基于气候修正与模型集成的农牧交错带碳储量时空动态及多情景模拟

金 婧[1,2], 王明新[1,2], 武永涛[3], 张 晶[1,2], 廖梓龙[1,2], 邓腾林[1,2]
(1.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特市 010020;
2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3.内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特市 010000)

摘 要: [目的]揭示农牧交错带碳储量动态变化及未来发展趋势,为区域实现“双碳”目标和国土空间规划提供理论和实践指导。[方法]以内蒙古自治区塔布农牧交错带为对象,引入降水和气温因子对碳密度进行年际动态修正,基于2000—2025年时间序列的土地利用、气候环境与社会经济数据,集成应用PLUS-InVEST-OPGD模型,揭示碳储量时空动态变化与驱动因子,并模拟2030年多种情景下的碳汇格局。[结果]①2000—2025年研究区多年平均碳储量为8.34×10^8 t,呈波动增加趋势〔$p>0.05$,变异系数(C_v)=0.13〕;空间上呈稳定的南高北低梯度;中、低覆盖度草地与农田贡献碳储量总量的82.8%;②土地利用类型〔解释力(q)=1.00〕和植被指数(EVI)(q=0.52)为核心驱动因子,GDP与人类足迹解释力持续增强,因子之间普遍呈双因子增强交互效应;③基于历史发展趋势,2030年惯性发展、社会经济发展、“三生”协同发展情景碳储量较基准年(2022年)分别增加1.02×10^8,1.22×10^8 t和1.53×10^8 t。[结论]中、低覆盖度草地和农田是农牧交错带的主要碳库,区域碳储量空间分异是多维因素耦合的结果,且人类活动的影响持续增强。“三生”协同发展情景更符合农牧交错带生态屏障功能与农牧产品供给的双重需求。

关键词: 碳储量; PLUS-InVEST-OPGD模型; 气候修正; 情景模拟; 塔布农牧交错带
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0348-16 **中图分类号:** X171.1

文献参数: 金婧, 王明新, 武永涛, 等.基于气候修正与模型集成的农牧交错带碳储量时空动态及多情景模拟[J].水土保持通报,2026,46(5):348-363. Jin Jing, Wang Mingxin, Wu Yongtao, et al. Carbon storage spatiotemporal dynamics and multi-scenario simulation in agropastoral ecotones based on climate correction and model integration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):348-363.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.010 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.010**

Carbon storage spatiotemporal dynamics and multi-scenario simulation in agropastoral ecotones based on climate correction and model integration

Jin Jing[1,2], Wang Mingxin[1,2], Wu Yongtao[3], Zhang Jing[1,2], Liao Zilong[1,2], Deng Tenglin[1,2]
(1.*Institute of Pastoral Hydraulic Research, Ministry of Water Resources of China, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*;
2.*Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 3.*Geological Survey of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia* 010000, *China*)

Abstract: [Objective] The dynamics and future development trends of carbon storage (CS) in agropastoral ecotones were revealed in order to provide theoretical and practical significance for achieving regional “dual carbon” goals and optimizing territorial spatial planning. [Methods] Taking the Tabu agropastoral ecotone in Inner Mongolia Autonomous Region as the study area, precipitation and temperature factors were introduced to correct carbon density on an interannual basis. Based on long time-series land use and land cover (LULC), climatic, and socio-economic data from 2000 to 2025, the spatiotemporal dynamics and driving factors of CS were analyzed by integrating the framework of PLUS-InVEST-OPGD model, and its spatial patterns under multiple scenarios in

收稿日期:2025-12-29 **修回日期:**2026-04-07 **采用日期:**2026-04-08
资助项目:内蒙古科技计划项目“‘三北’工程建设区植物多样性监测与持水-固碳功能评价技术研究”(2025YFHH0185);内蒙古自然科学基金项目(2025MS05130);国家自然科学基金项目(52179019)
第一作者:金婧(1988—),女(汉族),甘肃省兰州市人,硕士,高级工程师,主要从事生态水文,生态系统服务评估等方面的研究。Email:jinjing@iwhr.com。

2030 were simulated. [Results] ① From 2000 to 2025, the multi-year average CS in the study area was 8.34×10^8 t, exhibiting a fluctuating increasing trend ($p>0.05$, $C_v=0.13$). Spatially, CS presented a stable gradient characterized by higher levels in the south and lower levels in the north. Medium- and low-vegetation-coverage grasslands and farmland contributed 82.8% of the total CS. ② LULC ($q=1.00$) and the enhanced vegetation index (EVI, $q=0.52$) were the key driving factors, while the explanatory power of GDP and human footprint increased over time. Interactions among factors generally showed bivariate enhancement effects. ③ Based on historical development trends, CS under inertial development, socio-economic development, and production-living-ecology coordinated development scenarios in 2030 increased by 1.02×10^8, 1.22×10^8 t and 1.53×10^8 t compared with the base year (2022). [Conclusion] Medium- and low-vegetation-coverage grasslands and farmland are the primary carbon pools in the agropastoral ecotone. The spatial differentiation of regional CS results from the coupling of multi-dimensional factors, with the influence of human activities continuously strengthening. The production-living-ecology coordinated development scenario better satisfies the dual demands of maintaining ecological barrier functions and ensuring the supply of agricultural and livestock products in agropastoral ecotones.

Keywords: carbon storage; PLUS-InVEST-OPGD model; climate correction; scenario simulation; Tabu agropastoral ecotone

在全球气候变化背景下,碳捕集与封存对调控全球碳循环具有关键作用[1]。中国北部干旱半干旱区广泛分布着农牧交错带,其中内蒙古农牧交错带面积比例最大,约占61.4%。这些区域以草地和农田为主要土地利用类型,在生态系统服务功能和农牧产品供给方面发挥着重要作用[2]。在自然条件和人类活动共同影响下,农牧交错带草地退化较为普遍,土地利用类型频繁转换,显著影响区域碳平衡[3]。因此,聚焦农牧交错带,定量评估碳储量时空动态特征及其驱动机制,科学预测未来情景下碳储量空间格局,对助力实现“双碳”目标和优化国土空间格局具有重要的理论价值和现实意义[2,4]。

目前,众多学者已从不同尺度对碳储量开展了相关研究。田稼穑等[5]基于2023年的样方尺度实地调查结果,揭示了内蒙古乌兰察布市不同类型草原的碳储量特征。魏熙乐等[6]以省域为单位,揭示了四川省碳储量变化趋势及其驱动因子。党若源等[7]以北京市自然保护区为对象,以5 a为间隔分析了区域碳储量变化特征,证实碳储量的提升主要得益于保护区面积扩大和植被盖度提升。张熔轩[8]基于InVEST模型对内蒙古巴彦淖尔市碳储量时空变化进行了分析,发现2015—2021年耕地和草地面积增加明显,碳储量增加9.76×10^7 t。InVEST模型与土地利用预测模型(FLUS,PLUS等)的结合应用是国内外较为成熟的研究范式,通过设置惯性发展、耕地保护、生态保护和城市发展等典型情景,可实现多种情景下碳储量格局的预测分析[9-11]。总体来看,现有研究在碳储量时空格局、驱动机制及未来情景模拟等方面取得了显著进展[1],研究方法亦从实地调查逐步拓展至生态系统模型等多种手段[4-5,10]。然而,仍存在一些局限:多数研究更关注若干时间节点的变化,对历史—现状—未来全时间尺度的碳储量动态变化刻画不足;碳密度数据多采用固定值输入[6,8-9],忽略了气候等因素对其的影响,制约碳储量估算精度;针对农牧交错带这类特殊区域的碳储量研究较为匮乏[2,11],且现有情景设置多以单一发展目标为导向,难以适应区域多目标发展的现实需求[3,5]。

内蒙古塔布农牧交错带地处中国北疆生态屏障和黄河“几字弯”治理关键区。在退耕退牧还草、“三北”工程六期建设等一系列生态工程持续推进的背景下,区域碳储量时空格局动态演化,且深刻影响着生态系统稳定。针对当前研究存在的不足,本研究以塔布农牧交错带为对象,以2000—2030年为时间跨度,实现“历史—现状—未来”全时间尺度碳储量时空动态分析;引入降水、气温因子对碳密度进行年际动态修正,突破静态参数限制;设定惯性发展、社会经济发展、“三生”协同发展3种情景,模拟预测2030年碳储量空间格局。成果可为提升农牧交错带碳汇能力、优化“三生”国土空间布局提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古中部,地跨东经110°33′—112°10′,北纬41°2′—42°51′,总面积10 370.68 km^2,涉及呼和浩特市武川县、乌兰察布市四子王旗、包头市达尔罕茂明安联合旗和固阳县。地势南高北低,最大高差可达1 218 m。沿地势梯度,由南向北依次呈现低山丘陵向冲洪积和冲湖积平原过渡,农区向牧区过渡,典型草原向荒漠草原过渡的复合地理-生态格局[12]。土壤以淡栗钙土、棕钙土为主,质地粗

糙，土层浅薄，风蚀沙化较为突出。研究区属温带干旱半干旱大陆性气候，根据资源环境科学数据平台气象数据统计[13]，多年平均年降水量为244.46 mm，降水自南部的386 mm向北递减至155 mm；多年平均气温为4.75 ℃，年均气温由南部的0.51 ℃向北升高至6.42 ℃。

1.2 数据来源与处理

本次碳储量估算采用3类基础数据：①土地利用/覆被（LULC）数据，依据《土地利用现状分类（GB/T 21010—2017）》[14]和《草原术语及分类（LY/T 3370—2024）》[15]，结合农牧交错带特殊的生态梯度特征，将研究区土地利用类型划分为8类：农田、林地、低覆盖度草地（FVC＜0.4）、中覆盖度草地（0.4≤FVC＜0.6）、高覆盖度草地（FVC≥0.6）、水域、建设用地和裸地；②碳密度数据，包括地上/地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳密度，本次碳密度基于中国碳密度数据[16-17]经气候修正得到，并与邻近区域碳密度数据对比验证后应用[5,10,18-23]；③驱动因子数据，依据自然与人为因素并重、数据可量化的原则[6,11,17]，选取年降水量、年蒸发量、年均气温、高程、坡度、土壤质地与河流距离、人口、GDP与人类足迹作为驱动因子（表1）。

