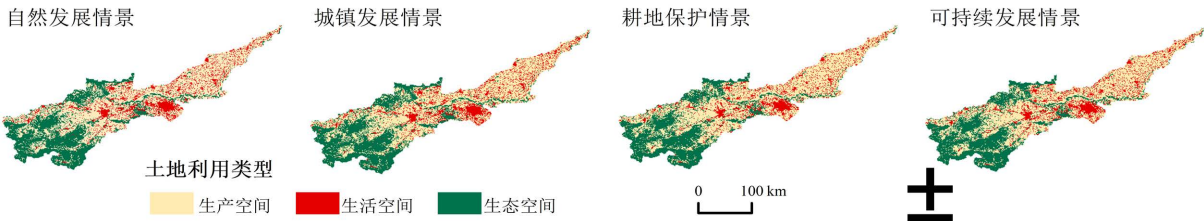


Figure 8. Spatial distribution of the ecological-production-living spaces in the Henan section of the Yellow River Basin under multiple scenarios

图 8. 多情境下黄河流域河南段三生空间分布情况

3.3.2. 多情景模拟下碳储量预测

2040 年自然发展、城镇发展、耕地保护和可持续发展情景下, 三生空间碳储量总量分别为 368.46、366.59、373.21 和 368.96 t, 与 2020 年相比, 4 种情景下的碳储量均有所下降(图 9), 城镇发展情景碳储量下降最多(12.51×10^6 t), 耕地保护情景碳储量下降最少(5.89×10^6 t), 自然发展和可持续发展情景碳储量分别下降 10.64×10^6 t 和 10.14×10^6 t, 主要源于生态空间向生产空间和生活空间的转移, 耕地保护情景下, 对农业生产空间的管控约束性增强, 生态空间向生产、生活空间转移量降低, 生态空间和生产空间的转出量大幅减少, 因此碳储量下降幅度最小。从空间上看, 黄河流域河南段三生空间碳储量等级整体变化较小, 各地市的碳储量变动以减少为主, 增加区域数量较少, 在空间分布上不显著, 碳储量减少的转移地区主要位于城市群以及黄河流域河南段沿岸的城镇扩张区域。

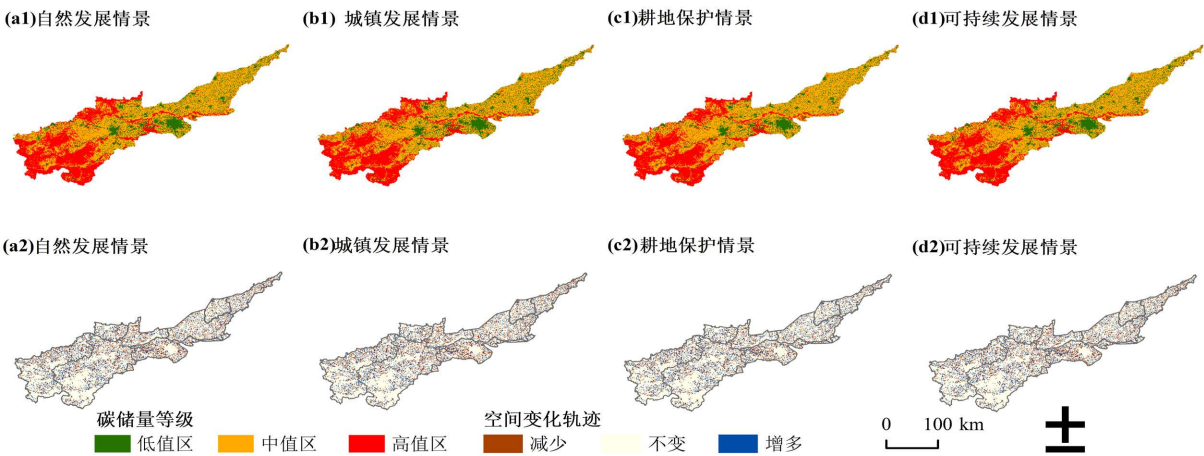


Figure 9. Distribution and transfer of carbon storage in the Henan section of the Yellow River Basin under multi-scenario simulation

图 9. 多情景模拟下黄河流域河南段生态系统碳储量分布与转移

4. 讨论

本研究基于 2000~2020 年黄河流域河南段三生空间格局演变的碳储量评估结果显示,黄河流域河南段碳储量累计减少 9.6×10^6 t,与黄河流域整体研究结论[31]高度吻合,共同印证了城镇扩张是黄河流域河南段碳储量减少的关键驱动因子,也充分验证了本研究碳储量评估结果的科学性与合理性。

研究发现,黄河流域河南段碳储量整体呈“西高东低、南高北低”的空间分异特征,20 年间碳储量持续下降,累计减少 9.6×10^6 t,生产空间向生活空间的转化是碳损失的主导原因,转化面积累计达 2606.11 km²,生态空间的稳定与恢复对减缓碳流失具有显著缓冲效应。结合多情景模拟结果,不同发展路径下碳储量响应差异显著,据此提出差异化管控策略:

