

基于PLUS-InVEST模型的黄河流域 碳储量时空演变与模拟

魏珊¹, 丁明磊², 杨伟敏³

(1. 濮阳职业技术学院能源与化学工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 华北水利水电大学人居科学与设计学院, 郑州 450000; 3. 濮阳市昌隆规划建设有限公司, 河南 濮阳 457000)

摘要: [目的] 定量评估土地利用变化对碳储量的影响, 对推动“双碳”战略目标实现和流域国土空间优化具有重要意义。[方法] 以黄河流域为研究区, 基于2005年、2015年和2025年3期土地利用数据, 综合运用PLUS-InVEST模型, 分析流域土地利用变化及碳储量时空演变特征, 并模拟预测2035年自然发展、城镇开发、耕地保护和生态保护4种情景下的土地利用格局与碳储量变化。[结果] 1) 2005—2025年黄河流域土地利用结构以草地、耕地和林地为主, 建设用地和林地分别增加1.07万km²和1.27万km², 耕地和未利用地持续减少, 反映出城镇扩张作用下的土地利用调整过程; 2) 2005—2025年流域碳储量累计增加0.95亿t, 整体呈增长趋势。草地、耕地和林地是主要碳库, 合计贡献率超过96%, 空间上呈“中部较高、上下游相对较低”的分布特征; 3) 2035年4种情景下, 碳储量表现为生态保护情景(73.44亿t) > 耕地保护情景(72.96亿t) > 自然发展情景(72.77亿t) > 城镇开发情景(72.10亿t), 说明生态保护和耕地保护有助于提升或维持流域碳储量, 而城镇开发强度增加可能削弱碳汇功能; 4) 土地利用转换方向是影响碳储量变化的重要因素, 草地转林地、未利用地转草地、建设用地转耕地等是主要增汇路径, 耕地、草地向建设用地转化是重要减汇路径。[结论] 未来黄河流域应采取耕地保护与生态保护相协调的复合型政策导向, 严格控制建设用地无序扩张, 统筹推进粮食安全、生态安全与“双碳”目标协同实现。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; PLUS模型; InVEST模型; 多情景模拟; 黄河流域

中图分类号: X171.1; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0471-12

Spatiotemporal Evolution and Simulation of Carbon Storage in the Yellow River Basin Based on the PLUS-InVEST Model

Wei Shan¹, Ding Minglei², Yang Weimin³

(1. Puyang Vocational and Technical College, Department of Energy and Chemical Engineering, Puyang, Henan 457000, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, School of Human Settlements Science and Design, Zhengzhou

450000, China; 3. Puyang Changlong Planning and Construction Limited Company, Puyang, Henan 457000, China)

Abstract: [Objective] Quantitatively assessing the impact of land use change on carbon storage is of great significance for promoting China's "dual-carbon" goals and optimizing territorial spatial planning. [Methods] Taking the Yellow River basin as the study area, this study used land use data from 2005, 2015, and 2025 and integrated the PLUS-InVEST models to analyze the spatiotemporal evolution of land use and carbon storage. The land use patterns and carbon storage changes in 2035 were further simulated under four scenarios: natural development, urban development, cropland protection, and ecological protection. [Results] 1) From 2005 to 2025, grassland, cropland, and forest land dominated the land use structure of the Yellow River basin. Construction land and forest land increased by 10 700 km² and 12 700 km², respectively, while cropland and unused land continued to

收稿日期: 2026-05-23

修回日期: 2026-07-03

录用日期: 2026-07-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-08-21

作者简介: 魏珊(1984—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事土地利用优化及碳储量评估研究。E-mail: weishan0517@163.com

通信作者: 杨伟敏(1988—), 女, 学士, 工程师, 主要从事人文地理与城市规划研究。E-mail: yangweimin111@126.com

decrease, reflecting land use adjustments driven by urban expansion. 2) Carbon storage in the basin increased by 0.095 billion t from 2005 to 2025, showing an overall upward trend. Grassland, cropland, and forest land were the main carbon pools, contributing more than 96% of the total carbon storage. Spatially, carbon storage showed a pattern of being relatively high in the middle reaches and relatively low in the upper and lower reaches. 3) Under the four scenarios in 2035, carbon storage followed the order of ecological protection scenario (7.344 billion t) > cropland protection scenario (7.296 billion t) > natural development scenario (7.277 billion t) > urban development scenario (7.210 billion t), indicating that ecological protection and cropland protection help improve or maintain carbon storage, whereas intensified urban development may weaken the carbon sink function. 4) The direction of land use conversion was an important factor affecting carbon storage changes. The conversions from grassland to forest land, unused land to grassland, and construction land to cropland were the main pathways for carbon storage increase, while the conversions from cropland and grassland to construction land were important pathways for carbon storage loss. [Conclusion] In the future, the Yellow River basin should adopt a coordinated policy orientation integrating cropland protection and ecological protection, strictly control the disorderly expansion of construction land, and promote the coordinated realization of food security, ecological security, and the "dual-carbon" goals.

Keywords: land use change; carbon storage; PLUS model; InVEST model; multi-scenario simulation; Yellow River basin

Received: 2026-05-23

Revised: 2026-07-03

Accepted: 2026-07-15

Online(www.cnki.net): 2026-08-21

气候变化是当前人类社会面临的最严峻挑战之一,由碳排放引发的全球变暖正深刻影响着生态环境演变和人类可持续发展进程。为积极应对气候变化,中国于2020年向国际社会郑重承诺,力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的“双碳”战略目标。陆地生态系统作为全球碳循环的核心组成部分,通过植被光合作用和土壤固碳过程吸收大气中的二氧化碳,在维持区域碳平衡和缓解气候变暖中发挥着不可替代的作用^[1]。土地利用变化作为人类活动影响陆地生态系统最直接的方式,通过改变地表覆被类型和植被-土壤系统的结构与功能,深刻影响着区域碳储量的时空格局^[2]。因此,定量评估土地利用变化对碳储量的影响,对于推动“双碳”战略目标的实现具有重要的理论价值和现实意义。

碳储量评估与预测是生态学、地理学和全球化研究的重要议题,相关研究主要围绕估算方法、模拟模型和研究内容3个方面不断深化。1)在碳储量估算方法方面,传统样地清查法和生物量法测算精度高,但存在研究尺度有限、空间可视化困难等不足,难以满足大区域研究需求^[3];遥感反演法可实现大尺度估算,但对特定生态系统类型依赖性较强,地下生物量和土壤碳库反演精度仍有待提升^[4]。近年来,模型模拟法因操作简便、运算高效、结果空间化等优势逐渐成为主流,其中InVEST模型凭借数据需求少、运行速度快、评估精度较高且便于可视化等特

点,在森林、湿地、草地等多种生态系统碳储量评估中得到广泛应用,已成为生态系统服务功能定量评估的代表性工具^[5]。2)在土地利用模拟方面,CA-Markov、PLUS等模型相继被开发应用。CA-Markov模型耦合元胞自动机与马尔科夫链,适用于长时序预测,但对斑块景观演变细节响应能力有限^[6];PLUS模型基于土地扩张分析策略(LEAS)和多类随机斑块种子机制(CARS),在斑块尺度模拟精度、驱动因子挖掘和政策情景响应等方面优势显著,逐渐成为前沿工具^[7]。基于此,PLUS-InVEST耦合模型应用日益广泛,既可实现土地利用变化的高精度模拟,又能定量评估其引发的碳储量变化,成为揭示二者耦合关系的重要研究范式^[8]。3)在研究内容方面,国内外学者围绕国家、省域、城市群、流域、市县等不同尺度开展了大量评估与多情景预测研究。研究对象既涵盖城市化地区和经济发达区域,也包括生态脆弱区、自然保护区、高寒高原等重要生态功能区,呈现多元化趋势^[9]。情景设置由早期单一自然发展情景,逐步扩展到融合耕地保护、生态保护、城镇发展、规划引导等多种政策导向的综合情景模拟;研究主题也从土地利用与碳储量响应关系,拓展到空间分异驱动因素、冷热点识别、生态系统服务权衡协同等多维议题^[10-12]。然而,已有研究在大尺度复杂流域的精细化模拟、不同政策情景对比分析及土地利用转换路径对碳储量影响机制的定量解析等方面

