

基于 PLUS-InVEST-GeoDetector 模型的黄河中游碳储量时空变化及驱动因素

毕帆帆¹, 武志涛^{1,2*}, 梁寒雪^{1,2}, 杜自强^{1,2}, 雷添杰³, 孙斌⁴

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西大学黄河实验室, 太原 030006; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:“双碳”战略背景下,研究黄河中游碳储量的时空变化特征及其驱动因素,对实现区域生态保护与可持续发展具有重要意义.基于5 a间隔选取黄河中游2000~2020年5期土地利用数据,耦合PLUS-InVEST-GeoDetector模型估算并分析碳储量的时空演变特征,并探讨影响碳储量时空分异的驱动因素,最后在自然发展、生态保护、经济发展和耕地保护这4种发展情景下对2030年黄河中游碳储量进行预测.结果表明:①2000~2020年黄河中游碳储量呈持续增长趋势,增长了 5.75×10^7 t,空间分布演化较为平稳,呈现“东南高于西北”的空间分布特征.②2000~2020年,NDVI是黄河中游碳储量时空分异的主要驱动因子,各驱动因子交互探测均呈现双因子增强和非线性增强作用.③2020~2030年黄河中游4种情景的碳储量较2020年均呈增加趋势,其中生态保护情景碳储量增加最多,为 3.93×10^7 t,经济发展情景碳储量增加最少,为 4.8×10^6 t.研究结果将为黄河中游的长期发展和生态环境管理提供一定的数据支撑.

关键词: 碳储量; InVEST模型; PLUS模型; 土地利用; 黄河中游; 地理探测器

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2025)08-4742-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202406176

Spatio-temporal Changes and Driving Factors of Carbon Storage in the Middle Reaches of the Yellow River Based on PLUS-InVEST-GeoDetector Model

BI Fan-fan¹, WU Zhi-tao^{1,2*}, LIANG Han-xue^{1,2}, DU Zi-qiang^{1,2}, LEI Tian-jie³, SUN Bin⁴

(1. Loess Plateau Research Institute, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Yellow River Laboratory, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Institute of Resource Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Studying the temporal and spatial variation characteristics and driving factors of carbon reserves in the middle reaches of the Yellow River is crucial for achieving sustainable development and regional ecological conservation against the backdrop of the “double carbon” plan. Based on the five-year interval, the land use data of the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020 were selected, and the spatio-temporal evolution characteristics of carbon reserves were estimated and analyzed by coupling with the PLUS-InVEST-GeoDetector model, and the driving factors affecting the spatio-temporal differentiation of carbon reserves were discussed. Finally, the carbon reserves of the middle reaches of the Yellow River in 2030 were predicted under four developmental scenarios: natural development, ecological protection, economic development, and cultivated land protection. The findings indicate that: ① The middle reaches of the Yellow River’s carbon storage showed a consistent growth trend between 2000 and 2020, exhibiting an increase by 5.75×10^7 t. The evolution of the spatial distribution was reasonably stable, exhibiting the characteristics of “southeast is higher than northwest.” ② The middle reaches of the Yellow River’s carbon storage differentiated both spatially and temporally between 2000 and 2020, with two-factor enhancement and nonlinear enhancement observed in the interaction detection of each driving element. The main driving force was the NDVI. ③ From 2020 to 2030, the carbon storage of the four scenarios in the Yellow River’s middle reaches showed an increasing trend in comparison to that in 2020. Of them, the carbon storage of the ecological preservation scenario rose the highest at 3.93×10^7 t, while the carbon storage of the economic growth scenario increased the least at 4.8×10^6 t. The findings of the study will offer some evidence in favor of the middle reaches of the Yellow River’s long-term development and ecological environment management.

Key words: carbon storage; InVEST model; PLUS model; land use; middle reaches of the Yellow River; GeoDetector

近年来,工业化和城市化的加速导致大量CO₂被排放到空气中,导致全球变暖^[1]和一系列的生态问题^[2,3],威胁着人类经济和社会的可持续性发展.在“双碳”的大背景下,如何提高我国生态系统的固碳潜力成为全球政府与学术界共同关注的热点话题.陆地生态系统的碳汇在全球碳循环、缓解温室效应方面起着重要作用^[4],而土地利用和土地覆盖变化直接影响着陆地生态系统的碳循环^[5,6].有研究表明,土地利用类型改变导致的碳排放量在世界上已居第二位^[7,8].因此开展土地利用与碳储量之间的相关性研

究,对于我国“双碳”战略的实施和促进区域可持续发展具有重要意义.

目前,有关陆地生态系统碳储量的研究已经取得了一些进展,其中InVEST(生态系统服务和权衡综合评估)模型以土地利用与碳密度为基本数据,适用

收稿日期: 2024-06-17; 修订日期: 2024-09-20

基金项目: 山西省科技创新人才团队(202204051001010); 国家自然科学基金项目(41977412); 国家重点研发计划项目(2023YFF1305102)

作者简介: 毕帆帆(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为土地利用变化及碳储量评估, E-mail: bifanfan0327@163.com

* 通信作者, E-mail: wuzhitao@sxu.edu.cn

于长时间和大尺度的碳储量估算,具有更高的适用性和精度,成为大量学者^[9,10]估算各生态系统碳储量的常用模型.目前,用于未来土地利用情景规划的模型主要包括 PLUS^[11,12]、CA-Markov^[13-15]、CLUE-S^[16,17]和 FLUS^[18,19]模型等,其中 PLUS 模型在模拟过程中能够实现城市发展中由于空间规划政策而引起的土地利用变化的模拟^[20],其结果能更好地促进空间规划政策的实施和展示土地利用的空间变化.然而,以往研究都基于普遍的自然和社会经济因子进行碳储量驱动机制研究,但由于不同区域之间的生态环境和发展状况不同,还需根据区域特征选取具有针对性的驱动因素.例如,在我国黄河流域,实施了大规模的生态修复工程,这些工程的实施将会对碳储量的变化产生影响.

黄河中游流经黄土高原地区,是黄河流域生态屏障的重要组成部分^[21].然而,过去几十年由于自然和人类的共同作用,黄河中游地区出现了各种生态环境问题^[22].近年来,为加强黄河中游地区的生态屏障建设,中国政府相继实施了退耕还林/草工程和天

然林保护工程^[23]等一系列生态恢复工程措施,这些生态保护工程措施的实施显著改变了黄河中游的土地利用结构^[24,25].因此,本研究采用 PLUS 模型模拟了黄河中游地区 2030 年不同情景下的土地利用格局,采用 InVEST 模型对 2000~2030 年的不同情景下的碳储量进行了计算,并探讨了影响黄河中游碳储量时空分异的驱动因素,以期黄河中游地区土地利用结构的优化和生态与经济的协调发展提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河中游是指从内蒙古河口镇到河南花园口的区域($33^{\circ}39' \sim 40^{\circ}35'N$, $103^{\circ}53' \sim 113^{\circ}41'E$,图 1),该地区植被稀疏,61%的面积处于黄土高原地区,水土流失严重,是黄河泥沙和下游洪水的主要来源区,为了改善生态环境,因地制宜采取了一些生态恢复工程措施,促进了各类土地利用类型间的相互转移,使得黄河中游地区土地利用结构和碳储量发生了显著变化.

