土地利用变化对无定河流域生境质量和碳储量演变的影响及其预测

李小兵[1,2], 刘 昶[1,2], 郭 强[1,2], 安文举[3]

〔1.黄河水土保持绥德治理监督局(绥德水土保持科学试验站), 陕西 榆林 719000; 2.水利部黄土高原水土保持野外科学观测研究站, 陕西 榆林 719000; 3.宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021〕

摘 要: [目的] 分析土地利用变化对无定河流域生境质量和碳储量演变的影响及其未来发展趋势,为该区域土地利用规划和生态环境可持续发展提供数据参考。[方法] 通过PLUS模型预测2033年土地利用变化,采用InVEST模型评估流域2003—2033年的生境质量和碳储量演变状况,并通过空间自相关分析揭示流域生境质量和碳储量的空间集聚特征。[结果] 2003—2023年无定河流域土地利用以草地和耕地为主(分别占比74.36%～78.40%和14.03%～15.20%),耕地、林地和建设用地面积均逐年增加,耕地和草地的相互转移以及裸地向草地转移是该流域主要转移形式。该流域生境质量和碳储量呈逐年增加的趋势,总体呈"中部低,四周高"的空间格局。高生境质量区域主要分布在林地、草地和水域,高碳储量区域则主要分布在草地和耕地。该流域生境质量空间集聚格局始终保持"环状分布",而碳密度则发生了显著变化,从前期"环状分布"转变为后期"中部低-低,南部高-高"的聚集模式。这一分异现象表明,生态工程的推进有效改变了裸地内部的碳密度空间异质性,但未能扭转受威胁因子距离主导的生境质量格局。此外,流域中南部耕地区域呈现出生境质量低-低聚集而碳储量无显著聚集的特征,凸显了农业活动在两种服务功能之间的权衡关系。[结论] 建议划定林草地类保护边界,防止耕地和建设用地侵占,在裸地区域配置更具固碳潜力的植物群落,适度探索光伏发电等产业,控制建设用地扩张边界,促进无定河流域生态系统稳定和提升。

关键词: 土地利用; PLUS模型; InVEST模型; 生境质量; 碳储量

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0322-11 **中图分类号:** X171.3, F301.24

文献参数: 李小兵, 刘昶, 郭强, 等.土地利用变化对无定河流域生境质量和碳储量演变的影响及其预测[J].水土保持通报,2026,46(4):322-332. Li Xiaobing, Liu Chang, Guo Qiang, et al. Effects and prediction of land use changes on evolution of habitat quality and carbon storage in Wuding River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):322-332.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.027 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.027**

Effects and prediction of land use changes on evolution of habitat quality and carbon storage in Wuding River basin

Li Xiaobing[1,2], Liu Chang[1,2], Guo Qiang[1,2], An Wenju[3]

(1.*Suide Administration and Supervision Bureau of Soil and Water Conservation of the Yellow River, Yulin, Shaanxi* 719000, *China*; 2.*Field Scientific Observation and Research Station of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Yulin, Shaanxi* 719000, *China*; 3.*School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of land use change on the evolution of habitat quality and carbon storage in the Wuding River basin and their future trends were analyzed in order to provide data support for land use planning and sustainable ecological development in this region. [Methods] Land use changes in 2033 were predicted using the PLUS model. The InVEST model was then used to evaluate habitat quality and carbon storage in the river basin from 2003 to 2033, and spatial autocorrelation analysis was conducted to reveal their spatial clustering characteristics. [Results] From 2003 to 2023, land use in the Wuding River basin was dominated by grassland and

收稿日期:2025-11-24 **修回日期:**2026-01-27 **采用日期:**2026-01-31

资助项目:绥德局科研发展项目"陕北黄土高原区植被恢复背景下水土保持生态服务功能时空格局研究"(KYFZ-01-01);黄河上中游管理局局列科研项目(HYK-202504)

第一作者:李小兵(1978—),男(汉族),陕西省榆林市人,大学本科,工程师,主要从事水土流失动态监测研究。Email:hhsbz@163.com。

通信作者:刘昶(2001—),女(汉族),甘肃省天水市人,工程师,主要从事水土流失动态监测研究。Email:824591068@qq.com。

cultivated land, accounting for 74.36%—78.40% and 14.03%—15.20%, respectively. The areas of cultivated land, forest land and construction land all increased annually, and the mutual conversion between cultivated land and grassland, and the conversion from bare land to grassland were the main land use transition types. Habitat quality and carbon storage showed increasing trends year by year, with an overall spatial pattern of low values in the central area and high values on the periphery. Areas with high habitat quality were mainly distributed in forest land, grassland and water bodies, whereas areas with high carbon storage were mainly distributed in grassland and cultivated land. The spatial clustering pattern of habitat quality consistently showed a ring-shaped distribution, whereas carbon density changed significantly from an early ring-shaped distribution to a later pattern characterized by low-low clustering in the central area and high-high clustering in the southern area. This divergence indicated that ecological engineering effectively changed the spatial heterogeneity of carbon density within the bare land, but did not reverse the habitat quality pattern primarily controlled by the distance to stress factors. In addition, cultivated areas in the central and southern parts of the river basin showed low-low clustering of habitat quality but no significant clustering of carbon storage, highlighting the trade-off between the two ecosystem service functions under agricultural activities. [Conclusion] It is recommended to delineate protection boundaries for forest land and grassland, prevent the encroachment of cultivated land and construction land, establish plant communities with greater carbon sequestration potential in bare land areas, moderately explore industries such as photovoltaic power generation, and control the expansion boundary of construction land, so as to promote ecosystem stability and improvement in the Wuding River basin.

