

内蒙古黄河流域生态系统碳储量时空 演变及驱动因素分析*

马晓萌¹,刘卓辰¹,姚林杰¹,苏琳轩^{2,3},赵艳云¹,张海军⁴,张庆¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院,呼和浩特 010021; 2. 内蒙古科技大学能源与环境学院,内蒙古包头 014010; 3. 伊尔库茨克国立理工大学金砖学院,伊尔库茨克州 伊尔库茨克市 664074; 4. 内蒙古自治区环境检测总站鄂尔多斯分站,内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要:全球变暖背景下,探究内蒙古黄河流域土地利用格局对碳储量时空变化的影响及其驱动机制,对评估区域碳循环过程与制定生态保护策略具有重要意义。本研究基于 Google Earth Engine 平台提取 1990—2020 年内蒙古黄河流域土地利用数据,分析其时序变化特征,并基于 InVEST 模型对碳储量的时空动态进行模拟。同时,采用最优参数地理探测器方法识别碳储量空间异质性的关键驱动因子。研究结果表明:(1)1990—2020 年,耕地、林地和建设用地面积显著增加,草地和未利用地面积持续减少,水体面积呈波动变化。(2)1990—2020 年,流域碳储量总体呈现增加趋势,增加了 3.02×10^7 t,草地和耕地是内蒙古黄河流域主要的碳储存地类,碳储量分布整体呈东北部高、黄河两岸较低的空间格局。(3)归一化植被指数、高程和土地利用程度是碳储量空间分异的主要驱动因子,自然因素与社会因素的交互作用强度普遍超过了单因子的影响力。综上,本研究可为区域土地资源优化配置与生态保护政策制定提供科学依据。

关键词:碳储量;驱动因素;InVEST 模型;土地利用变化;地理探测器;内蒙古黄河流域

中图分类号:X144 **文献标志码:**A

温室气体排放总量的持续增长,导致全球气候变暖趋势日益加剧,对生态系统与社会经济造成了重大影响^[1-2]。化石燃料的大量消耗、土地利用方式及强度的变化以及农业生产过程等人类活动向大气释放了大量温室气体,其中,CO₂被认为是引发温室效应的主要气体之一^[3-4]。陆地生态系统作为人类生存和社会发展的基本环境,能够通过吸收和固定大气中的 CO₂来维持生态平衡,对于减缓气候变暖具有重要作用^[5-6]。因此,在气候变化背景下,量化碳储量时空变化格局,深入分析其驱动力因素,对陆地生态系统固碳增汇,缓解气候变暖具有重要意义。

碳储量通常指陆地、海洋、森林等碳汇系统中所储存的碳量,增加碳储量是减少大气中 CO₂浓度的重要手段^[7-8]。目前碳储量估算的方法多样,涵盖实地调查^[9-10]、遥感建模^[11-12]等方法。尽管这些方法在碳储量评估中具有一定的准确性,但其受数据获取难度大、覆盖范围有限、周期较长等因素的制约。相比之下,生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)因其对数据需求较低、计算效率高以及具备良好的时空模拟能力,已被广泛应用于碳储量评估研究中,例如:Fu 等^[13]运用 InVEST 模型对伊犁天山地区 1990—2020 年的碳储量变化进行了定量评估。Gao 等^[14]采用土地利

* 收稿日期:2025-07-21

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2025FX007);鄂尔多斯市科技重大专项项目(ZD2023230503)

作者简介:马晓萌(2001—),女,山东聊城人,2023级硕士研究生。E-mail: mxm0862@163.com

通信作者:张庆(1982—),男,山东泰安人,教授,博士。主要从事景观生态学研究。E-mail: qzhang82@

163.com

用及碳密度数据,应用InVEST模型模拟并估算了青藏高原地区陆地生态系统的碳储量水平。研究碳储量空间分布变化的驱动力,有助于为区域碳储量提升提供决策依据。自然环境、土地利用以及社会经济等因素,都会对碳储量的变化产生影响^[15]。其中,Byrd等^[12]的研究表明快速城市化导致土地利用发生重大变化,对陆地和海洋生态系统的碳储存产生重大影响。Xi等^[16]探明了气候变化及人类活动对长江流域碳储量变化的影响。然而,目前的研究多聚焦于单一因素对于碳储量变化的影响,如土地利用变化^[17]、自然地理或社会经济因素。因此,从多方面探究其影响机制具有重要意义。鉴于碳储量及其驱动因子的空间分布具有显著的异质性,当前多数研究在驱动因子识别中普遍采用地理探测器方法^[18]。传统地理探测器在处理连续变量时通常需进行手动离散化操作,该过程存在较强的主观性,可能影响对空间分层异质性最优尺度的准确判断。为克服这一不足,本文引入最优参数地理探测器(OPGD)方法对参数配置进行优化,从而提升驱动力识别结果的科学性与稳定性^[19]。

内蒙古黄河流域作为我国北方具有重要生态功能和安全保障作用的关键区域,不仅在区域生态保护中占据重要地位,也在黄河流域的碳汇格局中发挥着承上启下的关键作用^[20]。黄河流域是我国主要的碳汇核心区域之一,尤其在当前生态环境面临多重挑战的背景下,其碳储量水平发生了明显变化^[21]。因此,研究内蒙古黄河流域碳储量的时空演变特征及其驱动因子,对于深化解区域碳储量驱动机制和推动黄河流域生态安全具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

内蒙古黄河流域位于黄河上游及中游过渡地带(106.34°E—112.78°E,37.62°N—41.83°N),海拔840—2340 m。黄河在内蒙古境内全长845.5 km,流域面积约为 $1.52 \times 10^5 \text{ km}^2$,流经乌海市、巴彦淖尔市、阿拉善盟、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市、鄂尔多斯市共7个盟市。内蒙古黄河流域地貌类型多样,主要由山地、高原及丘陵构成,地势起伏较大,地形复杂。该流域属于典型的干旱半干旱气候区,年均气温为6.6℃,年降水量200~400 mm。内蒙古黄河流域是我国重要的农牧结合区,经济活动主要为农业生产与畜牧业。流域内矿产资源丰富,煤炭、有色金属等矿产的开采在区域经 济中占据重要地位,成为推动地方工业发展和经济增长的关键支柱。

1.2 数据来源

本研究所需要的内蒙古黄河流域的自然因素、社会因素数据见表1。为保证上述数据的一致性,所有数据均统一坐标且分辨率重新采样为30 m×30 m。其中,对人口、GDP及粮食产量数据以旗县级行政区为基本单位进行统计,借助ArcGIS平台将各类数据赋值至相应区域后进行空间可视化。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用数据提取