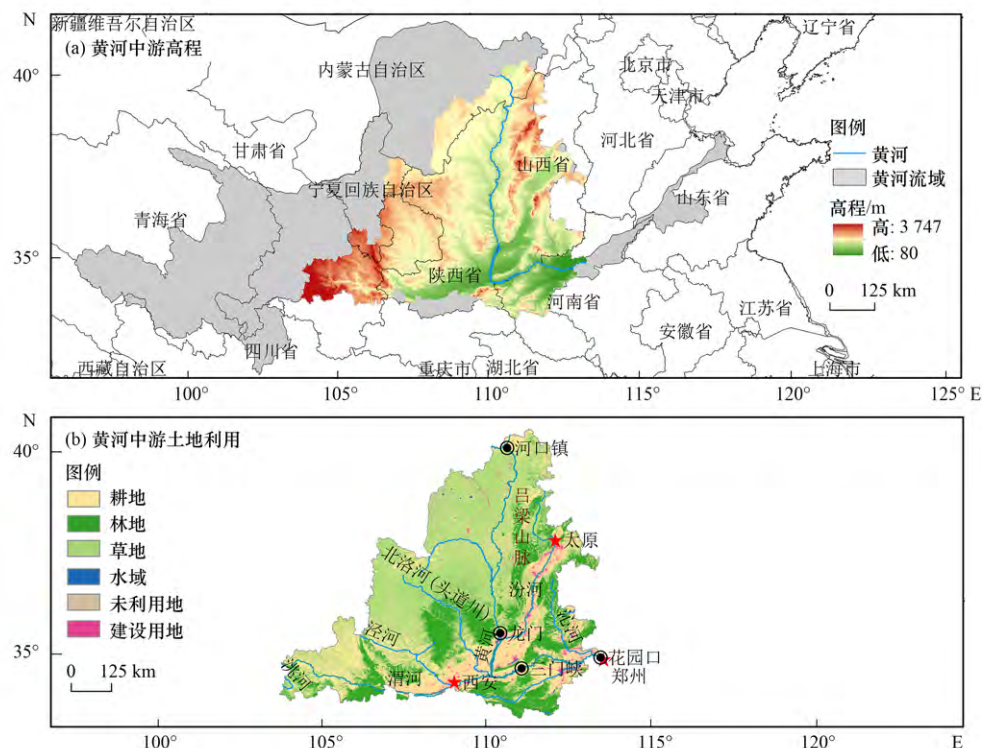


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 数据来源与处理

本研究使用的 5 期土地利用数据来源于武汉大学,其他研究数据包括自然因子、社会因子和可达性因子.自然因子包括年均温、土壤类型、NDVI、年均降水量和 DEM 数据,均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,坡度由 DEM 数据提取.可

达性因子包括到河流、省道和城市的距离,由 ArcGIS 10.8 中的欧几里得函数计算.社会因子包括国内生产总值(GDP)、人口密度、造林面积和淤地坝. GDP 和人口密度来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,造林面积和淤地坝数据分别从中国林业与草原统计年鉴和国家地球系统科学数据中

心获得(表1).碳密度数据集根据2010年中国陆地生态系统碳密度数据集^[26]获得初步资料,参考同类地区和同纬度地区的资料^[27,28]进行补充得到最终

碳密度数据集(表2).本研究所有地图数据均转换为Krasovsky_1940_Albers投影,空间分辨率均重采样至30 m.

表1 数据来源信息

数据	数据属性	年份	数据类型	来源
基础数据	土地利用数据	2000、2005、2010、2015 和 2020	分辨率为 30 m	https://zenodo.org/record/8176941
	土壤	1995	1:100 万	https://www.resdc.cn
自然因子	年均温			
	年均降水量			
	NDVI	2000、2005、2010、2015 和 2020	分辨率为 1 000 m	https://www.resdc.cn
	DEM			
	坡度			
社会因子	人口密度	2000、2005、2010、2015 和 2020	分辨率为 1 000 m	https://www.resdc.cn
	GDP			
	造林面积	2002、2005、2010、2015 和 2020	Excel	中国林业与草原统计年鉴
可达性因子	淤地坝	2024	Shapfile	https://www.geodata.cn/main/
	到河流的距离			
	到省道的距离	2020	Shapfile	https://www.resdc.cn
	到城市的距离			

表2 黄河中游不同土地利用类型的碳密度/t·hm⁻²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤有机碳密度	死亡有机碳密度
耕地	4.70	1.43	51.99	0
林地	25.20	7.06	66.58	13.00
草地	1.49	5.70	59.05	3.42
水域	1.19	0	13.7	0.35
未利用区	5.40	1.24	0	0
建设区	0.73	7.99	0	0

1.3 方法

1.3.1 InVEST模型碳储量估算

InVEST模型中的碳储量模块使用土地利用类型作为陆地表面的测量单位来评估碳储量^[29].它能有效的评价生态系统服务功能的数量和价值,用不同土地利用类型的总面积与其对应的平均碳密度相乘,估算研究区一段时间内的总碳储量.计算公式如下:

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}} \tag{1}$$

$$C_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \tag{2}$$

式中,*i*为某种土地利用类型;*C_i*为第*i*类土地利用类型碳密度;*C_i-above*、*C_i-below*、*C_i-soil*和*C_i-dead*分别为第*i*类土地利用类型地上植被碳密度(t·hm⁻²)、地下植被碳密度(t·hm⁻²)、土壤碳密度(t·hm⁻²)和死亡有机碳密度(t·hm⁻²);*C_{tot}*为生态系统总碳储量(t);*A_i*为第*i*类土地利用类型面积(hm²);*n*为土地利用类型数量.

1.3.2 PLUS模型

PLUS是中国地质大学 Liang 等^[20]开发的土地覆

盖变化模型,与其他模型相比,具有更高的仿真精度和可操作性.PLUS模型将基于随机森林的规划开发区的随机种子机制整合起来,兼顾生态建设区和规划开发区在区域发展中的带动和引导作用^[29].Kappa系数通常用来表示PLUS模型的精度,Kappa的取值范围为-1~1,当Kappa大于0.75时,模型的模拟精度较高^[30,31].

1.3.3 GeoDetector模型

地理探测器用于检测地理对象之间的空间分异并分析其空间驱动因素^[32],其中单因子探测是衡量单个驱动因子对碳储量空间分异的贡献率,交互探测是衡量不同驱动因子之间的交互作用对碳储量空间分异的解释力.

1.3.4 未来多情景设置

本研究立足于黄河中游现有发展格局,以黄河流域生态保护与高质量发展战略为主线,根据不同情景设定转移矩阵和邻域权重,参照杨洁^[28]、Wang 等^[33]和段炼等^[34]的研究设定转移矩阵(表3).

(1)自然发展情景 保持其土地利用转移矩阵和邻域权重参数设置与2010~2020年一致.

(2)生态保护情景 优先发展林、草、水等生态用地,降低林、草、水向建设用地转移的概率,模拟实施退耕还林、还草、封山和禁牧等生态措施的效果.

(3)经济发展情景 优先考虑经济发展,加大建设用地扩张,增大其他地类向建设用地转移的概率同时限制建设用地向其他地类转移,模拟经济增长、人口扩张和城市化程度提高等对土地利用变化的影响.

(4)耕地保护情景 综合考虑黄河中游地区的资源环境承载力,禁止耕地向其他地类转移.

表3 黄河中游地区2030年多情景模拟下土地利用转移矩阵¹⁾
Table 3 Land use transfer matrix under multi-scenario simulation in the middle reaches of the Yellow River in 2030

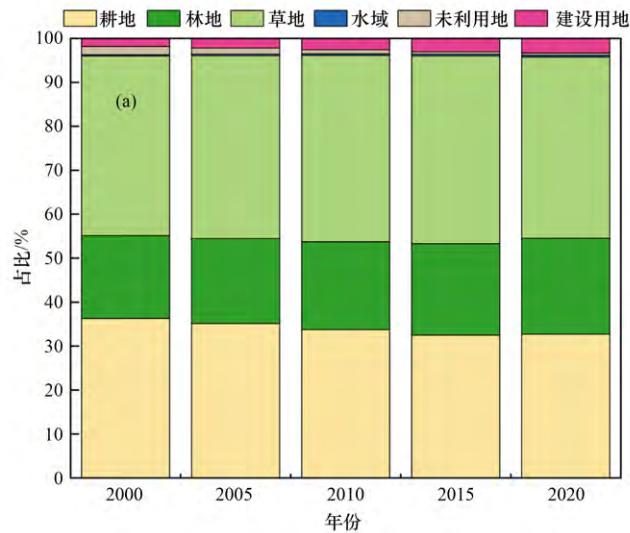
情景	用地类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
自然发展情景	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	0	0	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	0	1	1	1	1
	未利用地	1	0	1	1	1	1
	建设用地	1	0	1	1	1	1
生态保护情景	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	0	1	0	0	0	0
	草地	0	1	1	1	0	0
	水域	1	1	1	1	0	0
	未利用地	1	0	1	1	1	1
	建设用地	1	0	1	1	0	1
经济发展情景	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	0	0	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	0	1	1	1	1
	未利用地	1	0	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	0	1
耕地保护情景	耕地	1	0	0	0	0	0
	林地	1	1	1	0	0	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	0	1	1	1	1
	未利用地	1	0	1	1	1	1
	建设用地	1	0	1	1	1	1

1)1表示允许相互转换,0表示不允许相互转换

2 结果与分析

2.1 2000~2020年土地利用变化动态分析

2000~2020年,黄河中游的土地利用组成结构稳



定,其土地利用类型中耕地和草地面积占比最大,分别占总面积的32.5%~36.3%和40.9%~42.7%;其次是林地,占总面积的18%~20%;水域占比最低,为0.3%~0.4%[图2(a)].黄河中游土地利用变化主要表现为耕地面积在2000~2015年减少,在2015~2020年增加,增加速度较慢;林地、水域和建设用地面积在此期间持续增加,分别增加了11 044.51、404.51和5 339.52 km²;草地先增加(6 876.09 km²)再减少(5 672.06 km²).近20 a来,黄河中游土地利用面积共变化69 490.9 km²[图2(b)],占黄河中游总面积的19%,在此期间,耕地、林地、草地之间相互转化剧烈.其中,耕地和草地转出面积相对较多,达到32 791.3 km²和28 812.38 km²;耕地向林地的转移面积(3 457.92 km²)大于林地向耕地的转移面积(1 324.89 km²);耕地与城市的转移主要以耕地向城市的单项转移为主;未利用地转出面积是转入面积的13倍,主要转为了耕地和草地;建设用地转入面积是转出面积的26倍,在20 a期间建设用地的面积有了大幅度扩张,主要是占用了耕地和草地;水域转入面积是转出面积的2倍,可见在这20 a期间人们加强了对水资源的保护.