Keywords: land use; PLUS model; InVEST model; habitat quality; carbon storage

生态系统服务(ESs)定义为自然生态系统及其物种为人类生存提供的惠益,是人类通过生态系统功能得到的服务。1960年以来,随着对环境污染和资源稀缺问题的认识不断提高,在可持续发展经济学等相关学科影响下,学者们逐渐将自然生态科学和社会科学的概念联系起来,创造了“生态系统服务”的概念[1]。作为人与自然和谐共生的桥梁,伴随逐渐加快的全球化进程,生态系统服务已经成为生态、经济、环境等领域研究的重点。当前,对于生态系统服务的研究主要包括生态系统服务与人类福祉发展趋势、生态系统服务功能评估方法以及生态系统服务价值研究等方面,其中对特定区域开展生态环境评价是整个生态系统服务研究的重点和热点。生境质量和碳储量作为量化区域生态系统服务的重要因子,受到国内外相关学者的关注。生境质量是指生态系统提供适宜个体与种群持续生存发展条件的能力,是评价区域生物多样性的重要指标[2],而碳储量在维持全球碳平衡以及调节气候方面起到重要作用。

作为生态系统的基础,土地利用是驱动生态系统演变的宏观结构性因素。土地利用的改变,能够改变生态系统的结构、过程和功能[3],从而影响生境质量和碳储量。近年来,城镇化的进程加快了土地利用的变化,使得土地利用斑块化和碎片化,破坏了生态系统的稳定性。大量研究表明,为物种提供适宜栖息地的生态地类(如林地、草地和水域)在转为耕地或建设用地时,通过隔绝物种扩散,降低景观连通性,增加干扰源等方式破坏生境质量[4]。Kupfer等[5]发现,森林面积减少和农业用地扩张使得斑块灭绝率上升,导致区域敏感物种的丧失以及全球物种丰富度和多样性的下降。Upadhaya等[6]研究表明,城市化和农业扩张对栖息地产生了负面影响,2006—2015年平均生境质量下降了32%。同样,林地和草地通过光合作用固存大气中的二氧化碳,其向其他地类转移则直接破坏了碳储存的主体,从而导致碳储量下降。Wang Yafeng等[7]通过在黄土高原实地采样发现,耕地转变为草地或灌木丛的过程显著增加了土壤有机碳。综上所述,土地利用变化显著影响生境质量与碳储量。因此,科学调控土地利用方式、保障生态用地规模,是维护生态系统稳定与提升其服务功能的重要途径。在生态系统服务的多项功能中,水源涵养与土壤侵蚀的变化多受制于降水量等气候因子,而土地利用变化作为人为干扰主导的景观过程,对碳储量与生境质量的作用更为显著且复杂[8]。然而,在针对流域或典型生态区域开展大尺度生态系统服务评价时,主要存在两方面不足:一是多集中于单一要素的定性或局部定量分析,缺乏对两者在同一时空尺度下系统比较的研究,难以全面揭示区域生态质量[9];二是基于多因子开展权衡协同评价时,普遍忽略了区域特征赋予生态系统服务功能的不同权重,导致对生态系统服务功能的估算出现显著偏差,从而影响生态恢复优先级与资源配置效率[10]。由此,针对人类活动剧烈,土地利用转移频繁,

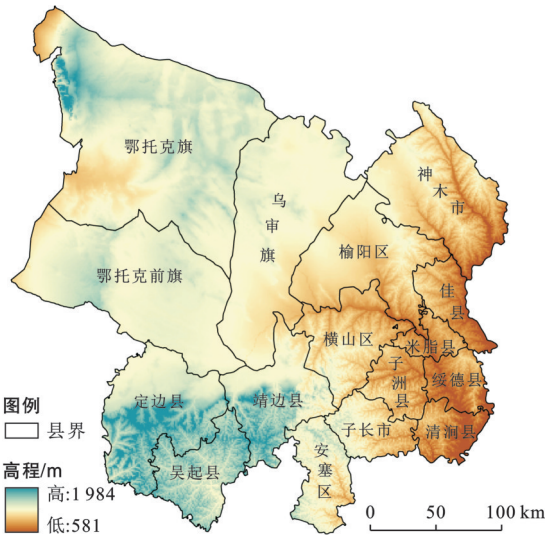
开发强度大的区域，选取生境质量和碳储量开展针对性的生态评价，分析其变化规律和未来发展趋势，对区域环境部门制定生态恢复政策具有重要作用。

无定河流域作为黄河流域一级支流，植被稀疏，土壤侵蚀严重[11]。自1998年以来，流域经历了快速城镇化与资源开发，生态部门开展的大规模退耕还林、还草工程以及水土保持措施，显著改变了流域的土地利用分布[12]。基于此，本文以无定河流域所辖县区为研究区域，研究2003—2023年土地利用、生境质量和碳储量的时空演变过程，预测2033年土地利用并分析其生境质量和碳储量的演变状况，为该区域土地利用规划和生态环境可持续发展提供数据参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文选取的无定河流域（106°28′—110°54′E，36°30′—40°11′N）是依据2024年中国水土保持公报中对于无定河流域所辖县区的总称（图1）。该区域位于黄土高原北部，黄河流域中上游，包括陕西、内蒙古两省共16个县区，总面积为9.27×10^4 km^2，海拔高度566～1 824 m。该区域包含黄土丘陵区、北部风沙区、戈壁区，属半湿润半干旱区域，是国家北方生态安全屏障的关键区域[13]。该地区农牧业较发达，煤、石油和天然气等储量丰富，但放牧以及大规模资源开采导致水土流失严重。据水利部监测中心统计，2024年无定河流域水土流失面积1.13×10^4 km^2，占土地总面积的12.19%[14]。



注：地图数据来源为国家基础地理信息中心（https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/dataSource）。审图号为GS（2024）0650号。底图无修改。下同。

图1 无定河流域概况

Fig.1 Overview of Wuding River basin

1.2 数据来源及处理

1.2.1 土地利用数据

数据来自武汉大学（https://zenodo.org/）基于GEE上所有可获得的Landsat数据，通过构建时空特征和随机森林算法制作的土地利用栅格数据集，并采用时空滤波和逻辑推理等后处理方法提高精度。其整体精度达80%，分辨率为30 m。依据《土地利用现状分类》（GB/T 21010—2017）并结合无定河流域特点，将土地利用数据分为耕地、林地、草地、水域、裸地和建设用地共6个类型。

1.2.2 PLUS模型及驱动因素数据

PLUS模型是由中国地质大学梁迅博士开发的土地利用预测模型。该模型主要基于土地扩张分析策略的规则挖掘框架和基于多类型随机种子的CA模型，通过读取现有两个时期的土地利用数据以及驱动因素等数据，利用随机森林算法挖掘土地扩张和景观变化规律，从而实现对未来土地利用的预测[15]。PLUS模型因其较强的可靠性和精确性，已受到学者的广泛采用。具体的模型教程参照Liang等[16]的研究成果和中国地质大学地理与信息工程学院的官方教程（https://xgxy.cug.edu.cn/info/1 046/3 145.htm）。研究表明，高程和坡度影响建设用地和耕地的分布，降水、土壤类型和气温等是林地和草地分布的主要因素，人口密度和GDP促进建设用地扩张，而道路的分布则影响所有地类扩张的可能性。参照模型运行规则及现有研究成果，并结合无定河流域现状，选取高程、降水等12项驱动因素，经ArcGIS 10.8重采样为30 m分辨率，空间坐标系统一采用WGS_1984_Albers，数据来源及处理见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移变化