Google Earth Engine(GEE)专门用于高效处理与分析卫星遥感影像及多源地理空间数据,支持大规模时空数据的集成与运算^[22]。随机森林(Random forest, RF)是一种集成多个决策树的分类方法,每棵树独立进行分类,最终通过投票确定结果^[23-25]。因此,本研究通过GEE平台结合野外样点数据,在线标注创设采样样点,并结合Landsat假彩色进行影像合成,建立土地利用分类样本信息库。其中,不同土地利用类型的样本量如表2所示。结合研究区特点,选用以生态系统类型划分的土地利用分类体系,将土地利用分为8类:林地、湖泊、草地、沼泽、建设用地、河流、耕地和未利用地。

1.3.2 基于InVEST模型的碳储量估算

本研究利用InVEST模型的Carbon模块,评估研究区的碳储量情况及其空间特征。该模型将生态系统中的碳储存划分为四类基本碳库:地上生物量、地下生物量、土壤碳库和死亡有机质。碳储量的估算需要依托不同时期土地利用类型的空间分布数据,以及各类土地利用类型对应的4种碳库密

度参数(表 3)。具体的计算方法如下^[26]：

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$$

式中： C_{total} 表示总碳储量(t)； C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别表示各类土地利用类型的地上生物碳量、地下生物碳量、土壤有机碳量、死亡有机质碳量。

表 1 研究数据概况

Table 1 Overview of datasets used in this study

类型	名称	格式	数据来源
自然因素	高程(DEM)	grid(30 m)	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	grid(30 m)	由DEM计算得到
	坡向	grid(30 m)	由DEM计算得到
	年降水量	grid(1 km)	时空三级环境大数据平台(https://portal.casearth.cn/poles)
	年均温	grid(1 km)	国家地球系统科学数据中(https://www.geodata.cn/data/)
	归一化植被指数(NDVI)	grid(30 m)	国家生态数据中心(https://nesdc.org.cn/)
社会因素	土地利用数据	grid(30 m)	Google Earth Engine 监督分类
	粮食产量数据	县域	《内蒙古统计年鉴》 ^① ,EPS 统计数据平台 ^②
	GDP 数据	县域	《内蒙古统计年鉴》 ^① ,EPS 统计数据平台 ^②
	人口数据	县域	《内蒙古统计年鉴》 ^① ,EPS 统计数据平台 ^②

注：①数据访问地址为：<https://tj.nmg.gov.cn/>。②数据访问地址为：<https://www.epsnet.com.cn/>。

表 2 样本点数量

Table 2 Number of sample points

个

年份	林地	湖泊	草地	沼泽	建设用地	河流	耕地	未利用地	合计
1990	550	475	998	411	743	399	840	553	4969
1995	439	387	1094	376	759	432	782	491	4760
2000	564	397	1423	369	775	416	808	593	5345
2005	513	406	1123	420	807	435	786	559	5049
2010	855	452	2137	335	780	414	901	614	6488
2015	416	412	967	388	742	407	688	470	4490
2020	333	386	1084	409	838	474	744	569	4837

1.3.3 土地利用程度指数

土地利用程度不仅反映了土地的自然特征,还体现了人类对土地的综合开发与利用状况。由于土地利用程度与生态系统的结构和功能变化密切相关,因此利用土地利用程度指标分析其对碳储量时空演变的影响,计算公式如下：

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i)$$

式中： L_a 表示土地利用程度综合指数； A_i 表示第*i*类土地类型的分级指数； C_i 为第*i*类土地类型面积占比； n 为地类种类个数。 L_a 值越高土地利用程度越强。本研究参考庄大方等^[27]提出的地类分级指数标准见表 4。

1.3.4 最优参数地理探测器

本研究选用最优参数地理探测器探测研究区碳储量的空间分异性,相比于传统地理探测器,该

方法能够更加高效解决空间数据离散化问题,利用相等间隔、分位数、标准差、自然断点法以及几何间隔等分类方法^[28],确定最佳离散化方式及类别。因此,本文将分类等级范围设置为4~9,最终选择解释力最强的组合。通过计算单因子及双因子交互 q 值判断不同因子间是否存在交互作用及其强度。 q 值的计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2。$$

式中: h 为解释变量的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别代表层 h 和全区的方差;SSW和SST分别为层内方差之和及全区总方差。 q 为因子解释力, q 的取值0~1,值越大解释力越强^[28]。

表3 不同土地利用类型下4类碳库碳密度参数值

土地利用类型	死亡碳密度	地上碳密度	土壤碳密度	地下碳密度
耕地	2.84	4.94	31.49	23.45
林地	4.09	12.32	46.14	33.67
草地	2.19	10.26	29.03	25.13
河流	0	0.09	0	0
湖泊	0	0.09	0	0
沼泽	0	0.09	0	0
建设用地	0	0.73	0	7.99
未利用地	0	0.38	6.28	0

表4 土地利用程度分级指数表

地类	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
分级指数 A_i	3	2	2	2	4	1

2 结果与分析

2.1 土地利用

本文选用1990—2020年每5年为1期,共7个时期的遥感影像数据,使用随机森林分类方法在GEE平台上对土地利用数据进行分类操作。如表5所示,分类结果符合分类精度要求,并且实地对比验证后,确认分类结果准确度较高。

表5 1990—2020年土地利用分类结果的总体精度和Kappa系数

指标	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
总体精度/%	91.32	90.07	91.18	93.36	91.70	96.64	96.01
Kappa系数	0.89	0.87	0.89	0.91	0.90	0.92	0.91

研究表明,草地是内蒙古黄河流域分布最广的土地利用类型,显著高于其他地类,其次为耕地与未利用地。相比之下,林地、建设用地及水体面积相对较小(表6)。1990—2020年,耕地、林地和建设用地面积呈持续增长趋势,草地和未利用地面积则不断减少,河流、湖泊和沼泽等水体面积受季节性因素影响,表现为波动变化(图1)。

表6 1990—2020年内蒙古黄河流域土地利用面积及占比

Table 6 Land use area and proportions in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

土地利用类型	1990年		1995年		2000年		2005年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	11706.0	7.96	15091.6	10.26	15065.7	10.24	15485.7	10.52
林地	2944.8	2.00	3032.8	2.06	3039.2	2.07	3298.9	2.24
草地	109313.3	74.29	105201.7	71.49	107914.8	73.34	108482.8	73.72
河流	764.8	0.52	982.2	0.67	989.4	0.67	641.1	0.44
湖泊	438.2	0.30	421.1	0.29	345.3	0.23	467.5	0.32
沼泽	1672.0	1.14	1255.3	0.85	1181.4	0.80	996.6	0.68
建设用地	1193.2	0.81	3203.0	2.18	4787.4	3.25	5168.2	3.51
未利用地	19114.8	12.99	17959.5	12.21	13823.9	9.39	12606.3	8.57
合计	147147.1	100.00	147147.1	100.00	147147.1	100.00	147147.1	100.00
土地利用类型	2010年		2015年		2020年			
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%		
耕地	16481.8	11.20	17585.0	11.95	18447.7	12.54		
林地	3472.6	2.36	7013.6	4.77	9335.5	6.34		
草地	108047.4	73.43	103451.1	70.30	98250.2	66.77		
河流	891.0	0.61	709.9	0.48	1140.8	0.78		
湖泊	492.8	0.33	430.8	0.29	586.5	0.40		
沼泽	1051.0	0.71	753.1	0.51	972.2	0.66		
建设用地	5933.7	4.03	6605.9	4.49	7845.5	5.33		
未利用地	10776.8	7.32	10597.8	7.20	10568.8	7.18		
合计	147147.1	100.00	147147.1	100.00	147147.1	100.00		