表1 数据来源和预处理

Table 1 Data sources and preprocessing

数据	空间分辨率	数据来源
土地利用与土地覆盖（LULC，2000—2025年）	30 m	Earth System Science Data（https://essd.copernicus.org/articles/13/3907/2021/）
增强型植被指数（EVI，2000—2025年）	250 m	Earth data（https://search.earthdata.nasa.gov/）
植被覆盖度（FVC，2000—2025年）	250 m	基于EVI数据采用像元二分法计算所得[24]
年降水量（mm）、年蒸发量（mm）、年均气温（℃）、人口（人/km²）、国内生产总值（GDP，万元/km²）	1 km	资源环境科学数据平台（https://www.resdc.cn/Default.aspx）
高程	30 m	地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/home）
坡度	30 m	基于DEM数据，利用ArcGIS软件中的slope工具提取
土壤数据	1∶100万	Harmonized World Soil Database version（HWSD）（https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12）
与河流的距离	1∶100万	National catalogue service for geographic information（https://www.webmap.cn/main.do method=index），然后利用欧式距离计算[25]
人类足迹	1 km	Figshare repository（https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16571064）

为满足InVEST和PLUS模型数据构建要求，参照相关研究的处理方法[9,11,26]，将所有栅格数据通过投影转换，掩膜提取和重采样后，均统一至WGS_1984_Albers坐标系和30 m空间分辨率。气候与社会经济等栅格数据主要用于PLUS预测模型和OPGD驱动分析，重采样后仍能反映整体变化规律，对LULC和碳密度驱动规律的识别影响较小[11,19]。

1.3 碳储量估算及碳密度动态修正

InVEST模型是由Natural Capital Project开发的生态系统服务评估工具，属于空间显式模型，支持多尺度应用，已被成功应用于区域尺度（如8 600 km²长株潭城市群[26]，1 500 km²的黄骅市[27]）。本研究属区域尺度，采用InVEST模型Carbon模块对2000—2025年碳储量进行估算，计算公式[7,19-20]为

$$C_{\text{total}}=\sum_{i=1}^{n}A_i\times\left(C_{i,\text{above}}+C_{i,\text{below}}+C_{i,\text{soil}}+C_{i,\text{dead}}\right) \quad (1)$$

式中：C_{total}为区域总碳储量；A_i为第i类土地利用地类的面积；$C_{i,\text{above}}$，$C_{i,\text{below}}$，$C_{i,\text{soil}}$，$C_{i,\text{dead}}$分别为第i类地类的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机碳密度，碳密度单位均为t/hm²。鉴于水域碳密度极低（＜0.1 t/hm²）且不涉及土壤碳库，本次研究不对水域碳储量进行估算。

碳密度是准确评估碳储量的关键。已有研究[7,19]表明，生物碳密度和土壤碳密度与降水、气温存在显著相关性。为提升碳储量估算精度，本研究以中国碳密度参数为基础[16-17]，采用Alam[28]和陈光水等[29]的研究方法，利用2000—2025年逐年降水和气温数据，对生物碳密度和土壤碳密度进行年际动态修正，计算公式为

$$C_{\text{SP}}=3.396\,8\times\text{MAP}+3\,996.1 \quad (2)$$

$$C_{\text{BP}}=6.795\times e^{0.005\,4\times\text{MAP}} \quad (3)$$

$$C_{\text{BT}}=28\times\text{MAT}+398 \quad (4)$$

$$K_{\text{BP}}=C'_{\text{BP}}/C''_{\text{BP}} \quad (5)$$

$$K_{\text{BT}}=C'_{\text{BT}}/C''_{\text{BT}} \quad (6)$$

$$K_B = K_{BP} \cdot K_{BT} \quad (7)$$

$$K_S = C'_{SP}/C''_{SP} \quad (8)$$

式中:C_{SP}为经年均降水量修正后的土壤碳密度;C_{BP},C_{BT}为经年降水量和年均温修正后的生物碳密度;MAP为年均降水量(mm);MAT为年均温(℃);K_{BP},K_{BT}分别为根据年降水量和年均温修正的碳密度修正系数(无量纲);C'_{SP},C'_{BT}分别为研究区根据年降水量和年均温得到的生物碳密度数据;C''_{SP},C''_{BT}为全国尺度根据年降水量和年均温得到的生物碳密度数据;K_B为生物碳密度修正系数(无量纲);K_S为土壤碳密度修正系数(无量纲);C'_{SP},C''_{SP}为研究区及全国对应的碳密度数据。

经修正后,研究区2000—2025年不同地类碳密度详见表2。修正后碳密度均值与邻近区域(呼和浩特市[18-19]、包头市[20]、鄂尔多斯市[4]及巴彦淖尔市[8]等)碳密度均值较为接近(表3),表明修正结果具有较好的区域一致性。此外,2010s中国陆地生态系统碳密度数据集中包括研究区邻近区域草地碳密度实测数据[16],草地实测地下碳密度均值为9.0 t/hm^2,与本次修正结果(9.7 t/hm^2)接近,进一步说明修正后碳密度数据的可靠性。

表2　基于气候修正的研究区2000—2025年各地类碳密度

Table 2　Carbon density of different land use types based on climate correction in study area from 2000 to 2025

年份	年降水量/mm		年均气温/℃		地类碳密度/(t·hm^{-2})											
					耕地				林地				低覆盖度草地			
	全国	研究区	全国	研究区	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
2000	596.5	195.4	6.8	4.0	1.7	8.0	81.0	1.1	4.2	6.3	107.6	1.2	2.2	5.5	47.7	0.4
2001	571.0	182.4	7.1	4.5	1.8	8.7	81.4	1.1	4.6	6.8	108.2	1.2	2.4	5.9	47.9	0.4
2002	626.0	234.3	7.4	5.0	1.8	8.7	82.1	1.1	4.6	6.8	109.1	1.2	2.4	5.9	48.3	0.4
2003	594.9	329.5	7.1	3.9	3.5	16.4	90.1	1.1	8.6	12.9	119.7	1.2	4.6	11.2	53.1	0.4
2004	565.9	249.6	7.3	4.9	2.7	13.0	86.3	1.1	6.8	10.2	114.6	1.2	3.6	8.9	50.8	0.4
2005	595.7	147.3	7.0	4.2	1.3	6.2	77.8	1.1	3.3	4.9	103.3	1.2	1.7	4.2	45.8	0.4
2006	572.7	214.0	7.5	5.0	2.2	10.3	83.5	1.1	5.4	8.1	110.9	1.2	2.9	7.0	49.2	0.4
2007	575.3	189.2	7.7	5.9	1.9	9.2	81.6	1.1	4.8	7.2	108.5	1.2	2.6	6.3	48.1	0.4
2008	613.5	273.2	7.2	4.8	2.4	11.4	85.3	1.1	6.0	9.0	113.4	1.2	3.2	7.8	50.2	0.4
2009	553.7	164.6	7.3	4.6	1.8	8.6	81.1	1.1	4.5	6.8	107.7	1.2	2.4	5.9	47.7	0.4
2010	638.7	260.3	7.1	3.9	1.9	8.9	83.2	1.1	4.7	7.0	110.5	1.2	2.5	6.1	49.0	0.4
2011	530.5	170.0	6.9	4.1	2.1	10.0	82.7	1.1	5.3	7.9	109.9	1.2	2.8	6.8	48.7	0.4
2012	639.8	304.9	6.6	3.4	2.3	11.1	86.0	1.1	5.9	8.8	114.3	1.2	3.1	7.6	50.7	0.4
2013	614.8	251.0	7.3	4.5	2.1	9.8	83.8	1.1	5.2	7.7	111.3	1.2	2.7	6.7	49.3	0.4
2014	583.8	204.9	7.2	5.3	2.0	9.5	82.3	1.1	5.0	7.5	109.3	1.2	2.6	6.5	48.4	0.4
2015	623.4	225.6	7.5	5.1	1.8	8.4	81.7	1.1	4.4	6.6	108.5	1.2	2.3	5.7	48.1	0.4
2016	673.7	313.9	7.5	4.5	2.1	10.0	84.9	1.1	5.2	7.9	112.8	1.2	2.8	6.8	50.0	0.4
2017	614.1	173.1	7.6	5.4	1.4	6.7	78.6	1.1	3.5	5.3	104.5	1.2	1.9	4.6	46.3	0.4
2018	633.0	291.5	7.3	4.8	2.4	11.3	85.5	1.1	5.9	8.9	113.6	1.2	3.1	7.7	50.3	0.4
2019	608.7	291.7	7.6	5.0	2.7	12.9	86.8	1.1	6.8	10.1	115.3	1.2	3.6	8.8	51.1	0.4
2020	636.1	318.2	7.5	4.7	2.7	12.6	87.1	1.1	6.6	9.9	115.7	1.2	3.5	8.6	51.3	0.4
2021	647.9	278.1	7.7	5.2	2.0	9.7	83.9	1.1	5.1	7.6	111.4	1.2	2.7	6.6	49.4	0.4
2022	597.4	201.1	7.6	4.8	1.7	8.2	81.3	1.1	4.3	6.5	108.1	1.2	2.3	5.6	47.9	0.4
2023	605.1	187.2	7.9	5.3	1.6	7.5	80.0	1.1	3.9	5.9	106.3	1.2	2.1	5.1	47.1	0.4
2024	654.3	335.4	8.1	5.5	2.7	12.8	87.3	1.1	6.7	10.1	116.0	1.2	3.6	8.7	51.4	0.4
2025	668.0	363.0	11.0	5.3	2.5	12.1	88.3	1.1	6.3	9.5	117.4	1.2	3.4	8.2	52.0	0.4
均值	609.0	244.2	7.5	4.8	2.1	10.1	83.6	1.1	5.3	7.9	111.1	1.2	2.8	6.9	49.2	0.4
模拟期平均水平					2.2	10.5	84.7	0.0	5.5	8.2	112.5	0.0	2.9	7.1	49.8	0.4