仍有待深化,特别是针对兼具生态脆弱性和发展紧迫性的大尺度流域系统,需进一步开展系统化的多情景碳储量演变研究。

黄河流域是我国重要的生态安全屏障和经济发展带,生态系统类型多样且脆弱。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,流域国土空间优化、生态修复和碳汇功能提升受到广泛关注。然而,城镇化推进、建设用地扩张、水土流失和局部土地退化等问题仍对流域碳储量稳定性产生影响^[13]。已有研究^[14-15]已围绕黄河流域碳储量评估和多情景预测开展了较多探索,但在结合最新土地利用数据、统筹生态保护与高质量发展情景、揭示上中下游分区差异以及量化土地利用转换路径影响机制等方面仍有深化空间。基于此,本研究以黄河流域为研究区,综合运用 PLUS 和 InVEST 模型,基于 2005 年、2015 年和 2025 年 3 期土地利用数据,分析土地利用变化及碳储量时空演变特征,并设置自然发展、城镇开发、耕地保护和生态保护 4 种情景,模拟 2035 年土地利用格局与碳储量变化,以期为黄河流域国土空间优化、生态保护修复和“双碳”目标实现提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

黄河流域作为中国第二大流域,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,自西向东流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 个省(自治区),最终注入渤海,干流全长约 5 464 km,流域总面积约 80.89 万 km²

(图 1)。流域横跨青藏高原(上游)、黄土高原(中游)、华北平原(中游)三大地貌单元,地势西高东低,气候类型复杂,年平均降水量呈“东南多、西北少”的空间分布特征。流域内土地利用类型以草地、耕地和林地为主,是我国重要的农牧业生产基地和生态屏障区。

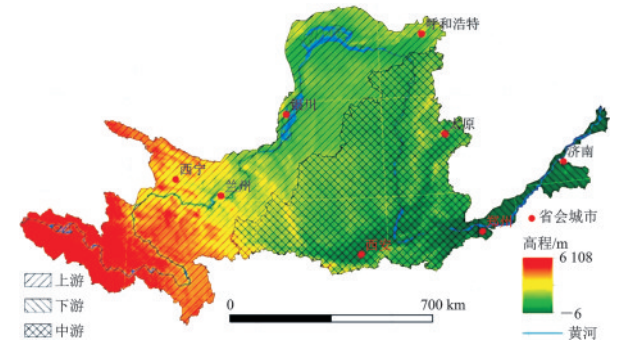


图 1 研究区地理位置
Fig. 1 Geographical location of the study area

本研究所用数据主要包括土地利用数据、自然环境数据和社会经济数据三大类(表 1)。其中,土地利用数据来源于武汉大学发布的 CLCD 数据集,按耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类进行重分类;自然环境数据包括气温、降水、土壤类型、高程、坡度和 NDVI;社会经济数据包括人口密度、人均 GDP、夜光遥感数据及距铁路、高速公路和水体的距离等,主要来源于中国科学院资源环境科学与数据中心、地理空间数据云和全国地理信息资源目录服务系统。所有栅格数据统一重采样至 1 km 分辨率,并统一坐标系。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	数据名称	分辨率	数据来源
土地利用数据	2005 年、2015 年、2025 年土地利用数据	30 m	武汉大学 CLCD 数据集 (https://zenodo.org/records/5816591)
	气温	1 km	
自然环境数据	降水	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	土壤类型	1 km	
	高程	1 km	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
	坡度	1 km	
	NDVI	1 km	
社会经济数据	人口密度	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	人均 GDP	1 km	
	夜光遥感数据	1 km	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn/)
	距铁路的距离	矢量	
	距高速公路的距离	矢量	
	距水体的距离	矢量	

2 研究方法

2.1 PLUS 模型

PLUS 模型是基于栅格数据的斑块生成式土地利用变化模拟模型,由土地扩张分析策略(land

expansion analysis strategy, LEAS)和基于多类随机斑块种子的元胞自动机(CA based on multiple random seeds, CARS)2 个模块耦合构成,在多类型土地利用斑块演变模拟和复杂土地系统动态变化分析方面具有显著优势。

2.1.1 LEAS 模块 LEAS 模块通过对比研究初期和末期土地利用数据,提取各地类发生扩张的栅格单元,并结合自然环境、社会经济等多种驱动因子,采用随机森林算法挖掘各地类扩张与驱动因子之间的非线性关系,进而获取各地类的发展概率及各驱动因子对地类扩张的贡献度,为后续 CARS 模块的斑块生成提供概率基础。

2.1.2 CARS 模块 CARS 模块通过引入多类随机斑块种子机制和阈值递减策略,在发展概率约束下模拟各地类斑块的空间演变过程。模型运行需要设置邻域权重和转换成本矩阵 2 个关键参数。其中,邻域权重反映各地类在驱动因子作用下的扩张能力,数值越大表示该地类扩张能力越强。本研究基于黄河流域 2005—2025 年土地利用变化特征,参考相关研究^[16-17],最终确定的各地类邻域权重耕地为 0.30,林地为 0.30,草地为 0.39,水域为 0.11,建设用地为 0.06,未利用地为 0.14。

2.1.3 多情景设置 为揭示不同发展导向对黄河流域未来土地利用格局和碳储量演变的影响,本研究结合黄河流域生态保护和高质量发展需求^[18-19],在 PLUS 模型中设置自然发展、城镇开发、耕地保护和生态保护 4 种情景。不同情景下,各类土地利用需求量均采用 Markov 模型预测获得,并作为 PLUS 模型中 CARS 模块的面积约束输入^[20-22]。土地利用多情景设定规则为:

1)自然发展情景。该情景延续 2015—2025 年土地利用变化趋势,保持原有土地利用转移概率不变,以 2025 年土地利用面积为基期,使用 Markov 模型预测 2035 年各类土地利用需求量。

2)城镇开发情景。该情景以城镇建设扩张为主要导向,在自然发展情景转移概率矩阵的基础上,将耕地、林地、草地和未利用地向建设用地的转移概率增加 30%;同时,将建设用地向林地、草地、水域和未利用地的转移概率降低 30%。

3)耕地保护情景。在自然发展情景转移概率矩阵的基础上,禁止耕地向建设用地转移,并将耕地向林地、草地、水域和未利用地的转移概率降低 30%。

4)生态保护情景。该情景以生态用地保护为主要导向,在自然发展情景转移概率矩阵的基础上,将林地、草地和水域向建设用地转移的概率降低 50%;同时,将耕地向林地、草地和水域的转移概率增加 30%,将耕地向建设用地的转移概率降低 60%。

针对不同情景的土地利用转换特征,设置相应的土地利用转换规则矩阵,用于约束 PLUS 模型模拟过程中不同地类之间是否允许发生转换(表 2)。

表 2 多种情景转移矩阵

Table 2 Multiple scenario-based transfer matrices

情景	地类	a	b	c	d	e	f
自然 发展 情景	a	1	1	1	1	1	1
	b	1	1	1	1	1	1
	c	1	1	1	1	1	1
	d	1	1	1	1	1	1
	e	1	1	1	1	1	1
	f	1	1	1	1	1	1
城镇 开发 情景	a	1	0	0	0	1	0
	b	1	1	1	1	1	0
	c	1	0	1	1	1	0
	d	0	0	0	1	1	0
	e	0	0	0	0	1	0
	f	0	1	1	1	1	1
耕地 保护 情景	a	1	0	0	0	0	0
	b	1	1	1	1	1	1
	c	1	1	1	1	1	1
	d	1	1	1	1	1	1
	e	1	1	1	1	1	1
	f	1	1	1	1	1	1
生态 保护 情景	a	1	1	1	1	0	0
	b	0	1	0	0	0	0
	c	1	1	1	1	0	0
	d	0	0	0	1	0	0
	e	1	1	1	1	1	0
	f	1	1	1	1	1	1