1990—2020年,内蒙古黄河流域的土地利用空间格局总体保持稳定。耕地集中分布在河套地区,呈现出明显的农业聚集格局,林地则地带性分布在呼和浩特市及包头市南部。湖泊在黄河周边、河套平原内部及毛乌素沙地东北部分布。沼泽多沿黄河两岸及乌梁素海周边区域发育,具备一定的生态缓冲功能。建设用地由西向东主要分布在巴彦淖尔市、包头市、呼和浩特市以及鄂尔多斯市东部市区。未利用土地主要分布于库布齐沙漠及毛乌素沙地的东部地区(图2)。

2.2 碳储量

1990—2020年,内蒙古黄河流域30年的平均碳储量为 8.61×10^8 t。在此期间,碳储量增加了 3.02×10^7 t,总体呈增加趋势。1995年碳储量最低,随后回升,至2015年达到最高值,2020年略有下降(图3)。草地和耕地是黄河流域内蒙古段的主要碳储存地类,其碳储量占总储存量的85%以上。结合地类来看,草地、未利用地和沼泽碳储量分别减少了 64.18×10^6 t、 13.01×10^6 t和 0.27×10^6 t,而林地的碳储量增幅最大,为 55.61×10^6 t,其次是耕地和建筑用地,分别为 38.88×10^6 t、 12.87×10^6 t(表7)。

从碳储量的空间分布及其变化趋势看,碳储量的分布呈现出区域性差异,表现为东北部地区碳储量较高,而黄河两岸区域则相对较低。高值区主要集中于呼和浩特市及包头市南部的大青山地区,该区域植被覆盖度较高且生态系统较为稳定,而库布齐沙漠及毛乌素沙地南部与东南部地区因自然条件相对较差、植被稀疏,为碳储量低值区(图4)。

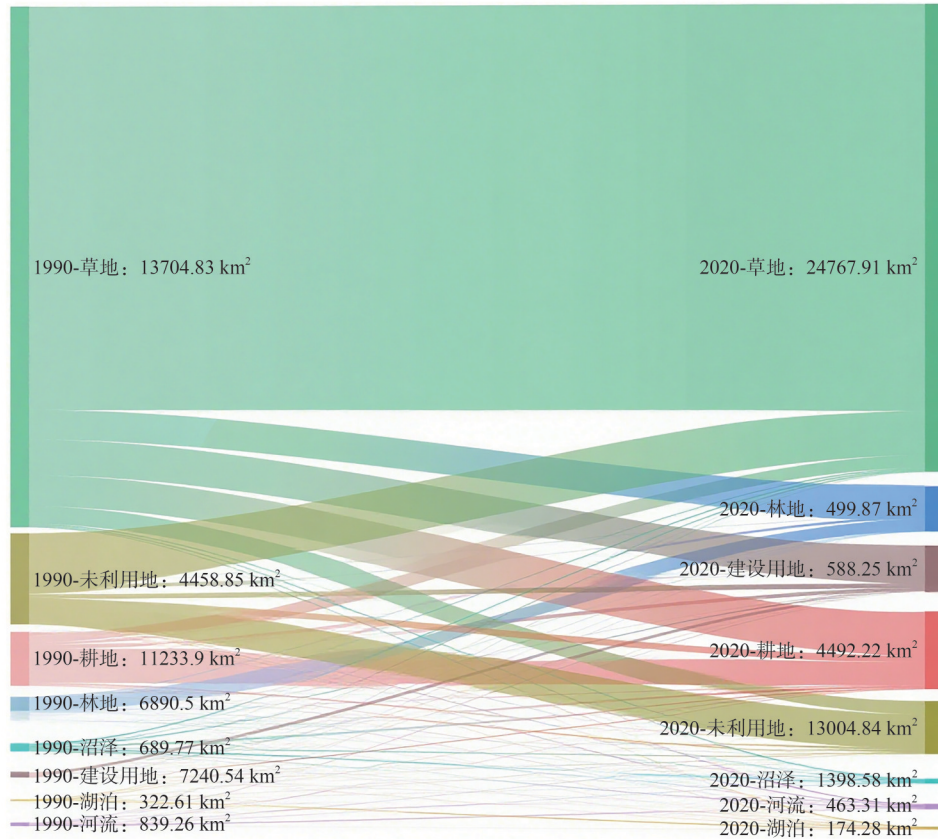


图1 1990—2020年内蒙古黄河流域土地利用变化量

Fig. 1 Land use change area of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

表7 1990—2020年内蒙古黄河流域各土地利用类型的碳储量

Table 7 Carbon storage of each land use type in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

类型	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
耕地	72.26	89.93	89.03	92.51	97.03	104.88	111.14
林地	27.02	27.10	27.02	29.46	30.64	61.46	82.63
草地	712.09	688.52	708.25	711.51	711.05	683.75	647.91
河流	0.31	0.70	0.60	0.34	0.54	0.30	0.51
湖泊	0.04	0.05	0.02	0.05	0.05	0.03	0.15
沼泽	1.66	1.07	1.17	0.85	1.02	0.91	1.39
建筑用地	2.43	7.52	9.79	10.93	12.52	13.87	15.30
未利用地	28.08	24.71	20.33	19.06	16.25	14.81	15.07
总计	843.89	839.60	856.21	864.71	869.10	880.01	874.10

10⁶ t

2.3 碳储量驱动因子分析

2.3.1 最优参数识别

本研究使用最优参数地理探测器,系统分析影响碳储量变化的多种因素。本文从自然因素和社会因素方面选取了高程、坡度、坡向、年降水、年均温、NDVI、GDP值、人口、粮食产量和土地利用程度共10个驱动因子来探究碳储量变化的影响因素^[29-30],并对其进行离散化处理,发现不同的离散方法及

分类粒度会对解释力产生显著影响。以2015年NDVI为例,当采用“地理断点法”并将数据划分为6个区间时, q 值达到最大,表明此分类方式对碳储量空间分异的解释效果最优。其余驱动因子的最优分类方式,通过相同方法确定(图5)。