续表2 （Continued table 2）

年份	地类碳密度/(t·hm^{-2})															
	中覆盖度草地				高覆盖度草地				裸地				建设用地			
	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
2000	3.5	8.6	74.9	0.6	3.8	9.2	80.0	0.7	0.1	0.0	16.2	0.0	0.2	1.6	58.5	0.0
2001	3.8	9.3	75.3	0.6	4.1	9.9	80.4	0.7	0.1	0.0	16.3	0.0	0.3	1.7	58.8	0.0
2002	3.8	9.3	75.9	0.6	4.0	9.9	81.1	0.7	0.1	0.0	16.4	0.0	0.3	1.7	59.3	0.0
2003	7.2	17.6	83.4	0.6	7.7	18.8	89.0	0.7	0.3	0.0	18.0	0.0	0.5	3.3	65.1	0.0
2004	5.7	13.9	79.8	0.6	6.1	14.8	85.2	0.7	0.2	0.0	17.3	0.0	0.4	2.6	62.3	0.0
2005	2.7	6.7	71.9	0.6	2.9	7.1	76.8	0.7	0.1	0.0	15.6	0.0	0.2	1.2	56.2	0.0
2006	4.5	11.0	77.2	0.6	4.8	11.8	82.4	0.7	0.2	0.0	16.7	0.0	0.3	2.1	60.3	0.0
2007	4.0	9.8	75.5	0.6	4.3	10.5	80.6	0.7	0.1	0.0	16.3	0.0	0.3	1.8	59.0	0.0
2008	5.0	12.2	78.9	0.6	5.3	13.1	84.3	0.7	0.2	0.0	17.1	0.0	0.4	2.3	61.6	0.0
2009	3.8	9.2	75.0	0.6	4.0	9.9	80.1	0.7	0.1	0.0	16.2	0.0	0.3	1.7	58.6	0.0
2010	3.9	9.6	76.9	0.6	4.2	10.2	82.1	0.7	0.1	0.0	16.6	0.0	0.3	1.8	60.1	0.0
2011	4.4	10.7	76.5	0.6	4.7	11.5	81.7	0.7	0.2	0.0	16.5	0.0	0.3	2.0	59.7	0.0
2012	4.9	11.9	79.6	0.6	5.2	12.7	85.0	0.7	0.2	0.0	17.2	0.0	0.3	2.2	62.1	0.0
2013	4.3	10.5	77.5	0.6	4.6	11.3	82.7	0.7	0.2	0.0	16.8	0.0	0.3	2.0	60.5	0.0
2014	4.2	10.2	76.1	0.6	4.4	10.9	81.3	0.7	0.2	0.0	16.5	0.0	0.3	1.9	59.4	0.0
2015	3.7	9.0	75.5	0.6	3.9	9.6	80.6	0.7	0.1	0.0	16.3	0.0	0.3	1.7	59.0	0.0
2016	4.4	10.7	78.5	0.6	4.7	11.4	83.8	0.7	0.2	0.0	17.0	0.0	0.3	2.0	61.3	0.0
2017	2.9	7.2	72.7	0.6	3.1	7.7	77.6	0.7	0.1	0.0	15.7	0.0	0.2	1.3	56.8	0.0
2018	4.9	12.1	79.1	0.6	5.3	12.9	84.5	0.7	0.2	0.0	17.1	0.0	0.3	2.3	61.8	0.0
2019	5.6	13.8	80.3	0.6	6.0	14.7	85.7	0.7	0.2	0.0	17.4	0.0	0.4	2.6	62.7	0.0
2020	5.5	13.5	80.6	0.6	5.9	14.4	86.0	0.7	0.2	0.0	17.4	0.0	0.4	2.5	62.9	0.0
2021	4.2	10.4	77.6	0.6	4.5	11.1	82.8	0.7	0.2	0.0	16.8	0.0	0.3	1.9	60.6	0.0
2022	3.6	8.8	75.2	0.6	3.9	9.4	80.3	0.7	0.1	0.0	16.3	0.0	0.3	1.7	58.7	0.0
2023	3.3	8.0	74.0	0.6	3.5	8.5	79.0	0.7	0.1	0.0	16.0	0.0	0.2	1.5	57.8	0.0
2024	5.6	13.7	80.7	0.6	6.0	14.6	86.2	0.7	0.2	0.0	17.5	0.0	0.4	2.6	63.0	0.0
2025	5.3	12.9	81.7	0.6	5.6	13.8	87.2	0.7	0.2	0.0	17.7	0.0	0.4	2.4	63.8	0.0
均值	4.4	10.8	77.3	0.6	4.7	11.5	82.6	0.7	0.2	0.0	16.7	0.0	0.3	2.0	60.4	0.0
模拟期平均水平	4.6	11.2	78.3	0.6	4.9	12.0	83.6	0.7	0.2	0.0	16.9	0.0	0.3	2.1	61.1	0.0

InVEST模型Carbon模块以LULC数据和碳密度参数为输入，其中LULC由武汉大学黄昕老师团队制作，总体准确率达80%[30]；而修正后的碳密度参数可靠性较高。综上所述，模型所需的两项关键数据均满足碳储量估算要求，模型精度取决于LULC栅格空间分辨率（30 m）。

根据InVEST模型开发团队官方技术建议，采用极值区间法对区域碳储量评估结果进行不确定性分析[31]。以本次碳储结果为基础值，提取2000—2025年各地类碳密度的最大值和最小值分别运行模型，得到高碳结果和低碳结果，按下式计算变异范围（M），将30%作为不确定性评估的基准幅度[32]。

$$M=\left(C_{高碳}-C_{低碳}\right)\Big/C_{基准}\times 100\% \tag{9}$$

1.4 时空变化趋势识别

（1）变异系数（C_v）稳定性分析方法。用于评估时序数据的波动程度。C_v值越大，表明序列波动性越大；当$C_v>0.3$，可认为数据呈现强烈变异，波动显著[33]。

$$C_v=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2/n}\Big/\bar{x}\times 100\% \tag{10}$$

式中：$\bar{x}$为时序数据均值；n为时序年数；x_i为第i年的空间栅格值。

（2）Sen+MK趋势分析法。该方法稳健性强，用于长时间序列栅格数据的趋势分析。通过计算Sen斜率β与MK统计量Z，依据预设阈值判断变化趋势的方向及显著性（表4）[34]。

表 3　邻近地区碳密度数据统计及与本次修正碳密度的对比验证

Table 3　Carbon density statistics in adjacent regions and comparison with modified carbon density data of this study

单位:t/hm²

地类	中国碳密度数据[16−17]				呼和浩特[18]				呼和浩特[19]				包头市[20]			
	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	17.0	80.7	108	0.0	0.80	11.4	65.8	1.0	1.4	20.4	147.5	0.0	2.7	0.4	88.5	0.0
林地	42.4	63.6	143.5	0.0	2.90	2.0	25.8	0.6	0.6	0.4	27.8	0.0	5.0	4.0	80.5	0.0
草地	35.3	86.5	99.9	0.0	0.70	6.9	81.2	1.8	8.9	21.9	136.0	0.0	1.4	3.4	96.3	0.0
裸地	1.3	0.0	21.6	0.0	0.20	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	106.2	0.0	9.1	14.2	22.6	0.0
建设用地	2.5	16.15	78.0	0.0	0.56	0.0	0.0	0.0	1.6	7.4	24.1	0.0	1.92	4.8	70.4	0.0
地区	巴彦淖尔市[8]				鄂尔多斯市[4]				锡林郭勒盟[21]				黄河流域内蒙古段(含研究区)[22]			
地类	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	1.4	6.40	81.2	0.0	3.4	17.5	47.0	6.3	4.50	23.5	31.5	2.8	4.50	23.5	31.5	2.8
林地	3.4	9.20	118.9	0.0	6.1	29.0	67.4	5.6	12.30	33.7	46.1	4.1	12.30	33.7	46.1	4.1
草地	2.8	6.90	74.79	0.0	2.3	19.7	48.6	1.7	10.30	25.1	29.0	2.2	10.30	25.1	29.0	2.2
裸地	0.1	0.00	16.17	0.0	1.6	7.4	24.0	0.0	0.40	0.0	6.3	0.0	0.40	0.0	6.3	0.0
建设用地	0.2	2.18	0.0	0.0	1.9	2.4	6.8	0.0	0.03	0.0	0.0	0.0	0.03	0.0	0	0.0
地区	黄河流域内蒙古段(含研究区)[10]				内蒙古[23]				邻近区域碳密度均值				本次修正的碳密度数据均值			
地类	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	2.6	3.6	80.4	0.0	0.20	1.6	8.2	0.0	2.1	10.8	58.2	1.30	2.10	10.1	83.60	1.1
林地	5.7	3.8	73.9	0.0	0.80	2.3	19.6	0.0	4.9	11.8	50.6	1.43	5.29	7.9	111.10	1.2
草地	0.8	5.1	86.1	0.0	0.20	1.5	8.4	0.0	3.8	11.6	58.9	0.79	3.97	9.7	69.70	0.6
裸地	0.5	0.9	38.6	0.0	0.02	0.0	2.7	0.0	1.3	2.3	22.3	0.0	0.20	0.0	16.72	0.0
建设用地	0.0	0.0	35.2	0.0	0.04	0.0	0.0	0.0	0.6	1.7	19.5	0.0	0.30	2.0	60.40	0.0

注:内蒙古地区草地碳密度未按不同覆盖度进行区分,因此将本次不同覆盖度草地碳密度取均值后进行对比。

表 4　碳储量变化趋势特征判别标准

Table 4　Criteria for judging variation trends in carbon storage

β(Theil−Sen Median法)	Z值(M-K趋势检验法)	趋势
$\beta>0$	$2.58<\|Z\|$	极显著增加
	$1.96<\|Z\|\leqslant 2.58$	显著增加
	$\|Z\|\leqslant 1.96$	不显著增加
$\beta=0$	—	无变化
$\beta<0$	$2.58<\|Z\|$	极显著减少
	$1.96<\|Z\|\leqslant 2.58$	显著减少
	$\|Z\|\leqslant 1.96$	不显著减少

1.5　最优参数地理探测器

本研究以 5 a 为间隔,借助 R 语言采用最优参数地理探测器(OPGD 法),量化分析 2000—2025 年驱动因子对碳储量变化的影响[25]。选取 12 个潜在驱动因子,包括 8 项自然因子(年降水量、年蒸发量、年均气温、EVI、高程、坡度、与河流距离、土壤质地)和 4 项人为因子(人口、GDP,LULC 和人类足迹)。