注:1 表示允许转换;0 表示不允许转换;a、b、c、d、e 和 f 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

为验证 PLUS 模型在黄河流域的适用性,本研究以 2015 年土地利用数据为基期,结合驱动因子和转换规则模拟 2025 年土地利用格局,并将模拟结果与 2025 年实际土地利用数据进行对比,经检验,Kappa 系数达到 0.85 以上,总体精度高于 90%,表明该模型在黄河流域具有良好的模拟精度,可用于 2035 年土地利用格局预测。

2.2 碳储量核算

InVEST 模型是用于量化评估生态系统服务功能及其经济价值的综合性模型,其碳储量评估模块将陆地生态系统碳库划分为地上生物碳库、地下生物碳库、土壤有机碳库和死亡有机质碳库 4 个部分,通过结合各地类面积与对应碳密度估算区域碳储量^[23-24],其计算公式为:

C_i = C_{i,a} + C_{i,b} + C_{i,s} + C_{i,d} (1)

C_{total} = ∑_{i=1}ⁿ C_i × S_i (2)

式中:C_i 为第 i 类土地利用的总碳密度,t/hm²;C_{i,a}、

$C_{i,b}$ 、 $C_{i,s}$ 、 $C_{i,d}$ 分别为第 i 类土地利用的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机质碳密度, t/hm^2 ; S_i 为第 i 类土地利用的面积, hm^2 ; C_{total} 为研究区总碳储量, t ; n 为土地利用类型总数。本研究参考前人^[25-27]在黄河流域及周边地区的相关研究成果,并结合国家生态科学数据中心公开数据,确定适用于黄河流域的各地类碳密度参数(表 3)。

3 结果与分析

3.1 黄河流域土地利用变化分析与预测

基于 2005 年、2015 年和 2025 年 3 期土地利用数据,结合 PLUS 模型对 2035 年自然发展、城镇开发、耕地保护和生态保护 4 种情景下的土地利用格局进行模拟(图 2、图 3)。整体来看,黄河流域土地利用类型以草地、耕地和林地为主,三者共同构成流域土地

利用格局的主体。2005—2025 年,流域土地利用结构发生明显变化,建设用地与林地二者呈持续增长趋势;耕地与草地持续减少,反映出城镇化推进与生态修复工程共同作用下的土地利用调整过程。

表 3 黄河流域不同土地利用类型碳密度
Table 3 Carbon density of different land use types in the Yellow River basin

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度
耕地	2.04	0.31	86.40	0.78
林地	34.26	8.53	99.60	1.47
草地	0.33	3.38	80.17	0.07
水域	0.23	0.79	16.11	0.96
建设用地	1.48	3.69	66.05	0.21
未利用地	0.38	1.59	20.27	0.74

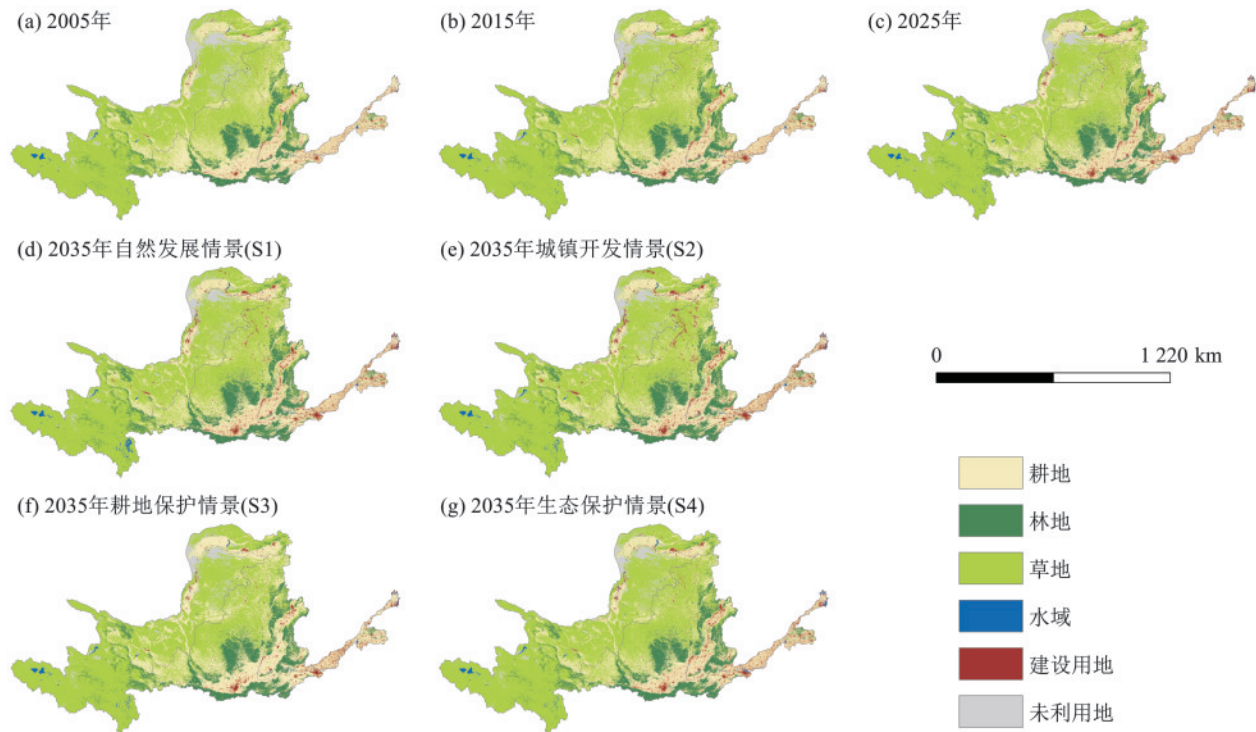


图 2 2005—2035 年黄河流域土地利用空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of land use in the Yellow River basin from 2005 to 2035