从空间上看(图3),2000~2020年黄河中游的土地利用类型分布较为稳定,其中草地大范围分布在黄河中游的西部和北部地区;耕地分布较为集中,主要分布在渭河流域、北洛河流域、泾河流域和汾河流域下游地区;林地主要集中分布在龙门至三门峡流域以及三门峡至花园口的部分区域;建设用地集中在省会城市周围,范围逐渐扩大.

2.2 2000~2020年碳储量变化动态分析

2000~2020年黄河中游碳储量呈持续增加的趋势,数量从2.6×10⁹ t增加到2.66×10⁹ t(图4),年均增长

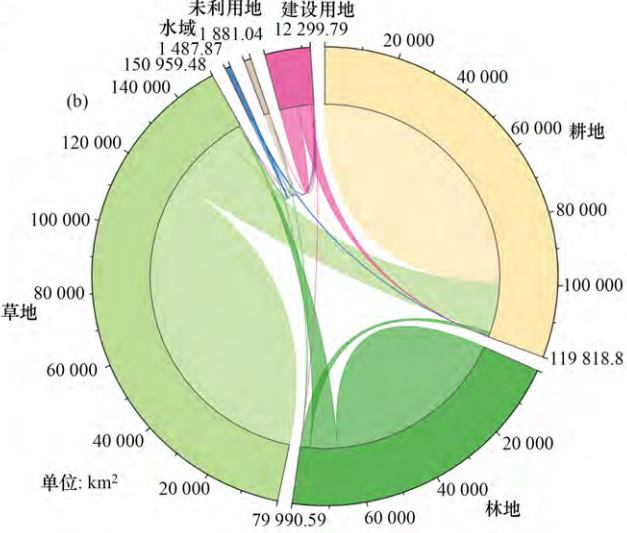


图2 2000~2020年黄河中游不同土地利用类型面积的占比以及相互转化

Fig. 2 Proportion and mutual transformation of different land use types in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

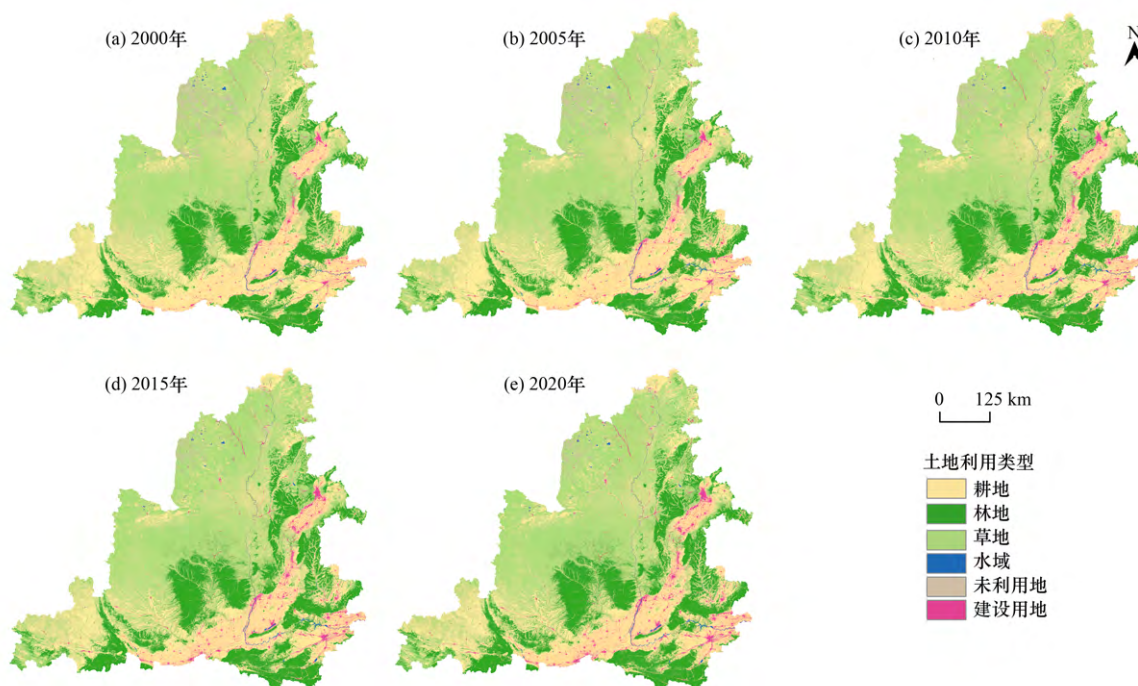


图3 2000~2020年黄河中游土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

率为0.1%,这主要是由于生态工程的实施引起的土地利用类型的变化.从土地利用类型的碳储量来看[图4(a)],草地占总碳储量的39%~42%,占比最大,其次是耕地和林地,占比分别为26%~30%和29%~34%,建设用地占0.2%~0.4%,水域和未利用地占比较小.近20 a来碳储量的变化数量顺序为:林地(1.24×10^8 t) > 草地(8.39×10^6 t) > 建设用地(4.66×10^6 t) > 水域(6.2×10^5 t) > 未利用地(-3.22×10^6 t) > 耕地(-7.6×10^7 t).在2000~2005生态工程实施之初,通过选择适宜树种,采用密植方式,将荒山、荒草和坡度大于 25° 的农田改造为森林,完成生态造林,在这个阶段,退耕还林面积为 792.73 km^2 ,退耕还草面积为 $13\,029.99 \text{ km}^2$,碳储量分别增加了 2.04×10^7 t和 1.97×10^7 t.2005~2015年,耕地面积持续减少,林草地面积持续增加,

黄河中游碳储量保持稳定增长.2015~2020年,新一轮退耕还林还草工程要求扩大规模,重点整治陡坡耕地、重度荒漠化耕地和严重污染耕地,促使退耕还林还草 $10\,745.64 \text{ km}^2$,促使碳储量增加 8.78×10^6 t.从不同碳库的碳储量变化来看[图4(b)],碳库中土壤有机碳所占比例最大,占总碳储量的77%~79%,其次是地上生物量碳,占总碳储量的10%~11%,地下生物量碳占总碳储量的6%~7%,死亡有机碳所占最小,为5%~6%.2000~2020年不同碳库的碳储量都有所增加,变化数量顺序为:地上碳库(1.96×10^7 t) > 死亡有机碳库(1.48×10^7 t) > 土壤碳库(1.28×10^7 t) > 地下碳库(1.02×10^7 t),20 a间植被地上、地下碳储量均呈持续增加的趋势,可见该时期的植被恢复工程取得了较大的成效.因此耕地面积减少和林草地面积增加是

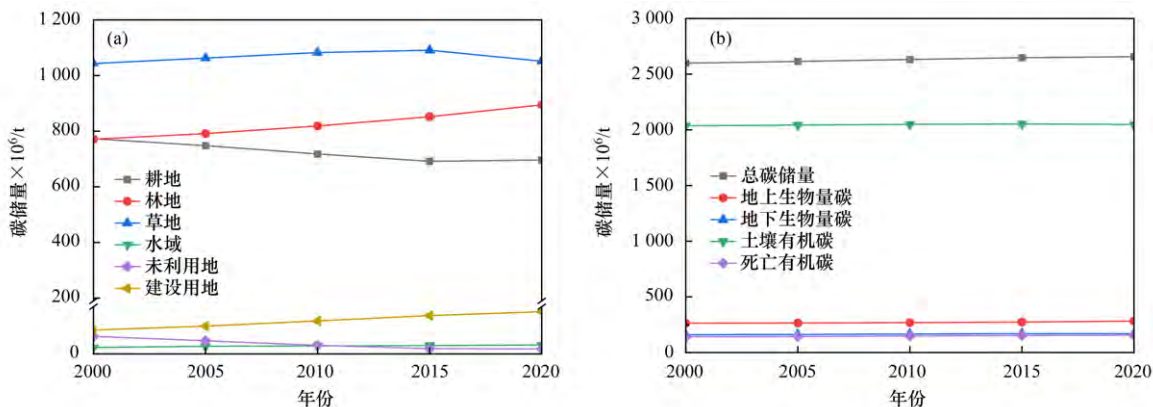


图4 2000~2020年黄河中游不同土地利用类型和碳库的碳储量

Fig. 4 Carbon storage of different land use types and carbon pools in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