1) 对于高碳储量区,应重点强化西部山地丘陵生态空间保护,筑牢区域碳汇核心屏障。严守永久基本农田红线,严控生产空间向生活空间的无序转化,稳定农田碳库;依托黄河干流与南水北调中线干线构建生态廊道,连通零散生态斑块,形成协同稳定的碳汇网络,从源头遏制碳汇能力下降。

2) 对于中碳储量区,重点开展生态过渡带退化修复与农林交错区综合治理,通过退耕还林还草、矿山生态修复等工程提升生态连通性,推进山水林田湖草沙一体化保护修复,增强生态系统稳定性与碳汇增量。优化农业空间布局,减少农业活动对生态空间的挤占,推动农田生产与生态碳汇协同发展。

3) 对于低碳储量区,以郑州、洛阳等中心城市及城镇扩张区为核心,推动传统产业绿色低碳转型,严控城镇开发对生态用地的侵占。同时推进城镇低效用地再开发,优化城镇空间结构,遏制建设用地无序扩张,在农业主产区推广绿色种养、节水灌溉等技术,降低面源污染,遏制耕地非粮化、非农化,改善平原农区碳汇质量。

4) 4 种情景对比显示,自然发展情景延续历史趋势,碳储量持续缓慢下降,难以平衡发展与保护需求。城镇发展情景建设用地扩张过快,碳储量减幅最大,生态与粮食安全风险突出。耕地保护情景可有效减缓碳损失,但对城镇发展约束较强。可持续发展情景用地转换更为均衡,建设用地适度扩张、生态用地有效维持,能够兼顾粮食安全、城镇发展与生态保护,更契合黄河流域生态保护和高质量发展战略要求,是区域国土空间优化的最优路径。

5. 结论

1) 2000~2020 年黄河流域河南段三生空间结构变化显著,生产空间持续减少,生活空间快速扩张,生态空间小幅波动但总体稳定。空间转移以生产空间转向生活空间为主导(累计达 2606.11 km²),生态空间保留率较高,转型呈现明显的城镇化驱动特征。

2) 研究区内区域碳储量呈持续下降趋势,由 388.7×10^6 t 降至 379.1×10^6 t,累计减少 9.6×10^6 t。碳储量空间分异显著。高值区集中于西部生态空间,低值区沿城镇节点扩张。生态空间为区域核心碳库,生活空间扩张是碳储量下降的主要原因。

3) 2040 年多情景模拟表明,城镇发展情景碳储量减幅最大,减少量为 12.51×10^6 t,耕地保护情景可有效减缓碳损失,可持续发展情景为兼顾发展与碳汇提升的最优模式。

4) 黄河流域河南段可通过严控生活空间无序扩张、稳定生产空间规模、强化生态空间保护修复,实现三生空间结构优化与碳汇能力提升。研究结果可为黄河流域河南段国土空间规划、生态保护及“双碳”战略实施提供科学依据。

基金项目

河南省大学生创新创业训练计划项目(S202612949029);郑州师范学院大学生创新性实验计划项目建设专项(DCZ2026019);河南省软科学研究计划项目(262400411080;262400411058);国家社会科学基金项目

