

气候变化下黑土区陆地生态系统碳储量时空格局与模拟

盖兆雪^{1,2} 郑文璐¹ 王洪彦¹ 杜国明¹

(1. 东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农林经济管理博士后科研流动站, 哈尔滨 150030)

摘要: 以典型黑土区——三江平原为研究区, 采用最小二乘法揭示 1990—2020 年气候变化下研究区陆地生态系统碳储量变化趋势, 借助重心分析和冷热点分析方法揭示研究区陆地生态系统碳储量时空分异特征, 利用地理加权回归法分析气候因子对碳储量的影响, 并借助 CMIP6 数据模拟和预测高强迫情景 (SSP585) 和中等强迫情景 (SSP245) 下陆地生态系统碳储量。结果表明: 气候变化背景下 1990—2020 年研究区碳储量呈波动下降趋势, 碳储量损失约 2.66×10^7 t; 碳储量高值区主要分布在西北部 and 东部地区, 碳储量低值区主要分布在北部和东南部地区; 1990—2020 年研究区碳储量下降速率变化幅度较大, 其中鹤岗市碳储量下降速率最大, 佳木斯市最小。1990—2020 年研究区碳储量重心向东北方向移动 1 340 m, 其中 2000—2020 年向东北方向偏移 1 680 m; 碳储量热点区呈片状和块状分布格局, 冷点区呈片状和带状分布格局, 热点区范围基本保持不变, 冷点区范围缩小。1990—2020 年研究区年均气温、年降水量与碳储量关系具有显著性, 呈正负无规律交错分布的空间格局。气候与土地利用变化决定碳储量的时空格局, 其中林地—林地和耕地—耕地碳储量损失最大。在 SSP585 和 SSP245 情景下, 2030 年研究区碳储量分别为 2.22×10^7 t 和 2.26×10^7 t, 相比 2020 年分别减少 2.17×10^7 t 和 2.13×10^7 t, 碳储量空间分布格局未发生显著改变, 但冷热点区范围均缩小, 重心将持续向东北方向偏移 6 525 m 和 6 000 m。

关键词: 陆地生态系统碳储量; 时空格局; 气候变化; 模拟; 三江平原

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0303-14

OSID:



Spatio-temporal Pattern and Simulation of Terrestrial Ecosystem Carbon Storage in Black Soil Region under Climate Change

GAI Zhaoxue^{1,2} ZHENG Wenlu¹ WANG Hongyan¹ DU Guoming¹

(1. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Post-doctoral Research Mobile Station of Agricultural and Forestry Economic Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Taking Sanjiang Plain, a typical black soil region, as the study area, and the least squares method was used to reveal the change trend of terrestrial ecosystem carbon stocks under climate change in 1990—2020. By means of barycentric analysis and cold hot spot analysis, the spatial and temporal differentiation of terrestrial ecosystem carbon stocks in study area was revealed, and the influence of climate factors on carbon stocks was analyzed by geographical weighted regression method. CMIP6 data were used to simulate and predict terrestrial ecosystem carbon stocks under SSP585 and SSP245. The results showed as follows: under the background of climate change, carbon storage in study area showed a fluctuating trend of decline in 1990—2020, and carbon storage loss was about 2.66×10^7 t. The regions with high carbon storage value were mainly distributed in the northwest and east, while the regions with low carbon storage value were mainly distributed in the north and southeast. The rate of carbon storage decline in the study area was changed greatly in 1990—2020, and the rate of carbon storage decline in Hegang City was the largest, while the rate of carbon storage decline in Jiamusi City was the minimum. The center of gravity of carbon storage in study area was shifted 1 340 m to the

收稿日期: 2023-10-08 修回日期: 2023-11-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD150010)、黑土地可持续利用管理学科团队项目(54940212)和东农学者计划项目(19QC37)

作者简介: 盖兆雪(1990—), 女, 讲师, 博士, 主要从事土地/耕地资源优化配置研究, E-mail: gaizhaixue@163.com

通信作者: 杜国明(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事土地资源优化配置和农村发展研究, E-mail: nmgdgm@126.com

northeast in 1990—2020, and 1 680 m to the northeast in 2000—2020. The distribution pattern of carbon storage hotspots was sheet-like and blocky, and the distribution pattern of cold spots was sheet-like and banded, the range of hot spots was basically unchanged, and the range of cold spots was reduced. The relationship between annual temperature, annual precipitation and carbon storage in study area was significant in 1990—2020, showing a positive and negative interleaving spatial pattern. Climate and land use change determined the spatio-temporal pattern of carbon storage, and forest – forest land and cultivated land – cultivated land led to the greatest loss of carbon storage. Under the SSP585 and SSP245 scenarios, the carbon reserves in study area in 2030 were 2.22×10^7 t and 2.26×10^7 t, respectively, which were reduced by 2.17×10^7 t and 2.13×10^7 t compared with that in 2020, respectively. The spatial distribution pattern of carbon reserves was not changed significantly, but the areas of cold hot spots were reduced. The center of gravity would continue to shift 6 525 m and 6 000 m to the northeast.

Key words: terrestrial ecosystem carbon storage; spatio-temporal pattern; climate change; simulation; Sanjiang Plain

0 引言

人类活动引发 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体大量排放,导致全球气候变暖,严重威胁全球社会与经济的可持续发展^[1]。气候变化是影响生态系统碳储量主要因素,其通过影响表层土壤微生物生长、植物生长和有机物的凋落等,进而影响土壤与大气之间的碳交换^[2]。陆地生态系统作为碳储量的重要组成部分,已成为当前气候变化和区域可持续发展研究的核心内容之一^[3]。而土地利用变化作为人类活动最主要的表现形式,其通过土地利用类型的转变来影响区域碳储量^[4]。2020 年我国提出碳达峰碳中和的目标,“减排增汇”成为学者们关注的热点问题。因此,在气候变化的背景下,研究土地利用变化对碳储量的影响,对东北黑土区碳储量的研究具有重要现实意义。

目前学者们针对陆地生态系统碳储量开展了大量研究,并取得了一定成果。研究尺度分为宏观尺度(全球^[5]、全国^[6]、城市群^[7])、中观尺度(流域^[8-10]、省^[11-12])、微观尺度(县市^[13-15]、地块^[16])。在研究方法上,主要基于传统的样地实测法、蓄积量法和模型法(FORCCHN 模型、HASM 模型耦合 LPJ – GUESS 模型、HASM 模型耦合 InVEST 模型)揭示碳储量时空变化特征,如孙忠祥等^[16]利用样地实测数据计算旱作区土壤有机碳密度;付伟等^[12]采用森林蓄积量法核算我国 31 个省(市、自治区)1993—2018 年的森林碳汇量;吕富成等^[17]基于 FORCCHN 模型模拟我国 4 种典型森林生态系统不同时间尺度的碳储量;赵明伟等^[18]基于 HASM 模型和 LPJ – GUESS 模型模拟森林植被碳储量空间分布,并验证其精确性;仲俊涛等^[13]基于 InVEST 模型对宁夏盐池县禁牧前后草地碳储量进行精确评估;RAJBANSHI 等^[10]基于 InVEST 模型计算 1992—2016 年印度科纳尔流域碳储量变化和经济价值。

综合来看,传统的样地实测法较适用于小尺度研究,蓄积量法和模型法所需数据复杂、适用性较低,InVEST 模型基于土地利用类型进行计算,无法精确揭示碳储量的空间格局。另外,国内外学者采用地理加权回归模型法、主成分分析法、路径分析法和相关性分析法探索陆地生态系统碳储量影响因素,如潘萍等^[19]通过地理加权回归法探索马尾松林生态系统碳密度变化的显著影响因子;兰秀等^[20]应用主成分分析和回归分析方法解析植被碳储量影响因素。李彦娥等^[21]通过图表和相关性分析揭示碳汇变化的主要驱动因素。此外,学者们将 InVEST 模型与 CA – Markov 模型^[9]、FLUS 模型与 PLUS 模型进行耦合模拟陆地生态系统碳储量,如巩晟萱等^[7]基于 PLUS – InVEST 模型分析京津冀地区 2000—2020 年碳储量时空变化并预测;邵壮等^[14]基于 FLUS 模型与 InVEST 模型揭示北京市 1990—2018 年碳储量时空变化规律并预测。

纵观已有文献可知:①陆地生态系统碳储量研究主要集中在经济发达地区,而对黑土区陆地生态系统碳储量的研究相对较少。②已有研究多基于 InVEST 模型将碳密度视为固定值进行碳储量时空变化研究,忽略了碳密度的时空异质性。③基于 CMIP6 数据预测气候变化和人类活动对陆地生态系统碳储量的影响研究鲜有报道。因此,本文以典型黑土区——三江平原为研究区,基于 1990、2000、2010、2020 年 4 期土地利用数据,地上、地下生物碳密度和土壤碳密度数据、气候因子(年均气温、年降水量)数据,借助最小二乘法、重心分析和冷热点分析方法,揭示气候变化下 1990—2020 年研究区陆地生态系统碳储量的时空分异特征,利用地理加权回归法分析气候变化对陆地生态系统碳储量的影响,运用 CMIP6 数据预测 SSP585 和 SSP245 情景下 2030 年的陆地生态系统碳储量,以期为缓解黑土区碳储量损失和丰富碳储量测算理论提供科学建议,为