黄河中游碳储量变化的主要原因。

从空间上看(图5),黄河中游2000~2020年碳储量在空间上具有一致性,即黄河中游龙门至三门峡和三门峡至花园口地区呈片状展布,整体上是“东南高西北低”。黄河中游从河口镇到龙门一带,碳储量相对偏低。黄土高原地处黄河中上游,吕梁山阻隔了从东而来的水分,在一定程度上具有较多的含沙量^[35],因此黄河中游的西北部属于碳储量低值区域。

通过黄河中游2000~2020年碳储量变化空间分布图可得,在这20 a里,碳储量基本不变($-10 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的区域占大多数,其中碳储量明显增加($\geq 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的区域和明显减少($\leq -10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的区域交错分布,明显增加的区域面积较多,且多分布在黄河中游的西部地区,河口镇至龙门的西部部分区域碳储量也明显增加;明显减少的区域面积较少,主要集中在城市周围。

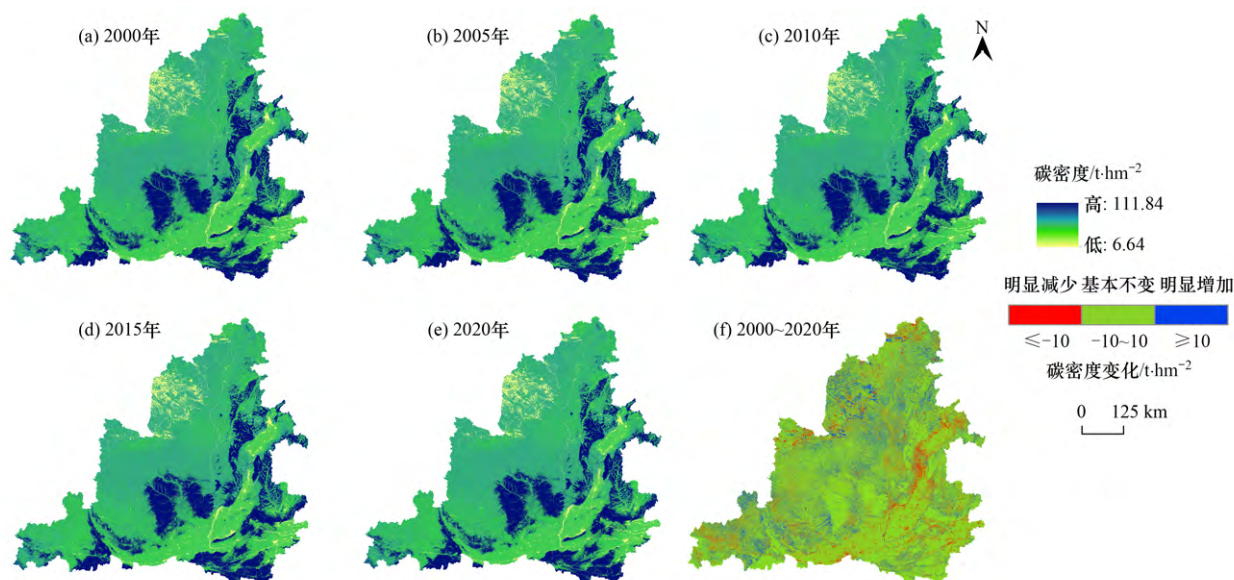


图5 2000~2020年黄河中游碳密度空间分布及变化

Fig. 5 Spatial distribution and change in carbon density in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

2.3 黄河中游碳储量时空分异驱动力分析

GeoDetector单因子探测结果显示(图6),本研究选取的9个驱动因子对黄河中游碳储量空间分布有着不同程度的影响,但各个时期内主要解释因子一致。其中NDVI(q 均值为0.872)是驱动黄河中游碳储量空间分布的主导因子,其解释力显著大于其他因素,这表明,在这一时期内,植被覆盖度越高的区域储存的碳储量也越多;其次是人口密度(0.563),人口越多的地方有更多的人类活动,表明人类活动深刻

影响着区域碳储量的变化;淤地坝(0.496)和造林面积(0.382)也是影响碳储量空间分异的重要因素,修建淤地坝拦截了大量的泥沙,植树造林措施提高了高碳密度林地的覆盖度,发挥了极大的固碳作用;坡度(0.037)对碳储量空间分异的驱动力较小,但其作用不可忽视。

GeoDetector交互探测结果显示(图7),2000~2020年黄河中游地区任意两个驱动因子的交互作用对碳储量空间分异的解释力大于单个驱动因子的解释力,说明各驱动因子之间的交互作用是双因子增强和非线性增强的,无非线性减弱、单线性减弱和独立作用存在。在2000~2020年对黄河中游碳储量空间分布解释力最强的交互类型均为NDVI与年均降水量、坡度和人口密度的组合,NDVI与其他因子交互的解释力均高于80%,进一步表明NDVI是驱动黄河中游碳储量空间分布的主导因子。坡度与GDP和其他因子的交互多为非线性增强型,远远大于单独作用,表明坡度与GDP在特定组合条件下会对碳储量空间分布产生极大的影响。综上所述,这些驱动因子之间的交互作用不是单纯的叠加关系,它们显著影响了碳储量的空间分异,在对黄河中游进行低碳建设时,

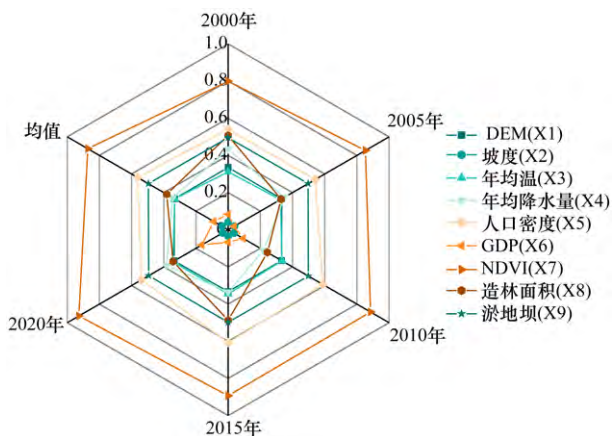
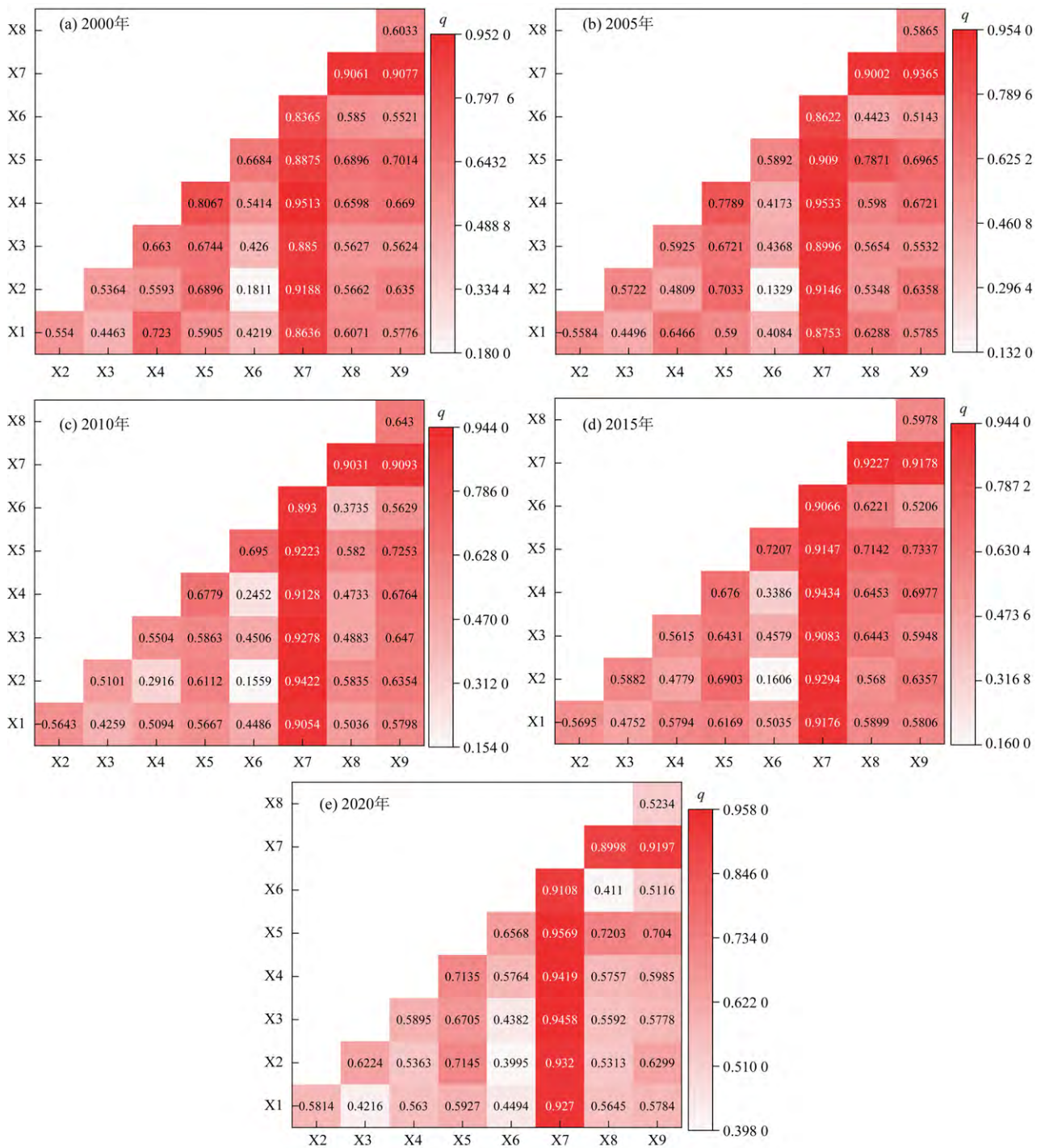