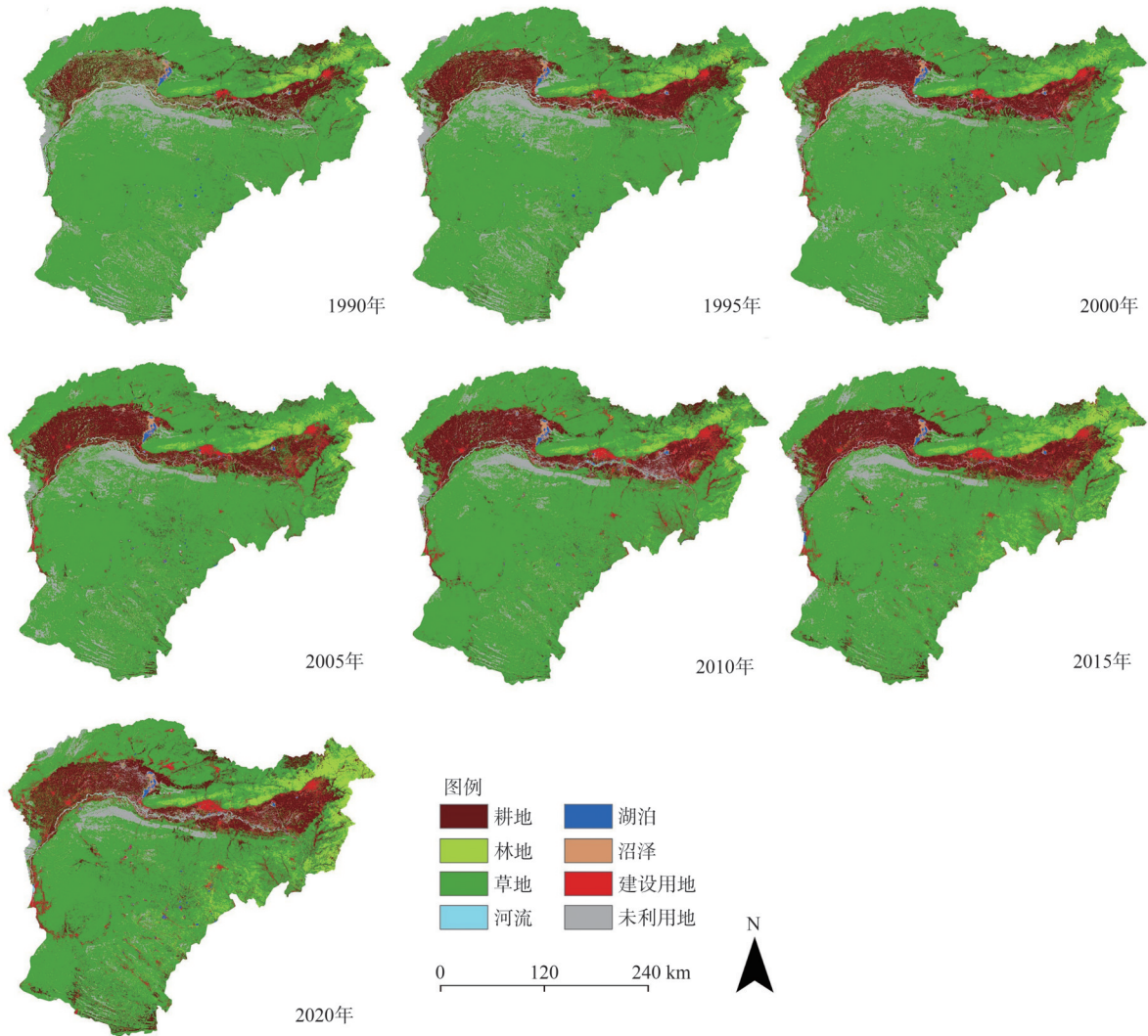


图2 1990—2020年内蒙古黄河流域土地利用图

Fig. 2 Land use of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

2.3.2 驱动因子分析

单因子探测结果表明,各驱动因子在不同年份对于碳储量的影响存在差异(图6)。1990—2020年,对内蒙古黄河流域碳储量变化驱动力较大的自然因素为NDVI、DEM。在研究时段内,社会因素中土地利用强度对碳储量变化的驱动作用一直处于主导地位,随着时间的推移,2010年后粮食产量对于碳储量的影响也逐渐加强。这表明农业生态系统对碳的固定能力以及人类管理强度的加强,增强了碳在植物以及土壤中的储存水平。

交互探测结果表明,各驱动因子之间以双因子和非线性增强为主要交互形式(图7)。这说明任意两个驱动因子之间的交互作用对碳储量变化的影响均大于单个驱动因子对碳储量变化的影响。根据多年各驱动因子交互作用的结果可知,NDVI与DEM的交互作用对碳储量变化的解释力最为显著,最高达到了45%,其次为NDVI与土地利用程度的组合,其最高解释力为38%。同时,其余各

因子的交互作用对碳储量空间变化的解释力也超过其单个因子对于碳储量变化的影响力,尤其是年降水、年均温、GDP等单个驱动因子解释力比较弱的因子。

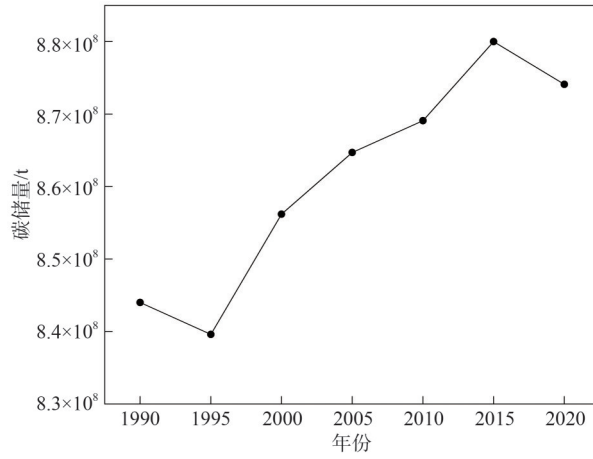


图3 1990—2020年内蒙古黄河流域碳储量变化图

Fig. 3 Carbon stock changes in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