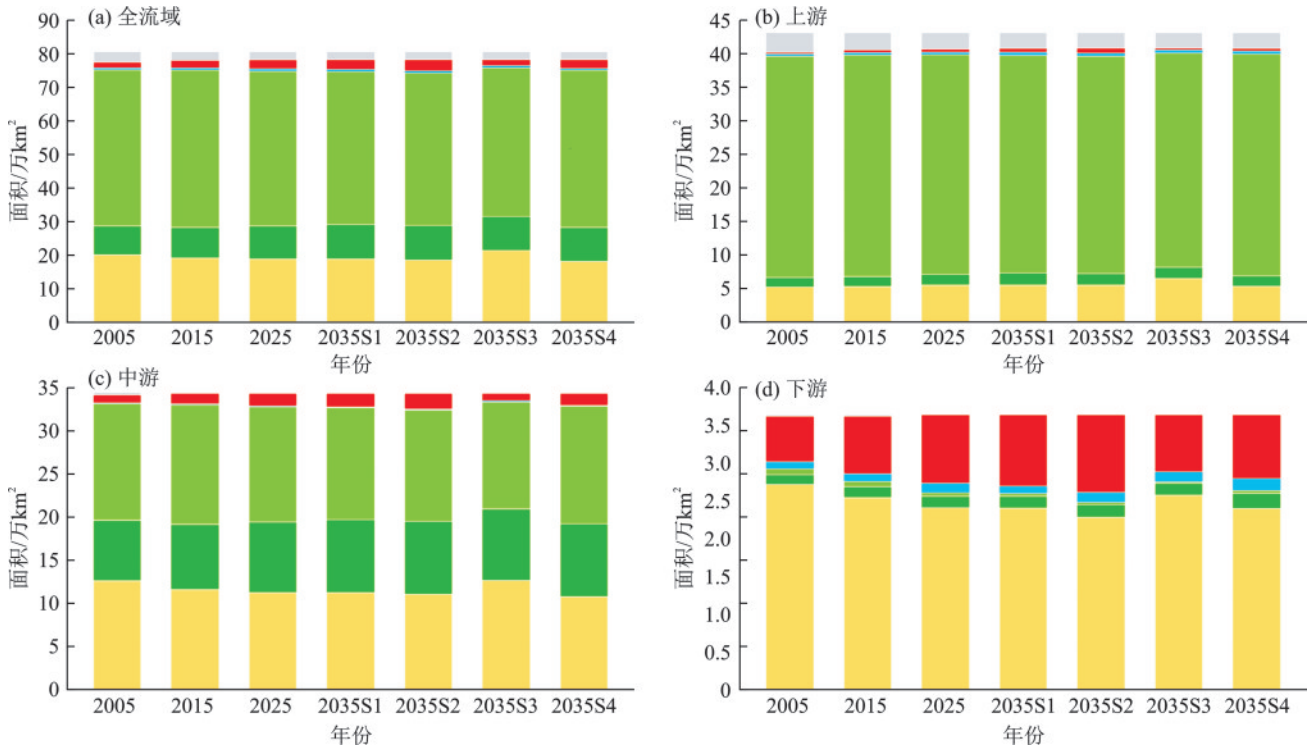
从空间分布格局(图 2)来看,黄河流域土地利用类型具有明显的空间分异特征。耕地主要分布在河套平原、汾渭盆地及华北平原等地势平坦区域;林地集中于中游山地丘陵区;草地广泛覆盖上游青藏高原东部及中游黄土高原地区,是流域最主要的土地利用类型;建设用地主要沿城市、交通廊道和下游平原区集聚扩展;未利用地则主要分布于上游高海拔地区。2035 年 4 种情景下,土地利用空间格局总体延续历史分布特征,但情景差异较为明显。其中,自然发展情景(S1)基本延续历史变化趋势;城镇开发情景(S2)下建设用地面积增至 3.42 万 km^2 ,为 4 种情景

中最高,耕地和草地相应减少;耕地保护情景(S3)下耕地面积增至 21.30 万 km^2 ,建设用地降至 1.79 万 km^2 ,体现出耕地红线约束作用;生态保护情景(S4)下草地面积增至 46.81 万 km^2 ,林地保持在 10.17 万 km^2 ,生态用地维持效果较好。

从上中下游分区(图 3)来看,不同区域土地利用结构及情景响应存在差异。上游以草地为主,2025 年草地面积为 32.81 万 km^2 ,占上游面积主体,未利用地也主要集中于该区域;2035 年生态保护情景下,上游草地增加至 33.11 万 km^2 ,说明生态保护对上游草地稳定具有积极作用。中游土地利用类型较为复

杂,草地、耕地和林地交错分布,2025年三者面积分别为13.33万km²、11.26万km²和8.19万km²,是流域土地利用转换较活跃的区域;2035年耕地保护情景下,中游耕地增至12.64万km²,而生态保护情景下林地和草地分别增至8.45万km²和13.66万km²。下游以耕地和建设用地为主,2025年二者面积分别为

2.11万km²和0.79万km²;城镇开发情景下建设用地增至0.90万km²,耕地保护情景下耕地增至2.25万km²。总体表明,黄河流域土地利用变化具有明显的区域差异,上游以草地生态空间稳定为主,中游以林草修复和耕地调控并存为主,下游则突出表现为城镇扩张与耕地保护之间的矛盾。



注:S1、S2、S3和S4分别表示自然发展、城镇开发、耕地保护和生态保护情景。

图3 2005—2035年黄河流域全流域及上中下游土地利用结构变化

Fig. 3 Changes in land use structure in the whole basin and upper, middle and lower reaches of the Yellow River basin from 2005 to 2035

3.2 黄河流域碳储量时空演变分析

3.2.1 碳储量总量变化及分区差异 基于InVEST模型计算得到的2005—2035年黄河流域不同时期及多情景下的碳储量变化结果见表4和图4。2005—2025年,黄河流域生态系统碳储量由71.58亿t增加至72.53亿t,累计增加0.95亿t,表明黄河流域整体固碳能力稳步提升。分地类来看,草地、耕地和林地是流域碳储量的主体,2025年三者碳储量分别为38.79亿t、16.85亿t和14.22亿t,合计贡献流域碳储量的96%以上。其中,林地碳储量较2005年增加1.83亿t,是碳储量提升的重要来源;耕地碳储量则减少1.15亿t,说明耕地面积减少对碳储量具有一定削减作用。从上中下游分区来看,碳储量主要集中于上游和中游,2025年二者碳储量分别为35.67亿t和34.15亿t,下游仅为2.70亿t;2005—2025年,上游和中游碳储量分别增加0.31亿t和0.67亿t,而下游小幅下降0.04亿t,表明中上游是流域碳储量增长的主要贡献区。

从2035年多情景模拟结果来看,不同发展导向下黄河流域碳储量差异明显,整体表现为生态保护情景(S4)>耕地保护情景(S3)>自然发展情景(S1)>城镇开发情景(S2)。其中,生态保护情景下碳储量最高,达73.44亿t,较2025年增加0.91亿t,主要与草地碳储量增加和林地碳储量维持较高水平有关;耕地保护情景下碳储量为72.96亿t,较2025年增加0.43亿t,其中耕地碳储量增至19.07亿t,体现出耕地保护的固碳增益;自然发展情景下碳储量为72.77亿t,增幅相对有限;城镇开发情景下碳储量降至72.10亿t,较2025年减少0.43亿t,说明城镇开发强度提高可能削弱流域碳汇功能。分区结果进一步表明,生态保护情景下上游、中游和下游碳储量分别达到36.18亿t、34.45亿t和2.81亿t,均处于较高水平;而城镇开发情景下上游和下游碳储量分别降至35.17亿t和2.68亿t,显示建设用地扩张对局部区域碳储量具有不利影响。

表 4 2005—2035 年黄河流域不同土地利用类型碳储量
Table 4 Carbon storage of different land use types in the Yellow River basin from 2005 to 2035 亿 t

地类	2005 年	2015 年	2025 年	2035 年			
				S1	S2	S3	S4
耕地	18.00	17.05	16.85	16.83	16.53	19.07	16.47
林地	12.39	13.27	14.22	14.90	14.28	14.61	14.88
草地	39.14	39.38	38.79	38.24	38.15	37.30	39.54
水域	0.10	0.11	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
建设用地	1.17	1.62	1.93	2.08	2.44	1.28	1.84
未利用地	0.78	0.66	0.62	0.59	0.58	0.58	0.59
合计	71.58	72.09	72.53	72.77	72.10	72.96	73.44

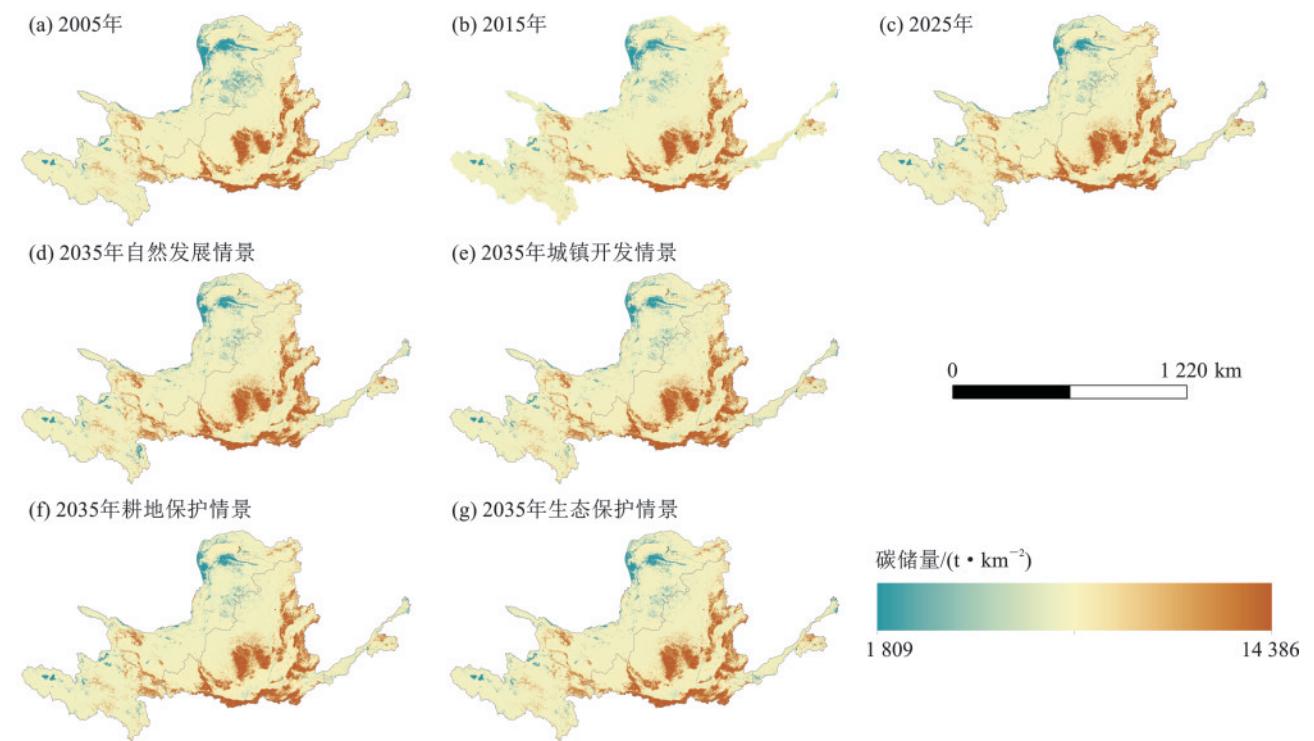


图 4 2005—2035 年黄河流域碳储量空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage in the Yellow River basin from 2005 to 2035

3.2.2 碳储量空间分布及情景响应 从碳储量空间分布格局(图4)来看,黄河流域碳储量呈现出明显的空间异质性,整体表现为“中部较高、上下游相对较低”的分布特征。高值区主要集中于流域中部林地集中分布区,碳密度最高可达143.86 t/hm²,这些区域植被覆盖度较高,生态系统碳汇功能较强,是流域重要的碳储集中区;中值区主要分布于中上游草地覆盖区和部分耕地分布区,是黄河流域碳储量的重要支撑;低值区则主要分布于上游高海拔未利用地、水域及下游建设用地集聚区,碳密度最低约为18.09 t/hm²。对比2005—2025年碳储量空间分布可以看出,历史时期黄河流域碳储量空间格局总体保持稳定,但中游林地集中区和生态修复区的高值斑块有所扩展,反映出退耕还林还草、水土保持等生态工程对黄河流域碳汇提升具有积极作用。与此同时,下游城

镇建设区及部分城市边缘地带仍表现为低值区,说明建设用地扩张对局部碳储量具有一定削弱作用。

2035年4种情景下,碳储量空间格局总体仍延续“中部高、上下游低”的基本特征,但不同情景下局部差异较为明显。自然发展情景下,碳储量空间变化相对平缓,主要延续历史演变趋势;城镇开发情景下,建设用地扩张区低值特征更加突出,局部碳储量下降风险增加;耕地保护情景下,中下游耕地分布区碳储量维持较好,体现出耕地保护对稳定生产空间碳储量的作用;生态保护情景下,中游林草集中区及上游草地分布区碳储量保持较高水平,高值区连续性和完整性相对更优,表明生态保护情景更有利于维持和提升黄河流域碳汇功能。

综合来看,2035年4种情景下黄河流域碳储量表现为生态保护情景(S4)>耕地保护情景(S3)>自然

发展情景(S1)>城镇开发情景(S2),说明未来应在满足合理城镇发展需求的同时,强化生态空间保护和耕地保护协同管控,以降低建设用地扩张对碳储量的不利影响。

3.3 土地利用变化引发的碳储量变化分析

3.3.1 碳储量变化的空间特征 为进一步揭示黄河流域碳储量的动态变化特征,对 2005—2025 年历史时期及 2025—2035 年不同情景下碳储量变化进行空间差值分析(图 5)。2005—2025 年,黄河流域碳储量变化范围总体扩大,但净碳储量均表现为增加。2005—2015 年,碳储量变化区域占流域总面积的 9.79%,增加区和减少区占比分别为 4.91% 和 4.88%,净碳储量增加 0.51 亿 t; 2015—2025 年,变化区域占比提高至 21.27%,增加区占比为 10.91%,高于减少区的 10.36%,净碳储量增加 0.44 亿 t。2005—2025 年整体来看,变化区域占比达 23.04%,净碳储量增加 0.95 亿 t,表明历史时期流域碳储量总体呈增长态势。从空间

分布看,增加区主要分布于中游林地扩展区、黄土高原生态修复区和部分草地恢复区,减少区则多位于城市边缘扩张区、耕地转出区及局部草地退化区。

从 2025—2035 年多情景模拟结果来看,4 种情景下碳储量变化区域均明显小于 2005—2025 年历史时期,说明未来 10 年流域碳储量空间格局总体趋于稳定。其中,自然发展情景下变化区域占比为 1.74%,净碳储量增加 0.24 亿 t;城镇开发情景下变化区域占比为 2.16%,减少区占比(1.17%)高于增加区(0.99%),表明城镇开发压力增强会扩大碳储量损失范围;耕地保护情景下变化区域占比最高,为 6.88%,增加区占 5.23%,净碳储量增加 0.48 亿 t,为 4 种情景中最高;生态保护情景下变化区域占比最低,仅为 1.47%,表明该情景下碳储量空间格局最为稳定。综合来看,耕地保护情景具有较强增汇效应,生态保护情景更有利于维持碳储量空间稳定,而城镇开发情景下建设用地扩张可能增加局部碳损失风险。