(1) 单因子驱动探测。通过统计参数 q 来衡量驱动因子 X 对碳储量 Y 空间分异的解释力,q 值范围为[0,1],值越大表明解释力越强,驱动作用越显著。

$$q=1-\sum_{h}^{L}N_h\sigma_h^2/N_h\sigma^2 \tag{11}$$

式中:L 表示因子分层数;N 为层 h 和全区的单元数;σ^2_h,σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差。

(2) 交互作用探测。用于识别任意两个驱动因子(X_1,X_2)之间的交互作用,通过对比单因子探测结果(q)和交互作用探测结果(q_i)进行判断,具体交互类型及判断准则详见表 5[25]。

表 5　基于 OPGD 的交互作用类型判别

Table 5　Judgement for interaction types based on OPGD

交互作用类型	判断准则
非线性增强	$q_i(X_1\cap X_2)>q_i(X_1)+q_i(X_2)$
独立	$q_i(X_1\cap X_2)=q_i(X_1)+q_i(X_2)$
双因子增强	$q_i(X_1\cap X_2)\geqslant \mathrm{Max}\{q_i(X_1),q_i(X_2)\}$
单因子减弱	$\min\{q_i(X_1),q_i(X_2)\}\leqslant q_i(X_1\cap X_2)<\max\{q_i(X_1),q_i(X_2)\}$
非线性减弱	$q_i(X_1\cap X_2)<\mathrm{Min}\{q_i(X_1),q_i(X_2)\}$

1.6　PLUS 模型及未来情景设定

PLUS 模型融合了土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子元胞自动机模型(CA),能够高效模

拟多地类的复杂转化过程[10,21-22]。本研究借助PLUS模型模拟预测未来多种情景下土地利用格局,进而评估未来碳储量的空间格局。LULC演化与地区5 a发展规划密切相关。本研究以近期(2020—2025年)LULC发展趋势作为模型输入基础,拟以2025年为基准期,2030年为模拟年份。情景模拟通常旨在反映常态气候下的未来趋势,而非重现极端年份的瞬时状态。然而,2025年为极丰水年(年降水量达363 mm,表6),丰沛降水导致当年中、高覆盖度草地面积显著扩张,难以代表未来多年平均降水条件下的LULC格局。因此,研究选取平水年(2022年)LULC为基准期LULC输入,结合农牧交错带生态保护、粮食供给及经济发展的多元需求,设定以下3种2030年发展情景:

表6 研究区丰枯水年降水量P_a

Table 6 Annual precipitation (P_a) in wet and dry years in study area 单位:mm

多年平均年降水量	极丰水年(P_0=10%)	丰水年(P_0=25%)	平水年(P_0=50%)	枯水年(P_0=75%)	极枯水年(P_0=90%)
244.46	325.32	282.45	239.39	200.95	170.13

注:P_a为年降水量;P_0为降水设计频率。

(1)惯性发展情景。延续2020—2025年历史土地利用发展趋势,不对转换概率进行额外设定。

(2)社会经济发展情景。优先保证城镇经济发展需求,以建设用地面积快速增加为主要表征。2020—2025年研究区建设用地面积由17.49 km^{2}增加至25.43 km^2,增幅45.4%;依据地区2035年社会经济发展远景规划和国土空间总体规划,区域城镇化率将达到72%~89%,表明2025—2030年仍处于城镇化快速发展阶段。基于上述历史趋势与规划目标,将林地、草地等向建设用地的转移概率增加45%;同时,为保障粮食安全,禁止永久性农田和优质农田的转出。

(3)"三生"协同发展情景。统筹协调生态保护、生活空间扩张和农牧业生产平衡。研究区处于"三北"六期工程黄河"几字弯"攻坚区中阴山北麓(河套平原)生态综合治理项目区,依据"三北"工程六期规划阶段发展计划、自治区农田灌溉发展规划(2021—2030年)及永久基本农田和生态保护红线保护等要求,设定:较低覆盖度草地向较高覆盖度草地、裸地向林地的转化概率增加10%;低、中覆盖度草地向农田转化概率增加10%,并限制高覆盖度草地的转出;适当提高其他地类向水体的转入概率,以增强区域水生态功能;建设用地转化概率延续历史发展趋势,保持适度增长。

基于转移概率确定2030年LULC目标值,借助PLUS模型的CA模块实现2030年多情景LULC模拟预测。在此基础上,以2030年LULC数据和近期(2020—2025年)碳密度均值(表2)为输入,估算2030年区域碳储量变化。

2 结果与分析

2.1 LULC变化特征

研究区以草地和农田为主要地类(表7和图1)。2000—2025年期间,农田面积比例由19.8%降至16.5%,而草地面积比例由79.7%增加至82.9%,其中高覆盖度草地面积增加最为显著,其余地类面积比例不足1%。裸地和水域面积有所减少,建设用地和林地面积增加。草地与林地面积的扩大,在一定程度上反映了退耕还草等生态工程对土地利用结构的影响。从空间格局来看,农田、中高覆盖度草地和建设用地主要分布在研究区中部以南,低覆盖度草地、裸地则集中分布在北部地区,整体呈现由南向北的生态梯度特征,林地和水域零星分布。

表7 研究区2000—2025年地类面积

Table 7 Land use areas in study area from 2000 to 2025 单位:km^2

地类	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年
农田	2 056.22	1 937.85	1 759.57	2 060.67	1 525.73	1 714.21
林地	0.25	0.32	0.30	0.83	0.91	1.59
低覆盖度草地	4 512.97	6 163.95	6 634.19	5 910.76	2 088.56	2 095.04
中覆盖度草地	2 981.59	1 768.16	1 692.57	1 612.78	4 024.66	3 101.80
高覆盖度草地	769.17	472.54	239.09	727.06	2 674.37	3 406.15
水域	2.95	2.97	1.87	1.67	1.09	2.81
裸地	43.07	18.87	32.48	43.22	37.88	23.66
建设用地	4.47	6.03	10.62	13.69	17.49	25.43

研究区土地利用类型频繁转化。2000—2025年农田面积减少342.01 km^2,主要转出方向为高覆盖度草地和中覆盖度草地,分别占转出面积的73.52%和24.72%;空间上,农田减少区域以现有农田分布为基

底,呈碎片化缩减特征。同期,草地总面积增加339.26 km^2,主要是中、高覆盖度草地面积增加。其中,高覆盖度草地面积相较于2000年增加了3.43倍,主要源于农田和中覆盖度草地的转入,增加区域集中于降水条件较好的南部和东部地区;而中覆盖度草地增加区域主要分布在交错带中部地区。研究区草地广泛分布,其他用地(如建设用地)扩张以侵占草地范围为代价。

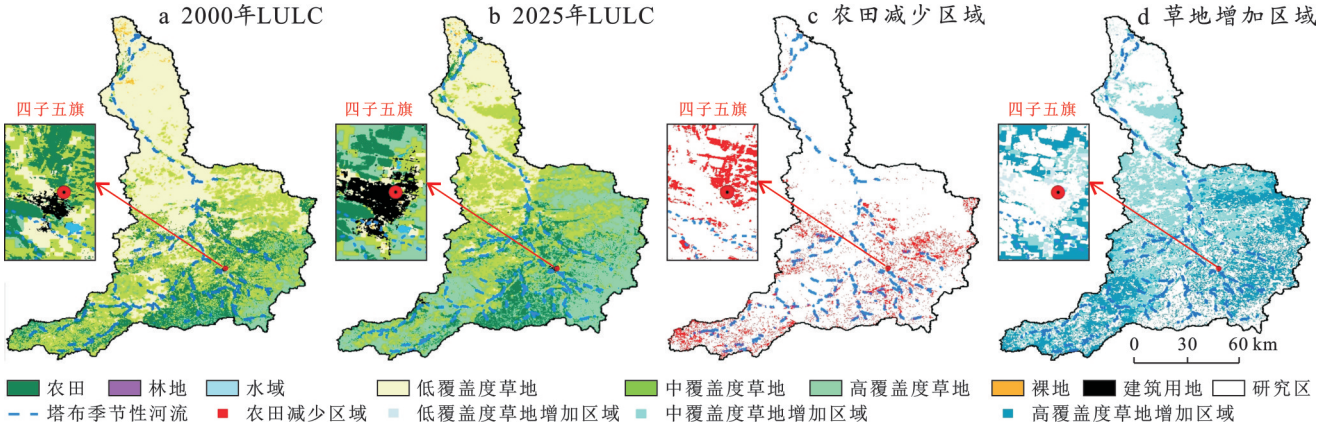


图 1　研究区 2000—2025 年土地利用与土地覆盖 LULC 空间格局及主要地类变化情况

Fig.1　Spatial patterns of land use and land cover (LULC) and increase in major land types in study area from 2000 to 2025

2.2　碳储量时空动态变化

基于InVEST模型,本研究估算了2000—2025年区域碳储量(图2)。极值区间法分析结果显示,变异范围M为27.98%,低于基准幅度(30%),表明基于InVEST模型碳储量估算结果具有较好的稳健性。由图2可知,2000—2025年研究区多年平均碳储量为8.34×10^8 t,呈波动增加趋势($p>0.05$,$C_v=0.13$),年均增速为4.26×10^6 t。其中,2005年碳储量最低(6.74×10^8 t),2019年最高(1.02×10^9 t),极差可达3.42×10^8 t,体现了农牧交错带生态敏感性的特征。各地类碳储量变化与其面积变化基本一致,农田、低覆盖度草地和裸地碳储量伴随面积减少而下降;林地碳储量自2012年起呈现阶段性显著增加;中、高覆盖度草地碳储量呈波动增加态势;建设用地碳储量呈稳定增加趋势。从贡献度来看,中覆盖度草地是区域碳储量的最大贡献者(31.6%),其次为低覆盖度草地(30.0%)和农田(21.2%);高覆盖度草地贡献较低(16.9%);裸地、林地和建设用地的贡献度则更为有限。变异系数C_v分析显示,区域碳储量年际波动较小(C_v为0.13),而中、高覆盖度草地、林地和建设用地碳储量波动显著(C_v远大于0.3)。