土地利用转移矩阵能够清晰地显示不同地类在同一时间间隔内的相互转移过程和面积，是当前评价土地利用变化的最直观的表示方法[17]，其表达式为：

$$C_{xy}=\begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：C_{xy}为地类y向地类x转移的面积（km^2），$x=1,2,3\cdots n$，$y=1,2,3\cdots n$。

1.3.2 基于InVEST模型评估生境质量和碳储量

InVEST模型由斯坦福大学等联合开发，具有操作简便、空间可视化程度高等优点[18]。其中，Habitat quality模块和Carbon storage模块用于评估生境质量和碳储量。现有研究中，该模块能够基于研究区特

征及研究侧重设置计算参数,已被广泛应用于陕北区域、黄土高原和黄河流域等不同尺度的生境质量和碳储量评估,具有较好的适用性[19]。无定河流域作为一个完整的地理单元,非常适合用该模型解释其生境质量和碳储量的变化过程。模型手册介绍了具体的计算原理、模型和方法,其计算式如下:

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R}w_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{2}$$

$$Q_{xj}=H_j\left(1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)\right) \tag{3}$$

$$C_i=C_{i_\text{above}}+C_{i_\text{below}}+C_{i_\text{soil}}+C_{i_\text{dead}} \tag{4}$$

$$C_{\text{total}}=\sum_{i=1}^{n}C_i\times S_i \tag{5}$$

式中:D_{xj}为地类j栅格x的生境退化程度;R为胁迫因子个数;W_r为胁迫因子权重;Y_r为胁迫因子的栅格数;r_y为图层范围胁迫因子强度;β_x为栅格x的可达性水平;S_{jr}为生境j对胁迫因子r的敏感性;i_{rxy}为栅格x与y之间的距离;Q_{xj}为生境质量;H_j为生境适宜度;k为半饱和常数,取该区域生境退化度最大值的一半;z为归一化常数,一般取0.5。C_{i_total}为第i种地类的碳密度(t/hm^2),C_{i_above},C_{i_below},C_{i_soil}和C_{i_dead}分别为第i种地类地上生物量碳密度(t/hm^2)、地下生物量碳密度(t/hm^2)、土壤碳密度(t/hm^2)和死亡有机质碳密度(t/hm^2);C_{total}为总碳储量(t),S_i为第i种地类面积(hm^2)。

表1　数据来源及处理

Table 1　Data sources and processing

数据类型	数据来源	时间	空间分辨率	时间分辨率
DEM数据	GEBCO(https://www.gebco.net/)	2023年	30 m	
坡度	GEBCO(https://www.gebco.net/)	2023年	30 m	
人口数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	2023年	1 000 m	年
GDP数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	2023年	1 000 m	年
土壤数据	世界土壤协调数据库2.0版本(https://gaez.fao.org/pages/hwsd)	2023年	1 000 m	
降水	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)	2003年、2013年、2023年	1 km	年
气温	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)	2003年、2013年、2023年	1 km	年
距水系距离	地理监测云平台(http://www.dsac.cn/)	2023年	30 m	
距铁路距离	地理监测云平台(http://www.dsac.cn/)	2023年	30 m	
距高速距离	地理监测云平台(http://www.dsac.cn/)	2023年	30 m	
距国道距离	地理监测云平台(http://www.dsac.cn/)	2023年	30 m	
距政府驻地距离	地理监测云平台(http://www.dsac.cn/)	2023年	30 m	

在Habitat quality模块中,生境质量通过分析土地利用及其对生物多样性的威胁程度来计算。在计算前,需选定当前区域影响生境质量的威胁因子及其权重,以及对其他生境单元的相对敏感性[2]。无定河流域地处黄土丘陵区、北部风沙区、戈壁区交会地带,林地、草地和水域提供了主要的栖息地,而耕地种植过程中的人为扰动,建设用地的扩张和裸地本身具有的恶劣生态环境,成为影响生境质量的主要威胁因子。故设定威胁因子为耕地、裸地和建设用地,参考模型手册及在黄土高原的相关应用[2,19],并咨询领域专家意见,设定其权重(分别为0.5,0.3,0.9)和不同地类的生境适应度。

在Carbon storage模块中,碳储量是不同地类中4个碳库的总和,本研究参考中国陆地生态系统碳密度数据集[20]和类似研究区碳密度的修正结果[21]综合设定了不同地类的碳密度。不同地类的生境适应性和碳密度见表2。

1.3.3　空间自相关分析生境质量和碳储量的集聚特征

空间自相关模型用于量化相邻区域之间的聚类特征,采用全局Moran's I指数判定空间单元之间是否存在空间自相关,判定存在后通过聚类和异常值分析生成聚集区域的空间分布。首先创建5 km×5 km网格共10 745个,通过分区统计将2003—2033年的生境质量和碳储量与网格相对应,计算得Moran's I指数均>0,且Z值均>2.58,p值均<0.01。这说明无定河流域的生境质量和碳储量均存在正的自相关性,而后采用聚类和异常值分析,将无定河流域

2003—2033年的生境质量和碳储量在空间上可视化为H-H(高值聚集),H-L(高低聚集),L-H(低高聚集),L-L(低值聚集)和NS(不明显聚集),以此分析无定河流域生境质量和碳储量的空间集聚特征。

表2 无定河流域不同生境类型对胁迫因子敏感度及不同土地利用碳密度

Table 2 Sensitivity of different habitat types to stress factors and carbon density of different land use types of Wuding River basin

土地利用类型	生境适应性	对胁迫因子敏感度			碳密度/(t·hm^{-2})			
		耕地	裸地	建设用地	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	0.3	0.3	0.3	0.4	5.58	1.06	41.82	13.00
林地	1	0.7	0.7	0.8	69.06	18.30	49.05	13.00
草地	0.7	0.7	0.8	0.7	3.33	20.45	48.49	2.00
水域	0.9	0.7	0.7	0.8	0.36	0.00	0.00	0.00
裸地	0.1	0.1	0.1	0	0.06	0.00	6.28	0.00
建设用地	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00

2 结果与分析

2.1 2003—2023年土地利用面积及2033年土地利用预测

基于PLUS模型的精度验证规则,采用2003年和2013年土地利用模拟预测2023年土地利用并与2023年实际土地利用进行验证,其模拟精度为89%,高于模型设定的75%要求,证明驱动因素选取合理,可以进行2033年的土地利用预测。2003—2033年土地利用面积及占比见表3。无定河流域土地利用以草地为主,占比在74.36%~78.40%之间,其次为耕地,面积持续增加,占比在14.03%~15.20%之间。建设用地在2003—2023年出现了明显扩张(增幅157.63%),与之对应裸地面积出现显著下降(减幅56.70%),这与无定河流域经济开发加快和"退耕还林"等生态保护措施持续实施相对应。