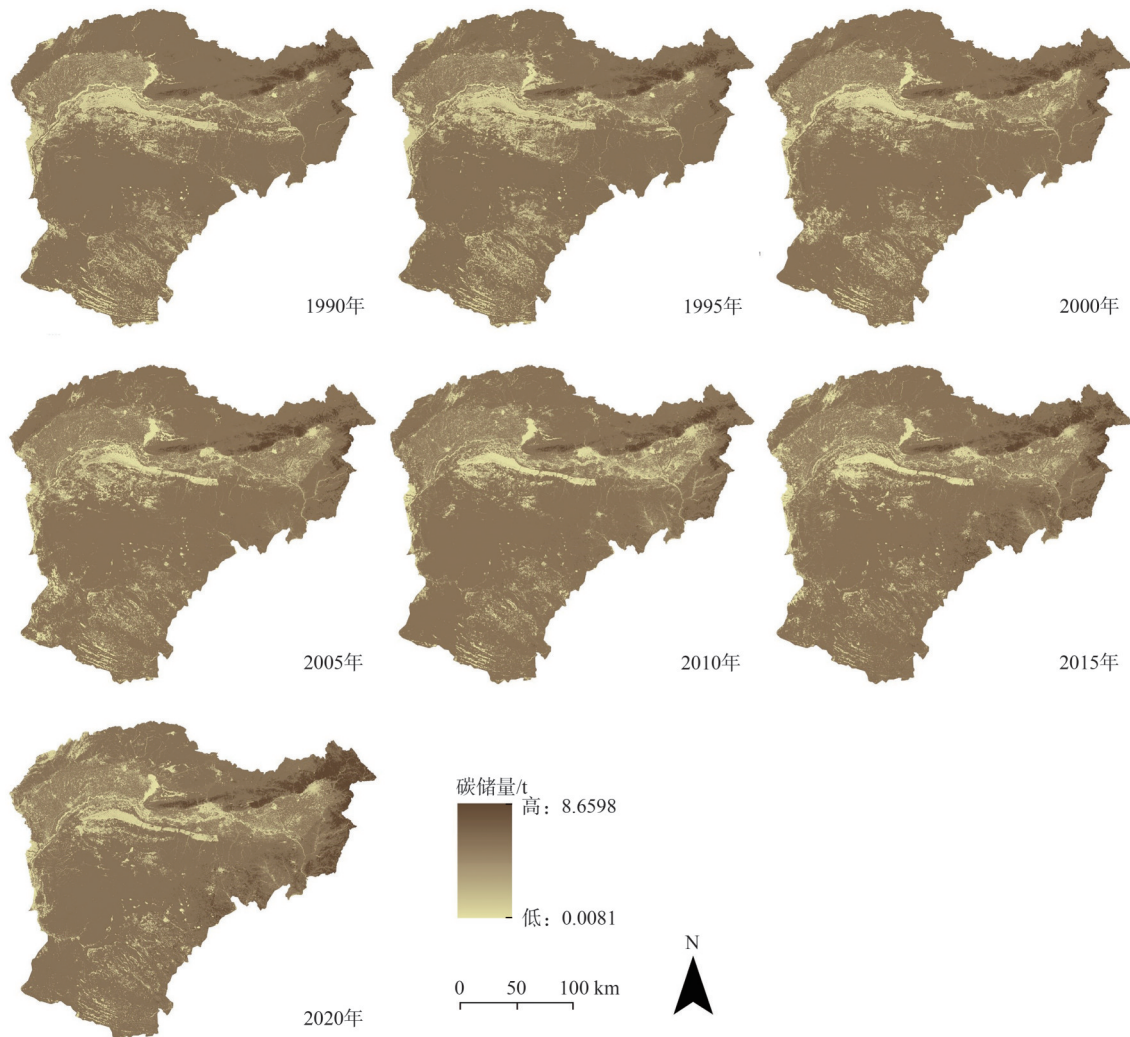


图4 1990—2020年内蒙古黄河流域碳储量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020

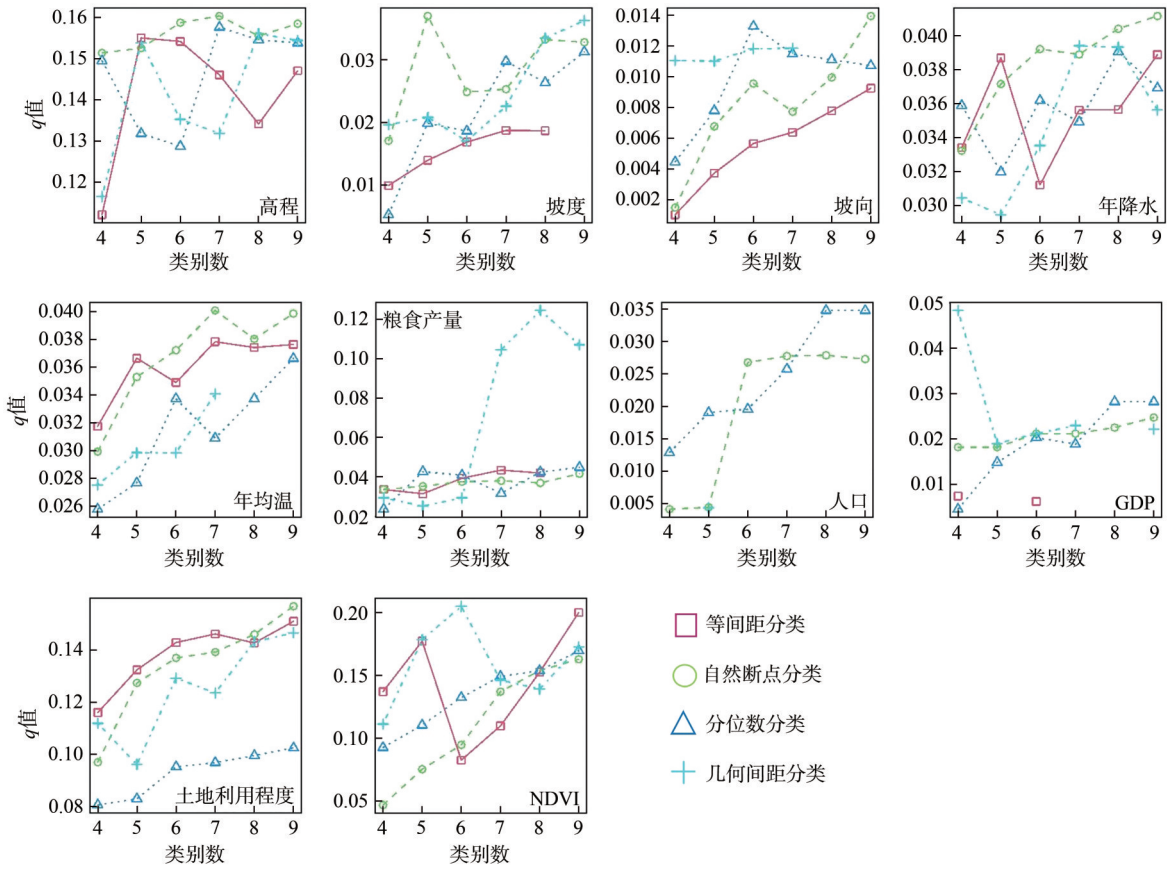


图 5 驱动因子解释力分位数

Fig. 5 Quantiles of explanatory power of driving factors

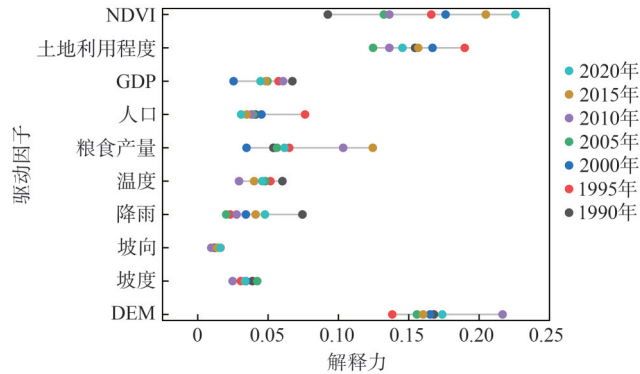


图 6 1990—2020 年单因子探测结果

Fig. 6 Single factor detection results from 1990 to 2020

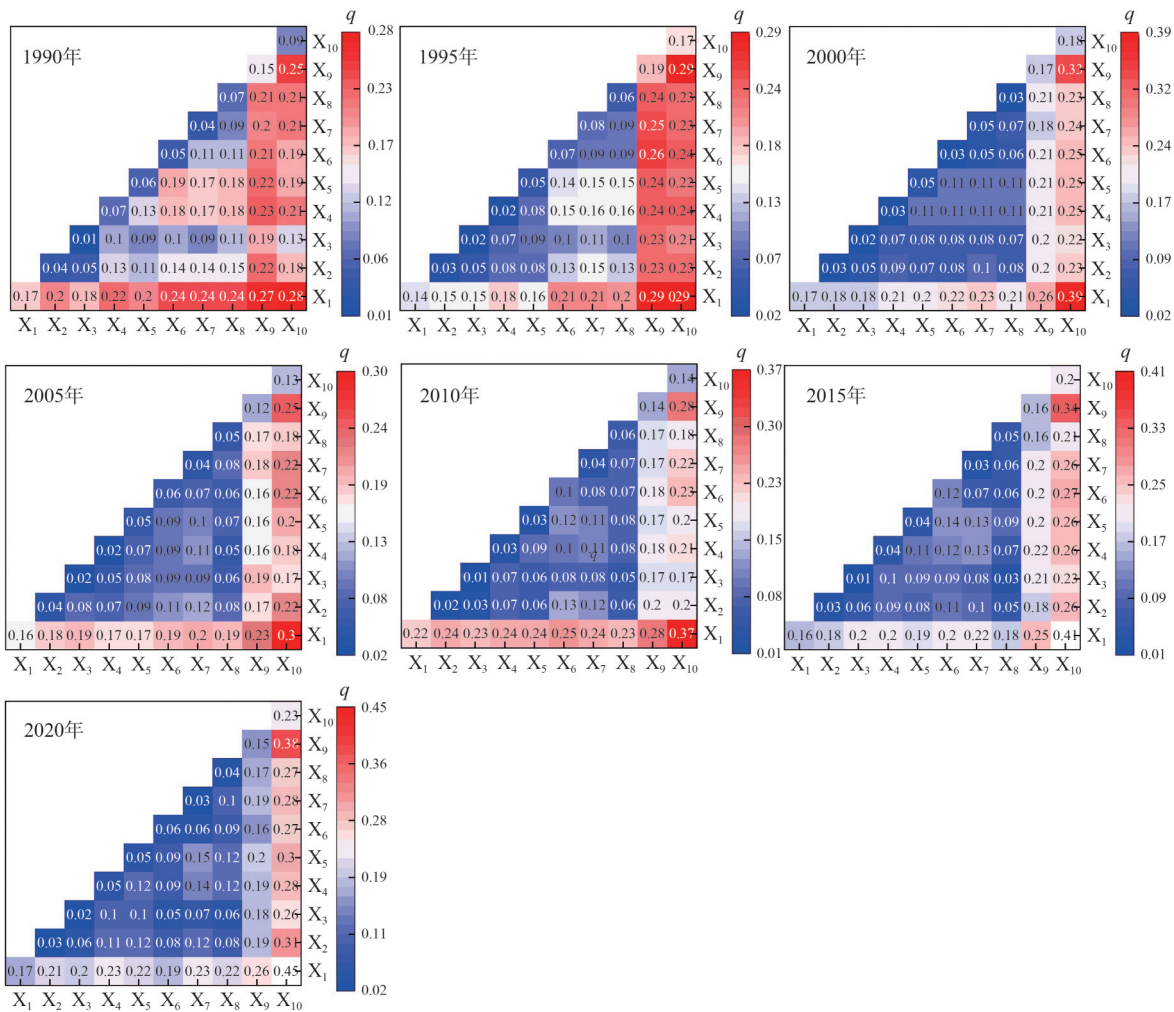
3 讨论

3.1 1990—2020 年内蒙古黄河流域土地利用变化对碳储量的影响

研究期内,内蒙古黄河流域土地利用变化以草地和未利用地的转出和耕地、建筑用地以及林地的大量转入为主。林地的扩张主要以耕地和草地的转入为主,草地面积的减少主要以草地转出为耕地、林地和建筑用地为主,这与李冰洁等^[31]的研究结果一致。

研究表明,1990—2020 年内蒙古黄河流域碳储量总体呈现增加的趋势,增加了 3.02×10^7 t。在土地利用类型转换方面,内蒙古黄河流域草地覆盖面积广且碳密度较高,是内蒙古黄河流域主要