政府因地制宜制定黑土区固碳政策提供数据支撑。

1 研究区概况

三江平原作为北大仓,是我国重要的粮食生产基地,位于 45°01′00″~48°27′56″N,130°13′00″~135°05′26″E 之间。包括佳木斯市、鹤岗市、双鸭山市、七台河市、鸡西市在内的 21 个县(市)以及哈尔滨市下属依兰县(图 1)。地形较复杂,受大陆和海洋的影响,属典型的季风气候,近 30 年年均气温为 2.5~4.5℃,年降水量为 500~800 mm。2020 年研究区土地面积为 $1.02 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中,耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地面积分别为 6.57×10^4 、 3.07×10^4 、200、3 000、2 800、7.12 km^2 。

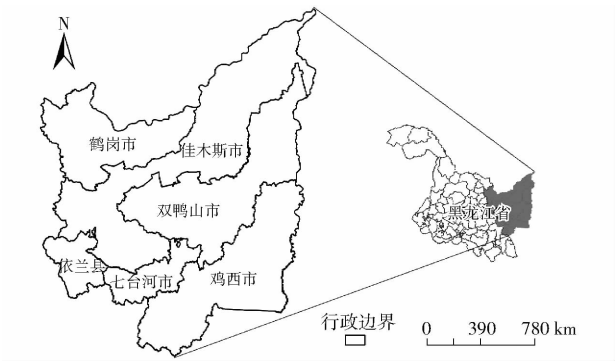


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

2 数据来源与处理

研究区 1990、2000、2010、2020 年土地利用类型数据(LUCC)来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)的“中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)”(<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54>),该数据是以 Landsat 遥感影像作为主要信息源,经人工目视解译方法建立的全国范围内多阶段专题数据库,空间分辨率为 30 m,精度较高,采用一级分类系统。研究区 1990、2000、2010、2020 年的年平均气温和年降水量来源于中国科学院资源与环境科学数据中心的“中国气象要素年度空间插值数据集”(<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=96>),分辨率为 1 km,该数据是基于全国 2 400 多个站点的气象要素站点日观测数据,利用数字高程模型(DEM)和薄盘平滑样条函数进行空间插值生成,插值精度高。地上与地下生物碳密度数据来源于 SPAWN 等 2020 年提供于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)橡树岭国家实验室分布式生物地球化学动态存档中心的全球地上及地下生物量碳密度数据集([https://daac.](https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/Global_Maps_C_Density_2010.html)

[ornl.gov/VEGETATION/guides/Global_Maps_C_Density_2010.html](https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/Global_Maps_C_Density_2010.html))和 WCMC 碳生物量数据集。土壤类型、土壤有机碳含量(1990、2000 年)和土壤容重数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。土壤有机碳含量(2010、2020 年)数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心-土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)。SSP585 和 SSP245 情景下 2030 年的气候数据来源于 CMIP6 数据官网(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>)。将地上、地下生物碳密度和土壤碳密度数据集进行叠加,获得研究区碳密度数据集。

3 研究方法

3.1 土壤碳密度估算

对研究区 1990—2020 年的表层土壤碳密度(SOCD)进行估算,计算公式为^[22]

$$SOCD = 10TD\rho \tag{1}$$

式中 SOCD——表层土壤有机碳密度, kg/m^2
T——表层土壤有机碳含量, %
D——土壤厚度,取 0.3 m
 ρ ——土壤容重, g/cm^3

3.2 碳储量估算

将研究区陆地生态系统碳储量分为 4 个基本碳库,分别为地上、地下、土壤与凋落物碳库^[23-24]。计算公式为

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \tag{2}$$

式中 C_{total} ——生态系统总碳储量, t
 C_{above} ——地类的地上生物碳储量, t
 C_{below} ——地类的地下生物碳储量, t
 C_{soil} ——地类的土壤碳储量, t
 C_{dead} ——凋落物碳储量, t

由于凋落物碳密度所占比例较小,均默认为 0。将 1990—2020 年研究区年降水量和年均气温代入碳密度修正公式,修正为符合研究区对应年份的碳密度,计算公式为

$$C_{BP} = 6.798e^{0.0054M_p} \tag{3}$$

$$C_{BT} = 28M_T + 398 \tag{4}$$

$$C_{Sp} = 3.3968M_p + 3\,996.1 \tag{5}$$

式中 M_p ——年降水量, mm
 M_T ——年均气温, $^{\circ}\text{C}$
 C_{BP} ——根据年均降水量修正得到的地上生物量碳密度, t/hm^2
 C_{BT} ——根据年均气温修正得到的地上生物量碳密度, t/hm^2

C_{SP} ——根据年均降水量修正得到的土壤碳密度, t/hm^2

3.3 地理加权回归分析

地理加权回归模型是一种空间局部回归方法, 计算公式为^[16]

$$y_i = \beta_{i0} + \sum_{k=1}^n \beta_{ik} x_{ik} + \varepsilon_i \tag{6}$$

式中 y_i ——点 i 碳密度, t/hm^2
 β_{i0} ——常数项
 β_{ik} ——点 i 第 k 个自变量(年均气温、年降水量)系数
 x_{ik} ——第 k 个自变量在点 i 的值
 ε_i ——残差项,符合正态分布 $N(0, \sigma^2)$
 n ——自变量数量

地理加权回归模型通过矩阵方程对各点进行局部分分析并估算系数, 计算公式为

$$\beta_{ik} = (X^T W_i X)^{-1} X^T W_i Y \tag{7}$$

式中 W_i ——点 i 的空间权重矩阵
 X ——各样本点构成的自变量矩阵
 Y ——各样本点构成的因变量矩阵

4 结果与分析

4.1 研究区陆地生态系统碳储量时间变化特征

估算 1990—2020 年气候变化下研究区陆地生态系统碳储量, 揭示碳储量时间变化趋势, 发现 1990—2020 年碳储量分别为 7.05×10^7 、 8.13×10^7 、 5.86×10^7 、 4.39×10^7 t, 呈波动下降趋势, 减少 2.66×10^7 t。其中 2000—2010 年碳储量大幅度下降, 碳储量减少 2.27×10^7 t; 而 1990—2000 年碳储量有所增长, 增加 1.08×10^7 t; 2010—2020 年碳储量持续减少, 减少 1.47×10^7 t(图 2)。

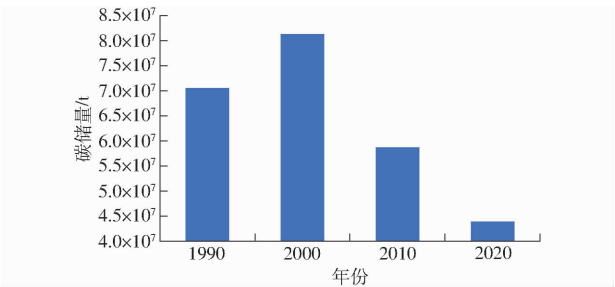


图 2 研究区 1990—2020 年碳储量变化
Fig.2 Changes in carbon storage in study area in 1990—2020

4.2 研究区陆地生态系统碳储量空间变化特征

4.2.1 变化趋势

借助 ArcGIS 10.7 平台揭示气候变化下研究区陆地生态系统碳储量空间格局(图 3)。从空间变化来看, 研究区陆地生态系统碳储量高值区呈散点状

分布在西北部 and 东部地区, 面积先扩大后缩小; 中值区呈片状分布在西北部、东部和南部地区, 且面积大幅扩张; 而低值区呈片状分布在北部和东南部地区, 面积有扩张趋势。综合来看, 1990—2020 年研究区东部、西北部和中南部地区碳储量变化显著, 其他地区变化不明显。

1990—2020 年气候变化下研究区碳储量高值区分布在双鸭山市南部和西部、鹤岗市中西部、佳木斯市西南部边缘、七台河市南部、依兰县南部和西北边缘和鸡西市南端, 这些地区土地利用类型主要为林地; 碳储量低值区分布在鸡西市、佳木斯市、鹤岗市中南部、双鸭山市中部、七台河市中部和依兰县, 土地利用类型主要为耕地、建设用地和未利用地。

利用最小二乘法进行碳储量与时间序列拟合, 并借助 ArcGIS 10.7 平台获得碳储量空间趋势变化图。结果表明, 1990—2020 年研究区陆地生态系统碳储量损失严重, 呈下降趋势, 变化速率主要集中在 $-39.19 \sim 0$ t/(10 a) 之间, 呈片状分布(图 4a)。碳储量损失最严重地区主要呈片状分布在东部、中南部和西南部地区, 在北部地区呈散点状分布, 变化速率在 $-344.58 \sim -143.24$ t/(10 a) 之间。