图6 单因子探测结果

Fig. 6 Single-factor detection results



X1 表示高程, X2 表示坡度, X3 表示年均温, X4 表示年均降水量, X5 表示人口密度, X6 表示 GDP, X7 表示 NDVI, X8 表示造林面积, X9 表示淤地坝

图7 交互因子探测结果

Fig. 7 Interaction factor detection results

应综合考虑多个因素的作用。

2.4 2030年多情景土地利用对碳储量动态变化的影响

2.4.1 2030年多情景土地利用变化预测及分析

本研究采用2010年土地利用为初始数据来预测2020年土地利用数据验证模型精度。结果显示,与2020年实际土地利用对比,Kappa值为0.7944,总体精度为86%。实际数据和模拟结果的一致性较高。因

此,该模型模拟的2020年土地利用数据模拟精度较高,可以用于模拟黄河中游地区2030年不同情景下的土地利用变化情况。最后,使用Markov模型和PLUS模型,分别设置4种不同情景的参数,对4种情景下的2030年土地利用变化进行了模拟。

根据图8和表4不同情景下土地利用模拟结果及各地类变化分析,黄河中游地区2030年和2020年土地利用空间分布格局变化不大。自然发展情景下

的各类用地按惯性发展,林地和建设用地扩张,主要侵占了部分耕地和草地,林地增长主要在渭河、北洛河、伊洛河流域周围和三门峡地区,林地的增长主要是因为近年来黄河中游地区对三门峡泥沙淤积、流域下泄不通的治理和退耕还林等生态工程的实施.

生态保护情景下,林地扩张最多,草地被侵占面积减少,可见生态保护情景能够一定程度上改善生态环境质量.经济发展情景下,建设用地扩张面积最大,主要在城市周围和沿河流域扩张.耕地保护情景下耕地扩张面积最大,耕地主要由草地转化而来.

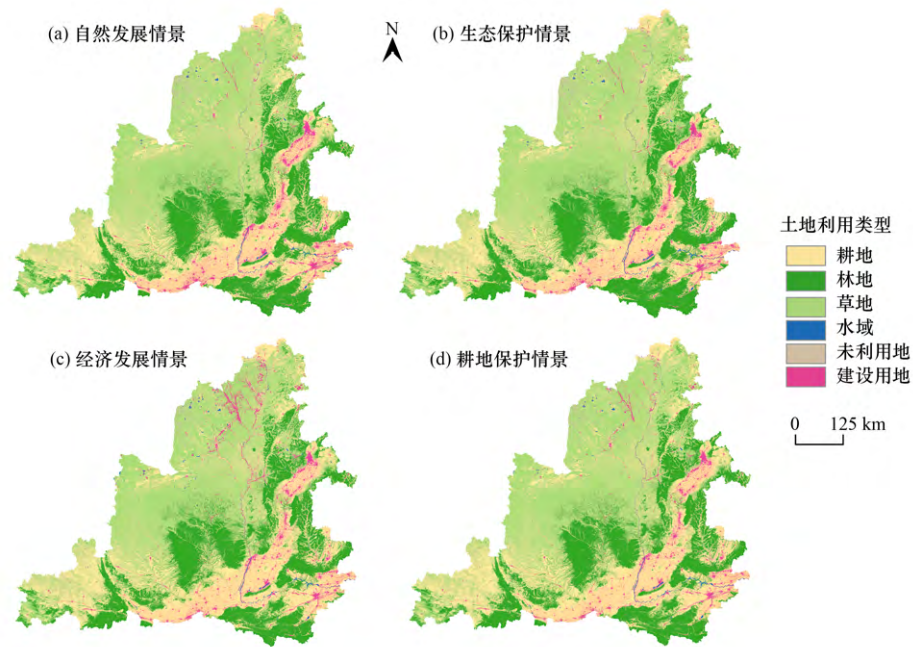


图 8 2030 年黄河中游地区不同情景土地利用模拟分布

Fig. 8 Simulation distribution map of land use in different scenarios in the middle reaches of the Yellow River in 2030

表 4 黄河中游地区 2030 年不同情景下的土地利用面积及变化 $\times 10^2/\text{km}^2$

Table 4 Land use area and change in different scenarios in the middle reaches of the Yellow River in 2030 $\times 10^2/\text{km}^2$

土地利用类型	自然发展情景		生态保护情景		经济发展情景		耕地保护情景	
	2030 年	2020~2030 年	2030 年	2020~2030 年	2030 年	2020~2030 年	2030 年	2020~2030 年
耕地	1 163.69	-34.5	1 107.31	-90.88	1 205.33	7.14	1 236.11	37.92
林地	863.12	63.21	898.59	98.68	859.06	59.15	859.27	59.36
草地	1 459.75	-49.84	1 480.76	-28.83	1 411.48	-98.11	1 411.08	-98.52
水域	12.67	-2.21	15.80	0.92	13.79	-1.09	14.75	-0.13
未利用地	16.45	-2.36	18.50	-0.31	12.32	-6.50	12.23	-6.58
建设用地	148.69	25.69	143.41	20.42	162.39	39.40	130.95	7.95

2.4.2 2030 年不同情景下的碳储量动态变化

黄河中游在 2030 年 4 种情景下的总碳储量均高于 2020 年,在生态保护情景下增加了 $3.94\times 10^7\text{ t}$,增量最多,在经济发展情景下增加了 $4.8\times 10^6\text{ t}$,增量最少,在不同的土地利用类型中[图 9(a)],草地储存的碳储量最多,占总碳储量的 36%~40%,其次是林地,占比为 34%~37%,未利用地储量最少.在不同碳库中[图 9(b)],土壤碳库是最大的碳库,约占总碳储量的 76%~78%,其他碳库的顺序为:地上碳库>地下碳库>死亡有机碳库.从空间上看(图 10),黄河中游不同情景下碳储量分布格局差异不大,与 2000~2020 年碳储量空间分布保持一致,碳储量的高值区集中在东南部的林地,低值区集中在水域、未利用地和建设用地分布区域以及河口镇至龙门

的西部地区.