表3 2003—2033年无定河流域土地利用面积及占比

Table 3 Land use area and proportion of Wuding River basin (2003—2033)

土地利用	2003年		2013年		2023年		2033年	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
耕地	13 004.99	14.03	12 121.76	13.08	13 979.71	15.08	14 091.07	15.20
林地	190.70	0.21	458.55	0.49	757.33	0.82	808.48	0.87
草地	68 913.33	74.36	72 662.82	78.40	72 598.03	78.33	72 595.63	78.33
水域	293.58	0.32	288.80	0.31	283.81	0.31	274.51	0.30
裸地	9 990.69	10.78	6 654.41	7.18	4 325.53	4.67	3 649.03	3.94
建设用地	284.76	0.31	491.71	0.53	733.64	0.79	1 259.33	1.36

由图2可以看出,无定河流域绝大多数为草地覆盖,而流域中部及西北部以裸地为主。该区域裸地是毛乌素沙地的核心区域,建设用地在榆阳区和神木市之间扩张。这是因为近年来该区域丰富的自然资源得到开发,相关的工业设施落地建设。耕地集中分布在东部和西南区域。

2.2 2003—2033年土地利用转移矩阵

无定河流域土地利用类型间转移面积较大的是"耕地-草地""裸地-草地"和"建设用地-草地"(表4),说明草地覆盖稳定性仍处于较高的动态变化之中。草地与裸地的转移反映出生态措施实行的积极效果。

近些年该区域在毛乌素沙漠试验推广的飞播技术,有效促进了其他地类向草地转移。然而,建设用地面积的增加主要也是由草地转移而来,这说明实施开发建设,更需要考虑对生态地类的保护。

2.3 2003—2033年生境质量和碳密度空间演变分析

无定河流域2003—2033年的生境质量和碳密度空间分布状况见图3。总体来看,生境质量和碳密度均呈"中部低,四周高"的空间格局。这种格局与土地利用的分布紧密相关。流域中部为毛乌素沙地集中分布区,作为干旱半干旱沙地生态系统,由于降水稀少,蒸发强烈加之表层土壤沙化,导致有机质含量与可利用水分显著偏低,从而无法提供生物适宜的生态环境和固碳能力。而流域四周以草地和林地为主,土壤养分以及水分条件相比沙地更加优越,从而

表现出更加复杂的生物群落结构,更高的储碳能力和土壤有机质,在生境质量和碳储量中表现更优。随时间演变,低生境质量和低碳密度在流域中部逐步缩减,而在东北部呈条带状的急速扩张趋势。这是人为干预和经济发展共同作用的结果。一方面,在沙地上实施的飞播造林、草方格等治沙措施,有效缩减了裸地的面积,另一方面,由于近年来能源开采和城市用地需求增加导致建设用地急速扩张,该区域生境质量和碳储量呈较低水平。生境质量和碳密度的最高值均分布在区域南部的吴起县和安塞区。该区域毗邻子午岭国家级生态保护区,主要森林生态系统在为陆地生物提供优越栖息地的同时成为主要的碳汇区域。所以该区域在生境质量和碳密度的空间表现均处于最高水平。

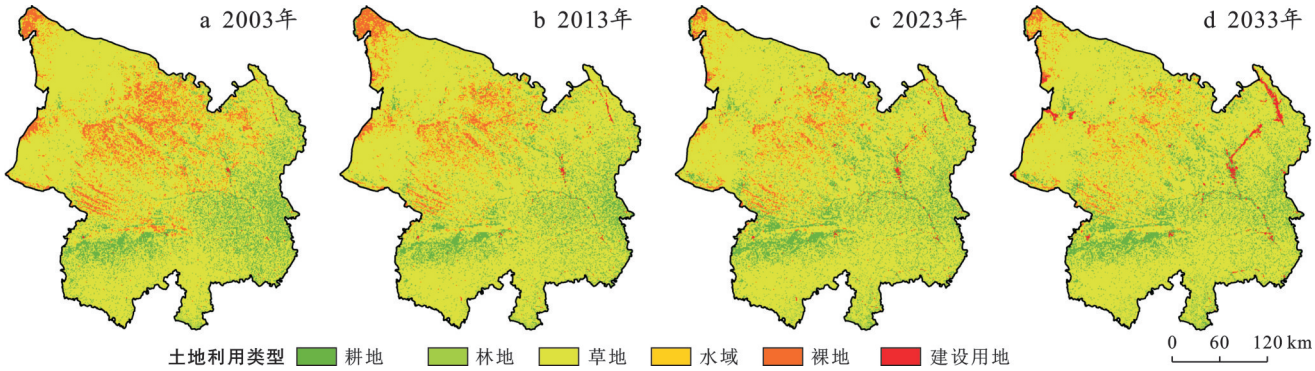


图 2　2003—2033 年无定河流域土地利用类型分布

Fig.2　Land use types distribution of Wuding River basin (2003—2033)

表 4　无定河流域土地利用类型转移矩阵

Table 4　Land use types transition matrix of Wuding River basin

转移年份	土地利用	转移面积/km²					
		耕 地	林 地	草 地	水 域	裸 地	建设用地
2003—2013	耕 地	8 810.30	8.78	4 117.21	16.39	0.00	52.31
	林 地	0.00	186.60	4.10	0.00	0.00	0.00
	草 地	3 274.45	263.17	63 998.13	26.54	1 235.46	115.58
	水 域	12.08	0.00	17.35	228.65	25.21	10.30
	裸 地	24.92	0.00	4 526.04	11.02	5 393.74	34.97
	建设用地	0.00	0.00	0.00	6.20	0.00	278.56
2013—2023	耕 地	9 269.83	5.61	2 798.48	12.60	0.00	35.23
	林 地	6.00	450.53	2.02	0.00	0.00	0.00
	草 地	4 638.80	301.19	66 827.83	23.81	719.83	151.37
	水 域	8.90	0.00	8.73	226.11	23.17	21.88
	裸 地	56.18	0.00	2 960.98	14.72	3 582.53	40.01
	建设用地	0.00	0.00	0.00	6.57	0.00	485.14
2023—2033	耕 地	12 930.41	9.14	997.48	6.39	17.72	18.57
	林 地	8.44	602.04	146.28	0.09	0.00	0.48
	草 地	1 104.97	195.23	70 158.40	13.60	358.39	767.45
	水 域	8.30	0.00	20.11	250.80	1.85	2.75
	裸 地	22.48	0.05	1 029.83	1.88	3 264.78	6.50
	建设用地	16.47	2.02	243.53	1.74	6.30	463.58