研究区各市碳储量均呈现下降趋势, 但变化速率不同(图 4b)。其中, 鹤岗市碳储量变化速率最高, 为 -79.48 t/(10 a); 佳木斯市碳储量变化速率最低, 为 -39.52 t/(10 a); 其他市县变化速率从大到小依次为双鸭山市、依兰县、七台河市、鸡西市, 对应的变化速率分别为 -70.16 、 -63.76 、 -62.88 、 -60.53 t/(10 a)。

4.2.2 重心分析

通过 ArcGIS 10.7 平台对 1990—2020 年气候变化下研究区碳储量进行重心分析, 揭示研究区碳储量空间变化轨迹^[25]。发现研究区碳储量重心向东北方向移动 1 340 m, 可见西南部地区比东北地区碳储量损失严重(图 5)。其中 1990—2000 年向西南迁移 340 m; 2000—2020 年碳储量重心向东北方向移动 1 680 m, 其中 2000—2010 年和 2010—2020 年均向东北方向偏移 840 m, 可见西南地区碳储量比东北地区碳储量损失严重, 主要由于研究区西南地区土地利用变化剧烈, 建设用地急剧扩张, 占用大量林地和耕地。

4.2.3 冷热点分析

借助 ArcGIS 10.7 平台对研究区碳储量进行空间自相关分析, 结果表明, Moran's I 大于 0.75, 并通过 $P < 0.001$ 显著性检验, 说明碳储量空间分布有高度聚集性。基于此, 借助 Getis - Ord General G 工具对 1990—2020 年气候变化下研究区碳储量进行

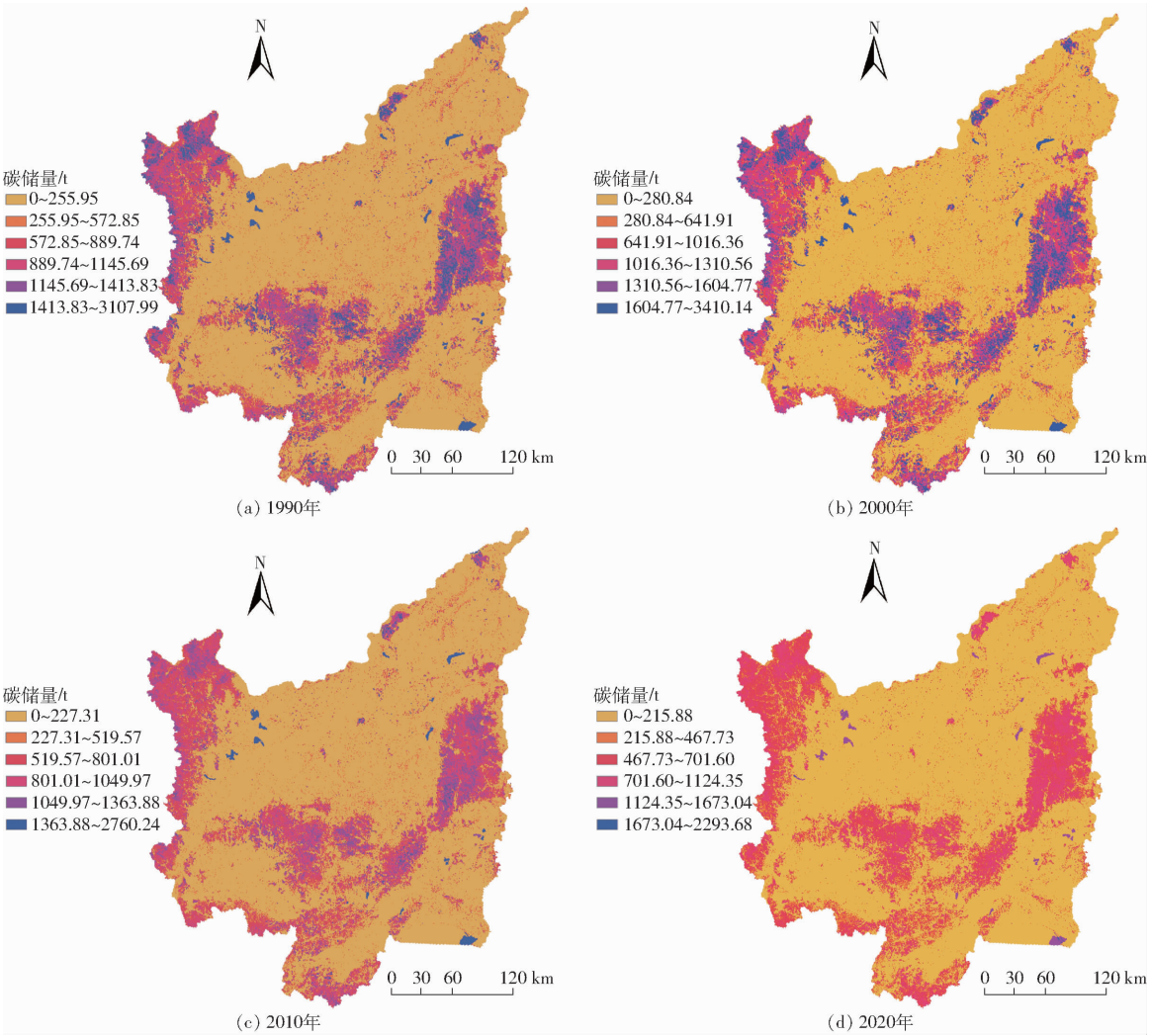


图 3 1990—2020 年研究区碳储量
Fig. 3 Carbon storage in study area in 1990—2020

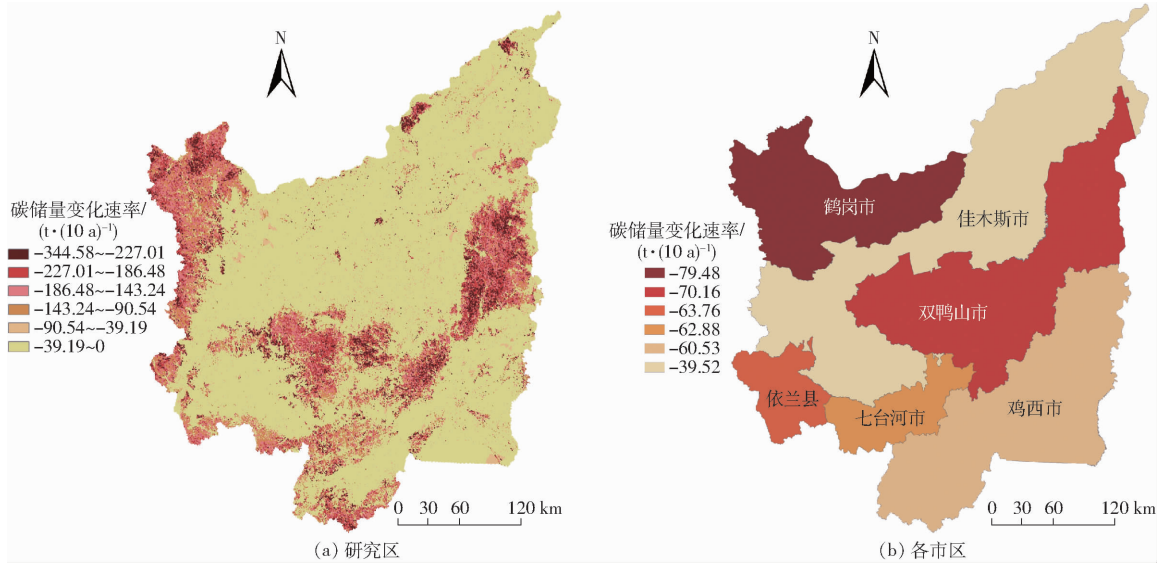


图 4 1990—2020 年研究区碳储量变化速率及各市碳储量变化速率
Fig. 4 Change rate of carbon storage in study area and in each city in 1990—2020

冷热点分析,揭示空间上碳储量变化的聚类分布^[26]。冷热点观测值 G 若为正值,值越高热点聚类的分布越集中,为热点区域,反之为冷点区域,结果

表明,1990—2020 年气候变化下研究区陆地生态系统碳储量热点区呈片状和块状分布格局,冷点区呈片状和带状分布格局(图 6)。其中,热点区范围变

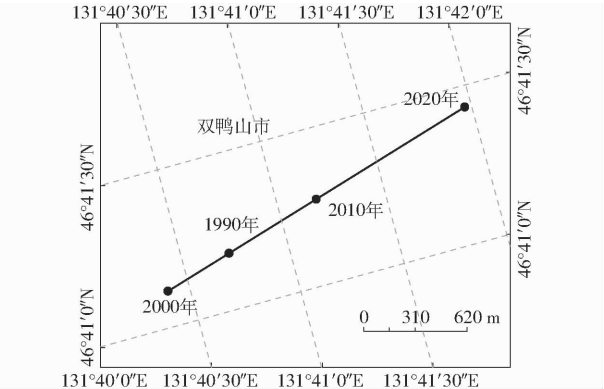


图 5 研究区碳储量重心转移轨迹

Fig. 5 Shifting trajectory of center of gravity of carbon storage in study area

化不大,东北地区有所扩大,主要集中在双鸭山市东北部和东南部、佳木斯市西南部、鹤岗市西北部、鸡西市西南部等地区;冷点区范围呈缩小趋势,逐渐由片状转为块状,其中 2010—2020 年变化最显著,主要成片分布在佳木斯市东北段、双鸭山市中部、鸡西市东北段、七台河市西部等地区,佳木斯市、双鸭山市、鸡西市西南部均有零星分布,表明碳储量损失进