的碳储存地类,这与李曼等^[32]研究结论一致。但是由于前期耕地开垦、城市扩张等原因,大量碳储量较高的草地转为耕地,致使草地碳储量损失较大,这与石宝金等^[33]研究结论一致。不同土地利用方式的土壤碳固持能力存在一定的差异^[34]。天然草地具有植物根系发达、土壤有机质积累周期长的特点,其碳汇功能表现出较高的长期稳定性。而耕地受耕作管理方式与作物类型影响显著,波动性较大,固碳稳定性相对较低^[35]。与耕地相比,草地具有较强的固碳能力^[36]。内蒙古黄河流域作为我国典型的生态脆弱区,一直是国家生态保护和建设的重点区域,在此区域内着力开展退耕还林还草、荒漠化防治以及盐碱地治理等生态工程,促使区域生态环境不断改善^[37]。因此,耕地转出为草地和林地、草地转为林地以及未利用地转为耕地是这一时期碳储量增加的主要原因^[28]。同时,退耕还草初期可能因土地扰动导致土壤有机碳短期下降,但经过恢复后,土壤有机碳水平逐渐提高,长期固碳稳定性显著增强^[38]。



X₁: 高程; X₂: 坡度; X₃: 坡向; X₄: 降水; X₅: 年均温; X₆: NDVI; X₇: GDP总值; X₈: 人口;
X₉: 粮食产量; X₁₀: 土地利用程度。

图7 1990—2020年交互探测结果

Fig. 7 Interactive detection results from 1990 to 2020

内蒙古黄河流域作为典型的外流区,其碳储量变化不仅影响本地生态系统,还通过水文过程影响下游碳循环^[39]。研究区域位于黄河中上游过渡地带,其上游地区植被固碳能力的提升不仅增加了局地碳储量,还会通过径流过程以溶解性有机碳、颗粒有机碳的形式向下游输送,从而影响下游土壤和水体的碳平衡。黄河中游有机碳浓度明显高于上游,部分来源于草地和农田的有机物输入^[40-41]。