总体而言,黄河中游碳密度变化不显著(表 5),2000~2020 年,碳密度明显增加的区域为 11.7%,与生态工程有关,随着生态工程的实施,大量的耕地被改造成森林和草地,低碳密度区域变为高碳密度区域;碳密度明显减少的区域占 7.2%,这是社会经济发展造成的,由于社会经济的发展,建设用地占用了大量的耕地和草地等碳密度较高的区域.在 4 种情景中,均表现为碳密度明显增加的区域大于明显减少的区域,其中在生态保护情景下更明显,增加的区域所占比例为 2.7%,这是因为生态保护情景下森林和草地等高碳密度土地扩张造成的;经济发展情景下的碳密度明显减少的区域所占比例最高,为 2.1%,其分布和建设用地的扩张大致一致.

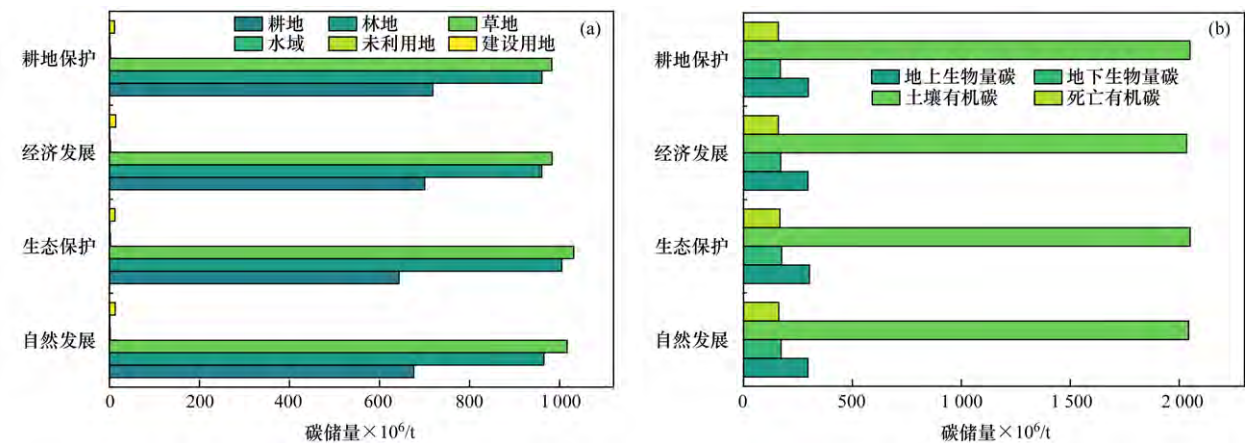


图9 2030年多情景下不同土地利用类型和碳库的碳储量

Fig. 9 Carbon storage of different land use types and carbon pools under multiple scenarios in 2030

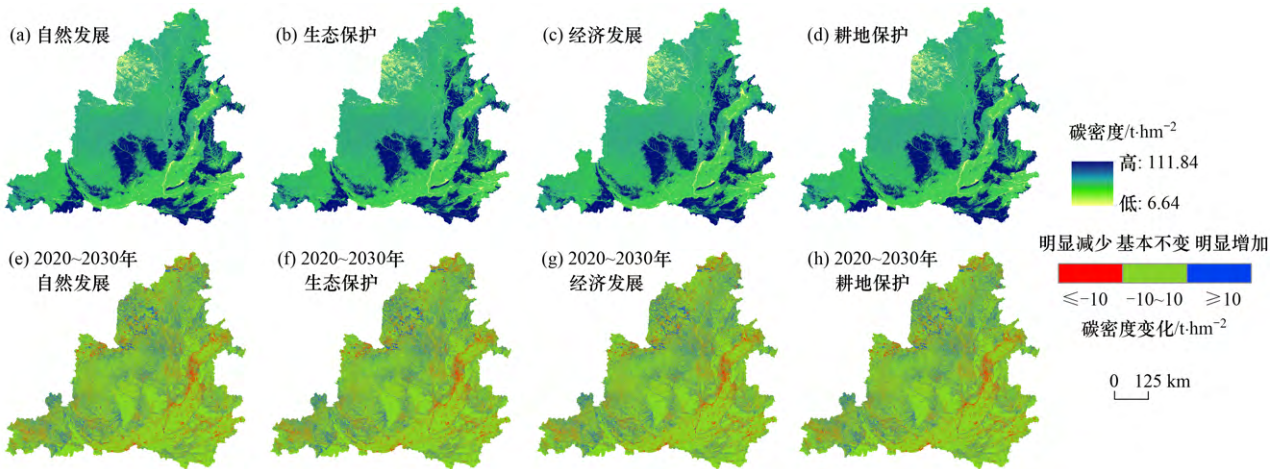


图10 2020~2030年黄河中游不同情景碳密度空间分布及变化

Fig. 10 Spatial distribution and change of carbon density in different scenarios in the middle reaches of the Yellow River from 2020 to 2030

表5 2030年黄河中游不同情景下碳密度的变化

Table 5 Changes in carbon density in the middle reaches of the Yellow River under different scenarios in 2030

项目	明显减少区域($\geq 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)		基本不变区域($-10 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)		明显增加区域($\leq -10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	
	面积 $\times 10^2/\text{km}^2$	比例/%	面积 $\times 10^2/\text{km}^2$	比例/%	面积 $\times 10^2/\text{km}^2$	比例/%
2000~2020年	263.20	7.2	2 973.25	81.1	427.92	11.7
2020~2030年自然发展	28.74	0.8	3 565.85	97.3	69.78	1.9
2020~2030年生态保护	21.23	0.6	3 544.27	96.7	98.88	2.7
2020~2030年经济发展	56.60	1.5	3 530.88	96.4	76.89	2.1
2020~2030年耕地保护	51.60	0.6	3 540.86	96.6	71.92	2.0

3 讨论

3.1 黄河中游地区碳储量变化分析

本研究分析发现,2000~2020年黄河中游碳储量呈持续增加趋势,这与杨洁^[28]和 Xu 等^[36]对黄河流域碳储量评估的结果相一致,韩敏等^[37]对我国西北干旱区 2000~2020 年及未来 2100 年碳储量进行估算及模拟预测,显示碳储量呈增加趋势的结果也佐证了本研究.碳储量的变化主要是由于生态工程引起的土地利用类型的变化,1999 年以来研究区实施了退耕还林还草、天然林保护和三北防护林等两轮生态

工程,大量耕地转化为林草地,由此碳储量增加,可见大规模的生态工程可显著提高碳储量,这与黄艳等^[38]、Liang 等^[39]和 Li 等^[40]的研究结果相一致.通过计算 2000~2015 年和 2015~2020 年生态工程实施期间碳储量增量发现,在 2000~2010 年和 2015~2020 年工程实施初期碳储量增长最快,在 2010~2015 年工程实施后期碳储量增长减慢,可见政策在实施过程中的规模效益逐渐递减,这与姚楠等^[27]的研究结果相一致.但总体来说,20 a 间的生态工程还是发挥了极大的碳汇作用.

本研究中设置的 2030 年 4 种情景下的碳储量均

高于 2020 年碳储量,这与许澳康等^[41]和马勇洁等^[42]的研究结果相一致,而与吴则禹等^[43]的研究中认为自然发展和经济发展情景下碳储量会减少的结果有所差异,主要原因是黄河流域是中国生态工程的重要实施区,20 a 间黄河中游大规模的生态工程显著提升了碳储量,因此在未来发展的同时仍然会注重生态保护,维持生态保护的成效。4 种情景下的生态保护情景和耕地保护情景下可以显著提高碳储量,耕地保护情景响应了国家保护耕地的政策,但没有注重对生态用地的保护,生态保护情景下的碳储量提升最多,生态用地面积增加,本研究基于综合考虑认为未来黄河中游应向生态保护情景靠近,严格坚守耕地保护红线和永久基本农田保护制度,对未利用地进行合理开发,优化土地利用结构,统筹山水林田湖草沙一体化保护,达到最优的生态效益与经济效益。

3.2 碳储量空间分异的驱动因子

单因子探测结果表明,NDVI 是影响黄河中游碳储量空间分异的主要驱动力,这与 Li 等^[44]的研究结果相一致,生态系统的碳汇主要来源于植物的光合作用,NDVI 能反映植物生物量的多少,NDVI 越大,植物长势越好,有机碳储存得越多。同时人口密度也是一个重要驱动因子,经济发展和人口增加带来的能源消耗和工业生产都会产生大量的碳排放。但是与贾纪昂等^[45]的研究中认为在经济发展较好的城市中,人为因子会更大程度上造成有机碳损失的结果不同的是,本研究还将人类活动与生态工程措施联系起来,例如植树造林和淤地坝建设等人类活动在一定程度上增强了碳储存。接着本研究选取符合黄河中游地区发展的生态措施作为驱动因素探究其解释力,结果显示,淤地坝和造林面积都是影响碳储量的重要因素,这与黄艳等^[38]的研究结果较为吻合,修建淤地坝可有效的拦截泥沙和沉积土壤,形成保碳、减排和增汇的作用与能力,可发挥巩固生态系统碳汇能力和提升生态系统碳汇增量的作用^[46]。植树造林提高了高碳密度林地的覆盖度,可有效增加碳储量,这与汪宗顺等^[47]的研究中指出造林是增汇潜力最大的“基于自然的气候解决方案”相一致。气候同样也影响着碳储量的分布,其中降水的影响力更强,这与李妙宇等^[48]的研究结论相一致,气候条件通过影响植被类型的分布进而影响有机碳的输入水平,黄河中游地区水土流失严重,水资源供需矛盾突出,降水季节集中且多暴雨是限制植被生产力的主要因素。

交互探测结果表明,不同驱动因子之间的结合均高于单因子对碳储量的影响程度,这与已有的研

究结果相一致^[30,38,45],驱动力最强的交互类型在各个年份均有所不同,在 2000 年、2005 年和 2015 年解释力最强的是 NDVI $\cap$ 降水,在 2010 年解释力最强的是 NDVI $\cap$ 坡度,在 2020 年解释力最强的是 NDVI $\cap$ 人口密度,出现这一变化的原因可能是,黄河中游的降水不稳定,是限制植被生产力的主要因素,2000 年第一批生态工程开始实施,逐渐到 2010 年林草地面积大幅增加,对降水也起到一定程度的调节作用,减轻了降水带来的负面影响,使降水趋向稳定,从而降水与 NDVI 交互的驱动力有所下降,2010 年由于第一轮生态工程已经实施到中期,根据坡度的不同种植不同类型的植被将对碳汇产生巨大的影响,此时 NDVI $\cap$ 坡度对碳储量的驱动力最强。在 2010 年进入第一轮生态工程末期,植树造林的规模效益在逐渐减少,且在 2014 年黄河流域降水量减少,发生罕见的全流域干旱,植被覆盖度有所下降^[49],此时降水又成为主要限制性因素,因此到 2015 年,NDVI $\cap$ 降水的驱动力再次成为主要驱动力。2015 年第二轮生态工程开始实施,再一次加强了对降水的调节能力。到 2020 年 NDVI $\cap$ 人口成为主要驱动力,人口活动主导土地利用模式的变化,深刻影响着植被的变化^[50]。因此,提高区域固碳能力要综合考虑多种因素,进行多元化调控策略。

3.3 不足与展望

本研究将 PLUS 与 InVEST 模型进行耦合,降低了陆地生态系统土地利用模拟和碳储量计算的复杂性,可以较为准确的反映碳储量的时空变化过程。但也存在一些不足之处,在进行土地利用模拟的时候,选取了较易获取和量化的一些自然和社会经济因素,但政策和制度这些难以量化的因素没有考虑,未来应确定如何将政策和制度等社会经济因素引入模型模拟。碳储量的计算受碳密度影响较大,本研究假设碳密度参数固定且通过碳密度数据集和参照黄河流域、黄土高原地区设置碳密度,忽略了不同时期不同地区碳密度的差异性,这就给计算结果增加了不确定性,未来还需利用实验数据进一步验证碳密度的合理性。

本研究使用地理探测器定量分析了碳储量时空分异的驱动因素,但没有对各驱动因子与碳储量进行空间非平稳性研究,没有指明各驱动因子对碳储量影响的尺度和方向,因此在未来还需对影响因素进行空间可视化研究。

4 结论

(1)黄河中游地区 2000~2020 年的土地利用格局与空间格局相对稳定,不同时期的面积占比大小依

次为:草地>耕地>林地>建设用地>未利用地>水域,随着时间的推移,林地、草地和水域面积增加,城市扩张明显,耕地和未利用地面积减少。

(2)黄河中游 2000~2020 年间碳储量呈持续增长趋势,增长了 5.75×10^7 t,均表现为草地碳储量占比最多,水域碳储量占比最少。土壤碳库是碳储量的重要组成部分。黄河中游地区总碳储量呈“东南高西北低”的空间分布格局,林地、草地、水域和建设用地的碳储量随时间增长,而耕地和未利用地的碳储量呈下降趋势,这主要是由于高碳地类与低碳地类的转移造成的碳储量变化。

(3)2000~2020 年,NDVI 是黄河中游地区碳储量时空分异的主要驱动因子,不同驱动因子的交互作用对碳储量时空分异的影响均呈现双因子增强和非线性增强的趋势,其中对黄河中游碳储量空间分布解释力最大的交互类型均为 NDVI 与年均降水量、坡度和人口密度的组合。

(4)黄河中游 2030 年碳储量分布格局与 2020 年大致相同,各情景碳储量空间变化存在一定差异。4 种情景的碳储量较 2020 年都呈增加趋势,其中在生态保护情景下碳储量增加了 3.93×10^7 t,增加量最多,在经济发展情景下碳储量增加了 4.8×10^6 t,增加量最少。生态保护情景较其他情景可以显著提高黄河中游的碳储量。

参考文献:

- [1] Lempert R J. Measuring global climate risk[J]. *Nature Climate Change*, 2021, **11**(10): 805-806.
- [2] Mazdiyasi O, AghaKouchak A. Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(37): 11484-11489.
- [3] Noyes P D, McElwee M K, Miller H D, et al. The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world[J]. *Environment International*, 2009, **35**(6): 971-986.
- [4] Ito A, Nishina K, Noda H M. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data[J]. *Polar Science*, 2016, **10**(3): 346-355.
- [5] Chen Y X, Huang B Y, Zeng H. How does urbanization affect vegetation productivity in the coastal cities of eastern China? [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **811**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152356.
- [6] Cui Y X, Dong Y Q, Liu H X, et al. Short-term grazing exclusions reduced soil organic carbon but not bacterial diversity in the sagebrush desert, Northwest China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **31**, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01872.
- [7] Houghton R A, House J I, Pongratz J, et al. Carbon emissions from land use and land-cover change[J]. *Biogeosciences*, 2012, **9**(12): 5125-5142.
- [8] 夏四友, 杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J]. *地理学报*, 2022, **77**(3): 679-696.
- [9] Xia S Y, Yang Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on the plan for major function-oriented zones[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(3): 679-696.
- [10] Zhang Y, Liao X Y, Sun D Q. A coupled InVEST-PLUS model for the spatiotemporal evolution of ecosystem carbon storage and multi-Scenario prediction analysis[J]. *Land*, 2024, **13**(4), doi: 10.3390/land13040509.
- [11] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, **8**(2): 2213-2223.
- [12] 王子尧, 黄楚梨, 李惊, 等. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(14): 5789-5798.
- [13] Wang Z Y, Huang C L, Li L, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFI-Plus model: a case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(14): 5789-5798.
- [14] Du S L, Zhou Z F, Huang D H, et al. The response of carbon stocks to land use/cover change and a vulnerability multi-scenario analysis of the Karst Region in southern China based on PLUS-InVEST[J]. *Forests*, 2023, **14**(12), doi: 10.3390/f14122307.
- [15] 余健, 童秋英, 朱波. 改进 CA-Markov 模型的武汉市土地利用变化模拟[J]. *测绘科学*, 2020, **45**(6): 165-171.
- [16] Yu J, Tong Q Y, Zhu B. Simulation of land change in Wuhan city based on improved CA-Markov model[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, **45**(6): 165-171.
- [17] 刘强, 杨众养, 陈毅青, 等. 基于 CA-Markov 多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(7): 1522-1531.
- [18] Liu Q, Yang Z Y, Chen Y Q, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its eco-environmental effect in hainan island based on CA-Markov model[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(7): 1522-1531.
- [19] 谭德明, 丁仕宇, 韩宝龙, 等. 不同发展模式对城市生态系统调节服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2022, **42**(16): 6554-6564.
- [20] Tan D M, Ding S Y, Han B L, et al. Impact of different development patterns on the value of regulating services of urban ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(16): 6554-6564.
- [21] 赫晓慧, 徐雅婷, 范学峰, 等. 中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2965-2976.
- [22] He X H, Xu Y T, Fan X F, et al. Temporal and spatial variation and prediction of regional carbon storage in Zhongyuan Urban Agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2965-2976.
- [23] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 等. 基于 CLUE-S 模型的县域生产—生活—生态空间冲突动态模拟及特征分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(16): 5897-5908.
- [24] Zhao X, Tang F, Zhang P T, et al. Dynamic simulation and characteristic analysis of county production-living-ecological spatial conflicts based on CLUE-S model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(16): 5897-5908.
- [25] 王旭东, 姚尧, 任书良, 等. 耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法[J]. *地球信息科学学报*, 2022, **24**(1): 100-113.
- [26] Wang X D, Yao Y, Ren S L, et al. A coupled FLUS and Markov approach to simulate the spatial pattern of land use in rapidly developing cities[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, **24**(1): 100-113.
- [27] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(1): 230-242.
- [28] Wang X, Ma B W, Li D, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(1): 230-242.
- [29] Liang X, Guan Q F, 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**, doi: 10.1016/j.compenvurb.2020.101569.
- [30] 贺莉, 申欣, 郭彦锐. 环境法典下黄河流域的保护与发展[J]. *低碳世界*, 2023, **13**(1): 4-6.
- [31] 任娟, 赵雪雁, 徐省超, 等. 黄河中游地区生态系统服务的时空演变及权衡与协同关系研究[J]. *地球环境学报*, 2022, **13**(4): 477-490.
- [32] Ren J, Zhao X Y, Xu X C, et al. Spatial-temporal evolution, tradeoffs and synergies of ecosystem services in the middle Yellow River[J]. *Journal of Earth Environment*, 2022, **13**(4): 477-490.
- [33] 林依雪, 李艳忠, 余文君, 等. 植被恢复工程对黄河中游 12 个典型流域水热平衡的影响研究[J]. *地理研究*, 2020, **39**(11): 2593-2606.
- [34] Lin Y X, Li Y Z, Yu W J, et al. Quantitative assessment of the impact of the vegetation restoration project on water-energy balance in 12 typical basins of the middle Yellow River[J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(11): 2593-2606.
- [35] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 等. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(12): 2005-2020.
- [36] Li Y Z, Liu C M, Liu X M, et al. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the middle Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(12): 2005-2020.
- [37] 陈实, 黄银兰, 金云翔. 退耕还林(草)工程实施前后黄河中游生境质量

- 时空变化分析[J]. 干旱区研究, 2023, **40**(3): 456-468.
- Chen S, Huang Y L, Jin Y X. Spatiotemporal changes of habitat quality before and after the implementation of Grain for Green Project in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2023, **40**(3): 456-468.
- [26] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2019, **4**(1): 86-92.
- Xu L, He N P, Yu G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s)[J]. *China Scientific Data*, 2019, **4**(1): 86-92.
- [27] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于InVEST模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(5): 329-336.
- Yao N, Liu G Q, Yao S B, *et al.* Evaluating on effect of conversion from farmland to forest and grassland porject on ecosystem carbon storage in loess hilly-gully region based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(5): 329-336.
- [28] 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]. 开封: 河南大学, 2023.
- Yang J. Simulation of land use change and carbon stock estimation in the Yellow River Basin based on Flus-InVEST model [D]. Kaifeng: Henan University, 2023.
- [29] Li P C, Chen J D, Li Y X, *et al.* Using the InVEST-PLUS Model to predict and analyze the pattern of ecosystem carbon storage in Liaoning province, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(16), doi: 10.3390/rs15164050.
- [30] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等. 耦合PLUS-InVEST-Geodector模型的新疆地区碳储量时空变化及驱动机制分析[J]. 环境科学, 2024, **45**(9): 5416-5430.
- Fu K X, Jia G D, Yu X X, *et al.* Analysis of temporal and spatial carbon stock changes and driving mechanism in Xinjiang region by coupled PLUS-InVEST-Geodector model[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(9): 5416-5430.
- [31] Gu L, Gong Z W, Du Y X. Evolution characteristics and simulation prediction of forest and grass landscape fragmentation based on the "Grain for Green" projects on the Loess Plateau, P.R. China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108240.
- [32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [33] Wang N F, Chen X P, Zhang Z L. Spatiotemporal dynamics and driving factors of county-level carbon storage in the Loess Plateau: a case study in Qingcheng County, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **144**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109460.
- [34] 段炼, 卢明深, 蔡耀君, 等. 海上丝绸之路经济带中国沿线省市生态系统碳储量演化分析与预测[J]. 水土保持学报, 2024, **38**(1): 242-254.
- Duan L, Lu M S, Cai Y J, *et al.* Analysis and prediction of ecosystem carbon storage evolution in Chinese provinces and cities along the maritime silk road economic belt[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, **38**(1): 242-254.
- [35] 张丹丹. 基于多源数据的黄河流域植被NPP时空变化及其影响因子分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- Zhang D D. Research on spatio-temporal variations in vegetation net primary productivity and their impact factors in Yellow River Basin based on muti-source data [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [36] Xu C L, Zhang Q B, Yu Q, *et al.* Effects of land use/cover change on carbon storage between 2000 and 2040 in the Yellow River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, **151**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110345.
- [37] 韩敏, 徐长春, 隆云霞, 等. 西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(3): 335-344.
- Han M, Xu C C, Long Y X, *et al.* Simulation and prediction of changes in carbon storage and carbon source/sink under different land use scenarios in arid region of Northwest China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(3): 335-344.
- [38] 黄艳, 刘晓曼, 袁静芳, 等. 2000—2020年华北干旱半干旱区碳储量变化特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 2024, **37**(4): 849-861.
- Huang Y, Liu X M, Yuan J F, *et al.* Spatial and temporal changes of carbon storage and its influencing factors in arid and semi-arid region of North China from 2000 to 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(4): 849-861.
- [39] Liang Y J, Hashimoto S, Liu L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106939.
- [40] Li K M, Cao J J, Adamowski J F, *et al.* Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: a case study in Huining County, China[J]. *Environmental Development*, 2021, **39**, doi: 10.1016/j.envdev.2021.100641.
- [41] 许澳康, 胡梦珺, 石晶, 等. 石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. 中国环境科学, 2024, **44**(6): 3365-3375.
- Xu A K, Hu M J, Shi J, *et al.* Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation in the Shiyang River basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, **44**(6): 3365-3375.
- [42] 马勇洁, 仲俊涛, 米文宝, 等. 基于青海湖流域土地利用多情景模拟预测的碳储量评估及其脆弱性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, **37**(10): 46-55.
- Ma Y J, Zhong J T, Mi W B, *et al.* Assessment and vulnerability analysis on carbon storage based on multi-scenarios simulation and prediction of land use in Qinghai Lake basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, **37**(10): 46-55.
- [43] 吴则禹, 刘星根, 曾金凤. 基于InVEST-PLUS模型的东江源流域碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学学报, 2024, **44**(3): 419-430.
- Wu Z Y, Liu X G, Zeng J F. Spatio-temporal change and prediction of carbon storage in Dongjiang River source watershed based on InVEST-PLUS model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(3): 419-430.
- [44] Li Y, Geng H C. Spatiotemporal trends in ecosystem carbon stock evolution and quantitative attribution in a karst watershed in southwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, **153**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110429.
- [45] 贾纪昂, 郭伟玲, 徐刘洋, 等. 耦合PLUS-InVEST-GeoDectector模型的安徽省碳储量时空演变及驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(3): 1703-1715.
- Jia J A, Guo W L, Xu L Y, *et al.* Spatial-temporal evolution and driving forces analysis of carbon storage in Anhui province coupled with PLUS-InVEST-GeoDectector model [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1703-1715.
- [46] 李智广, 成辉, 方怒放, 等. 淤地坝保碳、减排、增汇作用与其能力评估[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(4): 1-6.
- Li Z G, Cheng H, Fang N F, *et al.* The role of Yudiba dams in protecting carbon, reducing carbon emission and enhancing carbon sequestration and its capability assessment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(4): 1-6.
- [47] 汪宗顺, 张海鹏, 岳超, 等. 造林增汇是实现碳中和的成本有效途径吗?——以西北地区为例[J]. 自然资源学报, 2024, **39**(3): 731-748.
- Wang Z S, Zhang H P, Yue C, *et al.* Is afforestation for carbon sinks a cost-effective way to achieve carbon neutrality? Take Northwest China as an example [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(3): 731-748.
- [48] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- Li M Y, Shanguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- [49] 杨鹏辉, 田佳, 张楠, 等. 1990—2022年黄河流域植被时空变化特征及未来趋势预测[J]. 生态学报, 2024, **44**(19): 8542-8553.
- Yang P H, Tian J, Zhang N, *et al.* Characteristics of spatio-temporal changes and future trends forecast of vegetation cover in the Yellow River Basin from 1990 to 2022 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(19): 8542-8553.
- [50] Li J, Wang J L, Zhang J, *et al.* Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **136**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108620.