一步增加。除此之外,碳储量冷热点分布与土地利用类型有密不可分的关系,碳储量热点区主要分布在林地,冷点区主要分布在水域、建设用地、耕地、草地和未利用地。由此可见,为缓解碳储量损失状况,应在西南地区实施有效管理战略并扩大造林,同时推广秸秆还田、有机肥施用等保护性耕作行为。

4.3 地理加权回归分析

运用普通最小二乘法模型(OLS)检验研究区碳储量与气候因子之间的多重共线性,结果表明,VIF 小于 2.50,Koenker 大于 700, $P < 0.01$,适合进行地理加权回归分析。

基于此,借助 GWR4 平台进行地理加权回归分析,研究年均气温、年降水量和陆地生态系统碳储量的相关关系。结果表明,2000 年和 2020 年气候因子 OLS 残差在 $-4.74 \sim 9.52$ 之间,地理加权回归(GWR)残差在 $-1.54 \sim 3.89$ 之间;1990 年和 2010 年气候因子 OLS 残差在 $-3.35 \sim 6.67$ 之间,GWR 残差在 $-1.21 \sim 3.04$ 之间,说明 GWR 模型拟合效果优于 OLS 模型(图 7、8)。

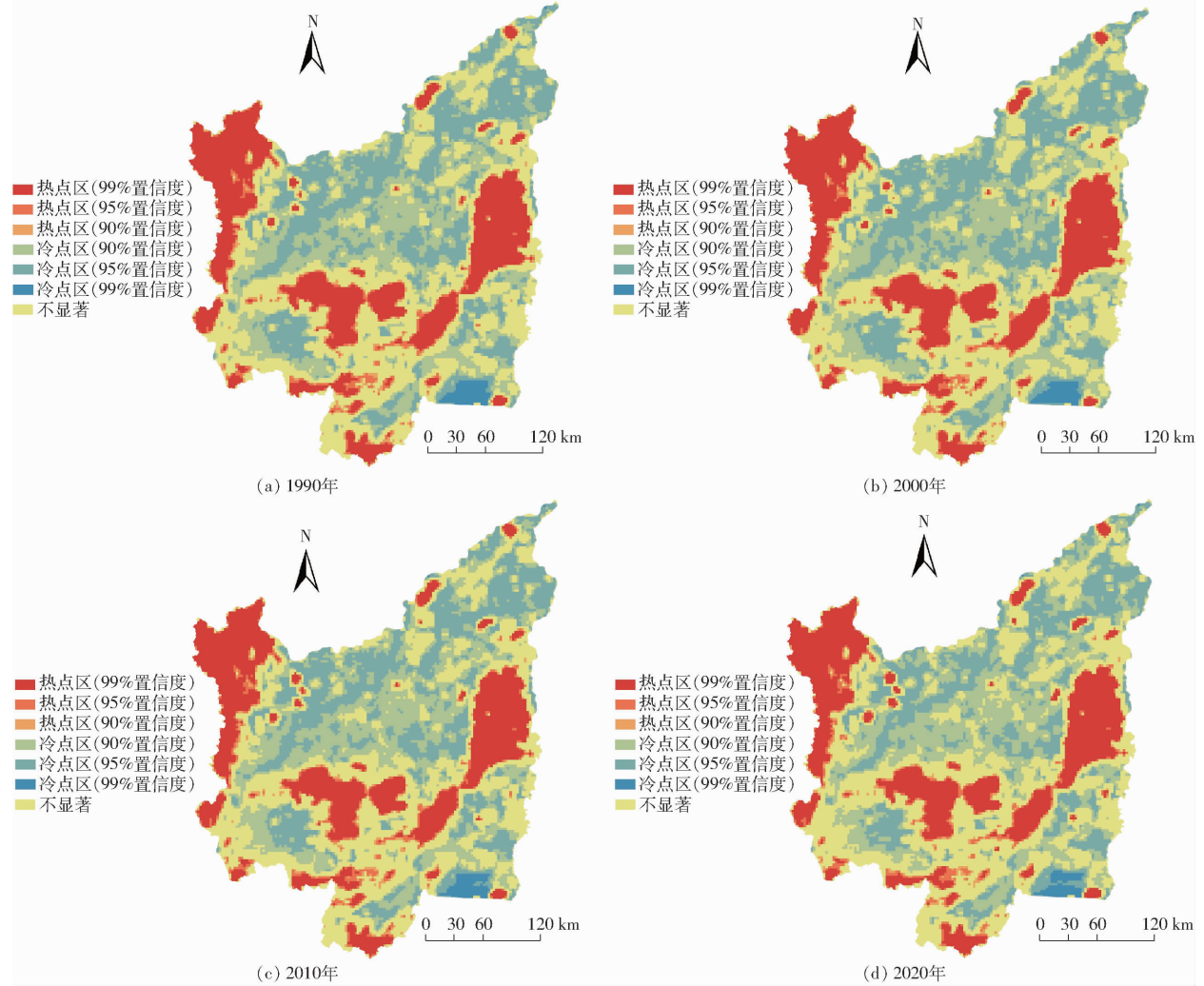


图 6 1990—2020 年研究区碳储量热点分析

Fig. 6 Hot spot analysis of carbon storage in study area in 1990—2020

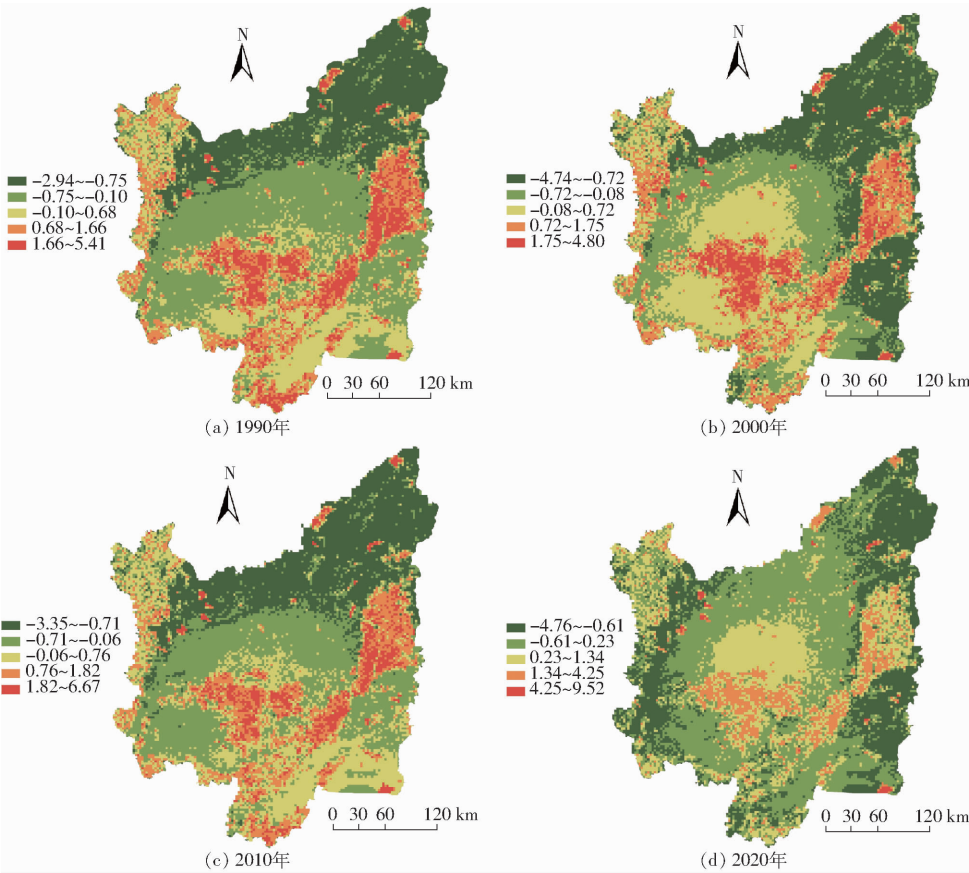


图 7 1990—2020 年研究区碳储量与气候因子 OLS 残差

Fig. 7 OLS residual of carbon storage and climate factors in study area in 1990—2020

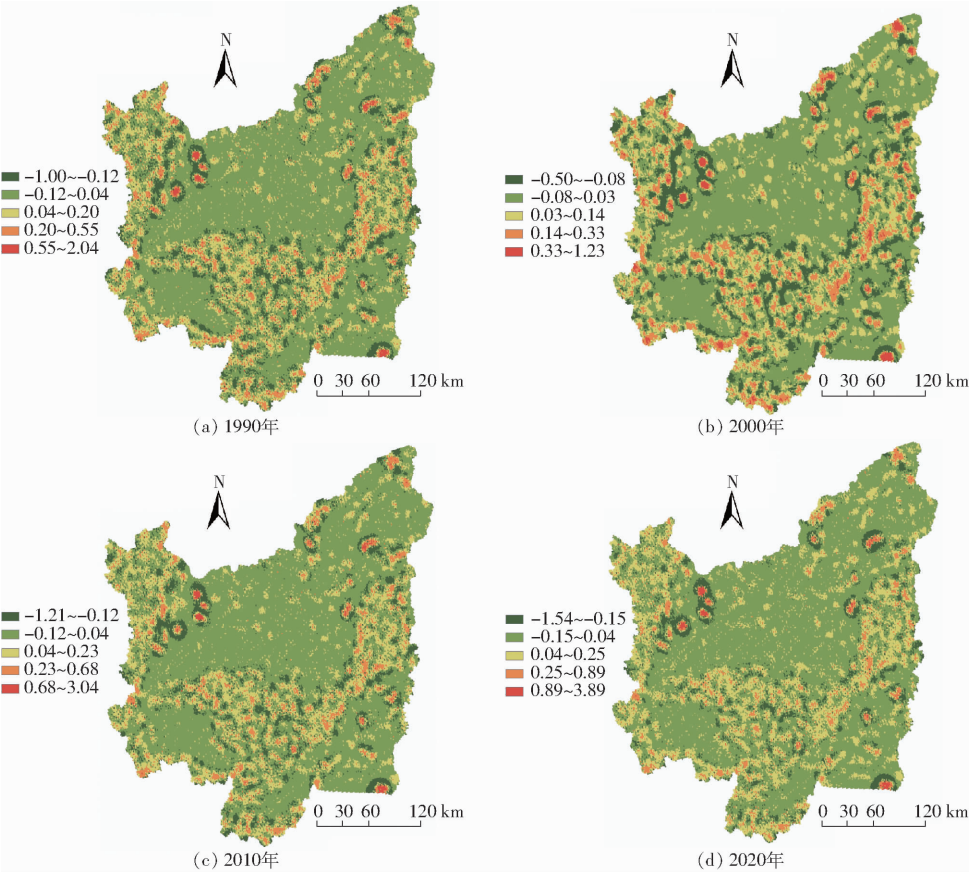


图 8 1990—2020 年研究区碳储量与气候因子 GWR 残差

Fig. 8 GWR residual of carbon storage and climate factor in study area in 1990—2020

地理加权回归分析结果表明,1990—2000 年研究区年均气温与碳储量主要呈负相关,回归系数在 $-45 \sim 0$ 之间,部分地区二者呈正相关,回归系数在 $0 \sim 63$ 之间(图 9)。其中,1990 年回归系数主要在 $-2.92 \sim 0$ 和 $0 \sim 0.39$ 之间,最高值分布在东北部和西南部地区,在 $-45.64 \sim -2.92$ 和 $5.92 \sim 48.27$ 之间;2000 年回归系数主要在 $-3.42 \sim 0$ 和 $0 \sim 0.77$ 之间,最高值零星分布在北部地区,在 $-44.49 \sim -11.39$ 和 $24.23 \sim 62.37$ 之间;2010 年回归系数主要在 $0 \sim 19.87$ 和 $-8.03 \sim 0$ 之间,呈带状和块状交替分布;2020 年回归系数主要在 $-2.41 \sim 0$ 和 $0 \sim 2.62$ 之间,最高值零星分布在东北部和中部地区,在 $-27.17 \sim -7.03$ 和 $10.59 \sim 26.33$ 之间。

1990—2020 年研究区年降水量回归系数主要在 $-154 \sim 0$ 和 $0 \sim 68$ 之间,空间上无明显分布规律(图 10)。其中,1990 年回归系数主要在 $0 \sim 2.46$ 和 $-1.14 \sim 0$ 之间,最高值呈带状和散点状分布在中南部地区,在 $12.39 \sim 51.18$ 和 $-63.86 \sim -15.14$ 之间;2000 年回归系数主要在 $0 \sim 1.56$ 和 $-1.98 \sim 0$ 之间,最高值呈块状分布在北部和中部地区,在 $-39.12 \sim -8.71$ 和 $24.09 \sim 61.6$ 之间;2010 年回归系数主要在 $0 \sim 1.80$ 和 $-4.96 \sim 0$ 之间,呈带状

和片状分布;2020 年回归系数主要在 $0 \sim 2.09$ 和 $-2.41 \sim 0$ 之间,呈片状和块状分布。

4.4 研究区气候和土地利用变化对碳储量的影响

1990—2020 年研究区土地利用格局变化较大,不同地类均发生不同程度的转变(表 1)。其中,耕地占土地面积的 63% 以上,是主要土地利用类型,其次是林地,占土地面积的 29% ~ 32%,而未利用地和草地的面积占比最小。水域面积萎缩最严重,减少 500.37 km^2 ,减幅为 14.24%,其次是林地,减少 405.60 km^2 ,减幅为 1.3%;但草地面积扩张,增加 136.55 km^2 ,增幅最大,为 250.18%,其次是建设用地,增加 967.11 km^2 ,增幅为 53.39%。综上可得,1990—2020 年研究区土地利用类型变化呈现林地、水域急剧下降,耕地先减少后增加,草地、建设用地迅速扩张,未利用地持续减少的特点。

基于土地利用转移矩阵和碳密度数据,测算 1990—2020 年气候和土地利用变化下研究区陆地生态系统碳储量变化。结果表明,1990—2020 年研究区气候和土地利用变化共同作用导致碳储量减少约 $2.66 \times 10^7 \text{ t}$,其中地上生物碳储量减少约 $2.45 \times 10^7 \text{ t}$,地下生物碳储量减少约 $2.01 \times 10^6 \text{ t}$,土壤碳储量减少约 $1.20 \times 10^5 \text{ t}$ (表 2)。其中,气候变化条件下,林地-林地碳储量损失最大,导致碳储量减少约

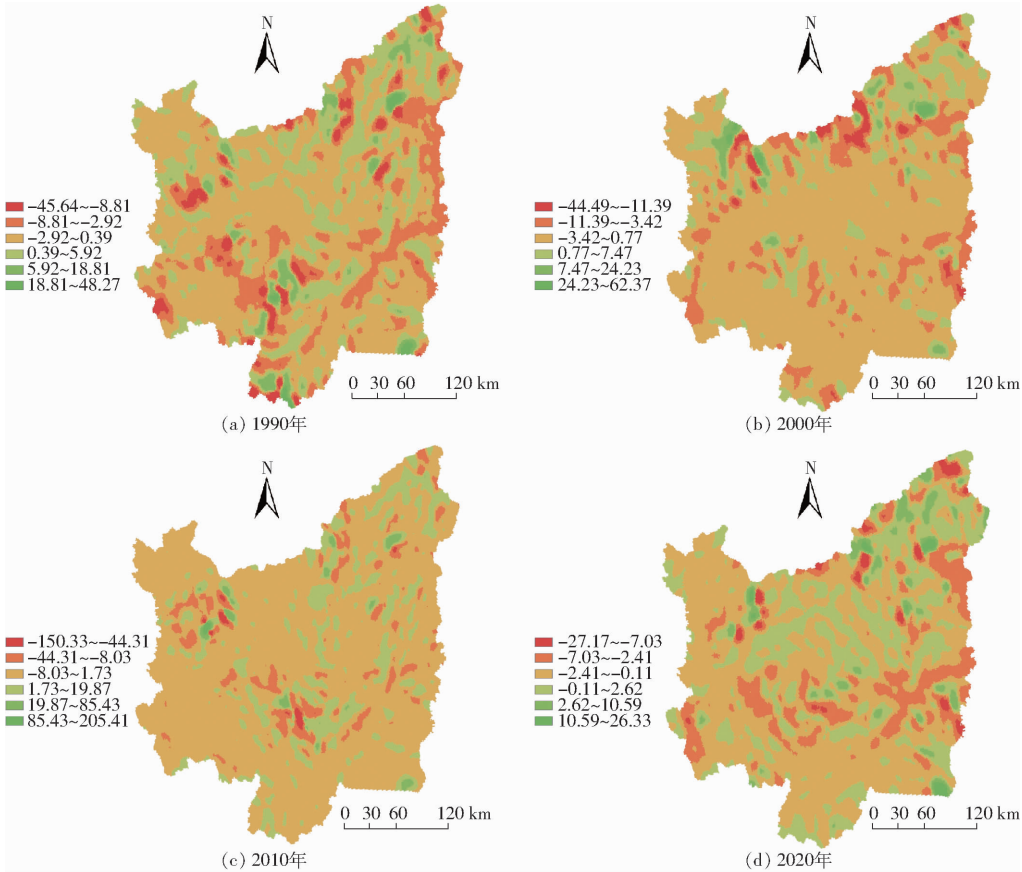


图 9 1990—2020 年研究区年均气温 GWR 系数

Fig. 9 GWR coefficient of average annual temperature in study area in 1990—2020

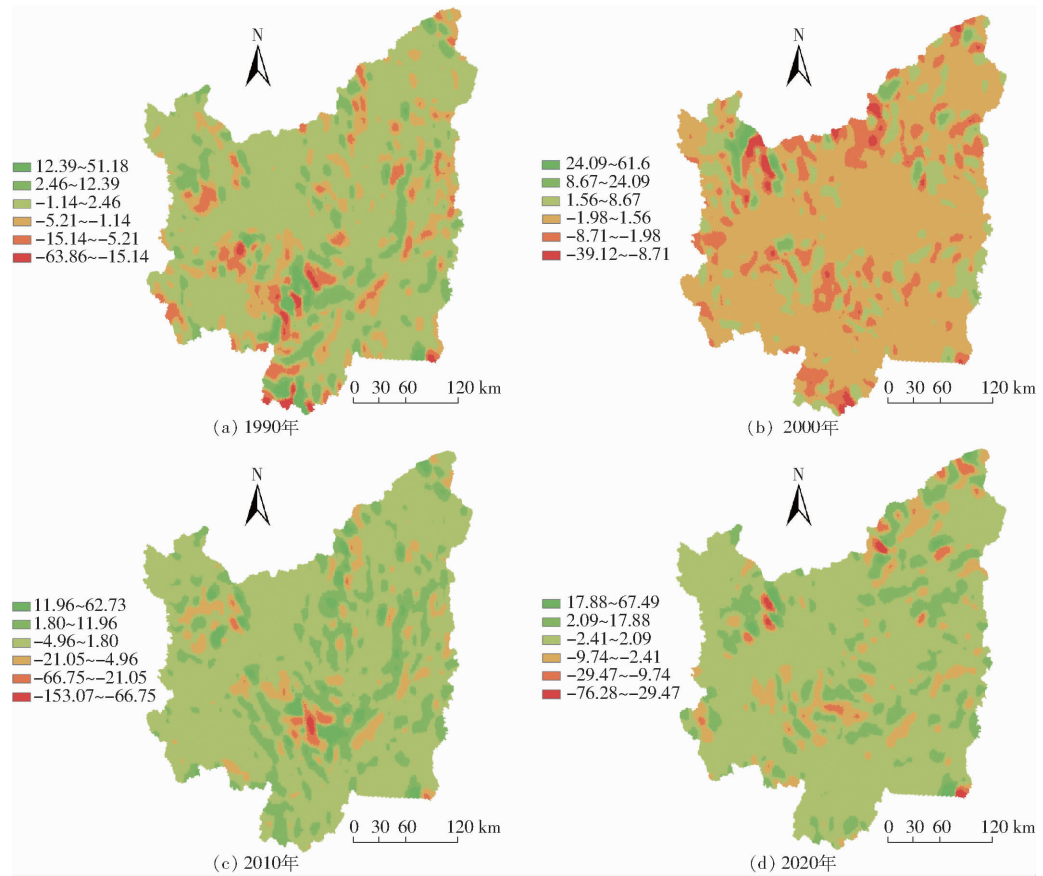


图 10 1990—2020 年研究区年降水量 GWR 系数

Fig. 10 GWR coefficient of annual precipitation in study area in 1990—2020

表 1 1990—2020 年研究区土地利用变化

Tab.1 Land use changes in study area in 1990—2020

土地利用 类型	1990 年		2000 年		2010 年		2020 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	65 904. 92	64. 36	66 093. 45	64. 54	64 782. 76	63. 26	65 718. 65	64. 18
林地	31 094. 58	30. 37	30 931. 47	30. 21	32 243. 43	31. 49	30 688. 98	29. 97
草地	54. 57	0. 05	60. 60	0. 06	112. 27	0. 11	191. 13	0. 19
水域	3 512. 74	3. 43	3 459. 76	3. 38	3 065. 96	2. 99	3 012. 37	2. 93
建设用地	1 814. 54	1. 77	1 835. 16	1. 79	2 188. 10	2. 14	2 781. 65	2. 72
未利用地	18. 55	0. 02	19. 46	0. 02	7. 38	0. 01	7. 12	0. 01

1.85 × 10⁷ t,占碳储量减少量的 69.17%,其次是耕地—耕地,碳储量减少约 6.32 × 10⁶ t,占碳储量减少量的 23.90%。在气候和土地利用变化共同作用下林地的转出导致碳储量损失最大,减少约 6.94 × 10⁵ t,占碳储量减少量的 2.89%,其中林地转为耕地的碳储量损失最大;其次是耕地的转出,导致碳储量减少约 7.33 × 10⁵ t,占碳储量减少量的 2.60%,其中耕地转为林地碳储量损失最大;而草地和未利用地碳储量损失最小。综上可得,气候和土地利用变化共同作用导致各地类碳储量急剧下降,其中林地和耕地的损失最大,未利用地和草地损失最小。

1990—2020 年研究区各土地利用类型的碳储量呈现不同变化趋势,其中耕地、林地、水域碳储量

明显减少,草地、建设用地碳储量增加,而未利用地碳储量有所减少(表 3)。该时间段林地碳储量减少最大,减少约 1.97 × 10⁷ t,其次是耕地和水域,分别减少约 6.97 × 10⁶ t 和 4.16 × 10⁵ t;而建设用地碳储量增加最大,增加约 8.40 × 10⁴ t,且 1990—2000 年增幅最大,其次是草地,增加约 3.98 × 10⁴ t。综合来看,林地、耕地对研究区陆地生态系统碳储量贡献最高,其次为水域、建设用地、草地和未利用地。从土地利用变化来看,碳储量变化的主要原因是城镇化速度加快,建设用地面积扩大,耕地转出为建设用地的同时大量林地和水域被耕地占用。

4.5 研究区陆地生态系统碳储量动态模拟

1990—2020 年研究区年均气温依次为 3.41、2.94、3.61、4.23℃,呈先减小后增长的趋势。其中

表 2 1990—2020 年研究区气候和土地利用变化引起的碳储量变化量

Tab.2 Carbon storage caused by climate and land use change in study area in 1990—2020

土地利用类型转换	面积/km ²	地上生物碳储量 变化量/t	地下生物碳储量 变化量/t	土壤碳储量 变化量/t	总碳储量变化 量/t	总计/t
耕地—耕地	62 443. 00	− 4 872 669. 00	− 1 361 288. 00	− 81 384. 00	− 6 315 341. 00	− 7 048 393. 00
耕地—林地	2 067. 62	− 562 090. 00	− 36 554. 00	− 2 185. 00	− 600 829. 00	
耕地—草地	159. 42	− 18 096. 00	− 3 370. 00	− 201. 00	− 21 667. 00	
耕地—水域	327. 21	− 20 621. 00	− 8 128. 00	− 486. 00	− 29 235. 00	
耕地—建设用地	906. 53	− 62 440. 00	− 17 779. 00	− 1 063. 00	− 81 282. 00	
耕地—未利用地	1. 14	− 21. 00	− 17. 00	− 1. 00	− 39. 00	− 19 200 831. 00
林地—耕地	2 460. 91	− 607 834. 00	− 56 795. 00	− 3 395. 00	− 668 024. 00	
林地—林地	28 568. 34	− 18 103 270. 00	− 380 599. 00	− 22 754. 00	− 18 506 623. 00	
林地—草地	22. 26	− 5 986. 00	− 250. 00	− 15. 00	− 6 251. 00	
林地—水域	12. 22	− 484. 00	− 211. 00	− 13. 00	− 708. 00	
林地—建设用地	52. 86	− 18 338. 00	− 837. 00	− 50. 00	− 19 225. 00	− 11 370. 00
林地—未利用地	0. 03	0	0	0	0	
草地—耕地	24. 81	− 2 830. 00	− 403. 00	− 24. 00	− 3 257. 00	
草地—林地	9. 54	− 4 713. 00	− 147. 00	− 9. 00	− 4 869. 00	
草地—草地	10. 34	− 234. 00	− 162. 00	− 10. 00	− 406. 00	
草地—水域	3. 57	− 63. 00	− 110. 00	− 7. 00	− 180. 00	− 236 409. 00
草地—建设用地	10. 96	− 1 599. 00	− 233. 00	− 14. 00	− 1 846. 00	
草地—未利用地	1. 08	− 779. 00	− 32. 00	− 2. 00	− 813. 00	
水域—耕地	814. 56	− 71 804. 00	− 20 393. 00	− 1 219. 00	− 93 416. 00	
水域—林地	60. 85	− 9 847. 00	− 1 313. 00	− 79. 00	− 11 239. 00	
水域—草地	8. 99	− 684. 00	− 104. 00	− 6. 00	− 794. 00	− 138 273. 00
水域—水域	2 630. 21	− 42 509. 00	− 80 845. 00	− 4 833. 00	− 128 187. 00	
水域—建设用地	50. 45	− 1 504. 00	− 1 167. 00	− 70. 00	− 2 741. 00	
水域—未利用地	2. 32	− 11. 00	− 20. 00	− 1. 00	− 32. 00	
建设用地—耕地	2. 12	− 63. 00	− 36. 00	− 2. 00	− 101. 00	
建设用地—林地	0. 19	− 63. 00	0	0	− 63. 00	− 885. 00
建设用地—草地	0. 01	0	0	0	0	
建设用地—水域	51. 35	0	− 775. 00	− 46. 00	− 821. 00	
建设用地—建设用地	1 802. 03	2 552. 00	− 35 686. 00	− 2 133. 00	− 35 267. 00	
建设用地—未利用地	0. 22	− 102 021. 00	0	0	− 102 021. 00	
未利用地—耕地	2. 89	− 63. 00	− 311. 00	− 19. 00	− 393. 00	− 885. 00
未利用地—林地	0. 74	− 11. 00	− 36. 00	− 2. 00	− 49. 00	
未利用地—草地	0. 25	0	− 88. 00	0	− 88. 00	
未利用地—水域	7. 07	− 42. 00	0	− 5. 00	− 46. 00	
未利用地—建设用地	6. 00	− 105. 00	− 400. 00	− 24. 00	− 529. 00	
未利用地—未利用地	2. 75	289. 00	− 65. 00	− 4. 00	220. 00	