因此,研究流域尺度的土地利用优化和生态工程,不仅有助于提升局地碳储量,还能通过水文联系增强整个流域的碳循环效率,从而为流域生态管理和碳汇优化提供科学依据。

3.2 碳储量变化受多方面因素的综合影响

从单因子分析结果来看,NDVI是影响内蒙古黄河流域碳储量空间变化的主要因素,表明植被的生长与碳储量的空间分布有着紧密联系,这与柯健等^[42]研究结果一致。生态系统的碳汇主要依赖于植被通过光合作用固定大气中的CO₂,植物生物量的多少在很大程度上决定了碳汇能力。NDVI能够有效反映植被覆盖度和生长状况,可有效表征植被生物量水平^[43]。土地利用程度的驱动作用较强,在2010年后,粮食产量的驱动作用显著增强,表明人类活动对于碳储量的空间分布状况具有显著影响^[44]。

交互探测结果表明,在所有因子交互组合中,NDVI与DEM的交互作用对碳储量空间格局的解释力最为显著,最高达到了45%以上。DEM主要反映区域地形起伏,海拔的高低会影响区域的温度及降水情况,进而影响植被生长状况和生物量积累,间接调控植被生长^[45]。降水是限制植被生长的关键因子,会直接影响土壤中的水分情况,进而影响植被生长和生物量的累积^[46-47]。在温度适宜的地区,生长环境有利于植物的生长发育,碳储量较高,而在极端气候条件下,温度会对植物的生长有一定的抑制作用^[48]。同时,地形也影响着人类活动的空间分布。研究区域覆盖河套平原,海拔相对较低,以耕地为主,人类活动频繁,农业灌溉和植被管理增加了局地植被覆盖度。因此,自然因素与人类活动共同影响NDVI的空间分布特征,最终表现为碳储量在空间上的异质性^[49]。

3.3 研究局限性

本研究在碳密度参数设定上仅考虑了8种主要的土地利用类型,然而不同土地利用类型之间的碳密度存在较大差异,类型划分的相对粗略可能对评估结果的精度产生一定影响。未来可进一步细化土地利用类型,以提升碳储量估算的准确性。此外,在量化土地利用变化与碳储量空间分布关系的过程中,本文采用了InVEST模型中的Carbon模块。该方法在一定程度上克服了传统碳储量估算在空间表达能力方面的局限。然而,该模型在碳储量计算中假设碳库密度为固定值,未能纳入植被生长动态、土壤理化性质演变等因素对年际碳密度的影响^[50],可能导致对实际碳储量变化的估计存在偏差。

4 结论

(1) 1990—2020年,内蒙古黄河流域土地利用格局总体保持相对稳定。其中,耕地、林地和建设用地不断扩张,而草地和未利用地面积则逐步减少,河流、湖泊和沼泽等水体面积表现出一定的波动性。

(2) 1990—2020年,流域碳储量总体呈现增加趋势,累计增加 3.02×10^7 t。空间上,碳储量分布表现为东北部地区碳储量较高,而黄河两岸区域则相对较低。碳储量较高的区域主要集中于呼和浩特市及包头市南部的大青山地区,而库布齐沙漠及毛乌素沙地南部地区碳储量较低。

(3) 草地和耕地是内蒙古黄河流域的主要碳储存地类,占总储存量的85%以上。未利用地转为草地以及草地转为林地显著提升了碳储量,而草地向耕地或建设用地转化则引发了碳储量下降。

(4) 内蒙古黄河流域碳储量在1990—2020年间的空间分异主要受NDVI、DEM和土地利用程度的驱动。在交互探测中,NDVI与DEM的交互效应显著,自然环境因子与社会经济因子之间的耦合关系进一步提升了单因子在驱动碳储量空间分布差异中的作用。

参考文献:

- [1] FISCHER E M, BADOR M, HUSER R, et al. Record-breaking extremes in a warming climate[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2025, 6(7): 456-470.

- [2] GEBRECHORKOS S H, SHEFFIELD J, VICENTE-SERRANO S M, et al. Warming accelerates global drought severity[J]. *Nature*, 2025, 642(8068):628-635.
- [3] SCHÖNWIESE C D. Recent developments in scientific knowledge on climate change[J]. *Energy Conversion and Management*, 1992, 33(5):297-303.
- [4] SMITH I M. CO₂ and climatic change: An overview of the science[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9):729-735.
- [5] WU D, PIAO S, ZHU D, et al. Accelerated terrestrial ecosystem carbon turnover and its drivers[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9):5052-5062.
- [6] HEIMANN M, REICHSTEIN M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. *Nature*, 2008, 451(7176):289-292.
- [7] PENG Y, CHENG W, XU X, et al. Analysis and prediction of the spatiotemporal characteristics of land-use ecological risk and carbon storage in Wuhan metropolitan area[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158:111432.
- [8] DYBALA K E, STEGER K, WALSH R G, et al. Optimizing carbon storage and biodiversity co-benefits in reforested riparian zones[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(2):343-353.
- [9] TANG X, ZHAO X, BAI Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16):4021-4026.
- [10] CHEN L T, JING X, FLYNN D F B, et al. Changes of carbon stocks in alpine grassland soils from 2002 to 2011 on the Tibetan Plateau and their climatic causes[J]. *Geoderma*, 2017, 288:166-174.
- [11] DENG R, YANG G, WANG W, et al. A new method of estimating shelterbelt carbon storage on the regional scale: Combined the single tree carbon storage with tree numbers[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 163:112071.
- [12] BYRD K B, BALLANTI L, THOMAS N, et al. A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 139:255-271.
- [13] FU K, CHEN L, YU X, et al. How has carbon storage changed in the Yili-Tianshan region over the past three decades and into the future? What has driven it to change?[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 945:174005.
- [14] GAO M, XU R, HUANG J, et al. Increase of carbon storage in the Qinghai-Tibet Plateau: Perspective from land-use change under global warming[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 414:137540.
- [15] 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.
- [16] XI H, LI T. Unveiling the spatiotemporal dynamics and influencing factors of carbon stocks in the Yangtze River Basin over the past two decades[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954:176261.
- [17] ZAFAR Z, ZUBAIR M, ZHA Y, et al. Predictive modeling of regional carbon storage dynamics in response to land use/land cover changes: An InVEST-based analysis[J]. *Ecological Informatics*, 2024, 82:102701.
- [18] ZHI R, LIN L, YANG X, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors analysis of carbon stock in traditional industrial transformation region: A case study in Harbin and Changchun urban agglomeration, China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 13:1636946.
- [19] SONG Y, WANG J, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5):593-610.
- [20] ZHANG H, ZHANG J, LV Z, et al. Spatio-temporal assessment of landscape ecological risk and associated drivers: A case study of the Yellow River Basin in Inner Mongolia[J]. *Land*, 2023, 12(6):1114.
- [21] SUN B, DU J, CHONG F, et al. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Yellow River Basin[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(15):3866.
- [22] 付东杰, 肖寒, 苏奋振, 等. 遥感云计算平台发展及地球科学应用[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1):220-230.
- [23] ANTONARAKIS A S, RICHARDS K S, BRASINGTON J. Object-based land cover classification using airborne LiDAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6):2988-2998.
- [24] GHORBANIAN A, ZAGHIAN S, ASIYABI R M, et al. Mangrove ecosystem mapping using Sentinel-1 and Senti-