2003—2023 年无定河流域生境质量均值和碳储量均呈逐年增加的趋势(表 5),预计 2033 年生境质量均值达 0.591 1,总碳储量达 6.40×10^8 t。同时,2003—2013 年生境质量均值和碳储量增幅均最高,生境质量均值增幅为 4.08%,碳储量增幅为 4.04%,反映出退耕还林的成效显著。

2.4　不同土地利用的生境质量均值和碳储量

无定河流域不同土地利用的生境质量均值和碳储量见表 6。从生境质量来看,林地、草地和水域是维持高水平生境质量(均值>0.65)的主要地类,而耕地与裸地、建设用地则构成流域的生境低值区(均值<0.35)。从碳密度来看,草地因其绝对的面积优势(>

70%)和较高的碳密度,贡献了约85%的碳储量,是流域最稳定的碳库。而耕地通过作物残茬及外界输入土体的秸秆或有机肥分解形成稳定的土壤有机碳,且耕地面积仅次于草地,贡献了约13%的碳储量。从变化趋势分析,林地对碳储量增长的贡献率最为突出。2003—2033年林地面积增幅达323.96%,其碳储量从2.80×10^6 t增长至1.21×10^7 t,增量贡献率(该地类碳储量变化量占流域总碳储量变化量的百分比)高达23.53%。综合来看,林草地类的扩张与保护,对提升无定河流域生境质量与碳储量具有"协同增效"作用。

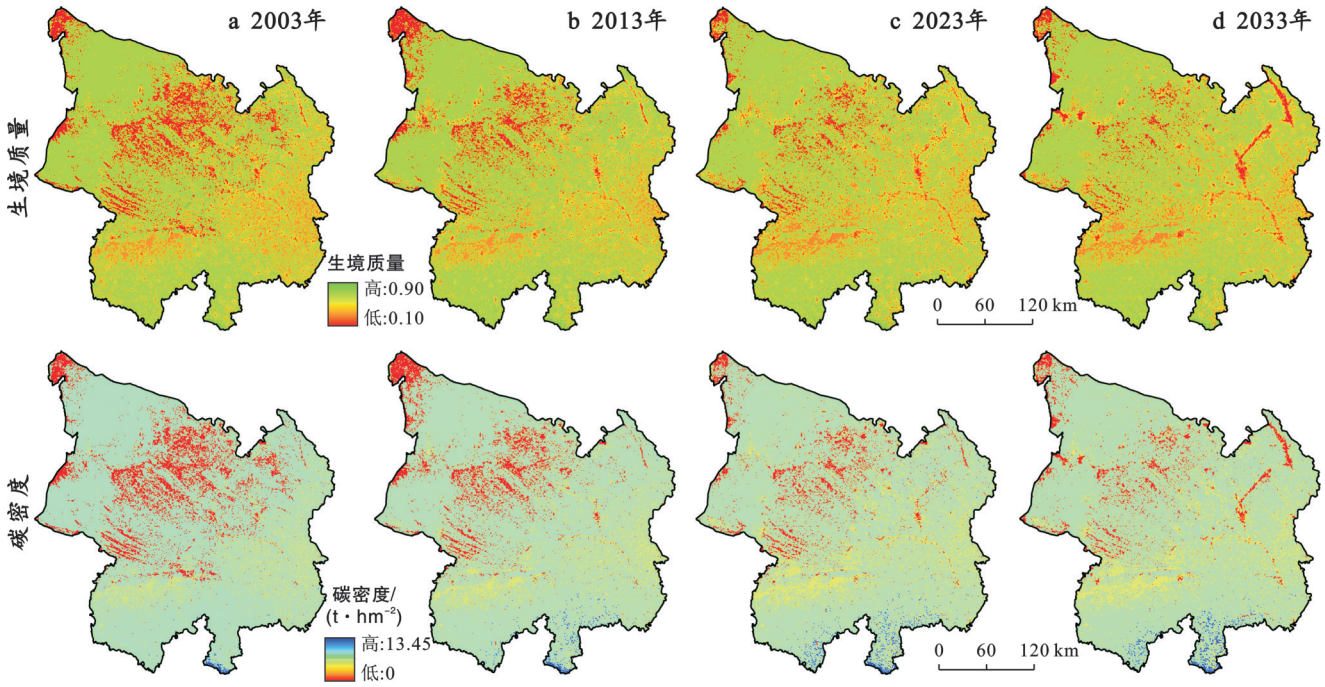


图3 无定河流域生境质量和碳密度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of habitat quality and carbon density of Wuding River basin

表5 2003—2033年生境质量均值和碳储量总量

Table 5 Mean habitat quality and total carbon storage (2003—2033)

项 目	2003年	2013年	2023年	2033年
生境质量均值	0.563 9	0.586 9	0.589 7	0.591 1
碳储量总量/10^8 t	6.01	6.25	6.39	6.40

2.5 无定河流域生境质量和碳密度的空间集聚特征

2003—2033年无定河流域生境质量空间集聚特征相似(图4a—4d),总体呈中部L-L聚集、四周H-H聚集的环状样式分布,南部和西北部H-H聚集与林草地的分布相对应。同时,中部L-L聚集区域面积逐年缩减,进一步说明近年来治理沙漠取得显著成效。无定河流域碳密度(图4e—4h)在2003—2013年呈环状分布,在2023—2033年呈中部L-L聚集,南部H-H聚集的特征。同时,流域中南部耕地区域的生境质量表现出明显的L-L聚集,而碳密度却没有明显的聚集特征。这是因为耕地受人为活动影响较大,不利于生物多样性的恢复。然而由于耕地具有较高的储碳能力,故两项功能在耕地上表现为权衡关系。生境质量和碳密度H-H聚集区域主要分布在流域南部林地集中和西北部草地集中的区域,表现出较好的协同性,而L-L聚集区域主要分布在流域东北部的"榆神走廊"。该区域建设用地的扩张引起生境质量和碳储量协同下降,后续的扩张应引起关注。

表6 不同土地利用的生境质量均值和碳储量

Table 6 Mean habitat quality and carbon density of different land use types

生态系统服务功能	土地利用	2003年	2013年	2023年	2033年
生境质量均值	耕 地	0.32	0.32	0.32	0.29
	林 地	0.78	0.77	0.76	0.77
	草 地	0.67	0.67	0.67	0.68
	水 域	0.80	0.77	0.75	0.77
	裸 地	0.14	0.14	0.14	0.10
	建设用地	0.13	0.13	0.13	0.10
碳储量/10^7 t	耕 地	7.99	7.45	8.59	8.66
	林 地	0.28	0.69	1.13	1.21
	草 地	51.18	53.97	53.92	53.92
	水 域	0.00	0.00	0.00	0.00
	裸 地	0.63	0.42	0.27	0.23
	建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00