表 3 1990—2020 年各土地类型碳储量变化

Tab.3 Changes in carbon storage of each land type in 1990—2020

土地利用 类型	碳储量/t			
	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	22 087 967. 18	24 862 556. 45	18 441 340. 61	15 120 936. 94
林地	46 882 432. 02	54 670 242. 58	38 607 430. 47	27 180 288. 57
草地	203 323. 37	279 261. 96	388 904. 54	601 743. 59
水域	905 824. 22	1 000 224. 02	684 984. 16	489 531. 91
建设用地	462 249. 9	519 721. 42	510 472. 13	546 207. 95
未利用地	5 632. 09	6 114. 02	742. 17	766. 87

大, 增长 0. 67℃; 2010—2020 年增长 0. 62℃。1990—2020 年研究区年降水量依次为 574. 74、531. 84、644. 71、797. 44 mm, 呈先减少后增加的趋势, 其中 1990—2000 年减少 42. 9 mm; 2000—2010 年增加 112. 87 mm; 2010—2020 年增加 153. 73 mm, 增幅最大。由此可见研究区气候变化表现为年均气温和年降水量的大幅增长。

利用 CMIP6 数据预测 SSP585 情景(高强迫情景)和 SSP245 情景(中等强迫情景)下 2030 年研究区年均气温和年降水量: 在 SSP585 情景下 2030 年年均气温将增至 4. 92℃, 年降水量将增至

814.21 mm;在 SSP245 情景下 2030 年年均气温将增至 4.49℃,年降水量将增至 805.81 mm。将其代入碳密度修正公式计算两种情景下 2030 年的碳密度,借助 ArcGIS 10.7 平台揭示 2030 年研究区碳储量空间分布格局(图 11)。结果表明,SSP585 情景和

SSP245 情景下 2030 年研究区碳储量损失严重,碳储量分别为 2.22×10^7 t 和 2.26×10^7 t,相比 2020 年分别减少 2.17×10^7 t 和 2.13×10^7 t;空间分布格局无显著差异,高值区呈片状分布在东部、中南部和西北部地区,低值区呈带状和块状分布在东北部地区。

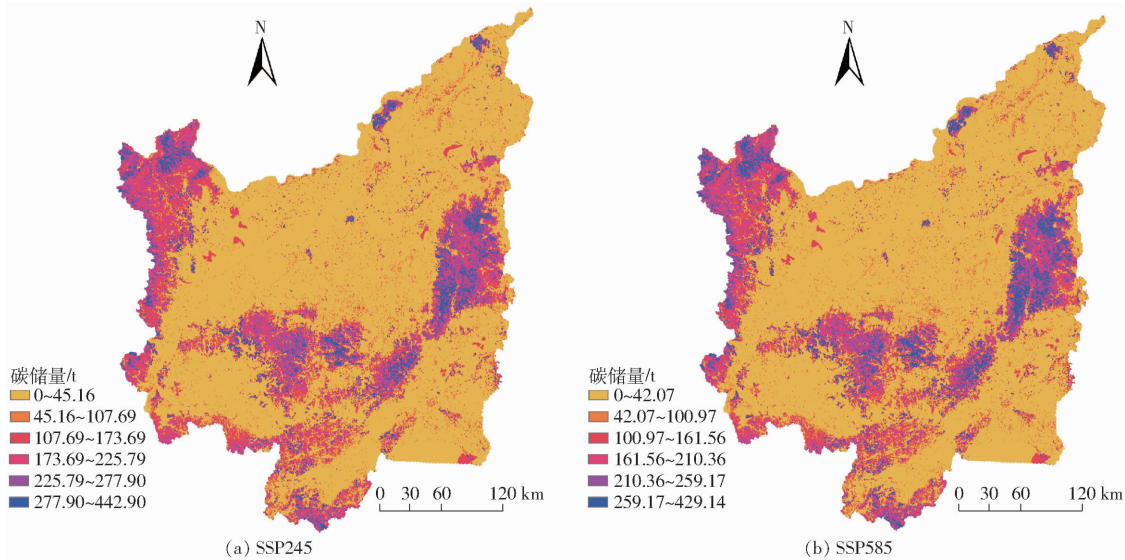


图 11 研究区 2030 年不同情景下碳储量空间分布

Fig. 11 Spatial distributions of carbon storage in study area under different scenarios in 2030

利用 ArcGIS 10.7 平台进行重心分析,结果显示在 SSP245 和 SSP585 情景下,2030 年研究区生态系统碳储量重心分别向东北方向移动 6 000 m 和 6 525 m,表示东北地区碳储量有所改善,西南地区碳储量损失严重(图 12),主要原因是西南地区建设用地扩张明显,主要占用碳密度相对较高的林地和耕地,导致碳储量损失较多。而东北地区耕地所占比重大,与西南地区相比,土地利用变化不显著。此外,SSP585 情景下西南地区碳储量损失比 SSP245 情景更为严重,主要由于 SSP585 情景下土地利用变化更为剧烈,生物和土壤碳储量减少,尤其建设用地扩张速度更快,林地和耕地进一步萎缩。因此,研究区应积极开展植树造林和保护性耕作等行为。

借助 ArcGIS 10.7 平台进行冷热点分析,发现 SSP245 和 SSP585 情景下碳储量冷热点空间格局发生显著变化(图 13):碳储量热点区主要分布在东部、中部和西南部林地,冷点区零星分布在东北部和东南部地区。冷点区范围大幅缩减,由片状和带状转变为散点状分布,热点区范围有所缩小,其中西北部和中部地区最显著,说明研究区碳储量损失进一步加剧,且集聚性逐渐减弱。

5 讨论

已有大量研究表明,土地利用变化是导致陆地生态系统碳储量减少的主要原因^[11,24,27-28]。气候是土壤有机碳密度的主要影响因素^[16],是生态系统碳汇的主要驱动因素^[21]。本研究也表明,黑土区陆地生态系统碳储量变化是气候和土地利用变化的综合作用结果,且气候变化对碳储量空间分异特征影响较大,主要由于土地利用类型转变的碳储量损失明显低于土地利用类型未发生转变的碳储量损失,即林地转为其他土地利用类型的碳储量损失低于林地-林地碳储量损失。这与李国栋等^[2]、GAI 等^[23]研究结果一致,研究结果具有一定信服度。但本研究陆地生态系统碳储量相对较低,主要原因是已有研究^[3,9,14]多基于 InVEST 模型定量估算陆地生态系统碳储量变化,其原理是将整个区域碳密度视为固定值,忽略了碳密度的空间异质性,同时未根据气

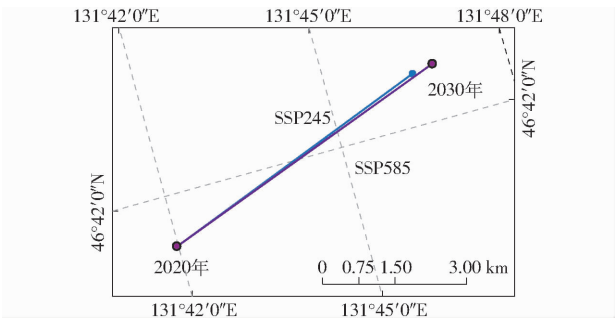


图 12 2020—2030 年不同情景下研究区碳储量重心转移轨迹

Fig. 12 Shift trajectory of carbon storage center under different scenarios in 2020—2030