- nel-2 satellite images and random forest algorithm in Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2565.
- [25] PAUL A, MUKHERJEE D P, DAS P, et al. Improved random forest for classification[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(8):4012-4024.
- [26] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST user's guide[M]. Stanford, USA: The Natural Capital Project, 2015.
- [27] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2):105-111.
- [28] 石晶, 石培基, 王梓洋, 等. 基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(1):300-313.
- [29] ZHAO X, TAN S, LI Y, et al. Quantitative analysis of fractional vegetation cover in southern Sichuan urban agglomeration using optimal parameter geographic detector model, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111529.
- [30] LI J, HU J, KANG J, et al. Spatio-temporal variation and prediction of land use and carbon storage based on PLUS-InVEST model in Shanxi Province, China[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2025, 21(1): 107-119.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 石宝金, 赵义义, 吴乐英, 等. 黄河流域(河南段)碳储量时空动态预测及其作用因素分析[J/OL]. *环境科学*, 2025:1-18(2025-06-16)[2025-06-18]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202502108>.
- [34] 潘占东. 陇中黄土丘陵沟壑区典型小流域不同土地利用类型对土壤有机碳的影响及机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025.
- [35] 李青春, 李跃进, 王丹澜, 等. 草地与耕地土壤团聚体及有机碳含量对比分析: 以内蒙古四子王旗为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1):50-54.
- [36] 魏早强, 罗珠珠, 牛伊宁, 等. 土壤有机碳组分对土地利用方式响应的Meta分析[J]. *草业科学*, 2022, 39(6): 1115-1128.
- [37] 陆莹, 张敏, 王彦阁. 内蒙古黄河流域生态保护恢复优先区识别[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(11):1946-1955.
- [38] 何奕成, 胡振华, 向仰州, 等. 中国退耕还草的土壤碳固持效应及影响因素[J]. *草业科学*, 2024, 41(2):262-270.
- [39] 包宇飞. 雅鲁藏布江水文水化学特征及流域碳循环研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [40] WEN Z, SONG K, SHANG Y, et al. Natural and anthropogenic impacts on the DOC characteristics in the Yellow River continuum[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117231.
- [41] LU T, BIANCHI T S, BI N, et al. Dam regulation alters the spatio-temporal delivery of organic carbon along the Yellow River[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 642: 131838.
- [42] 柯健, 管梅, 叶茂, 等. 伊犁地区陆地生态系统碳储量变化及影响因素[J]. *中山大学学报(自然科学版中英文)*, 2025, 64(4):91-101.
- [43] 毕帆帆, 武志涛, 梁寒雪, 等. 基于PLUS-InVEST-GeoDetector模型的黄河中游碳储量时空变化及驱动因素[J]. *环境科学*, 2025, 46(8):4742-4753.
- [44] ZHU G, QIU D, ZHANG Z, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107770.
- [45] ZHANG M, ZHOU A, CAO S, et al. Multi-angle study on carbon stock variation and its driving factors in Pingshan County[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1):9713.
- [46] LIU E, ZHOU G, LV X, et al. Reversal of the spatiotemporal patterns at the end of the growing season of typical steppe vegetation in a semi-arid region by increased precipitation[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(18): 3493.
- [47] IMAMOVIC A, SCHLEMMER L, SCHÄR C. Collective impacts of orography and soil moisture on the soil moisture-precipitation feedback[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(22): 11682-11691.
- [48] LIU T, ZHANG Q, LI T, et al. Dynamic vegetation responses to climate and land use changes over the Inner Mongolia reach of the Yellow River Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(14): 3531.
- [49] ABLIKIM K, YANG H. Spatiotemporal variation of vegetation carbon stocks and its driving factors in the Urumqi

- River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159:111668.
- [50] ZHOU J, JOHNSON V C, SHI J, et al. Multi-scenario land use change simulation and spatial-temporal evolution of carbon storage in the Yangtze River Delta region based on the PLUS-InVEST model[J]. *PLoS One*, 2025, 20(1): e0316255.

Spatiotemporal Dynamics and Driving Mechanisms of Ecosystem Carbon Storage in the Inner Mongolia Section of Yellow River Basin

MA Xiaomeng¹, LIU Zhuochen¹, YAO Linjie¹, SU Linxuan^{2,3}, ZHAO Yanyun¹,
ZHANG Haijun⁴, ZHANG Qing¹

- (1. *School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China*;
2. *School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China*;
3. *Brics Academy of Irkutsk State Technical University, Irkutsk 664074, Russia*;
4. *Ordos Branch Station of Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Station, Ordos 017000, China*)

Abstract: Under the background of global warming, investigating the impact of land use patterns on the spatiotemporal variations of carbon storage and its driving mechanisms in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin holds significant importance for understanding regional carbon cycling processes and formulating ecological protection strategies. In this study, land use data for the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1990 to 2020 were extracted using the Google Earth Engine platform. We analyzed the temporal characteristics of land use change and simulated the spatiotemporal dynamics of carbon storage with the InVEST model. Furthermore, an optimal parameter geographic detector as applied to identify key driving factors and their interactions influencing the spatial heterogeneity of carbon storage. The results indicate that: (1) 1990—2020, the areas of cropland, forest land, and construction land significantly increased, while grassland and unused land continuously decreased, and water bodies exhibited certain fluctuations. (2) 1990—2020, the carbon stock in the watershed showed a steady upward trend, with a cumulative increase of approximately 3.02×10^7 t. Grassland and cropland were the major carbon sinks, and the spatial distribution of carbon storage exhibited a clear pattern of higher values in the northeast and relatively lower values along both banks of the Yellow River. (3) NDVI, DEM, and land use intensity were identified as the primary drivers of spatial heterogeneity in carbon storage, and the interaction between natural and socioeconomic factors significantly enhanced the explanatory power of these driving factors. In summary, this study not only deepens the understanding of the spatiotemporal variations in carbon storage within the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin, but also provides critical theoretical support and practical guidance for optimizing land resource allocation and formulating ecological protection policies in the region.

Key words: carbon storage; driving factor; InVEST model; land use change; geographic detector; the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin