

黄河流域内蒙古段碳汇演变模拟及驱动因素

浩日娃¹, 周瑞平^{1,2}, 胡斯乐¹, 呼格吉乐¹

(1.内蒙古师范大学, 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;
2.内蒙古土地利用与整治工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: [目的] 探究黄河流域内蒙古段土地利用变化格局对碳汇空间分布的影响, 并找出背后的主要驱动因素, 为研究区生态空间发展方向和增汇政策提供依据。[方法] 以黄河流域内蒙古段为例, 基于2000、2010与2020年土地利用数据, 使用InVEST-FLUS模型分析各期碳汇能力变化情况, 进而模拟2040年自然发展、生态保护及农业优先3种不同情景下碳储量变化格局, 并借助地理探测器找出造成碳汇空间分布差异背后的主要驱动因素。[结果] ①2000—2020年, 黄河流域内蒙古段碳储量呈先上升后下降态势, 碳储量总体增加 8.63×10^6 t, 其中, 地下生物碳储量增加 3.91×10^6 t, 土壤碳储量增加 2.28×10^6 t。②未来自然发展情景下碳储量继续减少 3.92×10^6 t, 而在生态保护情景下增长 2.21×10^7 t, 高于农业优先情景下 4.99×10^6 t的碳储量增量, 其中, 土壤碳库是造成增量差异的关键。③年平均降雨量、年平均温度的不平衡分布是造成黄河流域内蒙古段各类碳库差异的主要因素。[结论] 合理的生态保护政策更符合未来城镇集约化和生态高质量发展要求, 未来应重视荒漠化防治工作, 推进林草建设, 为提升区域生态安全格局和增汇政策提供保障。

关键词: 碳汇; 土地利用; InVEST模型; 驱动因素; 黄河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0000-00

中图分类号: X171.1

文献参数: 浩日娃, 周瑞平, 胡斯乐, 等. 黄河流域内蒙古段碳汇演变模拟及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): -. Haoriwa, Zhou Ruiping, Hu Sile, et al. Simulating evolution of carbon sinks and determining driving factors for Inner Mongolia section of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): -.

Simulating Evolution of Carbon Sinks and Determining Driving Factors for Inner Mongolia Section of Yellow River Basin

Haoriwa¹, Zhou Ruiping^{1,2}, Hu Sile¹, Hügejile¹

(1. School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China; 2. Inner Mongolia Land Use and Improvement Project Research Center, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China)

Abstract: [Objective] The influence of land use change patterns on the spatial distribution of carbon sinks for the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin was investigated, and the main driving factors behind the spatial distribution of carbon sinks were identified in order to provide a basis for directing ecological spatial development and for developing sink enhancement policies in the study area. [Methods] The study was conducted for the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin. InVEST-FLUS model was used to analyze changes in the carbon sink capacity during each period of the study based on land use data from 2000, 2010, and 2020. The patterns of carbon stock changes were simulated in 2040 under three different scenarios (natural development, ecological conservation, and agricultural priority), and identified the main driving factors behind the differences in the spatial distribution of carbon sinks with the help of geographic probes. [Results] ① From 2000 to 2020, carbon storage for the Mongolia section of the Yellow River basin initially

收稿日期: 2023-06-09

修回日期: 2023-08-12

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“土地利用视角下黄河流域内蒙古段碳排放测度及减排增汇机制研究”(2023SHZR0540)

第一作者: 浩日娃(1998—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生。研究方向为土地资源开发利用与生态保护。Email: hrw981114@163.com。

通信作者: 周瑞平(1977—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授。主要从事土地规划与信息技术方面的研究。Email: rpzhou@126.com。

increased and then decreased, with an overall increase of 8.63×10^6 t. Subsurface biological carbon storage increased by 3.91×10^6 t and soil carbon storage increased by 2.28×10^6 t. ② Carbon storage continued to decrease by 3.92×10^6 t for the future natural development scenario, but increased by 2.21×10^7 t for the ecological protection scenario, which was higher than for the agricultural priority scenario (4.99×10^6 t). Soil carbon storage was the key factor causing the incremental difference. ③ The unbalanced distributions of mean annual rainfall and mean annual temperature were the main factors causing differences in the various carbon pools for the Mongolia section of the Yellow River basin. [Conclusion] Reasonable ecological protection policies are more in line with the future requirements of urban intensification and ecological high-quality development. Future attention should be given to preventing and controlling desertification, and to promoting forest and grassland construction in order to improve the regional ecological security pattern and sink enhancement policies.

Keywords: carbon sink; land use; InVEST model; driving factors; the Yellow River basin

根据已通过的《联合国气候变化框架公约》《巴黎协定》等应对气候变化的行动方案,不同国家根据自身不同的发展情况以及碳排放量作出不同的治理方案。中国作为全球主要碳排放国家,秉持人类生命共同体理念,提出力争在 2030 年前实现碳达峰、努力争取 2060 年前实现碳中和的宏伟目标^[1-2]。碳中和的方法大致分为减少“源”和增加“汇”两种,而后者与土地利用变化密切相关。陆地生态系统能够吸收 30% 人为排放的 CO_2 , 其中植物具有吸收大气中的 CO_2 将其固定在植物本身和土壤的功能,以此达到降低大气中 CO_2 浓度的目的。而土地利用类型、方式、强度、结构的不断变化是陆地生态系统以及其碳汇能力不稳定的关键因素^[3]。因此,量化土地利用格局变化与碳汇能力间的响应关系,探究造成碳汇能力空间异质性的主要影响因素,对于优化土地利用方式和碳增汇工作具有参考意义。

目前,城镇化、工业化进程仍在持续,碳排放的增加在短期内成为必然趋势^[4],因此,如何在经济发展背景下提高碳汇能力,是实现碳中和亟需解决的问题^[5]。当前,基于土地利用变化的主流碳汇研究方法有试验方法^[6]、碳排放模型构建法^[7]、生态圈模拟法^[8]、InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 模型法^[9]等,其中 InVEST 模型的 Carbon 模块以数据要求少、模型运行速度快、结果可视化而被诸多学者广泛使用^[10]。在基于 InVEST 模型的碳汇研究中,大部分学者对未来碳储量空间分布进行了模拟预测^[11],而耦合 InVEST 模型进行未来碳汇空间统计,需要采用重视空间表达的元胞自动机模型。当前,高度普适性的元胞自动机模型经过多次迭代,衍生出了 FLUS (Future Land Use Simulation_Model) 模型^[12]、PLUS (Patch-generating_Land_Use_Simulation_Model) 模型^[13] 以及 SLEUTH (Slope, Land cover, Exclusion, Urbani-

zation, Transportation, and Hillshade) 模型等^[14],其中 FLUS 模型拟合了对于土地利用变化模拟有影响的多个因素^[15],利于使模拟结果更加精确化。现如今黄河流域作为中国重要的经济发展区域和生态屏障^[16],被列入国家生态保护和高质量发展战略后,其生态安全建设备受关注^[17]。黄河流域内蒙古段位于黄河上游,该区域生态质量高低关乎到全流域的经济发展和生态安全。然而,过往有关黄河流域土地利用研究多聚焦于景观格局变化^[18]、土地利用变化驱动因素分析^[19]、归一化植被指数变化^[20]以及生态系统服务^[21]等,缺乏对土地利用变化与碳汇能力间的相关性研究,黄河流域内蒙古段作为典型的干旱半干旱区域,量化分析其土地利用变化和碳汇间的相互关系,有助于提升区域生态系统碳储量。其次,大部分研究在探究生态系统碳汇空间驱动因素时,缺乏对驱动因子空间异质性的考虑,同时缺乏对驱动因子间的交互叠加效应的研究。

本文以黄河流域内蒙古段为例,基于 InVEST-FLUS 模型,采用合土地利用与碳密度数据,分析碳汇空间变化以及不同土地利用情景下的碳汇响应。并借助地理探测器分析单一因子以及因子交互叠加对于碳汇空间异质性的驱动效应,为识别外部影响因素和促进区域增汇工程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域内蒙古段 ($37^{\circ}24' - 42^{\circ}28' \text{N}$, $103^{\circ}21' - 113^{\circ}02' \text{E}$) 包含了黄河中上游分界点以及黄河“几”字弯重要区域,径流长度 843.5 km,地域辽阔,属于干旱半干旱气候,地貌类型与生态分区多样化,域内不仅能源富集,同时是北方主要粮食生产区。流域涉及内蒙古阿拉善、乌海、鄂尔多斯、巴彦淖尔、包头、呼

和浩特以及乌兰察布 7 个盟市(图 1)。面积大约 25.38 km²,占全区 21.45%,区域常住人口约 1.056 × 10⁷ 人,占全区 43.98%。

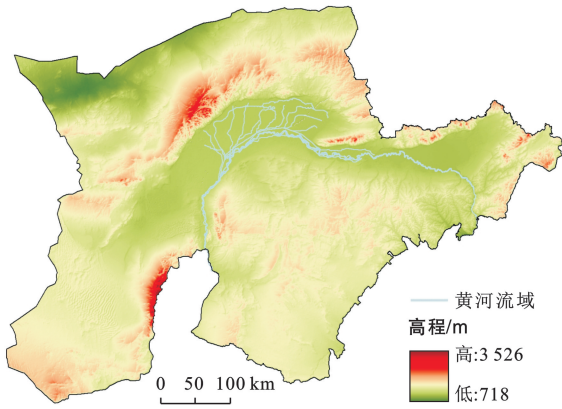


图 1 黄河流域内内蒙古段地理位置

Fig.1 Geographical location of Inner Mongdia section of Yellow River basin

1.2 数据来源

黄河流域内内蒙古段 2000,2010,2020 年 3 期土地利用数据采用来自武汉大学杨杰等^[22]制作的基于 Landsat 土地利用分类数据,并按照国家土地利用分类方法《土地利用现状分类》(GB/T2010—2017)将土地利用数据分耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 大地类;驱动因素数据中高程数据采用地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/search>) DEM 数据,空间分辨率为 90 m;坡度及坡向数据采用 ArcGIS 10.8 进一步解析 DEM 数据获得;年平均气温、年降水量、GDP、人口数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;河流、铁路、公路、居民分布点等矢量数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 未来土地利用格局模拟 FLUS 模型是 Liu Xiaoping 等^[23]基于传统元胞自动机(CA)模型开发的用于模拟未来多类土地利用变化情景的模型。该模型主要由 3 个内容组成:适宜性概率计算、邻域因子和成本矩阵确定以及自适应惯性系数计算。依照模型对驱动因素的要求,本文根据模型要求及黄河流域内内蒙古段实际情况,从对土地利用变化影响较大的自然、社会和经济 3 个关键因素出发,选取距居民点距离、距铁路距离、距公路距离、距河流距离、高程、坡度、坡向、人口、GDP、气温、降水等共 11 个因素。

(1) 适宜性概率计算。基于人工神经网络模块(BP-ANN)算法的适宜性概率计算主要由 3 部分组成:输入层、隐藏层和输出层。其可在空间上拟合土

地利用类型与选取的驱动因素之间的相应关系,得到不同土地类型的适宜性概率。其中输入层为研究时段初始年份土地利用数据及驱动因素数据,本文数量为 12;隐藏层数量本文为 12,输出层则为不同土地利用类型适宜性概率文件。其表达式为:

$$P_{p,k}^t = \sum_j \omega_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-N_j(p,q)}} \quad (1)$$

式中: $P_{p,k}^t$ 为在时间 t 时将元胞 p 转换为 k 土地利用类型的适宜概率; $\omega_{j,k}$ 为隐藏层与输出层的权重; $N_j(p,q)$ 为隐藏层神经元 j 接收输入层信号,其中 $N_j(p,q) = \sum_i \omega_{ij} \times x_i(p,q)$ 表示隐藏层神经元 j 接收输入层信号; $x_i(p,q)$ 为第 i 个神经元在迭代次数为 q 时元胞 p 的输入值; ω_{ij} 为输层与隐藏层的权重。

(2) 邻域因子设定。使用 FLUS 模型进行土地利用模拟时,需根据实际用地情况和模拟情景设置邻域因子,以确定某一地类的扩张能力。邻域因子参数越接近 1 说明其扩张能力越强,靠近 0 则反之^[23]。本文邻域因子结合黄河流域内内蒙古段实际土地利用特征,参考相关研究^[24-25],经过对比多次模拟结果,保证其合理性后最终确定各参数,见表 1。其表达式为:

$$\Omega_{p,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \quad (2)$$

式中: $\Omega_{p,k}^t$ 为元胞 p 在 t 时间的邻域影响因子; $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示最后一次迭代 $t-1$ 时,在 $N \times N$ 的 Moore 邻域窗口中的土地利用类型 k 所占有的元胞总数量; ω_k 表示各类土地类型的邻域因子参数。

表 1 邻域因子参数设置

Table 1 Parameter Settings of neighborhood factors

邻域因子	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展	0.45	0.20	0.50	0.50	0.95	0.60
生态优先	0.50	0.65	0.60	0.45	0.80	0.50
耕地保护	0.50	0.60	0.45	0.50	0.95	0.50

(3) 自适应惯性系数。自适应惯性系数计算反映了土地利用类型的预期需求数量和实际数量之间的差异,在模型迭代过程中使预测数量向预期目标发展。其表达式为:

$$I_k^t = \begin{cases} I_k^{t-1} & (|D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}|) \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & (D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0) \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & (0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_k^t 为土地利用类型 k 在迭代时间 t 时的惯性系数; D_k^{t-1} 和 D_k^{t-2} 表示 $t-1$ 和 $t-2$ 时用地类型 k 求数量和实际数量间的面积差(km²)。

(4) 成本矩阵。土地利用转移成本矩阵表示不同地类间的相互转换规则,当限制某两种地类相互转换时将矩阵中对应的值设为 0,当允许某两种地类相互转换时将矩阵中对应的值设为 1。自然发展情景

下假定各转移概率矩阵与 2000—2020 年一致;生态保护情景设置林地、草地为高优先级,限制其向低等级土地转换;农业优先情景设置限制耕地转出。2040 年多情景土地利用转移成本矩阵见表 2。

表 2 FLUS 模型转移成本矩阵
Table 2 Transfer cost matrix for FLUS model

情景	自然发展情景						生态保护情景						农业优先情景					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
F	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

注:A为耕地;B为林地;C为草地;D为水域;E为建设用地;F为未利用地。

(5) 精度验证。FLUS 模型 Precision Validation 模块中的 kappa 系数验证可以从整体上检验模型模拟结果与现实数据的一致性,kappa 系数越高表明模型模拟精度越高^[26]。本文将 2010 年作为基准年,对 2020 年土地利用变化进行模拟,并将模拟结果与 2020 年实际土地利用数据进行 Kappa 系数精度验证,得到结果为 0.80,模拟结果 ≥ 0.75 。由此,FLUS 模型在本文中模拟精度较高,可用于模拟预测未来土地利用变化。

1.3.2 基于 InVEST 模型的碳汇空间评估 本文利用 InVEST 模型 3.11.0 Carbon Storage and Sequestration 模块对碳汇空间进行评估。该模型的生态系统碳库由地上生物碳、地下生物碳、土壤碳以及死亡有机碳等 4 个基本碳库组成。根据土地利用分类情况,分别对不同地类像元的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度及死亡有机物碳密度的总量进行统计计算,其公式为:

$$C_i = C_{a,i} + C_{b,i} + C_{s,i} + C_{d,i} \quad (4)$$

$$C_{t,i} = \sum_{i=1}^n (C_i \times F_i) \quad (5)$$

式中: C_i 为地类 i 总碳密度(t/hm^2); $C_{a,i}$ 为地类 i 地上总碳密度 (t/hm^2); $C_{b,i}$ 为地类 i 地下碳密度 (t/hm^2); $C_{s,i}$ 为地类 i 土壤碳密度 (t/hm^2); $C_{d,i}$ 为地类 i 死亡有机物碳密度 (t/hm^2)。 $C_{t,i}$ 为研究区总碳储量(t); n 为土地类型数量,本文中 n 为 6; F_i 为土地类型 i 的面积 (hm^2)。

根据 InVEST 模型用户手册,碳储量计算模块假设各地类的碳密度为固定值。由于研究区范围较大,对各地类进行野外调查获得碳密度数据对设备及时间有一定需求,因此本文碳密度数据参考了地域与本

研究区相邻,且年份相近的前人研究成果^[27],分析数值合理性后参考中科院地理所整理的 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集^[28]修正获得,见表 3。

表 3 不同土地利用类型各部分的碳密度
Table 3 Carbon density of different parts of land use types

土地利用类型	地上	地下	土壤	死亡有机物
耕地	4.00	25.60	30.80	6.16
林地	6.12	42.40	24.20	7.17
草地	2.78	18.79	42.30	1.76
水域	2.37	3.95	5.95	1.50
建设用地	1.89	2.42	6.78	0.00
未利用地	1.10	8.60	19.20	0.00

1.3.3 地理探测器驱动因素探测 地理探测器是探测空间要素的分异性,揭示其背后驱动力的一组统计学方法。它包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测^[29]。本文将采用因子探测与交互探测揭示各影响因子对区域碳汇能力的影响。因子探测度量的取值区间为 $[0,1]$,值越大,表明影响因素对生境质量的影响越大,反之则越小。因子探测计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中: q 为因子探测度量,表示某影响因素对碳汇空间分布的影响程度大小; L 为影响因素的样本数; N_h 是层 h 区的碳汇能力(t); N 是整个研究区的碳汇能力(t); σ_h^2 是层 h 区碳汇能力的离散方差; σ^2 是整个研究区碳汇能力的离散方差。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年碳汇空间变化

黄河流域内内蒙古段 2000, 2010, 2020 年总碳储量分别为 1.26×10^9 , 1.27×10^9 和 1.27×10^9 t, 呈倒“V”字形先增长后下降态势。从碳库来看, 2000—2010 年, 碳储量增加 1.42×10^7 t, 其中土壤碳库(SOC)增加了 9.29×10^6 t, 占总增量的 65.61%; 而在 2010—2020 年, 碳储量减少 5.53×10^6 t, 虽然其他碳库均有小幅度增长, 但土壤碳库的碳储量减少 7.00×10^6 t, 是该时间段碳汇能力下降的主要原因(见图 2)。除土壤碳库以外, 地下生物(BGC)碳库对区域碳汇能力的变化也具有主导作用, 20 a 间, 总碳储量增加 8.64×10^6 t, 其中地下生物碳库占总碳储增量的 45.25%。

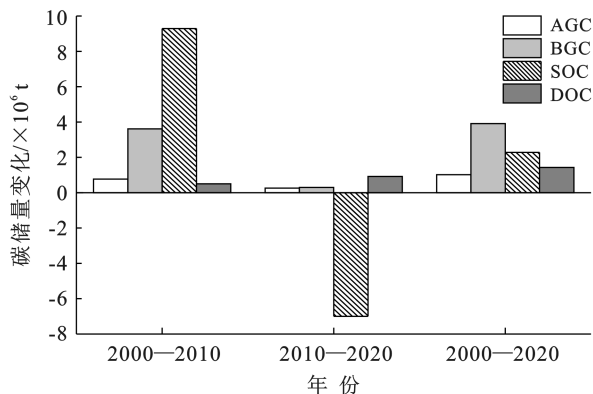


图 2 2000—2020 年黄河流域内内蒙古段不同时期碳库碳储量变化

Fig.2 Changes of carbon stocks in carbon pools in Inner Mongolia of Yellow River basin in different periods from 2000 to 2020

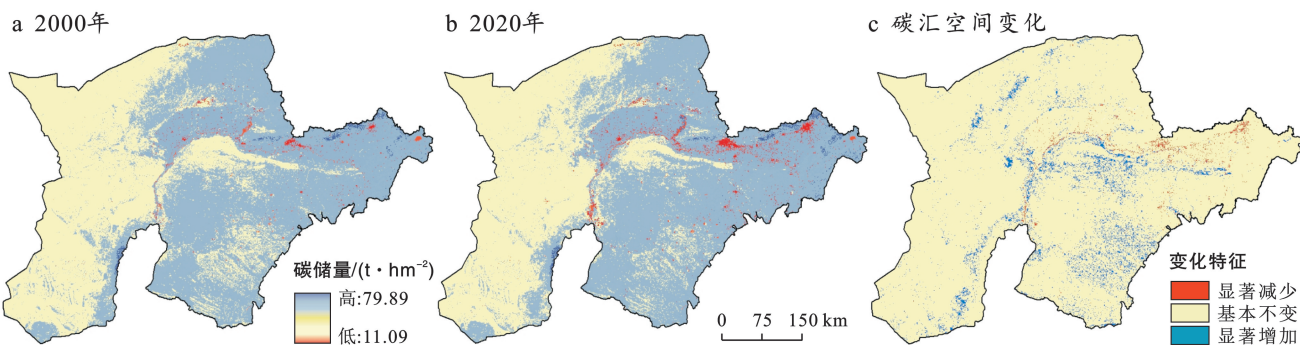


图 3 2000—2020 年黄河流域内内蒙古段碳汇空间变化

Fig.3 Spatial change of carbon sink in Inner Mongolia of Yellow River basin from 2000 to 2020

从空间分布情况来看(图 3), 黄河流域内内蒙古段碳汇能力存在明显的地域分布差异。高碳汇地区集中分布于东部地区, 包括凉城县、呼和浩特、包头等地区, 该地区处于阴山山脉腹地, 雨水丰厚, 有利于植被及粮食作物生长。巴彦淖尔、鄂尔多斯和乌海市为荒漠化缓冲地区, 未利用地与草地博弈剧烈, 碳汇空间受到未利用地挤压, 同时也是研究区内治沙工程主要推进区域。而阿拉善左旗则属于荒漠地区, 该区域包含腾格里沙漠与乌兰布和沙漠, 因此植被覆盖较少, 是研究区内碳汇能力较低区域。从碳汇能力空间增减角度来看, 碳汇减少区域主要围绕各城镇地区周围以及沿黄河平原地区, 建设用地的扩张挤压了草地、耕地等植被覆盖区, 其中平原地区为粮食种植区, 人类活动频繁, 村落向外扩展占据了部分耕地, 因而导致碳汇空间减少。碳汇增加区域则位于鄂尔多斯、巴彦淖尔以及阿拉善左旗, 主要为未利用地与林草地的相互转换, 该区域因实施毛乌素沙地治理、“三北”防护林以及退耕还林还草等人工生态建设工程, 部分未利用地被植被所覆盖, 使得碳汇能力相应提高。

土地利用类型的转变是碳密度变化的主要原因之

一^[30]。从土地利用变化的角度来看, 2000—2010 年, 除呼和浩特、包头、乌海之外, 其他地区平均碳密度均有所上升, 其与植被的增加有密切关系(见表 4)。在所有地类中, 变化较大的地类为草地、耕地与未利用地, 平均碳密度上升的地区草地面积均大量增加, 未利用地减少, 填补了建设用地扩张所致的碳密度空缺。而平均碳密度下降的地区中林地、草地等高碳汇地类变化不显著, 且建设用地的大量增加加剧了平均碳密度的下降态势。2010—2020 年, 除鄂尔多斯和凉城县外, 其他地区平均碳密度均呈下降趋势。其中凉城县林地面积增加 92 km^2 , 草地面积减少 184 km^2 , 平均碳密度增加 0.47 t/hm^2 ; 而鄂尔多斯林地与草地面积分别增加 $19,1335 \text{ km}^2$, 碳密度增加 1.07 t/hm^2 。虽然鄂尔多斯建设用地增量占总建设用地增量的 30.43%, 但充足的生态地类扩张保证了其平均碳密度的稳定性, 使其碳储量增长 $9.26 \times 10^6 \text{ t}$ 。耕地碳汇能力虽然高于建设用地和未利用地, 但其整体面积变化低于草地, 且受扩张限制, 低碳汇地类向其转换并不能显著提高区域碳汇能力, 因此, 推进林草建设, 防止荒漠化进程是稳定和提高区域碳汇能力的关键。

表 4 2000—2020 年黄河流域内蒙古段各地类与平均碳密度变化

Table 4 Changes of class and average carbon density in Mongolia in Yellow River Basin during 2000—2020

项目	地类	呼和浩特	包头	鄂尔多斯	巴彦淖尔	乌海	阿拉善左旗	凉城县	总计
2000—2010 年 各地类面积 变化/km ²	耕地	-348	-196	-627	518	14	58	-240	-821
	林地	36	6	1	75	0	3	50	171
	草地	158	-57	4 080	630	-68	5	198	4 946
	水域	16	12	63	8	2	6	-14	93
	建设用地	156	234	239	228	69	18	6	950
	未利用地	-18	1	-3 756	-1 459	-17	-90	0	-5 339
平均碳密度变化/(t·hm ⁻²)	-0.68	-2.76	1.39	0.65	-1.94	0.03	0.26	0.26	-3.06
2010—2020 年 各地类面积 变化/km ²	耕地	113	-91	1 290	677	-2	120	97	2 204
	林地	137	9	19	4	0	1	92	262
	草地	-475	-106	1 335	-3 314	-16	-848	-184	-3 608
	水域	4	-9	29	23	26	33	-20	86
	建设用地	224	176	307	233	35	19	15	1 009
	未利用地	-3	21	-2 980	2 377	-43	675	0	47
平均碳密度变化/(t·hm ⁻²)	-0.82	-2.02	1.07	-1.54	-1.01	-0.34	0.47	0.47	-4.19

2.2 未来碳汇模拟分析

2.2.1 未来土地利用格局多情景模拟对比 在自然发展情景中,建设用地面积增加 1 958 km²,面积占比从 1.29%增长至 2.06%,而耕地、林地与水域面积分别增长 997,429,135 km²,3 种地类虽均有增长态势,但比例增长仅为 0.39%,0.17%和 0.05%。作为研究区占比最高的两种地类,草地与未利用地面积则分别减少 1 679,1 840 km²,其面积的减少除两种地类间的相互转换之外,也为其他地类的扩张提供了空间。在生态保护情景中,水域及耕地变化较小,建设用地向草地的扩张速率明显放缓,增长面积为 1 440 km²,低于自然发展情景(见图 4)。林地与草地面积分别

增长 571,6 281 km²,面积占比提高 0.22%和 2.47%,未利用地作为草地与林地的主要增长来源,面积减少 8 106 km²,空间占比下降至 37.65%,为区域林草建设提供了保障。但在农业优先情景中,未利用地主要转出地类更倾向于耕地,面积减少 3 769 km²。在该情景下,耕地面积增长 3 477 km²,空间占比提高 1.37%。建设用地因限制向耕地扩张,其面积增长仅 923 km²,空间占比增长 0.36%,低于自然发展情景和生态保护情景。林地、水域面积变化较小,草地和未利用地面积分别减少 993,3 769 km²,其主要原因为沿黄河流域平原地区耕地扩张,使得草地与未利用地面积减少(见表 5)。

表 5 黄河流域内蒙古段 2020 年土地利用与 2040 年多情景模拟情况对比

Table 5 Comparison of land use in 2020 and multi-scenario simulation in 2040 in Inner Mongolia of Yellow River basin

情景	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地		
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
2020 年	28 605	11.25	1 489	0.59	116 020	45.62	1 064	0.42	3 280	1.29	103 836	40.83	
2024 年	自然发展	29 602	11.64	1 918	0.75	114 341	44.96	1 199	0.47	5 238	2.06	101 996	40.11
	生态保护	28 303	11.13	2 060	0.81	122 301	48.09	1 180	0.46	4 720	1.86	95 730	37.65
	农业优先	32 082	12.62	1 704	0.67	115 027	45.23	1 211	0.48	4 203	1.65	100 067	39.35

2.2.2 碳汇空间对未来土地利用多情景模拟的响应

从数量变化角度看,2040 年自然发展情景与农业优先情景下的碳储量低于生态保护情景,在未来碳汇模拟变化中,自然发展情景碳储量相比 2020 年减少 3.92×10⁶ t,其中,土壤碳库的下降是导致碳储量减少的主要原因(图 5)。在生态保护情景中,植被的覆盖得

到有效保障,碳储量相比 2020 年增长 2.21×10⁷ t。其中,地下生物和土壤碳库碳储量分别增长 6.87×10⁶ t 和 1.25×10⁷ t,验证了植被覆盖度的增加能够有效促进碳汇能力。而农地虽然也有一定的碳汇能力,但在农业优先情景中,其土壤碳库增长甚微,碳储量的增长主要依靠地下生物碳库,其增长值为 4.99×10⁶ t。

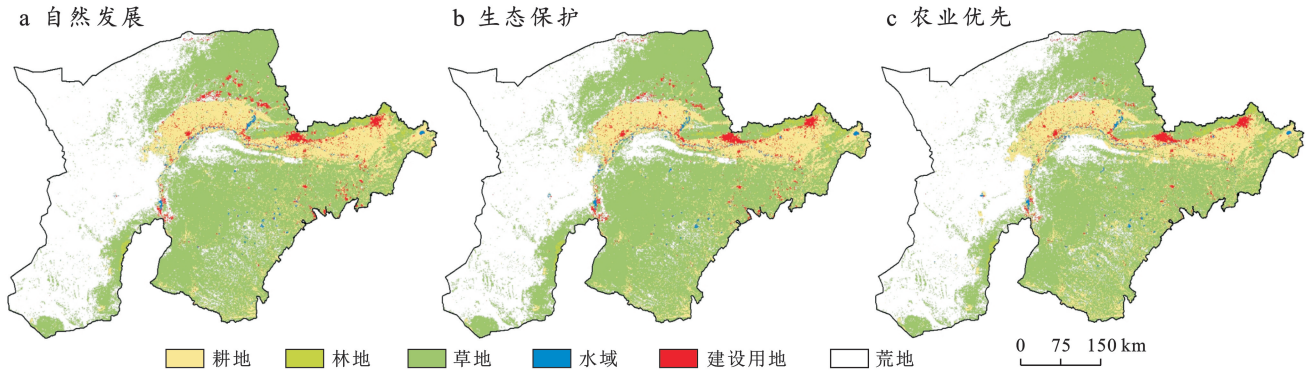


图 4 2040 年黄河流域内内蒙古段各情景模拟下的土地利用空间分布

Fig.4 Spatial distribution of land use under various scenarios in Inner Mongolia of Yellow River basin in 2040

分析各城镇碳密度变化得知(见图 6),自然发展情景下碳密度减少 0.15 t/hm^2 ,而在生态保护情景和农业优先情景下分别增长 $0.87, 0.34 \text{ t/hm}^2$ 。自然发展情景下除鄂尔多斯和凉城县外,其他地区碳密度均呈下降趋势,这与 2000—2020 年碳密度变化趋势基本一致。该情景下碳密度下降严重的地区为巴彦淖尔、包头、乌海以及呼和浩特市,其中巴彦淖尔地处荒漠化缓冲带,其碳密度下降主要由荒漠扩张所致,而包头、乌海与呼和浩特在自然发展情景中建设用地未受限制,且未进行积极的生态建设,导致区域碳密度显著下降。在生态保护情景中,巴彦淖尔、鄂尔多斯、阿拉善左旗与乌海碳密度均高于自然发展情景,这些地区处于林草建设重点区域,在生态发展情景下草地面积显著增加,从而提高了该区域碳汇能力。而在耕地保护情景中,呼和浩特、包头等中心城市碳密度有所下降,但沿黄河粮食种植区域碳密度高于自然发展情景。因河套平原为研究区内重要粮食种植区,在该情景下耕地受到严格保护,建设用地并未大面积扩张,但耕地的扩张侵占了部分草地与未利用地,影响了研究区整体的碳汇能力。

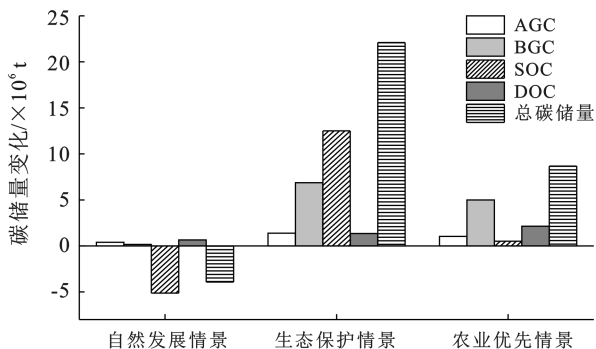


图 5 2040 年黄河流域内内蒙古段多情景下各碳库碳储量变化

Fig.5 Changes of carbon stocks of each carbon pool in Inner Mongolia of Yellow River basin in 2040 under multiple scenarios

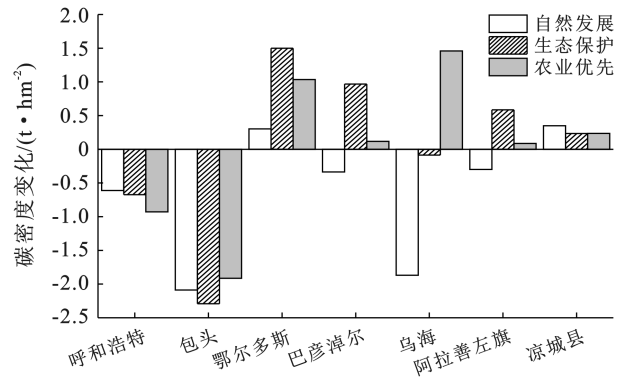


图 6 2040 年黄河流域内内蒙古段多情景下各地区碳密度变化

Fig.6 Changes of carbon density in Inner Mongolia of Yellow River basin under multiple scenarios in 2040

从空间变化看(见图 7),2040 年黄河流域内内蒙古段各情景碳汇空间分布格局与 2020 年总体相似,仍呈东高西低态势。在自然发展情景下,研究区低碳汇空间沿中心城市边界以及河套平原居民区向外显著扩张,该情景下乌海、巴彦淖尔以及呼和浩特碳汇空间明显减少,鄂尔多斯与凉城县碳汇空间少量增加。生态情景下虽然呼和浩特、包头以及乌海等中心城市碳汇空间仍处于减少状态,但其余地区高碳汇空间显著扩张,其关键原因在于生态地类向未利用地的推进。而农业优先情景下,虽然沿黄河流域平原地区低碳汇空间减少,但结合数量变化来看,耕地碳汇能力低于生态地类,农业空间挤压生态地类仍会导致碳汇空间减少。

2.3 碳汇空间格局影响因素分析

除土地利用方式的转变以外,外部条件的影响对于碳汇空间演变也具有一定的影响,利用地理探测器进行因子探测可以揭示各种影响因素对碳汇空间格局的潜在影响强度,可为未来不同增汇方向提供参考。区域碳汇能力受多因素综合影响,且不同因素间存在相互作用,本文从自然因素、社会因素、经济因素

的角度考虑,共选取了坡向、坡度、高程、降水、气温、距铁路距离、距公路距离、距河流距离、距居民点距

离、GDP、人口等 11 个影响因素,为考虑严谨性,影响因素数据选取年份均为 2020 年。

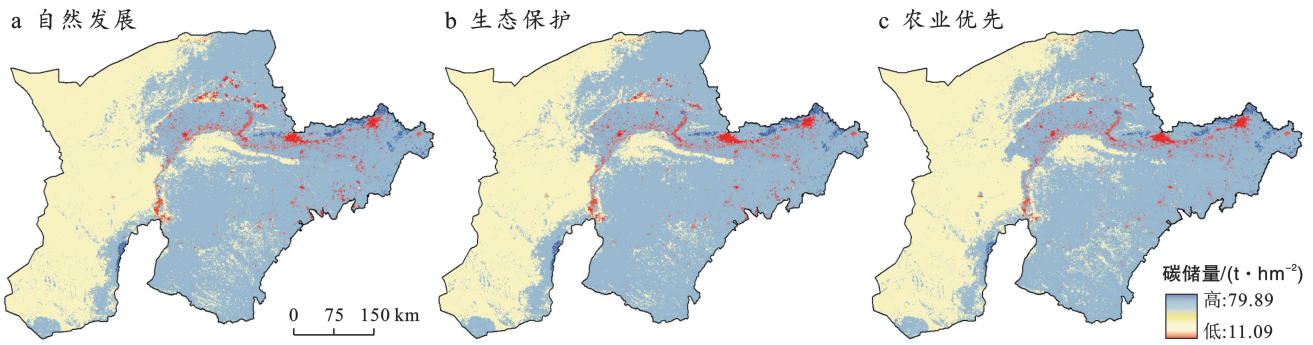


图 7 黄河流域内蒙古段多情景碳汇空间分布

Fig.7 Spatial distribution of carbon sinks in Inner Mongolia section of Yellow River Basin in multiple scenarios

表 6 黄河流域内蒙古段碳储量影响因素探测结果

Table 6 Detection results of influencing factors of carbon storage in Inner Mongolia section of Yellow River basin

影响因素	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
因子解释	坡向	降雨量	气温	铁路	人口	坡度	居民点	河流	公路	GDP	高程
解释力 q	0.001 8	0.504 5	0.229 0	0.188 8	0.068 7	0.011 4	0.194 2	0.056 8	0.129 2	0.087 7	0.002 3

从因子探测结果来看(表 6),各影响因素对研究区碳汇能力分布格局的解释力大小排序为: $X_2 > X_3 > X_7 > X_4 > X_9 > X_{10} > X_5 > X_8 > X_6 > X_{11} > X_1$ 。自然因素中解释力最大的因素为年平均降水量,碳汇能力的高低与其拟合度较高,其次为年平均气温。而在社会因素中解释力最高的因素为居民点,与高碳汇地区分布拟合度较高,其次为距铁路距离及距公路距离。虽然研究区内社会经济空间占比较少,但 GDP、人口因素解释力仍达到了 0.087 7,0.068 7,且与低碳汇空间拟合度较高(图 8),表明社会经济因素与碳汇能力呈负相关关系。

从交互探测角度看(图 9),各因子交互探测结果呈现出非线性增强和双因子增强关系。其中与 X_2 交互的因子除 $X_6 \cap X_2$ 和 $X_{11} \cap X_2$ 呈非线性增强关系外,其他交互均呈双因子增强关系,且解释力均 > 0.5 。双因子增强关系中解释力最高的交互因子为 $X_5 \cap X_2$ (0.529 1) 和 $X_3 \cap X_2$ (0.528 4),说明降雨量与人口、气温的交互会导致对碳汇能力影响的增强。另外,距铁路距离、距居民点距离、年平均气温间的交互解释力 > 0.30 ,距公路距离与其他因子的交互解释力 > 0.13 。

综上所述可知,对碳汇空间分布影响最大的因子为降雨量和气温,其对植物生长具有决定性作用,而且人类活动随降雨量与气温适宜程度分布,导致地类

转换速率加快,其与自然因素的叠加会增强对碳汇能力的影响。

3 讨论

从 2000—2020 年碳汇变化来看,生态地类的优先级远高于其他地类,尤其从碳汇能力最强的土壤碳库来看,土壤的利用性质变化直接影响了整体碳储量,是碳储量减少的关键。流动沙地向其他地类转移时土壤变化首先从土表开始,而土壤中的有机碳密度最高值均在土壤表层^[30]。由于腾格里沙漠与乌兰布和沙漠均分布于研究区内,因此未利用地占比较高,荒漠化速率较快,且主要向林草地等碳汇能力较高的地类扩张,是区域碳汇能力下降的主要原因,这与闫蒙等^[31]等沙漠化碳含量减少研究结果一致。

此外,从未来不同土地利用方式中也可以看出,农用地虽然也有碳汇效益,但其碳汇效益要低于生态用地。主要原因在于,耕地作为需要进行扰动的土壤,其土壤碳汇稳定性低于未扰动的生态地类,当耕地向草地、林地转化时,其土壤碳密度会有所提高,这与张煜等^[32]对内蒙农牧交错带地区土地利用方式和施肥对土壤碳库的影响研究结论相同。同时农用地作为碳源和碳汇双重作用载体,从碳中和的角度来看,其综合生态效益要低于生态地类^[33]。

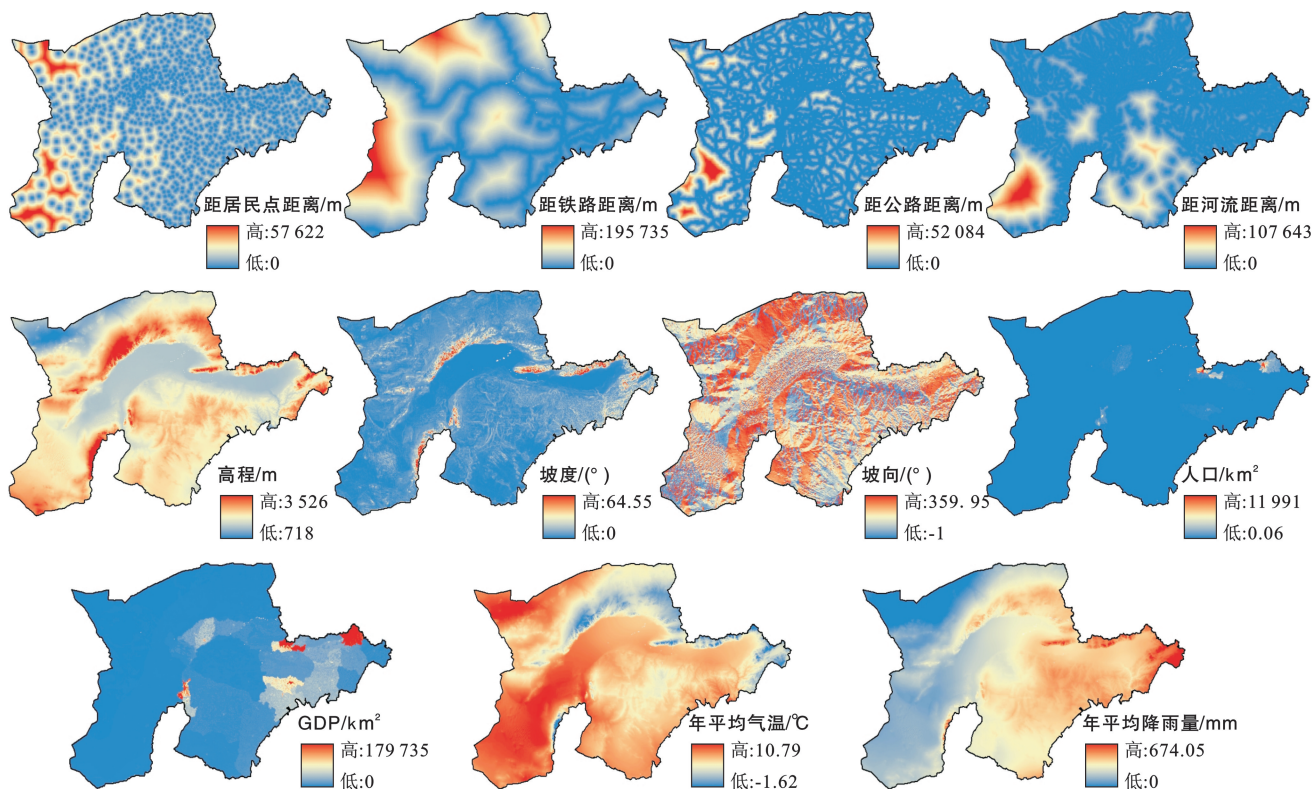


图 8 黄河流域内蒙古段碳储量影响因子选择

Fig.8 Selection of carbon stock influence factors in Inner Mongolia section of Yellow River basin

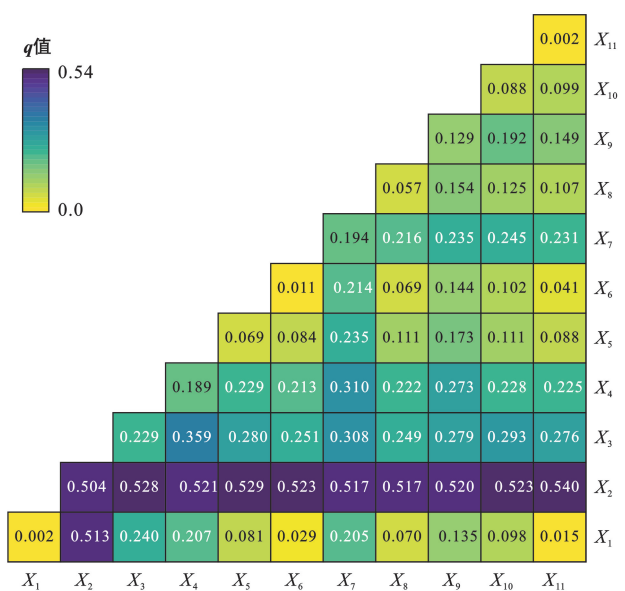


图 9 黄河流域内蒙古段碳储量影响因素交互探测结果

Fig.9 Interaction detection results of carbon stock influencing factors in Inner Mongolia section of Yellow River basin

通过分析碳汇能力变化与驱动力关系发现,降水和气温是影响黄河流域内蒙古段总碳储量的主要因素。年平均降水和年平均气温等气候条件能够影响 0—40 cm 土壤有机碳的形成,而气候和土壤的双重作用能够直接影响植物碳输入和碳输出的平衡^[34]。

在空间分布上,年平均降水量低值区域与研究区西部未利用地高度拟合。该区域未利用地为荒漠地区,降雨量较少,且土壤类型为荒漠土壤,因此难以形成植被,导致其地上及地下碳汇能力底下。其次,研究区西部区域年平均气温较高,而较高的年平均气温能够促进土壤有机碳库的分解速率,导致土壤碳汇能力下降^[35]。除此之外,中东部区域人类活动明显高于西部地区,而随着人类活动的频繁,其区域地类转换速率也相应提高,尤其在研究区中部荒漠化区域,人工林草建设工程与未利用地博弈明显,对研究区碳储总量高低有决定性作用。这也表明气候条件与人类活动的叠加效应可提高对碳汇能力的影响,同时进一步证实了人工林草建设工程对于碳汇增加的重要性。

本研究从外部因素分析了影响碳汇格局的主要原因,并从宏观上较好的反映了干旱半干旱区荒地与耕地对区域碳汇能力的影响,同时也证明了生态地类对未来增汇情景中的重要性,但仍存在几点不足之处。首先本文在量化土地利用变化与碳汇能力关系时采用了 InVEST 模型中的 Carbon Storage and Sequestration模块,补充了传统碳储量估算在空间可视化上的不足,但 InVEST 模型在计算碳储量过程中假设碳库密度数据是固定不变的,未考虑 4 个碳库在土地利用变化中的流动转换,而这就意味着在多时段

土地利用变化中研究区碳储量数值只能随土地利用变化而变化,忽略了植被生长情况以及土壤质地变化等对碳密度的影响。其次,借助地理探测器虽然能够宏观上探测主要影响因子,但对于大尺度研究区,分区计算其影响因素有利于提高影响因素探测精度,以便实施更妥善的改善措施。另外,本文从单一碳汇角度分析了黄河流域内蒙古段碳密度和碳汇能力时空变化,但碳中和工作分为“碳减排”和“碳吸收”双重内容,因此应量化碳吸收和碳排放间的溢出和缺失关系,以便更客观地向碳汇市场建立和碳中和工作提供参考。本文虽然在未来情景模拟过程中加入了自然、经济、社会等驱动因素,但忽略了未来地方政府对于经济发展和生态保护的约束力度以及发展红线对于未来预测的影响,因此在设置未来发展情景时要综合考虑自然、经济、社会驱动因素以外,应根据最新未来发展导向设置更为贴切的情景模拟。

4 结论

(1) 黄河流域内蒙古段在过去 20 a 间碳储量总体处于上升态势,碳储量共增加 8.63×10^6 t。2000—2010 年随着绿化工作及治沙工程的推进,碳储量增加 1.42×10^7 t,但在 2010—2020 年由于耕地大面积增加,碳储量减少 5.53×10^6 t,其中,土壤碳库的下降是促进碳储量减少的关键。

(2) 在未来自然发展情景下,碳储量依旧呈下降态势。而在生态保护情景下,地下生物与土壤碳库均有增加,增汇效益优于依靠单一地下生物碳库的农业优先情景,这也进一步显示了生态地类对于区域增汇的优先性。

(3) 通过探测影响因子得知,对该区域碳汇能力影响最高的因素为年平均降水量和年平均气温,且与社会和经济因素呈双线性增强关系。气候的不平衡对作物生长以及人活动分布均有一定影响,同时是该地区各类碳库形成差异的关键。

[参 考 文 献]

- [1] 杜之利,苏彤,葛佳敏,等.碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应[J].经济研究,2021,56(12):187-202.
Du Zhili, Su Tong, Ge Jiamin, et al. Towards the carbon neutrality: The role of carbon sink and its spatial spillover effects [J]. Economic Research Journal, 2021, 56(12): 187-202.
- [2] 徐冠华,刘琦岩,罗晖,等.后疫情时代全球气候变化的应对与抉择[J].遥感学报,2021,25(5):1037-1042.
Xu Guanhua, Liu Qiyan, Luo Hui, et al. Responses and choices of global climate change in the post-epidemic era [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(5): 1037-1042.
- [3] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等.面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J].自然资源学报,2021,36(12):2995-3006.
Huang Xianjin, Zhang Xiuying, Lu Xuehe, et al. Land development and utilization for carbon neutralization [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 2995-3006.
- [4] 李培林.面对未来:我国城镇化的特征、挑战和趋势[J].中国社会科学院大学学报,2022,42(8):5-20.
Li Peilin. Toward the future: characteristics, challenges and trends of urbanization in China [J]. Journal of University of Chinese Academy of Social Sciences, 2022, 42(8): 5-20.
- [5] 邹桃红,陈鹏,刘家福,等.不同土地利用情景下四平市生态系统碳储量时空演变[J].中国环境科学,2023,43(10):5508-5518.
Zou Taohong, Chen Peng, Liu Jiafu, et al. Spatio-temporal dynamics of territorial ecosystem carbon storage under different land use scenarios in Siping City [J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5508-5518.
- [6] 曾娟,刘毅华,吴大放.广州市土地利用变化的碳排放效应研究[J].广东农业科学,2013,40(6):186-189.
Zeng Juan, Liu Yihua, Wu Dafang. Effects of land use change on net carbon emissions in Guangzhou [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(6): 186-189.
- [7] 郑永超,文琦.宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J].水土保持研究,2020,27(1):207-212.
Zheng Yongchao, Wen Qi. Change of land use and the carbon emission effect of Ningxia autonomous region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 207-212.
- [8] 许蕊,黄贤金,王佩玉,等.黄河流域国土空间碳中和度研究:以内蒙古段为例[J].生态学报,2022,42(23):9651-9662.
Xu Rui, Huang Xianjin, Wang Peiyu, et al. Territorial spatial carbon neutrality realization degree of the Yellow River Basin: a case study of the Inner Mongolia section [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9651-9662.
- [9] 张楚强,向洋,方婷,等.LUCC影响下太原市生态系统碳储量时空变化及预测[J].安全与环境工程,2022,29(6):248-258.
Zhang Chuqiang, Xiang Yang, Fang Ting, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Taiyuan ecosystem under the influence of LUCC [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(6): 248-258.
- [10] 邹文涛,何友均,叶兵,等.基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J].中南林业科技大学学报,2021,41(3):120-128.

- Zou Wentao, He Youjun, Ye Bing, et al. Study on carbon storage of ecosystem in Qianjiangyuan National Park based on InVEST model [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(3):120-128.
- [11] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(6):20-28.
- Gong Shengxuan, Zhang Yuhu, Li Yuhang. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region: a PLUS-InVEST model approach [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(6):20-28.
- [12] 袁雪松, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 基于 FLUS 模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测[J]. *地理科学*, 2023, 43(3):564-574.
- Yuan Xuesong, Zhou Jun, Hu Beibei, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological-productive-living spaces in Guangdong-Hong Kong Macao Greater Bay Area based on FLUS model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3):564-574.
- [13] 牛统莉, 熊立华, 陈杰, 等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J/OL]. *武汉大学学报(工学版)*. (2023-03-14)[2023-07-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20230313.1823.002.html>
- Niu Tongli, Xiong Lihua, Chen Jie, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River Basin based on PLUS model[J/OL]. *Engineering Journal of Wuhan University*. (2023-03-14)[2023-07-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20230313.1823.002.html>
- [14] 李海萍, 王语萌, 杜佳琪. 基于保护生态服务价值的县域城市扩展情景分析: 以浙江省安吉县为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(19):7858-7870.
- Li Haiping, Wang Yumeng, Du Jiaqi. Scenario analysis of County expansion based on the value of ecological services: taking Anji County in Zhejiang Province as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(19):7858-7870.
- [15] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置: 以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(12):4284-4298.
- Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: a case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12):4284-4298.
- [16] 郑佳乐, 李粉玲, 张晓东, 等. 宁夏引黄灌区生态承载力分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3):164-171.
- Zheng Jiale, Li Fenling, Zhang Xiaodong, et al. Analysis of ecological carrying capacity of Ningxia yellow diversion irrigation area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3):164-171.
- [17] 祁强强, 徐占军, 李娜艳, 等. 黄河流域碳排放的时空分布及影响因素研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(4):577-582.
- Qi Qiangqiang, Xu Zhanjun, Li Nayan, et al. Spatio-temporal distribution pattern and influencing factors of carbon emission in the Yellow River Basin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(4):577-582.
- [18] 刘希朝, 李效顺, 蒋冬梅. 基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4):265-274.
- Liu Xizhao, Li Xiaoshun, Jiang Dongmei. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(4):265-274.
- [19] 付乐, 迟妍妍, 于洋, 等. 2000—2020 年黄河流域土地利用变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(10):1927-1938.
- Fu Le, Chi Yanyan, Yu Yang, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(10):1927-1938.
- [20] 付建新. 山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3):364-372.
- Fu Jianxin. Temporal and spatial changes of NDVI of different land covers and their responses to temperature and precipitation in the Yellow River Basin of Shanxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3):364-372.
- [21] 吴翠霞, 冯永忠, 赵浩, 等. 基于土地利用变化的甘肃省黄河流域生态系统服务价值研究[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(6):304-316.
- Wu Cuixia, Feng Yongzhong, Zhao Hao, et al. Study on ecosystem service value of the Yellow River Basin in Gansu Province based on land use change [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(6):304-316.
- [22] 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.
- [23] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple

- land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [24] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4473-4487.
Ren Yinming, Liu Xiaoping, Xu Xiacong, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [25] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. *环境科学*, 2022, 43(11): 5253-5262.
Hou Jiankun, Chen Jianjun, Zhang Kaiqi, et al. Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5253-5262.
- [26] 吴宗洋, 蔡卓雅, 郭英, 等. 黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(6): 917-927.
Wu Zongyang, Cai Zhuoya, Guo Ying, et al. Accuracy evaluation and consistency analysis of multi-source remote sensing land cover data in the Yellow River Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(6): 917-927.
- [27] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于 FLUS-InVEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响: 以呼包鄂榆城市群为例[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1667-1679.
Wang Chaoyue, Guo Xianhua, Guo Li, et al. Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-InVEST: A case study of hu-Bao-Er-yu urban agglomeration [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8): 1667-1679.
- [28] 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): 90-96.
Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [28] 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.
- [29] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [30] 高亮, 高永, 王静, 等. 土地覆盖类型对科尔沁沙地南缘土壤有机碳储量的影响[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(5): 1357-1364.
Gao Liang, Gao Yong, Wang Jing, et al. Impact of land cover change on soil carbon storage in the southern horqin sandy land, inner Mongolia [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(5): 1357-1364.
- [31] 闫蒙, 王旭洋, 周立业, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳含量变化特征及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 221-231.
Yan Meng, Wang Xuyang, Zhou Liye, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the process of desertification in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5): 221-231.
- [32] 张煜, 张琳, 吴文良, 等. 内蒙农牧交错带地区土地利用方式和施肥对土壤碳库的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 930-941.
Zhang Yu, Zhang Lin, Wu Wenliang, et al. Impact of land use and fertilization measures on soil C stock in farming grazing interlacing zone of inner Mongolia, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 930-941.
- [33] 黎鹏, 张勇, 李夏浩祺, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 29-33.
Li Peng, Zhang Yong, Li X, et al. Effect of soil carbon sink in the hilly region of the loess plateau under grain for green project [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 29-33.
- [34] 杨阳, 窦艳星, 王宝荣, 等. 黄土高原土壤有机碳固存机制研究进展[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 509-522.
Yang Yang, Dou Yanxing, Wang Baorong, et al. Advances in soil organic carbon sequestration mechanisms on the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 509-522.
- [35] 王鑫婧, 张美玲, 杨敏聪, 等. 基于 CENTURY 模型的张掖草地土壤有机碳模拟及影响因素研究[J]. *草地学报*, 2023, 31(4): 1173-1185.
Wang Xinjing, Zhang Meiling, Yang Mincong, et al. Simulation of soil organic carbon and analysis on its influencing factors in Zhangye grassland based on CENTURY model [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(4): 1173-1185.