空间上,碳储量呈现明显的南高北低梯度特征(图3a—3f)。高值区集中分布于林地、农田及中、高覆盖度草地,低值区则主要分布在低覆盖度草地与裸地斑块。以单位面积碳储量来表征地类碳储能力(t/km^2),2000—2025年各地类平均碳储能力排序为:林地(12 548)>高覆盖度草地(9 952)>农田(9 692)>中覆盖度草地(9 317)>低覆盖度草地(5 925)>裸地(5 961)>建设用地(1 688)。受降水、气温等因素影响,区域碳储能力存在年际波动,2020年和2025年区域碳储能力较之前年份有所提升,以中南部地区提升最为显著(图3d—3e)。Sen+M-K趋势分析结果表明(图3g),2000—2025年研究区97.18%的区域碳储量增加,以不显著增加为主。其中,极显著增加和显著增加区域主要分布在近河岸带。结合前述LULC变化特征,2025年中、高覆盖度草地及林地等高碳储能力地类面积的扩张,是驱动中南部碳储量整体提升的主要原因。碳储量稳定区和减少区范围较小,多呈分散斑块分布。

2.3　多时期碳储量空间分异的驱动因子

基于OPGD单因子探测结果显示(图4a),各因子解释力(q均值)排序为:LULC(1.00)>EVI(0.52)>年蒸发量(0.44)>高程(0.38)>GDP(0.35)>年降水量(0.32)=人口(0.32)>年均气温(0.31)>人类足迹(0.24)>与河流距离(0.22)>土壤质地(0.10)>坡度(0.03)。由此可见,LULC是控制碳储量时空变化的决定性因子,EVI次之。GDP、人口的影响力超过自然本底因素(年降水量、年均气温、土壤质地等),反映出农牧交错带碳储量变化对人类活动的高度敏感性。从时间上看,2000—2025年年均气温、年蒸发量、高程、EVI、与河流距离、GDP及人类足迹的解释力增加,年降水量、坡度、土壤质地的解释力基本稳定,而人口因子的解释力有所下降。

从交互因子探测结果来看(图4b—4g),因子之间普遍存在双因子增强交互效应,其中以LULC,EVI与其他因子的交互作用最为突出。坡度的单因

子解释力弱(0.03),但在2005年和2010年坡度与多个因子间呈现出非线性增强交互效应,凸显了地形要素在碳循环过程中的潜在调制作用。类似地,人类足迹与其他因子之间亦多次表现出非线性增强交互效应。此外,河流距离与土壤质地、坡度之间在2005和2025年出现了单因子非线性减弱效应,说明这些因子组合在某些时期对碳储量空间分异存在相互削弱的情形。

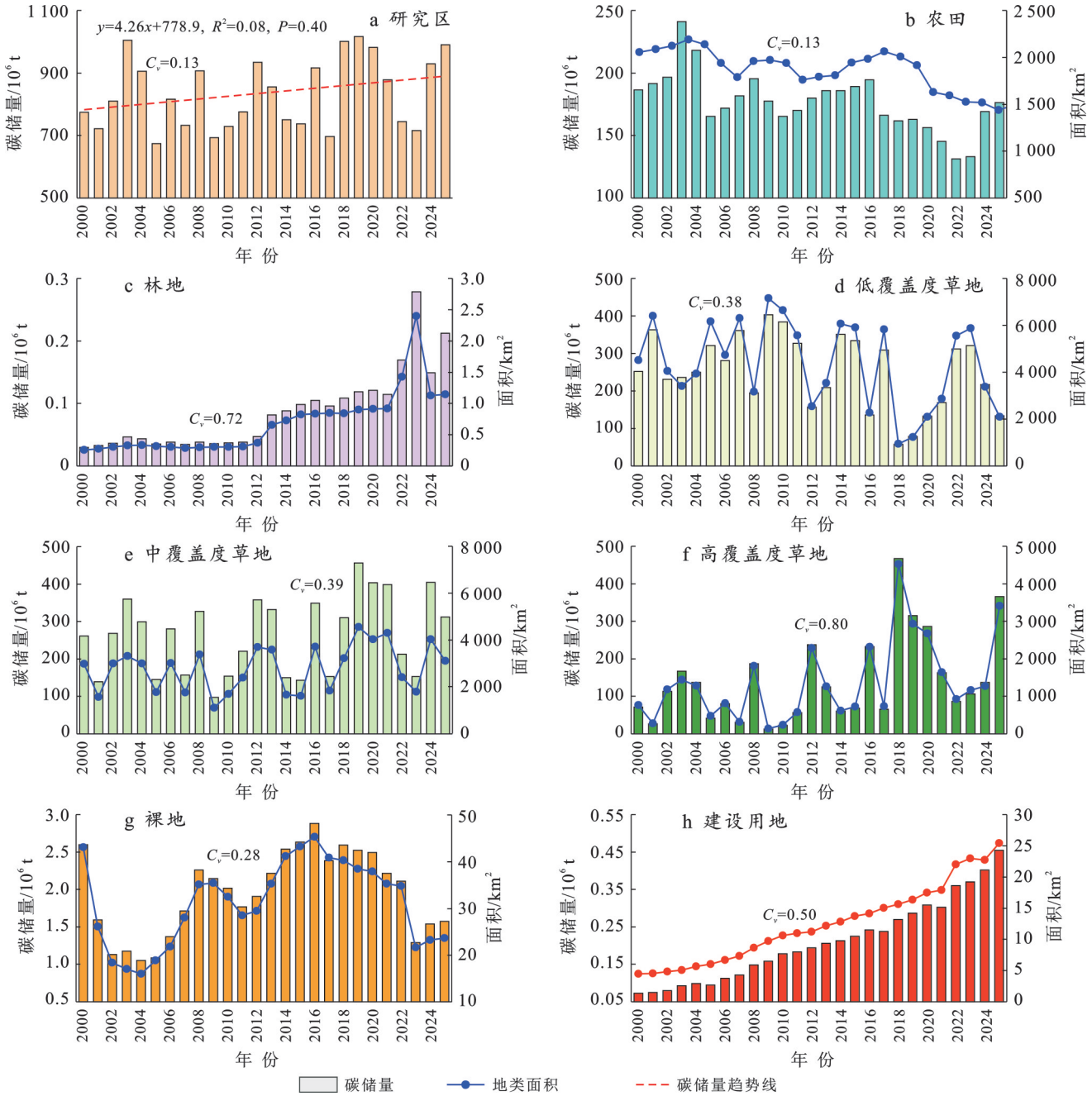


图2 研究区2000—2025年各地类碳储量及面积变化

Fig.2 Variations in carbon storage and areas of different land use types in study area from 2000 to 2025

2.4 未来情景下碳储量和LULC预测

对比2025年LULC实际数据和PLUS模型模拟结果,总体精度(OA)为0.79,kappa系数为0.72,品质因数(FoM)为0.18,各项指标均达到可接受标准[10,21-22],表明模型参数设定合理,模拟结果具有较好的可信度。2030年惯性发展、社会经济发展和"三生"协同发展3种情景下碳储量及LULC的空间分布格局及变化特征如图5和表8所示。从空间格局来看,3种情景下研究区碳储量整体仍呈南高北低的分布特征。2030年在惯性发展情景下,土地利用变化延续2020—2025年历史发展趋势,2030年区域碳储量为8.46×10^8 t;在社会经济发展情景下,建设用地

和农田面积增幅最为显著,较基准年(2022年)分别增长74.16%和38.98%,碳储量为8.67×10^8 t;在"三生"协同发展情景下,中、高覆盖度草地和林地面积大幅增加,裸地面积显著减少,同时建设用地与农田面积仍保持一定增速,碳储量达8.98×10^8 t。与基准年(2022年)相比,惯性发展、社会经济发展和"三生"协同发展情景下碳储量分别增加1.01×10^8 t,1.22×10^8 t和1.53×10^8 t,其中"三生"协同发展情景碳储量增加最为显著。在3种情景下,草地对区域碳储量的贡献度均超过75%。

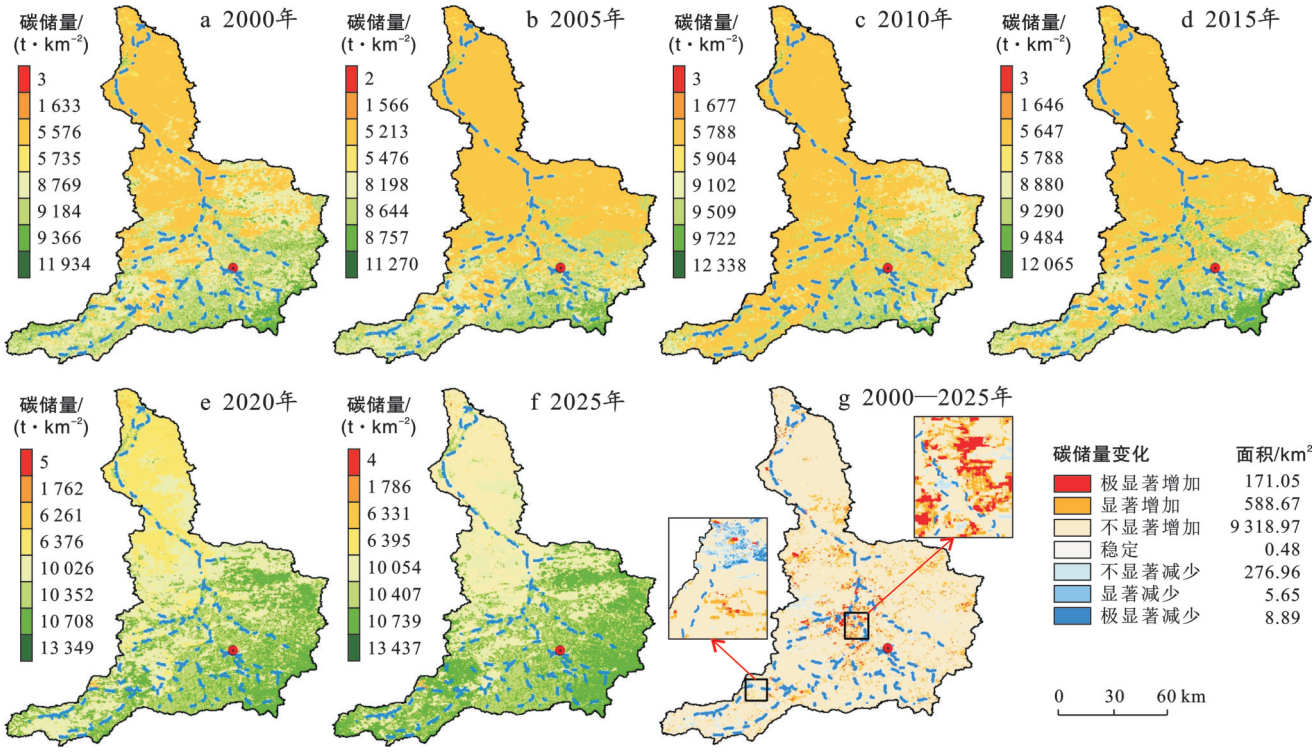


图3　研究区2000—2025年碳储量空间分布及变化趋势分区

Fig. 3　Spatial distribution and zoning of variation trends in carbon storage in study area from 2000 to 2025

3　讨　论

3.1　农牧交错带碳储量时空动态的驱动分析

本研究表明2000—2025年塔布农牧交错带碳储量波动增加但其统计特征不显著,中、低覆盖度草地和农田是区域碳储量的主要载体。林地、高覆盖度草地碳储能力大,但因分布面积有限,二者对区域碳储量的贡献较小。高碳储能力地类(如高覆盖度草地、林地)的面积扩张是驱动研究区碳储量整体提升的重要原因。因此,地类面积及其碳储能力的高低共同决定了区域碳储量的动态变化,这与刘小丹[11]、陈杰等[25]学者在半干旱区生态系统的研究结果一致。

农牧交错带的特殊性在于草地广泛分布,而草地植被以浅根系植被为主,对降水等气候因子变化敏感[3,5],导致不同覆盖度草地间频繁转化,进而驱动区域碳储量的年际波动。这一机制在极端水文年份表现尤为明显。2005年枯水年份(年降水量P_a=147.27 mm)与2019年丰水年(P_a=291.71 mm)的草地总面积相差不足4%,但丰水年中、高覆盖度草地面积比例由26.66%跃升至85.86%,碳储量差异可达3.42×10^8 t。2025年同样为丰水年(P_a=363.00 mm),中、高覆盖度草地面积显著扩张,碳储量维持较高水平。从年际变化来看,2014年平水年与2015年丰水年之间的年变幅达24.23%,而2016年枯水年又使其显著下降(年变幅为−23.97%),进一步印证了降水对碳储量的关键作用。气候条件的变化会对碳汇不确定性分析产生影响,这一观点已在Yousefpour[32]和Nagarajan等[35]学者关于陆地生态系统碳汇研究中得到证实,本文亦为此提供了进一步的佐证。本次不确定性分析得到的变异范围M为27.98%,虽低于设定的基准标准(30%),但已较为接近,这很可能反映了农牧交错带植被对极端气候条件的生态敏感性。上述分析清晰揭示了降水通过调控草地覆盖度结构,进而影响区域碳储量的主导路径。而植被覆盖度与EVI密切相关[5,9,24],这也解释了为什么EVI对农牧交错带碳储量的解释力仅次于LULC。近年来GDP和人类足迹的解释力增强,反映出经济发展强度与人类活动扰动在农牧交错带碳循环过程中的作

用日益凸显。这一趋势提示，未来区域碳汇管理需在持续推进生态修复的同时，更加重视对人类活动强度的合理调控与空间引导。交互探测结果进一步解释了驱动因子叠加作用的复杂性[6,25]。因子之间普遍存在双因子增强效应，表明碳储量空间分异是多重因素协同作用的结果。值得注意的是，地形和人类足迹单因子解释力虽较弱（q 值分别为 0.03，0.24），但与其他因子交互作用时的 q_i 值往往是 q 值的数倍乃至数十倍，凸显了此类因子在交互情境下的潜在调制能力。因此，在制定生态保护修复与碳汇提升策略时，须统筹考虑多因子间的交互作用，以提升干预措施的整体协同效益。

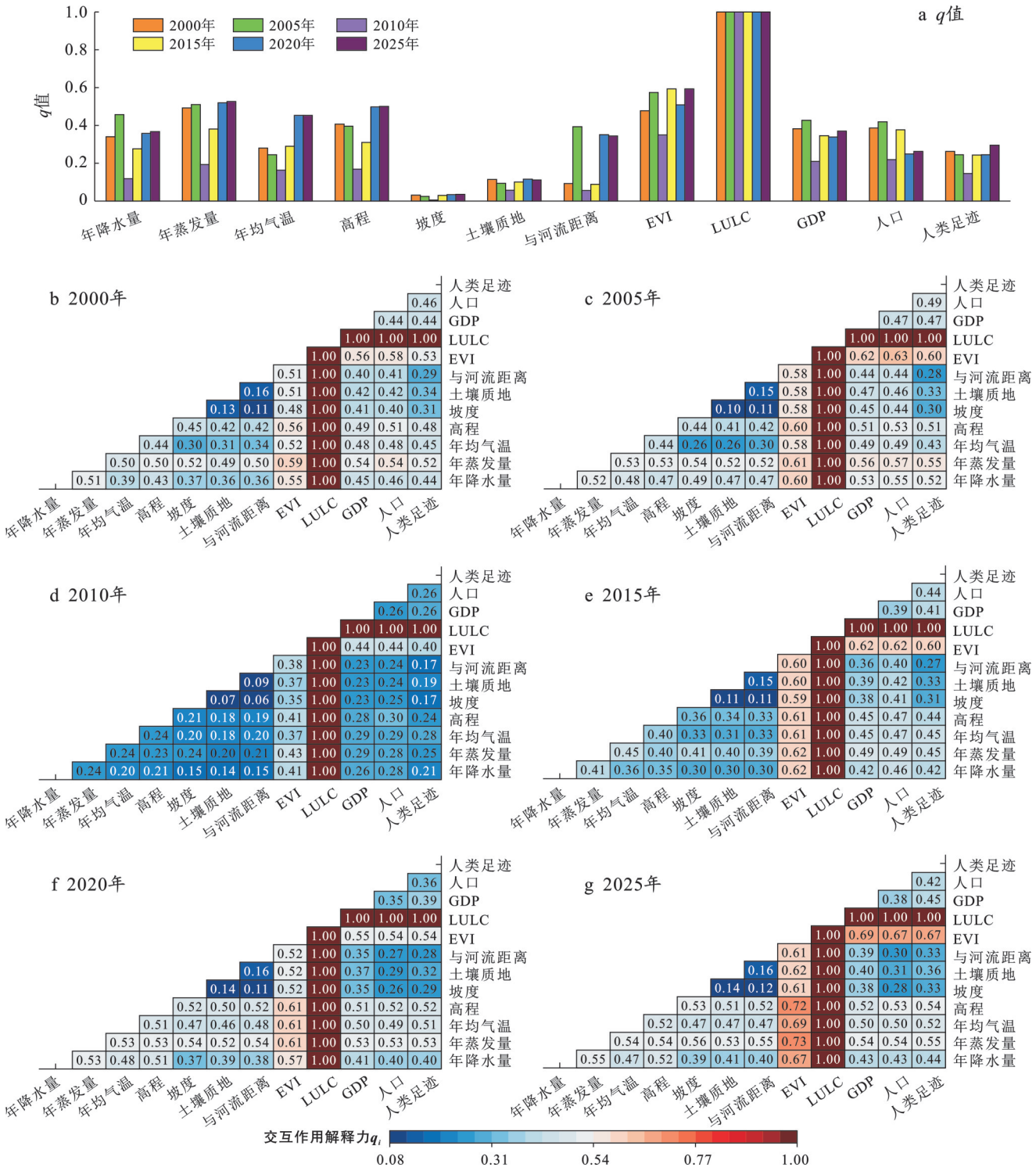


图 4　研究区 2000—2025 年驱动因子单因子解释力和交互作用解释力

Fig.4　Explanatory powers of individual and interacting driving factors in study area from 2000 to 2025

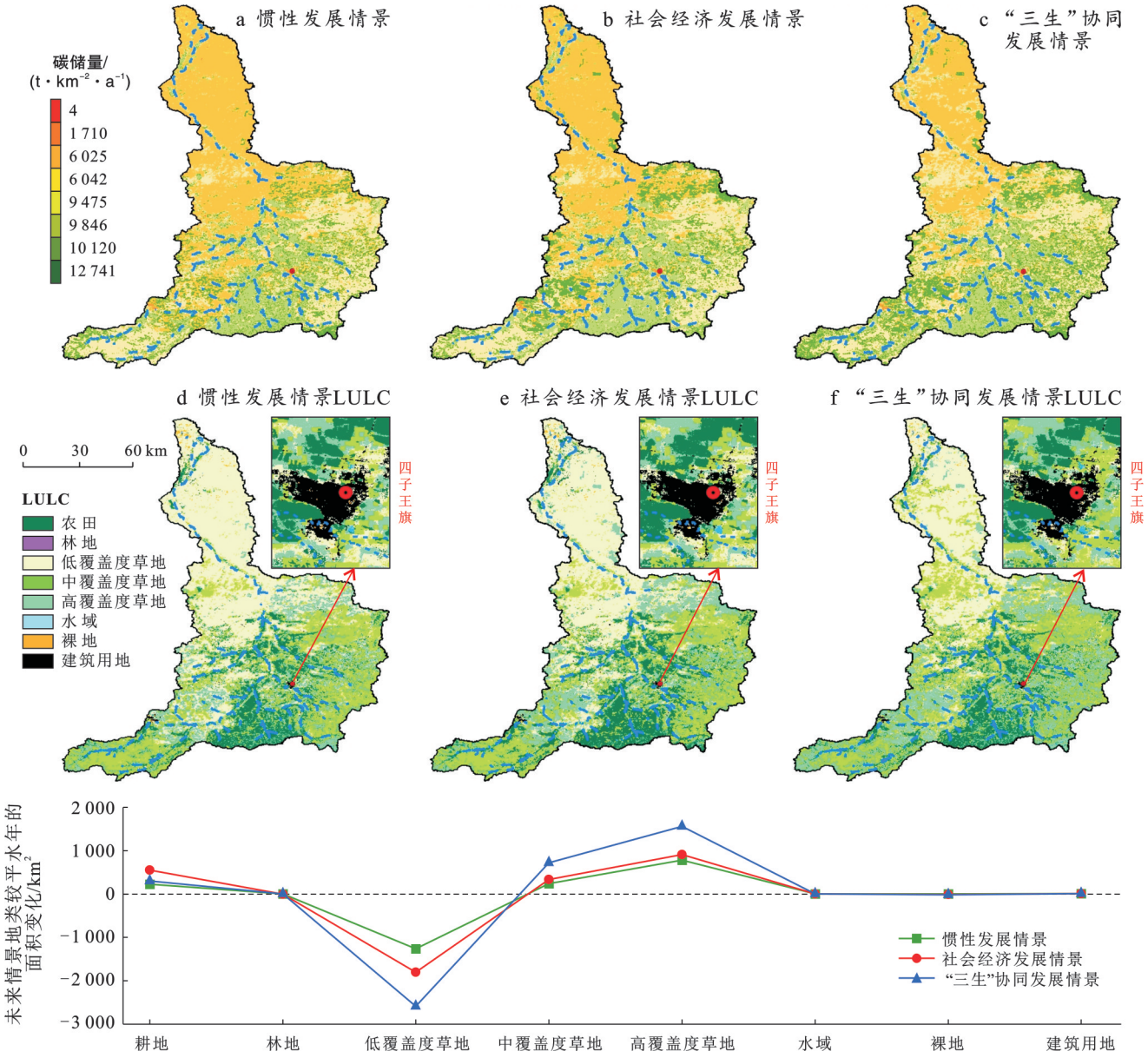


图 5　多情景下 2030 年碳储量空间格局及土地利用与覆盖变化(LULC)

Fig.5　Spatial patterns of carbon storage and land use and land cover (LULC) changes under multiple scenarios in 2030

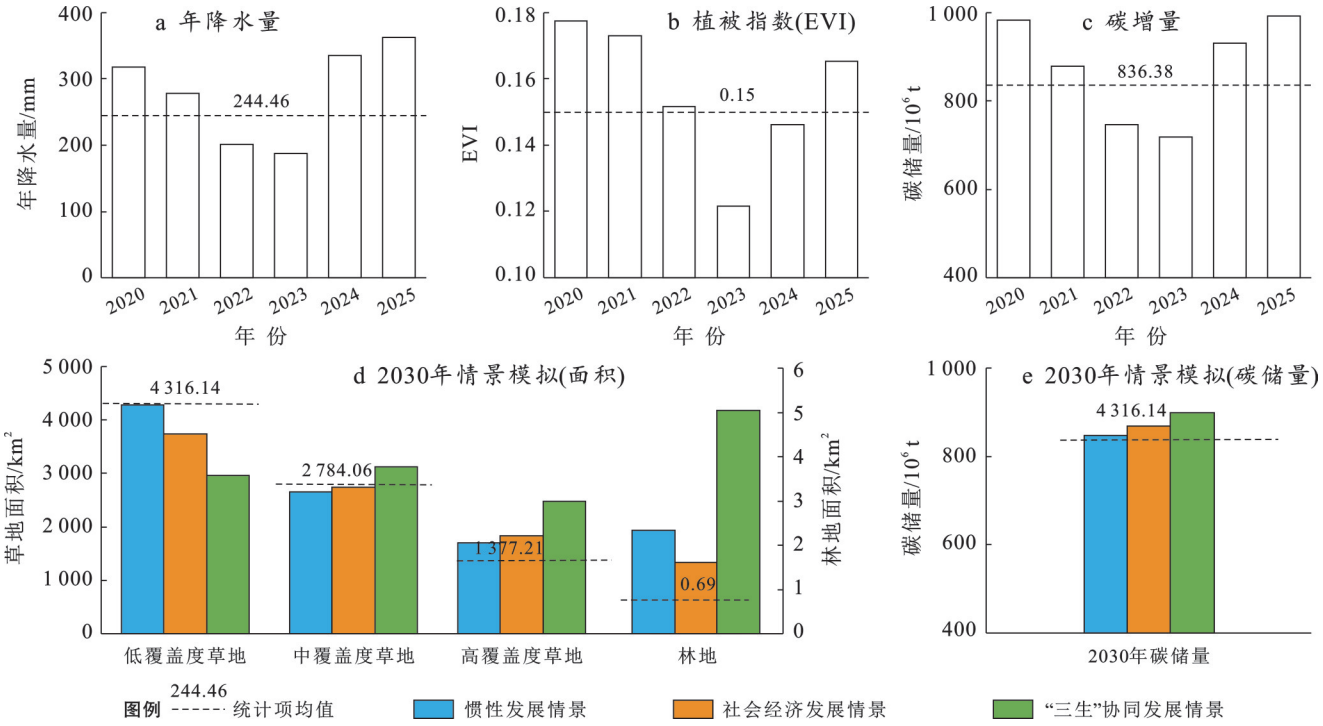
表 8　多情景下 2030 年土地利用与覆盖(LULC)面积及碳储量统计

Table 8　Land use and land cover change (LULC) areas and carbon storage under multiple scenarios in 2030

地 类	基准年(2022 年)		2030 年					
			惯性发展情景		社会经济发展情景		“三生”协同发展情景	
	面积/km²	碳储量/10⁶ t	面积/km²	碳储量/10⁶ t	面积/km²	碳储量/10⁶ t	面积/km²	碳储量/10⁶ t
农 田	1 437.12	131.23	1 843.72	161.84	1 997.24	193.51	1 926.50	169.42
林 地	1.42	0.17	1.53	0.30	1.49	0.20	4.66	0.64
低覆盖度草地	5 546.87	311.51	2 087.50	258.37	2 077.44	225.61	1 974.80	178.39
中覆盖度草地	2 406.19	212.41	2 800.57	250.67	2 730.71	259.67	2 691.13	296.17
高覆盖度草地	921.29	86.91	3 577.30	172.20	3 501.73	185.42	3 720.95	251.14
水 域	1.00	—	3.54	—	3.63	—	3.75	—
裸 地	34.81	2.11	24.68	2.35	20.14	1.70	15.69	1.30
建设用地	21.99	0.36	31.83	0.51	38.30	0.56	33.20	0.55
合 计	10 370.68	744.70	10 370.68	846.22	10 370.68	866.67	10 370.68	897.60

3.2 碳汇提升的政策启示

情景模拟分析显示,3种发展情景下2030年研究区碳储量均呈增长趋势。其中“三生”协同发展情景的碳汇提升潜力最为突出。相较于其他两种情境,该情景兼顾碳汇提升、粮食安全与社会发展的多目标协同,更契合农牧交错带作为生态屏障和农牧产品供给区的功能定位。需指出的是,情景模拟基于历史发展趋势开展。2020—2025年期间,区域经历了多个丰水年,且“三北”工程六期、“十四五”林草规划等生态工程也相继实施。因此,该时段的发展趋势暗含了丰沛降水和生态修复工程的积极影响。由图6可以看出,2000—2025年中共有4个丰水年,区域EVI值较多年平均水平显著提升,使得PLUS模型中、高覆盖度草地的扩展概率增大,进而推动2030年3种情境下中高覆盖度草地面积增加和碳储量显著提升。区域碳储量历史趋势的“缓慢增加”和未来情景的“大幅增加”之间的差异,凸显了主动土地利用优化和降水调节对于实现碳汇倍增目标的巨大潜力。



注:均值为PLUS模型预测涉及的2000—2025年统计项均值。

图6 模型历史时期关键指标及2030年情景模拟结果与历史均值对比

Fig.6 Key indicators during historical period of model, and comparison of simulated results with their corresponding historical average values for 2030 scenarios

本研究与前人研究均表明,优化土地资源结构是一种经济有效的固碳途径[7,10,24]。但对于农牧交错带这样的特殊过渡地带,若较高覆盖度草地在枯水年向较低覆盖度大量退化,有可能使得区域碳汇功能遭受重创。因此,农牧交错带的碳汇提升既要坚持以多目标协同为导向,也应充分考虑浅根系草本植被对水热条件的高度敏感性,通过提升和稳定植被覆盖度,增强碳储系统的整体稳定性。

3.3 研究不足与展望

本研究通过引入气象因子对碳密度年际动态进行修正,使碳储量评估更符合实际;同时,PLUS-InVEST-OPGD模型的集成应用,实现了农牧交错带碳储量时空动态与驱动因子的系统分析。此外,基于区域发展设定的“三生”协同发展情景,为“双碳”目标下类似区域的协同发展提供了可借鉴的分析范式。然而,研究仍存在一定局限。①InVEST模型碳储量估算精度主要取决于LULC与碳密度参数的准确性,本研究基于气候因子对碳密度进行了年际动态修正,并与邻近区域碳密度数据进行了对比验证,但由于缺乏大量实测数据的支撑,碳密度参数仍存在一定不确定性,可能对估算精度产生影响;②部分驱动因子数据(如年降水量等栅格数据)原始分辨率较粗,经重采样统一至30 m空间分辨率后,在一定程度上平滑了微观尺度的空间异质性,可能在PLUS模型发展潜力和OPGD驱动分析时引入尺度误差;③本研究共纳入12项可量化的驱动因子,但碳储量演变实际受更多因素的综合影响,部分关键政策变量(如草原生态保护补助奖励标准、禁牧轮牧

实施强度等)因难以量化而未能纳入模型。未来研究将通过开展实地观测、借助数据同化技术、探索政策因素量化表征,以提升多源数据融合精度,完善碳密度数据库,从而提升碳储量估算及模拟预测精度,强化研究成果的政策支撑能力。

4　结　论

本研究通过碳密度气候修正及PLUS-InVEST-OPGD模型耦合,实现了2000—2030年塔布农牧交错带碳储量的量化评估及驱动因子辨识。研究区碳储量呈南高北低的稳定空间格局,多年平均碳储量为8.34×10^8 t,呈波动增加趋势但统计上不显著。区域碳储量空间分异由LULC与EVI核心驱动、多重因子协同作用所致。草地与农田构成区域碳库主体,其中草地以浅根系植被为主,降水通过调控草地覆盖度结构影响区域碳储量的年际波动。多情景模拟表明"三生"协同发展情景碳储量增量最为显著,更契合农牧交错带的区域主体功能定位。研究成果启示区域碳储提升需兼顾土地利用空间格局优化与碳储系统整体稳定性的协同提升。未来研究将重点开展碳密度参数本地化校准、多源数据融合与政策变量量化表征,以进一步提升碳储量估算精度与情景模拟的决策支撑能力。

参考文献(References)

[1] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].中国科学(地球科学),2022,52(6):1010-1020.
Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: Method, progress and prospect [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(6):1010-1020.