目(22BJY149); 郑州师范学院本科教学改革研究一般项目(JSJYYZK253498); 郑州师范学院科研启动专项经费。

参考文献

- [1] Niu, J.Y., Jin, G. and Zhang, L. (2023) Territorial Spatial Zoning Based on Suitability Evaluation and Its Impact on Ecosystem Services in Ezhou City. *Journal of Geographical Sciences*, **33**, 2278-2294. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2176-9>
- [2] Wu, W., Xu, L.Y., Zheng, H.Z. and Zhang, X.R. (2023) How Much Carbon Storage Will the Ecological Space Leave in a Rapid Urbanization Area? Scenario Analysis from Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Resources, Conservation and Recycling*, **189**, Article ID: 106774. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106774>
- [3] Li, Q., Pu, Y.C. and Gao, W. (2023) Spatial Correlation Analysis and Prediction of Carbon Stock of “Production-Living-Ecological Spaces” in the Three Northeastern Provinces, China. *Heliyon*, **9**, e18923. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18923>
- [4] Shi, H.Q., Duan, H.E., Li, X.M., Wang, G.G., Chen, A. and Liang, D.R. (2026) Impact of Land Use Change on Carbon Storage Based on the Plus-Invest Model: A Case Study in the Urban Belt along the Yellow River, China. *Journal of Arid Land*, **18**, 452-476. <https://doi.org/10.1016/j.jaridl.2026.03.006>
- [5] Zou, L.L., Liu, Y.S., Wang, J.Y. and Yang, Y.Y. (2021) An Analysis of Land Use Conflict Potentials Based on Ecological-Production-Living Function in the Southeast Coastal Area of China. *Ecological Indicators*, **122**, Article ID: 107297. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107297>
- [6] Ji, Z.X., Liu, C., Xu, Y.Q., Sun, M.X., Wei, H.J., Sun, D.F., *et al.* (2023) Quantitative Identification and the Evolution Characteristics of Production-Living-Ecological Space in the Mountainous Area: From the Perspective of Multifunctional Land. *Journal of Geographical Sciences*, **33**, 779-800. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2106-x>
- [7] Song, J.Z., Lei, J. and Wang, P.J. (2025) Evolution of the “Production-Living-Ecological” Space of Urban Trituration and Its Prediction of Carbon Mitigation Potential—The Case of Xi’an. *Ecological Indicators*, **171**, Article ID: 113137. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113137>
- [8] 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.
- [9] 陈姜全, 李效顺, 刘希朝, 等. 基于“三生空间”转型的碳收支演变机制与碳补偿研究——以西南地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(3): 610-626.
- [10] 周宇, 张余, 王琴, 等. 黑龙江省“三生空间”转型及其碳效应[J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 901-911.
- [11] 曾庆雨, 孙才志. 黄河流域陆地生态系统碳储量测算及其影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5476-5493.
- [12] Ma, Y.M., Wang, J.S., Xin, P.Y., Zhao, Z.X., Zhang, X.X., Yang, Y.X., *et al.* (2026) Assessing Carbon Storage Dynamics and Policy Impacts: Application of Invest-Plus Framework in the Qinling Mountains, China. *Land Use Policy*, **164**, Article ID: 107947. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2026.107947>
- [13] Zhu, Y., Ma, B., Hu, H.B., Ding, D.X., Zhou, H.W., Liu, J.X., *et al.* (2025) Analysis and Prediction of Spatiotemporal Carbon Storage Changes in the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province Based on PLUS and Invest Model. *Trees, Forests and People*, **21**, Article ID: 100916. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100916>
- [14] 任利敏, 金喜盈, 李娜, 等. 黄河流域河南段碳储量时空演变及驱动因素[J]. 测绘科学, 2026, 51(03): 129-139.
- [15] 王文娟, 赵振坤, 赵东方. 1980-2035年黄河流域土地利用和碳储量时空格局演化分析——基于 FLUS-InVEST 模型[J]. 生态经济, 2025, 41(8): 201-210.
- [16] 杨洁. 基于 FLUS-InVEST 模型的黄河流域土地利用变化模拟与碳储量估算研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2023.
- [17] 张薇, 朱睿, 杨华庆, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的黄河水源涵养区碳储量时空演变分析及模拟预测[J]. 高原气象, 2025, 44(2): 362-377.
- [18] 安文举, 李旭, 郭强, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型预测 2033 年陕北多沙粗沙区碳储量及经济价值[J]. 应用生态学报, 2026, 37(4): 1165-1174.
- [19] 何慧爽, 董鑫鑫, 丁婕妤. 基于 PLUS-InVEST 模型的黄河流域“三生”空间演变多情景模拟与碳储量评估[J]. 环境科学, 2026, 47(5): 3037-3048.
- [20] Cai, J., Chi, H., Lu, N., Bian, J., Chen, H., Yu, J., *et al.* (2024) Analysis of Spatiotemporal Predictions and Drivers of Carbon Storage in the Pearl River Delta Urban Agglomeration via the Plus-Invest-Geodetector Model. *Energies*, **17**,

5093. <https://doi.org/10.3390/en17205093>

- [21] 刘晓河, 黄磊, 程爱华. 耦合 PLUS-InVEST-Geodetector 模型的黄河“几”字弯土地利用与碳储量时空变化及驱动因素分析[J/OL]. 环境科学: 1-17. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjxx.202509302>, 2026-04-27.
- [22] 毕帆帆, 武志涛, 梁寒雪, 等. 基于 PLUS-InVEST-GeoDetector 模型的黄河中游碳储量时空变化及驱动因素[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4742-4753.
- [23] 丛中笑, 刘金花, 孙增禹, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的黄河流域九省(区)碳储量变化分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(12): 24-30, 36.
- [24] 李冰洁, 范志韬, 曲芷程, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的黄河流域内蒙古段生态系统碳储量评价及预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1217-1227.
- [25] 贾佳, 梁帅, 田世民, 等. 黄河流域河南段生态系统碳储量评估及其影响因素[J]. 人民黄河, 2026, 48(1): 21-25+32.
- [26] 夏依宁, 刘鹏翱, 何柯润, 等. 基于土地利用的长株潭都市圈碳储量时空格局与情景模拟[J]. 生态环境学报, 2025, 34(11): 1661-1674.
- [27] 杜嘉睿, 宋芊, 高文明. 黄河源区生态系统健康时空演变与多情景模拟研究[J]. 生态环境学报, 2026, 35(4): 551-562.
- [28] 梁秋燕, 宋明洁, 张豆, 等. 基于生态安全格局的昆明市 2030 年和 2050 年土地利用模拟[J]. 生态环境学报, 2025, 34(9): 1463-1472.
- [29] 闵婕, 刘晓煌, 肖粤新, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的新安江流域生态系统碳储量时空变化分析与预测[J]. 现代地质, 2024, 38(3): 574-588.
- [30] 曹振江, 张亚丽. 基于 InVEST-PLUS 模型的河南省土地利用和碳储量时空演变[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7043-7057.
- [31] 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 冀正欣, 等. 人地关系视角下北京市“三生”空间转型及其碳储量效应[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2786-2798.