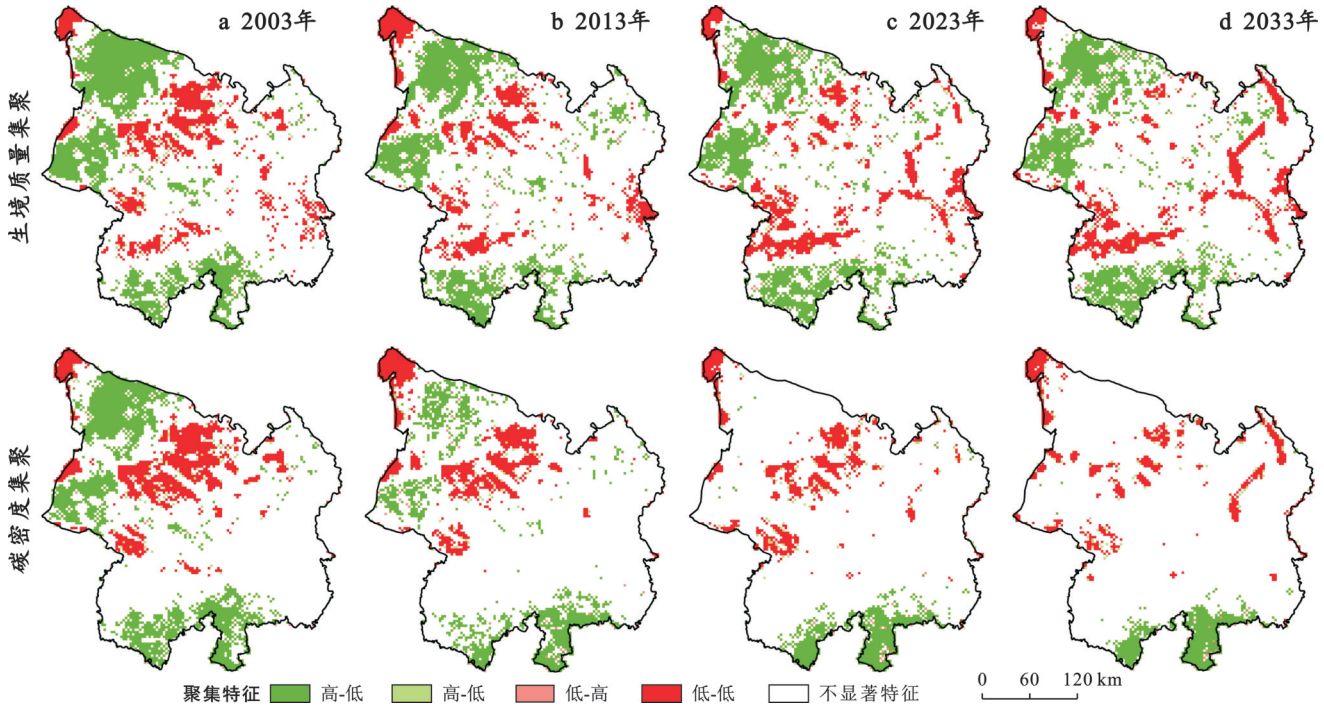


图 4　生境质量和碳密度空间集聚特征

Fig.4　Spatial clustering characteristics of habitat quality and carbon density

3　讨　论

3.1　土地利用转移及对生境质量和碳密度贡献分析

无定河流域作为黄河流域重要的一级支流,其生态状况对区域水资源安全、土壤保持和生态系统服务功能的稳定具有决定性作用。然而,由于它处于黄土高原和毛乌素沙地的交叉地带,其生态状况亦相对脆弱。针对该流域开展生态保护,对黄河流域的高质量发展具有重要作用。本研究中,无定河流域以草地覆盖为主,耕地、建设用地和裸地等交错分布。草地与耕地间的相互转移成为无定河流域主要的土地利用流转特征。这是因为草地作为极易被侵占的生态系统,而耕地与粮食供给紧密关联,人为的耕作种植不可避免地侵占草地系统。“飞播造林”等针对性生态工程取得了显著成效。飞机播撒柠条、沙打旺等耐旱植物种子,实现了对裸地以及荒山沟谷的快速绿化,驱动了“裸地-草地”转移以及裸地面积锐减 56.70%。从土地利用转移对生境质量和碳密度的贡献度来看(表 7),耕地、裸地向林地、草地转移会显著增加生境质量和碳密度,这与张小瑜等[22]的研究结果一致。碳储量与土地利用的关系更为密切,因植被通过光合作用能将大气中的 CO_2 固存在植物体中,所以其在林草地的固存能力更优[23]。裸地向草地转移对生境质量和碳密度的贡献率均最高。这表明在生态本底最脆弱的区域开展修复工程,能同时获得生物多样性保护和固碳增汇的最大收益。

3.2　生境质量和碳密度空间集聚格局演变机制

本研究区碳储量与生境质量空间集聚格局的演变呈现出显著的分异。碳密度格局由“环状分布”(2003—2013 年)转变为“中部 L-L 聚集、南部 H-H 聚集”(2023—2033 年),而生境质量则始终保持“中部低、四周高”的环状格局。这种分异从根本上反映了生态恢复工程“由外向内”推进的阶段性特征与两项生态系统服务内在评估机理的差异。碳储量依赖于像元自身的土地覆被类型及其对应的碳密度,而生境质量在于评估威胁因子(如建设用地、裸地)对生境适宜性的空间衰减影响[24]。2003—2013 年流域生态恢复工程(如退耕还林还草、飞播造林等)实施初期,主要从生态环境相对较好且易于治理的沙地外围向内部推进,草地面积在沙地周边实现扩张,在空间统计上,由于草地分布导致大量高值的生境质量和碳密度像元同步提升至较高水平,从而在局部空间自相关分析中表现出 H-H 聚集,而中部沙地因其脆弱的自然本底,恢复响应缓慢,表现为连续的 L-L 聚集。随着生态政策的持续实施,“飞播造林”技术的实施将裸地分割成斑块状分布,草地逐渐延伸至裸地内部使得碳汇能力增强,碳密度高低值像元的分异性逐渐减弱而表现为不显著特征。而生境质量因与威胁因子的距离密切相关,穿插在裸地之间的草地仍不