[2] Bai Yu, Wang Yuxin, Li Linru, et al. Unraveling ecosystem service supply-demand relationships and zoning optimization in the agro-pastoral ecotone of northern China [J]. Ecological Indicators, 2026,182:114590.

[3] Yuan Ning, Wang Enhui, Lv Shaofeng, et al. Degradation reduces greenhouse gas emissions while weakening ecosystem carbon sequestration of Moso bamboo forests [J]. Science of the Total Environment, 2023, 877: 162915.

[4] 刘轶敏,何洋,苏瑞景,等.干旱区生态系统碳储量时空演变及其驱动机制的非线性响应及阈值效应分析:以鄂尔多斯市为例[J].环境科学学报,2026,46(3):466-480.
Liu Yimin, He Yang, Su Ruijing, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem carbon stocks in arid regions and analysis of nonlinear responses and threshold effects in its driving mechanisms: A case study of Ordos City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2026,46(3):466-480.

[5] 田稼穑.乌兰察布市天然草地碳储量及碳密度分布特征[J].中国水土保持科学,2026,24(2):128-138.
Tian Jiase. Distribution characteristics of carbon storage and carbon density of natural grassland in Ulanqab [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026, 24(2): 128-138.

[6] 魏熙乐,李倩,邓爱平,等.基于土地利用变化的四川省碳储量时空演变与预测及驱动因素分析[J].水土保持研究,2025,32(3):373-383.
Wei Xile, Li Qian, Deng Aiping, et al. Spatiotemporal evolution, forecast, and driving factor analysis of carbon storage in Sichuan Province based on land use change [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):373-383.

[7] 党若源,王金凤,周紫羽,等.北京市自然保护地多情景土地利用变化与碳储量模拟[J].环境科学,2025,46(12):7747-7757.
Dang Ruoyuan, Wang Jinfeng, Zhou Ziyu, et al. Simulation of multi-scenario land use change and carbon storage in protected areas of Beijing [J]. Environmental Science, 2025,46(12):7747-7757.

[8] 张熔轩,彭虹,张万顺,等.巴彦淖尔市碳储量时空变化研究[J].人民黄河,2026,48(5):157-162.
Zhang Rongxuan, Peng Hong, Zhang Wanshun, et al. Spatiotemporal evolution of carbon storage in Bayannur City [J]. Yellow River, 2026,48(5):157-162.

[9] 贾艳艳,张芳源,刘新龙.基于土地利用变化的大汶河流域碳储量评估及其脆弱性分析[J].水土保持通报,2025,45(1):254-263.
Jia Yanyan, Zhang Fangyuan, Liu Xinlong. Assessment and vulnerability analysis of carbon storage in Dawen River basin based on land-use change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):254-263.

[10] 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.

[11] 刘小丹,李垒,张洪,等.1985—2035年密云水库流域生态系统碳储量时空演替格局与预测[J].水土保持通报,2025,45(1):244-253.
Liu Xiaodan, Li Lei, Zhang Hong, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Miyun Reservoir basin during 1985—2035 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):244-253.

[12] 王佳爽,高晓瑜,李为萍,等.塔布河流域潜在蒸散量时

空变化特征及成因[J].干旱区研究,2024,41(9):1538-1547.
Wang Jiashuang, Gao Xiaoyu, Li Weiping, et al. Spatial-temporal variation characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Tabu River basin [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(9): 1538-1547.

[13] 中国科学院资源环境科学数据中心.中国气象要素各年度平均状况数据集[DB/OL].(2025)[2026-01-18]. https://www.resdc.cn/data.aspx DATAID=378.
Resource and Environmental Science Data Platform. Annual mean conditions dataset of meteorological elements in China [DB/OL]. (2025) [2026-01-18]. https://www.resdc.cn/data.aspx DATAID=378.

[14] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T21010—2017土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. GB/T 21010—2017 Current land use classification [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[15] 国家林业和草原局.LY/T 3370-2024草原术语及分类[S].北京:中国标准出版社,2024.
National Forestry and Grassland Administration. LY/T 3370—2024 Vocabulary of grassland and classification [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[16] 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.

[17] 李曼,吴东丽,何昊,等.1990—2020年黄河流域碳储量时空演变及驱动因素研究[J].生态环境学报,2025,34(3):333-344.
Li Man, Wu Dongli, He Hao, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Yellow River basin from 1990 to 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(3):333-344.

[18] 冯悦.黄河流域呼和浩特段植被碳储量核算及固碳潜力评价[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
Feng Yue. Estimation of vegetation carbon storage and evaluation of carbon sequestration potential in Hohhot section of the Yellow River basin [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[19] 王子昊,王冰,张宇飞,等.基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J].农业资源与环境学报,2024,41(2):292-304.
Wang Zihao, Wang Bing, Zhang Yufei, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024,41(2):292-304.

[20] 谢金君.基于Invest模型的包头地区生态系统服务功能研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
Xie Jinjun. Research on ecosystem service functions in Baotou area based on the invest model [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[21] 刘涛,刘晓龙,郭利彪,等.基于Markov-PLUS和InVEST模型的锡林郭勒草原碳储量变化预测[J].草原与草坪,2023,43(2):1-12.
Liu Tao, Liu Xiaolong, Guo Libiao, et al. Prediction of carbon storage change in Xilingol grassland based on Markov-PLUS and inVEST models [J]. Grassland and Turf, 2023,43(2):1-12.

[22] 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.

[23] 曹鹏辉,齐晓明,杨雯,等.内蒙古土地利用多情景模拟与碳储量预测分析[J].干旱区资源与环境,2023,37(9):83-90.
Cao Penghui, Qi Xiaoming, Yang Wen, et al. Multi scenario simulation and prediction of carbon storage for land use types in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(9):83-90.

[24] Liu Yu, Huang Tingting, Qiu Zhiyuan, et al. Effects of precipitation changes on fractional vegetation cover in the Jinghe River basin from 1998 to 2019 [J]. Ecological Informatics, 2024,80:102505.

[25] 陈杰,靳宇鑫,倪建华.耦合GeoSoS-FLUS和InVEST模型的吕梁市碳储量时空变化及情景模拟[J].环境工程,2025,43(12):237-246.
Chen Jie, Jin Yuxin, Ni Jianhua. Spatiotemporal variation and scenario simulation of carbon storage in Lvliang by coupling GeoSoS-FLUS and InVEST model [J]. Environmental Engineering, 2025,43(12):237-246.

[26] 张俊韡,欧阳晓,陈键,等.城镇空间扩张影响城市群碳储量的多情景模拟及优化调控:以长株潭城市群为例[J].生态学报,2025,45(21):10431-10444.
Zhang Junwei, Ouyang Xiao, Chen Jian, et al. Multi-scenario simulation and optimal regulation of urban spatial expansion affecting carbon storage in urban

agglomerations: The case of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21):10431-10444.

[27] 张宇炆,赵子漠,魏梦瑶,等.LUCC 视域下黄骅市碳储量时空动态及其驱动机制[J].环境科学与技术,2026,49(2):240-251.
Zhang Yuwen, Zhao Zimo, Wei Mengyao, et al. Spatio-temporal dynamics and driving mechanism of carbon stocks in Huanghua City from perspective of LUCC [J]. Environmental Science & Technology, 2026,49(2):240-251.

[28] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.

[29] 陈光水,杨玉盛,谢锦升,等.中国森林的地下碳分配[J].生态学报,2007,27(12):5148-5157.
Chen Guangshui, Yang Yusheng, Xie Jinsheng, et al. Total belowground carbon allocation in China's forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(12):5148-5157.

[30] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[31] Natural Capital Project. Carbon storage and sequestration: uncertainty analysis [EB/OL]. (2022-11-06)[2026-03-20]. https://community.naturalcapitalalliance.org/t/carbon-storage-and-sequestration-uncertainty-analysis/3183.

[32] Yousefpour R, You Bin, Hanewinkel M. Simulation of extreme storm effects on regional forest soil carbon stock [J]. Ecological Modelling, 2019,399:39-53.

[33] 包玉斌,张慧娟,杨雪茹,等.宁夏生态系统碳汇时空变化及潜力诊断分区[J].干旱区地理,2026,49(4):740-755.
Bao Yubin, Zhang Huijuan, Yang Xueru, et al. Spatio-temporal variation and potential zoning diagnosis of ecosystem carbon sinks in Ningxia [J]. Arid Land Geography, 2026,49(4):740-755.

[34] 何洋,赵喜萍.基于标准化遥感生态指数的汾河流域生态评价与时序分析[J].生态学杂志,2024,43(2):564-575.
He Yang, Zhao Xiping. Ecological evaluation and time series analysis of Fenhe River basin based on standardized remote sensing ecological index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(2):564-575.

[35] Deepak R S N. Global sensitivity analysis for terrestrial carbon cycle simulations under present and future climate conditions [D]. Victoria: University of Victoria, 2025.

(上接第 124 页)

[32] Yi Kexin, Zhang Jianjun, Lei Haoyi, et al. Response of ecological condition in ecologically fragile areas to disturbance from extreme precipitation event: An empirical analysis from the Loess Plateau [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,512:145701.

[33] Dong Guanyu, Fan Lei, Fensholt R, et al. Asymmetric response of primary productivity to precipitation anomalies in southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023,331:109350.

[34] 张诗文,刘入菊,田震,等.基于多模型耦合的滇东南岩溶湖泊流域生境质量评估及模拟[J].生态学报,2026,46(4):1853-1871.
Zhang Shiwen, Liu Ruju, Tian Zhen, et al. Habitat quality assessment and simulation of Karst lake watershed in southeastern Yunnan by multi-model coupling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026,46(4):1853-1871.

[35] 贾天朝,胡西武,杨海娟,等.生境质量对气候变化与人类活动的空间响应:以青藏高原为例[J].水土保持学报,2024,38(5):203-211.
Jia Tianchao, Hu Xiwu, Yang Haijuan, et al. Spatial response of habitat quality to climate change and human activities: Taking the Qinghai-Xizang Plateau as an example [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(5):203-211.