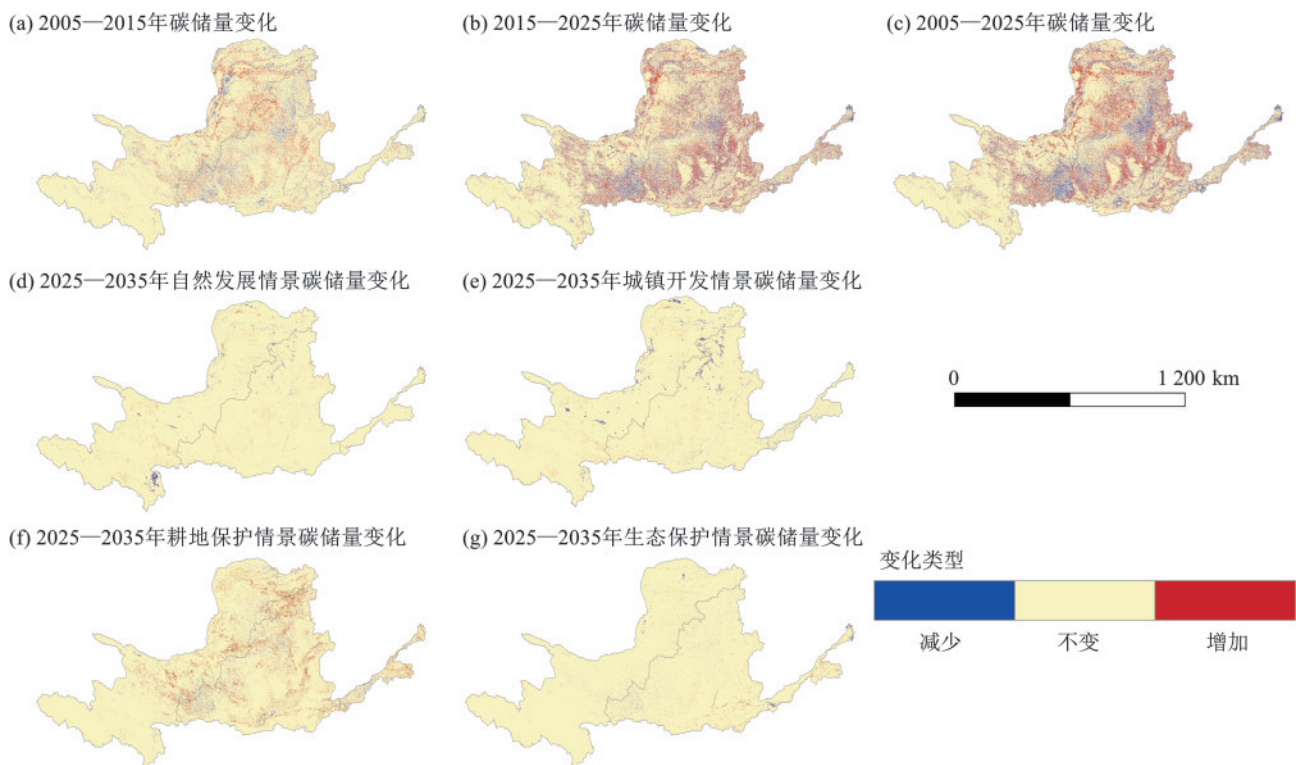


图 5 不同时期黄河流域碳储量空间变化

Fig. 5 Spatial changes of carbon storage in the Yellow River basin during different periods

3.3.2 土地利用类型转换对碳储量的影响 进一步分析 2025—2035 年不同情景下土地利用类型转换对碳储量变化的影响(图 6)。总体来看,土地利用转换方向直接决定碳储量变化的正负效应。低碳储量地类向林地、草地、耕地等较高碳储量地类转化通常表现为增汇效应,而草地、耕地、林地等向建设用地、水域或未利用地转化则容易导致碳储量损失。4 种情景下,主要增

汇路径和减汇路径存在明显差异,表明不同土地利用调控政策对碳储量变化具有不同作用机制。

自然发展情景下,碳储量变化主要受草地转林地和草地向低碳储量地类转出共同影响。其中,草地转林地是最主要的增汇路径,带来 2 833.74 万 t 的碳储量增加;其次为未利用地转草地,增汇量为 1 004.22 万 t。与此同时,草地转水域、草地转建设用地和草地

转未利用地分别导致 933.24 万 t、368.46 万 t 和 334.34 万 t 的碳储量减少。说明在自然发展情景下,林草生

态用地扩展能够带来一定增汇效应,但草地向水域、建设用地和未利用地的转出仍会削弱部分固碳收益。

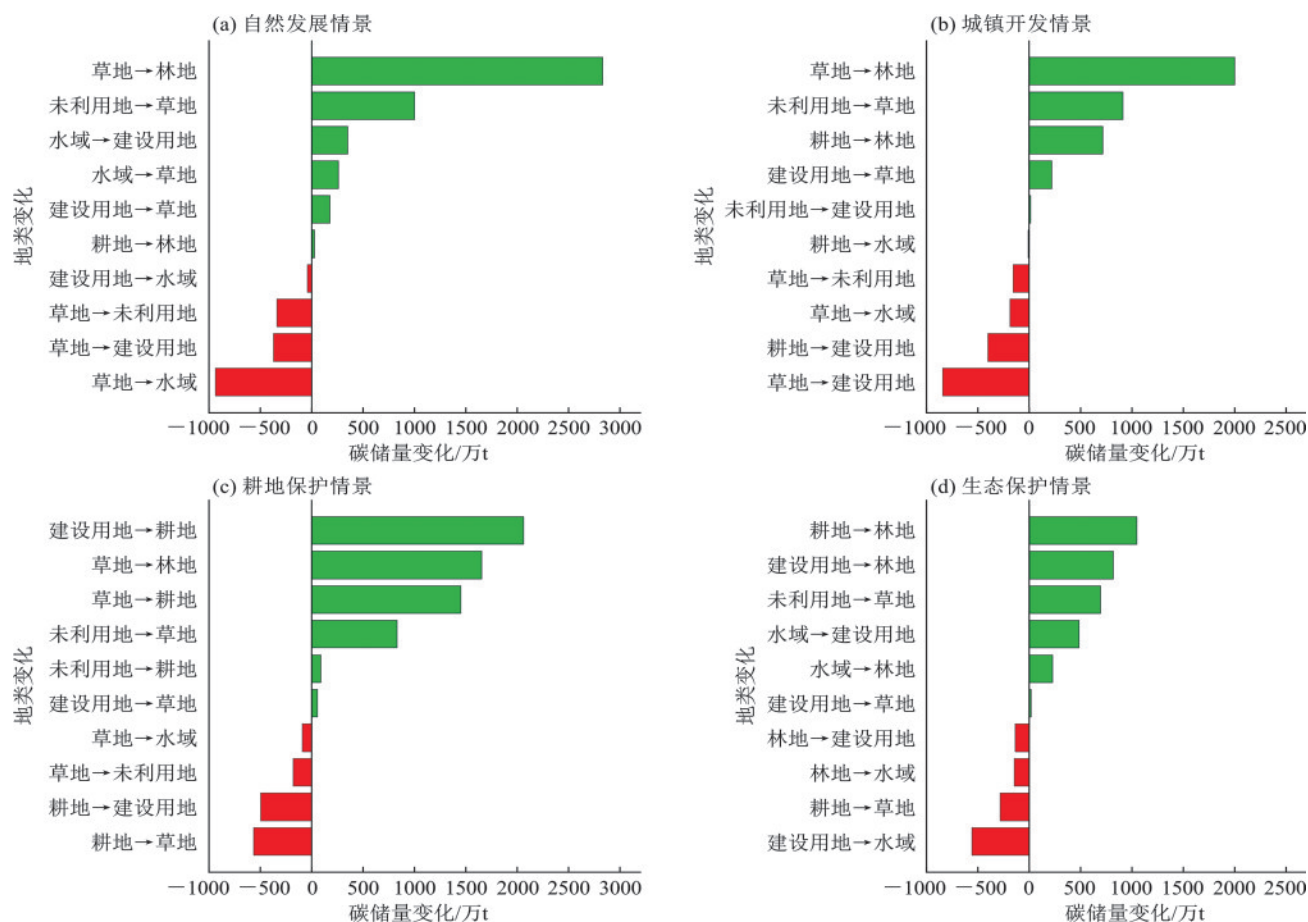


图6 不同情景下土地利用转换的碳储量效应

Fig. 6 Carbon storage effects of land use conversion under different scenarios

城镇开发情景下,土地利用转换的碳储量效应呈现出“增汇与减汇并存、建设扩张影响突出”的特征。草地转林地仍是主要增汇路径,碳储量增加 2 001.59 万 t;未利用地转草地和耕地转林地分别带来 916.11 万 t 和 718.24 万 t 的碳储量增加。然而,草地转建设用地和耕地转建设用地分别造成 838.34 万 t 和 399.11 万 t 的碳储量损失,是该情景下最主要的减汇路径。与自然发展情景相比,城镇开发情景下建设用地扩张导致的碳损失更加突出,说明城镇开发强度提高会加剧耕地、草地等地类转出带来的碳储量损失。

耕地保护情景下,土地利用转换表现出较强的增汇效应。建设用地转耕地是该情景下最主要的增汇路径,碳储量增加 2 064.49 万 t;草地转林地和草地转耕地分别带来 1 656.51 万 t 和 1 456.21 万 t 的碳储量增加,未利用地转草地也贡献了 833.43 万 t 的增汇量。减汇路径主要为耕地转草地和耕地转建设用地,分别导致 560.68 万 t 和 491.42 万 t 的碳储量减少。总体来看,耕地保护情景通过抑制建设用地扩张并促进建设用地、未利用地等向耕地或草地转化,有利