能提供较好的生物适宜性。在空间上,裸地内外的生境质量高低值像元分异性仍较为明显。而南部的森林生态系统在持续的高水平保护中,系统逐渐完善,生境质量和碳密度在空间上的差距进一步减小,持续表现为H-H聚集。所以生境质量持续呈“环状”分布,而碳密度则发生了明显的格局变化。

表7 2003—2033年土地利用转移对生境质量和碳密度贡献率

Table 7 Contribution rates of land use transition to habitat quality and carbon storage (2003—2033) 单位:%

项目		2033年土地利用类型					
		耕地	林地	草地	水域	裸地	建设用地
2003年生境质量	耕地	−0.06	0.01	1.9	0.01	0	−0.02
	林地	0	0	0	0	0	0
	草地	−2.42	0.05	0.23	0.01	−0.47	−0.46
	水域	−0.01	0	−0.01	−0.01	−0.02	−0.01
	裸地	0.01	0	3.98	0.01	−0.02	0
	建设用地	0	0	0.05	0	0	0
2003年碳密度	耕地	0	0.21	6.65	−0.16	−0.06	−0.76
	林地	−0.02	0	−0.24	0	0	0
	草地	−7.93	4.58	0	−0.33	−5.73	−5.98
	水域	0.15	0	0.31	0	0.02	0
	裸地	1.14	0	45.57	−0.01	0	−0.07
	建设用地	0.03	0.01	0.72	0	0	0

作为长期演化且相对稳定的草地,将其开垦为耕地引起生境质量和碳密度双下降。但是,在耕地集中分布的流域中南部,生境质量呈L-L聚集,碳密度却未表现出明显的聚集特征。这是因为耕地的生境质量主要受到人为干扰(频繁翻耕、施药等)导致生物结构简化和生物胁迫程度增加,处于较低水平[25]。但是,耕地中的作物凋落物、动物及微生物排泄物和死亡残体,以及人为管理过程中的根系滞留、秸秆还田和有机肥的使用,促进了耕地中有机碳的积累[26],从而成为陆地生态系统中非常重要的“碳库”。此外,碳密度对林地变化的响应远比生境质量敏感。这与植被作为直接碳库,而其生境功能还受林分结构、树种多样性等多种因素影响有关[27]。这种差异化响应机制表明,单一的生态指标无法全面评估土地利用变化的生态后果,必须进行多因子的协同评估。

3.3 生态保护建议

2003—2023年无定河流域生境质量持续增长,2023年增至0.589 7,超越同年黄河流域生境质量均值(0.568 0)[28]。高生境质量区域逐年扩张,流域为生物多样性提供适宜生境的能力增强。碳储量从6.01×10^8 t增加至6.39×10^8 t,充分反映了退耕还林、飞播造林等生态政策和生态部门对生态环境的长效保护产生的良好效果。但是,模拟预测2033年,生境质量和碳储量的增速明显减缓(生境质量预计为0.591 1,碳储量为6.40×10^8 t),资源的深度开采和建设用地的扩张,已成为阻碍无定河流域生态治理回升的突出威胁。为了实现流域生态系统的长效恢复,后续应从以下3个方面开展生态保护:①对于现有的林草地类,应划定保护边界,防止耕地和建设用地侵占;对于长期撂荒的耕地,应鼓励种植枣树等经济作物,在获得经济收入的过程中促进民众自发保护成林。②对于裸地的治理可能需要从“单纯增绿”向“提质增汇”转变,考虑配置更具固碳潜力的乡土植物群落,适度探索光伏发电等产业,通过减少水分蒸发促进植被生长。③建设用地的扩张应严格控制边界,对于必要的开发项目应实行“占补平衡”等补偿措施,保证林草地类面积。基于对历史发展过程中生境质量和碳储量的分析,在后期的研究中,应加入如水土保持、耕地保护和经济发展等多个情景的模拟,研究不同情景下生境质量和碳储量的空间分布状况。

4 结 论

以无定河流域为研究区域,分析了2003—2023年土地利用分布及转移过程,采用PLUS模型预测2033年土地利用,并进一步计算了区域生境质量和碳储量。

(1)2003—2023年无定河流域土地利用以草地和耕地为主,草地面积先增后减,耕地和建设用地逐年增加,林地面积急剧增长并集中分布于“子午岭国家级预防区”周边,而裸地面积显著下降。耕地和草地的相互转移和裸地向草地的转移是无定河流域主要的土地利用转移形式。建设用地面积增加主要由

草地转移而来,未来实施开发建设,更需要考虑对生态地类的保护。

(2) 无定河流域生境质量和碳储量呈逐年增加的趋势。2033年生境质量均值达0.591 1,碳储量总量达6.40×10^8 t,空间分布总体呈"中部低,四周高"的空间格局,林地、草地和水域是维持高水平生境质量的主要地类,而草地和耕地成为区域碳储量的主要碳库。

(3) 无定河流域生境质量格局稳定,始终呈"中部L-L,四周H-H"的环状分布,而碳储量格局则从环状分布演变为"中部L-L,南部H-H"聚集,反映了生态工程对流域生态状况的直观影响。裸地内部草地的扩张有效改变了碳密度在空间上的分异性,局部空间自相关性减弱,表现为不显著特征。而生境质量受威胁因子距离影响,即使裸地内部植被恢复,仍未改变外围高生境地类的空间聚集特征。此外,中南部耕地的生境质量受人为干扰频繁而呈L-L聚集,但作物凋落物、秸秆还田等途径促进有机碳积累而无显著聚集特征,凸显了农业活动在生境质量与碳存储之间的权衡关系。

参考文献(References)

[1] 王诗绮,刘焱序,李琰,等.近20年黄土高原生态系统服务研究进展[J].生态学报,2023,43(1):26-37.
Wang Shiqi, Liu Yanxu, Li Yan, et al. Research progress on the ecosystem services on the Loess Plateau during the recent 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(1):26-37.

[2] 安文举,鱼亦凡,郝姗姗,等.基于土地利用变化的陕北多沙粗沙区生境质量演变及响应分析[J].干旱区地理,2024,47(3):474-484.
An Wenju, Yu Yifan, Hao Shanshan, et al. Evolution and response analysis of habitat quality in more sediments and coarse sediments region of northern Shaanxi based on land use change [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(3):474-484.

[3] 门宝辉,李国娇,申耀铎,等.近20年滦河流域土地利用与碳储量时空演变及协调关系[J].生态学杂志,2025,44(6):2042-2054.
Men Baohui, Li Guojiao, Shen Yaoduo, et al. Spatial and temporal variation and coordination of land use and carbon stocks in the Luan River basin in recent 20 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(6):2042-2054.

[4] Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2003,34(2003):487-515.

[5] Kupfer J A, Franklin S B. Linking spatial pattern and ecological responses in human-modified landscapes: The effects of deforestation and forest fragmentation on biodiversity [J]. Geography Compass, 2009, 3(4): 1331-1355.

[6] Upadhaya S, Dwivedi P. Conversion of forestlands to blueberries: Assessing implications for habitat quality in Alabaha River watershed in southeastern Georgia, United States [J]. Land Use Policy, 2019,89:104229.

[7] Wang Yafeng, Fu Bojie, Lü Yihe, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China [J]. Catena, 2011,85(1):58-66.

[8] 周正,刘哲,赵进勇,等.破碎化背景下滹沱河流域碳储量与生境质量的时空演变特征及交互效应[J/OL].(2026-09-22).水利水电技术(中英文),2025:1-16. https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250919.1624.002.
Zhou Zheng, Liu Zhe, Zhao Jinyong, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and interaction effects of carbon storage and habitat quality in Hutuo River basin under fragmentation [J/OL]. (2026-09-22). Water Resources and Hydropower Engineering, 2025: 1-16. https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250919.1624.002.

[9] 郑世妍,刘小明,雷浩川,等.三江源地区多情景土地利用变化对碳储量与生境质量的影响[J].水土保持通报,2026,46(1):330-343.
Zheng Shiyan, Liu Xiaoming, Lei Haochuan, et al. Impacts of multi-scenario land use changes on carbon storage and habitat quality in Sanjiangyuan region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(1): 330-343.

[10] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making [J]. Ecological Economics, 2009,68(3):643-653.

[11] 赵雪岩,张鑫,孙媛.2005—2030年无定河流域土地利用变化对径流的影响[J].人民黄河,2023,45(3):24-31.
Zhao Xueyan, Zhang Xin, Sun Yuan. Effects of different land use changes on runoff in Wuding River basin in 2005—2030 period [J]. Yellow River, 2023,45(3):24-31.

[12] 王晓萌,党安荣,佟彪,等.无定河流域人居生态安全格局构建及优化策略[J].风景园林,2025,32(4):31-39.
Wang Xiaomeng, Dang Anrong, Tong Biao, et al. Strategies for construction and optimization of the ecological security pattern for human settlements in the Wuding River basin [J]. Landscape Architecture, 2025, 32(4):31-39.

[13] 吕博,陈力,杨柳,等.基于PLUS模型未来土地利用多情景模拟与景观生态风险分析:以无定河流域为例[J].水土保持研究,2025,32(6):361-369.
Lyu Bo, Chen Li, Yang Liu, et al. Multi-scenario simulation of future land use and landscape ecological risk analysis based on PLUS model: A case study of

Wuding River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(6):361-369.

[14] 罗舒元,朱清科,辛云玲,等.陕北吴起县植被覆盖度时空特征及其影响机制[J].中国水土保持科学,2020,18(3):146-154.
Luo Shuyuan, Zhu Qingke, Xin Yunling, et al. Spatio-temporal characteristics of vegetation coverage and its influencing mechanism in Wuqi County, northern Shaanxi Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(3):146-154.

[15] Dai Xiaoai, Li Danlan, Zheng Yumeng, et al. Analysis of spatiotemporal changes and driving factors of green and blue carbon stocks in Zhangzhou City based on PLUS and InVEST models [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,528:146743.

[16] 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, 2021,85:101569.

[17] 张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合InVEST与GeoSOS-FLUS模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J].中国环境科学,2022,42(6):2799-2809.
Zhang Kaiqi, Chen Jianjun, Hou Jiankun, et al. Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with in VEST and GeoSOS-FLUS model [J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2799-2809.

[18] Zhang Jinxia, Liu Zhao, Guan Zilong, et al. Balancing future urban development and carbon sequestration: A multi-scenario InVEST model analysis of China's urban clusters [J]. Journal of Environmental Management, 2025,380:125003.

[19] 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 Shi, Huang Yinlan, Jin Yunxiang. 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.

[20] 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,2019,4(1):86-92.
Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. China Scientific Data, 2019,4(1):86-92.

[21] 刘康,张寒,张道军,等.黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素:基于PLUS-InVEST-Geodector模型的研究[J].中国环境科学,2025,45(4):2159-2170.
Liu Kang, Zhang Han, Zhang Daojun, et al. Scenario simulation and driving factors of ecosystem carbon storage in the Loess Plateau: A study based on the PLUS-InVEST-Geodector model [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2159-2170.

[22] 张小瑜,周自翔,唐志雄,等.无定河流域生境质量时空变化及预测[J].中国沙漠,2024,44(3):75-84.
Zhang Xiaoyu, Zhou Zixiang, Tang Zhixiong, et al. Spatio-temporal variation and prediction of habitat quality in Wuding River basin [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(3):75-84.

[23] Liang Xiaoyu, Xin Zhongbao, Zhang Zhiqiang. Trade-offs between soil water storage and carbon sequestration: Differences between natural secondary forests and plantation forests on the Loess Plateau [J]. Ecological Engineering, 2025,221:107779.

[24] 温昕,王继军,韩晓佳.基于地理分区的陕北黄土高原生态系统服务权衡/协同的尺度效应研究[J].水土保持研究,2025,32(1):305-315.
Wen Xin, Wang Jijun, Han Xiaojia. Scale effects of ecosystem service trade-offs/synergies in the Loess Plateau of northern Shaanxi based on geographical regions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(1):305-315.

[25] Tscharntke T, Klein A M, Kruess A, et al. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management [J]. Ecology Letters, 2005,8(8):857-874.

[26] 蔡健旋,赵德强,吴宇,等.农田深层土壤有机碳的固持机制与调控策略[J].土壤通报,2025,56(6):1782-1791.
Cai Jianxuan, Zhao Deqiang, Wu Yu, et al. Mechanisms and regulation strategies for the deep soil organic carbon sequestration in agricultural ecosystems [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025,56(6):1782-1791.

[27] Lal R, Smith P, Jungkunst H F, et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,73(6):145A-152A.

[28] 刘雅琳,王晓,石梓力,等.黄河流域生态系统服务时空变化特征及其多尺度权衡协同关系[J/OL].(2025-10-14).环境科学,2025:1-20. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202507276.
Liu Yalin, Wang Xiao, Shi Zili, et al. Characterization of spatial and temporal changes of ecosystem services in the Yellow River basin and their synergistic relationship with multi-scale trade-offs [J/OL]. (2025-10-14). Environmental Science, 2025:1-20. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202507276.