于提高流域碳储量,同时也体现出耕地保护对土地利用结构优化的调控作用。

生态保护情景下,增汇效应主要来自林草生态空间扩展。耕地转林地、建设用地转林地和未利用地转草地分别带来 1 050.20 万 t、821.36 万 t 和 697.04 万 t 的碳储量增加,表明生态保护情景下林地和草地扩展对碳汇提升具有明显贡献。该情景下主要减汇路径为建设用地转水域、耕地转草地、林地转水域和林地转建设用地,对应碳储量变化分别为 -556.87 万 t、-280.40 万 t、-143.38 万 t 和 -135.44 万 t。总体而言,生态保护情景通过强化林地、草地等生态用地保护,提高了高碳储量地类的稳定性和扩展能力,但局部地类向水域或建设用地的转化仍会带来一定碳损失。

综合 4 种情景可以看出,草地转林地、未利用地转草地、建设用地转耕地、建设用地转林地等是提升黄河流域碳储量的重要转换路径,而草地转建设用地、耕地转建设用地、草地转水域及建设用地转水域等则是造成碳储量损失的主要路径。不同情景下,耕地保护情景的增汇路径最为突出,生态保护情景更强调林草生态空间扩展,城镇开发情景则表现出

建设用地扩张导致的减汇压力。由此表明,未来黄河流域应在严格控制建设用地无序扩张的基础上,协同推进耕地保护、林草修复和未利用地生态化利用,以提升黄河流域土地利用结构优化的碳汇效益。

4 讨论

本研究表明,2005—2025年黄河流域碳储量总体上升,但其变化过程同时受到生态修复增汇和建设扩张减汇的共同影响。历史时期林地面积持续增加,推动林地碳储量提升,是流域碳储量增长的重要来源;而耕地减少、建设用地扩张及局部草地退化则导致部分区域碳储量下降,使流域碳储量呈现“整体增加、局部减少”的特征。从空间上看,碳储量增加区主要集中于中游林地扩展区、黄土高原生态修复区和部分草地恢复区,减少区则多位于城镇扩张区和耕地转出区。本研究进一步结合2025年土地利用数据,从上中下游分区和土地利用转换路径角度揭示碳储量变化的空间差异和作用机制,表明大尺度流域碳储量研究不仅需要关注总量变化,也应重视不同河段土地利用结构及其转换过程的影响。

多情景土地利用预测与碳储量模拟表明不同政策导向会显著影响黄河流域未来碳储量演变。自然发展情景可作为延续历史趋势的基准情景,其碳储量仅小幅增加,说明单纯依靠土地利用自然演变的增汇效果有限;城镇开发情景下,耕地和草地向建设用地转化加剧,碳储量最低,反映出建设用地扩张对流域碳汇功能的削弱作用;耕地保护情景通过抑制建设用地扩张和维持耕地规模,兼具粮食安全保障和固碳效益;生态保护情景下林地、草地等生态用地保持较高水平,碳储量最高,说明强化林草生态空间保护是提升流域碳汇能力的重要途径。由此可见,4种情景并非简单比较未来碳增减量,而是反映不同政策导向下土地利用结构调整对碳汇功能的调控机制。

虽然InVEST模型能够较好反映土地利用类型转换引起的碳储量变化,但对植被生长过程和碳密度动态变化的刻画仍较为有限。尤其对于林地而言,实际碳储量不仅受林地面积变化影响,还与森林年龄结构、林分质量、植被恢复阶段、人工造林年限及经营管理措施等因素密切相关,而本研究采用固定碳密度参数,难以充分反映不同情景下森林自然生长和林分质量提升带来的固碳差异。PLUS模型情景模拟结果受驱动因子选择、转移规则设定和情景约束条件影响,未来土地利用变化仍具有一定不确定性。后续研究可结合NDVI、NPP、生物量遥感

反演、森林龄组和样地调查数据,构建动态碳密度参数,并进一步引入生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界等国土空间规划约束,以提高黄河流域碳储量模拟的精细化水平和政策适用性。

5 结论

1)2005—2025年,黄河流域土地利用结构以草地、耕地和林地为主,三者共同构成黄河流域土地利用格局的主体。历史时期土地利用变化主要表现为建设用地和林地增加、耕地和未利用地减少、草地小幅波动的特征。其中,建设用地由1.63万 km^2 增加至2.70万 km^2 ,扩张最为明显;林地由8.61万 km^2 增加至9.88万 km^2 ,体现出退耕还林还草和生态修复工程的持续影响;耕地和未利用地分别减少至18.81万 km^2 和2.60万 km^2 。空间上,流域土地利用呈现出上游以草地为主、中游林草耕交错分布、下游耕地与建设用地集中分布的格局。

2)2005—2025年,黄河流域碳储量由71.58亿t增加至72.53亿t,累计增加0.95亿t,整体表现为稳定增长趋势。草地、耕地和林地是流域主要碳库,三者合计贡献流域碳储量的96%以上。分区来看,上游和中游是黄河流域碳储量的主要承载区,2025年碳储量分别为35.67亿t和34.15亿t,下游仅为2.70亿t。空间上,碳储量整体呈现“中部较高、上下游相对较低”的分布特征,碳储量增加区主要集中于中游林地扩展区、黄土高原生态修复区和部分草地恢复区,减少区则主要分布于城镇扩张区、耕地转出区和局部草地退化区。

3)2035年4种情景下,黄河流域土地利用格局表现出明显的政策响应差异。自然发展情景基本延续历史演变趋势,建设用地继续扩张,耕地和草地有所减少;城镇开发情景下建设用地面积增至3.42万 km^2 ,为4种情景中最高,表明发展压力增强加剧建设用地扩张;耕地保护情景下耕地面积增至21.30万 km^2 ,建设用地降至1.79万 km^2 ,体现出耕地保护政策对土地利用结构的调控作用;生态保护情景下草地面积增至46.81万 km^2 ,林地面积保持在较高水平,有利于维持林草生态空间稳定。

4)2035年4种情景下,黄河流域碳储量表现为生态保护情景最高、城镇开发情景最低。生态保护情景下碳储量达到73.44亿t,较2025年增加0.91亿t,说明强化林地、草地等生态空间保护更有利于提升流域碳汇能力;耕地保护情景下碳储量为72.96亿t,较2025年增加0.43亿t,表明耕地保护兼具粮食安全保障和固碳增益;自然发展情景下碳储量为72.77亿t,增幅相对有限;城镇开发情景下碳储量降至72.10亿t,较2025

年减少0.43亿t,说明建设用地扩张可能削弱流域碳汇功能。土地利用转换路径分析表明,草地转林地、未利用地转草地、建设用地转耕地等是主要增汇路径,而耕地、草地向建设用地转化是重要减汇路径,土地利用转换方向是影响碳储量变化的关键因素。

综合研究结果显示,未来黄河流域国土空间优化应采取耕地保护与生态保护相协调的复合型政策导向,在严格控制建设用地无序扩张的基础上,推进退化草地修复、林草生态空间保护、低效建设用地整理和未利用地生态化利用。上游应重点加强草地保护和水源涵养功能提升,中游应持续推进林草修复和水土保持工程,下游应强化耕地保护和建设用地集约利用,从而统筹推进粮食安全、生态安全与“双碳”目标协同实现。

参考文献:

- [1] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J].Scientia Sinica (Vitae), 2022,52(4):534-574.
- [2] 杨玉盛,谢锦升,盛浩,等.中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J].地理学报,2007,62(11):1123-1131.
Yang Yusheng, Xie Jinsheng, Sheng Hao, et al. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China[J].Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11):1123-1131.
- [3] 袁钰娜,姜学兵.森林生态系统碳估测方法及展望[J].人民珠江,2024,45(2):90-96.
Yuan Yuna, Jiang Xuebing. Forest ecosystem carbon measurement methods and future directions [J]. Pearl River,2024,45(2):90-96.
- [4] 涂燕茹,邢龙,吴语嫣,等.国内生态系统碳储量时空动态研究进展与趋势[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2025,48(4):322-333.
Tu Yanru, Xing Long, Wu Yuyan, et al. Research progress and trend of domestic ecosystem carbon storage spatio-temporal dynamics [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2025,48(4):322-333.
- [5] 姚顽强,徐梦雨,蔺小虎,等.西咸地区土地利用与生态系统服务时空演变研究[J].人民黄河,2026,48(5):121-127.
Yao Wanqiang, Xu Mengyu, Lin Xiaohu, et al. Spatio-temporal evolution of land use and ecosystem services in Xi'an and Xianyang Region [J]. Yellow River, 2026, 48(5):121-127.
- [6] 董世杰,安慧,吴海林.长三角地区生态脆弱性评估、驱动因素分析及预测[J].环境科学,2026,47(5):3235-3248.
Dong Shijie, An Hui, Wu Hailin. Ecological vulnerability assessment, driving factor analysis, and prediction in the Yangtze River Delta Region [J]. Environmental Science, 2026,47(5):3235-3248.
- [7] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021,85:e101569.
- [8] 秦正,高宇潇,萨木哈·单山白.基于PLUS-InVEST的济南多情景土地利用变化模拟与碳储量评估[J].人民黄河,2024,46(5):117-122.
Qin Zheng, Gao Yuxiao, Samha·Sarsenbay. Multi-scenario land use change simulation and carbon storage assessment in Jinan City based on PLUS-InVEST model [J]. Yellow River, 2024,46(5):117-122.
- [9] 伍璐垚.甘肃省草地生态系统碳储量时空分布格局及影响因素研究[D].北京:中国环境科学研究院,2025.
Wu Luyao. Spatiotemporal distribution pattern and influencing factors of carbon storage in the grassland ecosystem of Gansu Province [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2025.
- [10] 刘雅璇,彭秋志,黄培依,等.川西高原土地利用碳储量估算及多情景预测[J].水土保持学报,2024,38(1):207-219.
Liu Yaxuan, Peng Qiuzhi, Huang Peiyi, et al. Estimation and multi-scenario prediction of land use carbon storage in western Sichuan Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):207-219.
- [11] 韩楚翘,郑江华,王哲,等.基于PLUS-InVEST模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J].干旱区地理,2024,47(2):260-269.
Han Chuqiao, Zheng Jianghua, Wang Zhe, et al. Spatio-temporal variation and multisenario simulation of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Turpan-Hami basin based on PLUS-InVEST model [J]. Arid Land Geography, 2024,47(2):260-269.
- [12] 王想,王春雨,吕飞南,等.基于PLUS-InVEST模型的区县碳储量时空格局变化与碳汇提升策略:以延庆区为例[J].应用生态学报,2023,34(12):3373-3384.
Wang Xiang, Wang Chunyu, Lyu Feinan, et al. Temporal and spatial variations of carbon storage and carbon sink improvement strategy at the district and county level based on PLUS-InVEST model: Taking Yanqing District as an example [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(12):3373-3384.
- [13] 赵彦飞,王丽.黄河流域产业智能化与生态效率的耦合机制及演化特征[J].人民黄河,2026,48(5):35-41.
Zhao Yanfei, Wang Li. Coupling mechanism and evolu-

- tion characteristics of industrial intelligence and ecological efficiency in the Yellow River basin [J]. *Yellow River*, 2026, 48(5):35-41.
- [14] 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.
Zeng Qingyu, Sun Caizhi. Estimation and influencing factors of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(13):5476-5493.
- [15] 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.
Li Bingjie, Fan Zhitao, Qu Zhicheng, et al. Evaluation and prediction of ecosystem carbon storage in the Inner Mongolia section of the Yellow River basin based on the InVEST-PLUS model [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(7):1217-1227.
- [16] 崔旺来, 蔡莉, 奚恒辉, 等. 基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(6):2136-2148.
Cui Wanglai, Cai Li, Xi Henghui, et al. Ecological security assessment and multi-scenario simulation analysis of Zhejiang Greater Bay Area based on LUCC [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6):2136-2148.
- [17] 柯佳兰, 贺一梅, 杨诗琴. 基于InVEST-PLUS模型的昆明市土地利用变化与碳储量时空演变研究[J]. *绿色科技*, 2024, 26(15):207-213.
Ke Jialan, He Yimei, Yang Shiqin. Spatiotemporal evolution of carbon stock from land use changes in Kunming based on InVEST-PLUS model [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2024, 26(15):207-213.
- [18] 张旭辉, 杜敏, 王莉霞, 等. 基于PLUS-InVEST模型的庆阳市碳储量时空演变及其多情景预测[J]. *水土保持研究*, 2026, 33(4):317-329.
Zhang Xuhui, Du Min, Wang Lixia, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario prediction of carbon storage in Qingyang City based on PLUS-InVEST model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2026, 33(4):317-329.
- [19] 胡增琳, 曹罗丹, 李加林, 等. 基于InVEST-PLUS-GeoDetector模型的浙江大陆海岸带生态系统碳储量时空演变特征及多情景预测[J]. *生态学报*, 2026, 46(7):3695-3711.
Hu Zenglin, Cao Luodan, Li Jialin, et al. Spatio-temporal evolution and multi-scenario prediction of carbon stock in coastal zone ecosystems of Zhejiang mainland based on the InVEST-PLUS-GeoDetector model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, 46(7):3695-3711.
- [20] Shi Hanqi, Duan Huan'e, Li Xuemei, et al. 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 [J]. *Journal of Arid Land*, 2026, 18(3):452-476.
- [21] 赵双红, 周冬梅, 王得梅, 等. 基于PLUS-InVEST模型的渭河流域生态系统碳储量评估及多情景预测[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(8):2044-2054.
Zhao Shuanghong, Zhou Dongmei, Wang Demei, et al. Ecosystem carbon storage assessment and multi-scenario prediction in the Weihe River basin based on PLUS-InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8):2044-2054.
- [22] 张阔, 郭荣中, 吴洁. 基于PLUS-InVEST模型的长株潭城市群碳储量时空演变及情景模拟[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2026, 24(1):252-269.
Zhang Kuo, Guo Rongzhong, Wu Jie. The spatio-temporal evolution and scenario simulation of carbon storage in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration based on the PLUS-InVEST model [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2026, 24(1):252-269.
- [23] Zhang Jiaping, Cao Penghui, Roosli R. Assessing land use and carbon storage changes using PLUS and InVEST models: A multi-scenario simulation in Hohhot [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025, 26:e100655.
- [24] Liu Xiangyu, Zhang Fei, Jim C Y, et al. Spatio-temporal dynamics and drivers of carbon storage in arid ecosystems: Integrated analysis using InVEST and PLUS models with machine learning [J]. *Environmental Research*, 2026, 302:e124641.
- [25] 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.
Cong Zhongxiao, Liu Jinhua, Sun Zengyu, et al. Analysis of carbon stock changes in nine provinces (regions) of the Yellow River basin based on PLUS and InVEST models [J]. *Yellow River*, 2024, 46(12):24-30.
- [26] 李佳凡, 付昊, 张盼月, 等. 基于PLUS-InVEST模型的濮阳市土地利用变化与碳储量评估[J]. *人民黄河*, 2025, 47(8):140-145.
Li Jiafan, Fu Hao, Zhang Panyue, et al. Assessment of land use change and carbon storage in Puyang City based on PLUS-InVEST model [J]. *Yellow River*, 2025, 47(8):140-145.
- [27] 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.
He Huishuang, Dong Xinxin, Ding Jieyu. Multi-scenario simulation of evolution of production-living-ecological space and carbon stock assessment in the Yellow River basin based on the PLUS-InVEST model [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(5):3037-3048.