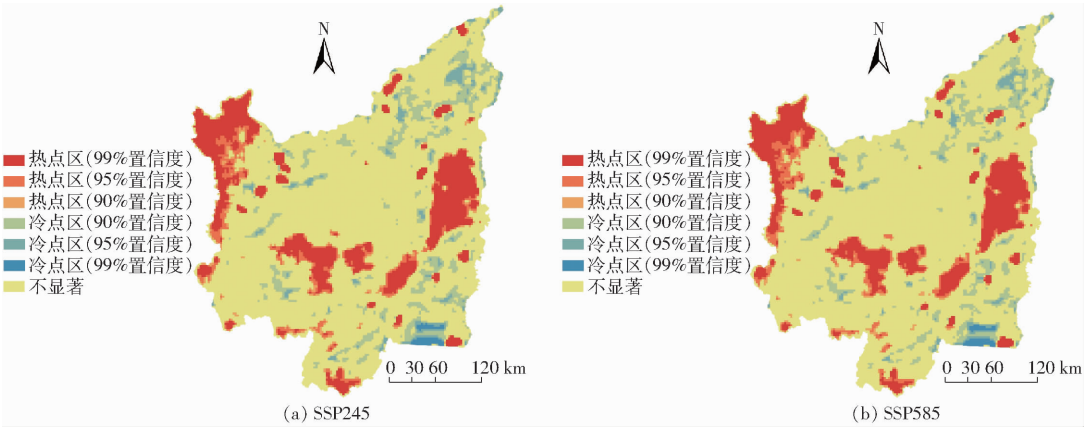


图 13 研究区 2030 年不同情景下碳储量热点分析

Fig. 13 Hot spot analysis of carbon storage in study area under different scenarios in 2030

候因子对碳密度进行修正,进而导致陆地生态系统碳储量被高估。本研究充分考虑到了碳密度的空间异质性,并根据气候因子对其进行修订,揭示陆地生态系统碳储量的时空变化特征,弥补了碳密度空间异质性带来的结果误差。

气候和土地利用变化对研究区碳储量的影响体现在 3 方面:①研究区耕地和林地的生物碳密度和土壤碳密度差值较大,导致林地转为耕地的碳储量损失较大。②研究区林地的地下生物和土壤碳密度最高,其转出必然导致碳储量损失,且耕地的占用影响最大。③建设用地的扩张也是碳储量损失的原因之一,建设用地占用了大量耕地。自 18 亿亩耕地红线保护实施以来,耕地面积扩张却导致了林地和水域面积萎缩,碳储量损失巨大,陆地生态系统碳储量损失问题未得到缓解,因此在 18 亿亩耕地红线保护取得成效的同时应重视退耕还林、退耕还湖政策的落实。

气候变化对研究区碳储量的影响主要表现为:①年均气温、年降水量和碳储量的关系具有显著性:1990—2020 年研究区年均气温与碳储量主要呈负相关,回归系数在 $-45 \sim 0$ 之间,部分呈正相关;年降水量回归系数主要在 $-154 \sim 0$ 和 $0 \sim 68$ 之间,呈正负无规律交错分布的空间格局。②研究区林地地上生物量碳储量最高,几乎是其他土地利用类型的 5 倍以上,林地-林地碳储量损失最大,导致碳储量减少约 1.85×10^7 t,占碳储量减少量的 69.17%。③研究区耕地-耕地面积最大,且碳密度相对较高,耕地-耕地导致碳储量减少约 6.32×10^6 t,占碳储量减少量的 23.90%。可见,林地具有较大的固碳潜力,在研究区加强林地防护体系建设,做好林地砍伐破坏管理,有利于持续增加研究区陆地生态系统碳储量。

尽管本研究较深入分析了气候和土地利用变化

对黑土区陆地生态系统碳储量的影响,但仍存在一些局限性:①本研究揭示气候和土地利用变化对研究区陆地生态系统碳储量的影响,但未深入挖掘其二者的贡献率。②本研究碳密度数据是通过碳密度修正公式得到,未进行实地测量,存在一定的误差。③本研究仅探讨年均气温和年降水量对碳储量的影响,未揭示其他因素对碳储量的影响。

6 结论

(1)探讨了气候和土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响,相对已有研究使用 InVEST 模型(碳密度固定值)数据,能够更好地揭示碳密度空间异质性,避免高估结果,可以更精确地揭示陆地生态系统碳储量的变化。

(2)1990—2020 年研究区陆地生态系统碳储量呈波动下降趋势,碳储量损失约 2.66×10^7 t;其中气候和土地利用变化导致林地、耕地转为其他土地利用类型碳储量损失最多。从空间来看,西南地区的碳储量高于东北地区,但重心向东北偏移。西南部林地面积较大,气候变化导致林地-林地碳储量损失也越严重,其次是耕地-耕地。相对来说,林地和耕地的保护形式相对较为严峻,尤其是西南地区必须在宜林地区进行造林,加强林地实施有效管理战略和扩大造林,有效增加陆地生态系统碳储量,同时研究区继续推广秸秆还田、有机肥施用等保护性耕作行为可以有效提高耕地土壤固碳能力。

(3)1990—2020 年研究区年均气温、年降水量是碳储量的重要影响因素,其中年均气温与陆地生态系统碳储量呈负相关为主、正负交替分布的空间格局,年降水量与碳储量呈正负无规律交错分布的空间格局。

(4)在 SSP585 和 SSP245 情景下,2030 年研究区陆地生态系统碳储量持续损失,重心继续向东北

移动;冷热点区范围均缩小,中部冷点区全部消失。 区陆地生态系统碳储量的影响,并积极开展植树造林和保护性耕作等行为。因此,研究区必须重视气候和土地利用变化对黑土

参 考 文 献

[1] 栾晓波,高子涵,薛静,等.气候与种植结构变化对温室气体排放及灌溉需水的影响[J].农业机械学报,2023,54(12):327-337.
LUAN Xiaobo,GAO Zihan,XUE Jing, et al. Effects of climate and plantation structure changes on greenhouse gas emissions and irrigation water demand[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):327-337. (in Chinese)

[2] 李国栋,张俊华,陈聪,等.气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展[J].生态环境学报,2013,22(5):873-878.
LI Guodong, ZHANG Junhua, CHEN Cong, et al. Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change[J]. Journal of Ecology and Environment,2013,22(5):873-878. (in Chinese)

[3] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.
LIN Tong, YANG Muzhuang, WU Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model—a case study in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2022,42(10):4827-4839. (in Chinese)

[4] 高星,杨刘婉青,李晨曦,等.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].生态学报,2021,41(20):7974-7988.
GAO Xing, YANG Liuwanqing, LI Chenxi, et al. Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian Basin under the simulated multiple scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,41(20):7974-7988. (in Chinese)

[5] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
YANG Yuanhe, SHI Yue, SUN Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. Science in China: Life Sciences,2022,52(4):534-574. (in Chinese)

[6] 张煜星,王雪军.全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究[J].中国科学:生命科学,2021,51(2):199-214.
ZHANG Yuxing, WANG Xuejun. Study on forest volume-to-biomass modeling and carbon storage dynamics in China[J]. Science in China: Life Sciences,2021,51(2):199-214. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.
ZHU Wenbo, ZHANG Jingjing, CUI Yaoping, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: a case study in Qihe River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 74(3):446-459. (in Chinese)

[9] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报,2021,41(10):4052-4065.
LIU Yang, ZHANG Jun, ZHOU Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(10):4052-4065. (in Chinese)

[10] RAJBANSHI J, DAS S. Changes in carbon stocks and its economic valuation under a changing land use pattern—a multitemporal study in Konar catchment, India[J]. Land Degrad. Dev.,2021,32:3573-3587.

[11] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等.江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J].资源科学,2011,33(10):1932-1939.
CHUAI Xiaowei, HUANG Xianjin, ZHENG Zeqing, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province[J]. Resources Science,2011,33(10):1932-1939. (in Chinese)

[12] 付伟,李龙,罗明灿,等.省域视角下中国森林碳汇空间外溢效应与影响因素[J].生态学报,2023,43(10):4074-4085.
FU Wei, LI Long, LUO Mingcan, et al. Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China from provincial perspective[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(10):4074-4085. (in Chinese)

[13] 仲俊涛,王蓓,米文宝,等.基于 InVEST 模型的宁夏盐池县禁牧草地生态补偿标准空间识别[J].地理科学,2020,40(6):1019-1028.
ZHONG Juntao, WANG Bei, MI Wenbao, et al. Spatial recognition of ecological compensation standard for grazing grassland in Yanchi County based on InVEST model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(6):1019-1028. (in Chinese)

[14] 邵壮,陈然,赵晶,等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 生态学报,2022,42(23):9456–9469.
SHAO Zhuang, CHEN Ran, ZHAO Jing, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(23):9456–9469. (in Chinese)

[15] XIANG S,WANG Y,DENG H, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China[J]. Ecol. Indic.,2022,142:129205.

[16] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J]. 农业机械学报,2019,50(1):255–262.
SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):255–262. (in Chinese)

[17] 吕富成,马建勇,曹云,等. 基于 FORCCHN 模型的中国典型森林生态系统碳通量模拟[J]. 生态学报,2022,42(7):2810–2821.
LÜ Fucheng, MA Jianyong, CAO Yun, et al. Carbon fluxes simulation of China's typical forest ecosystem based on FORCCHN model[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(7):2810–2821. (in Chinese)

[18] 赵明伟,岳天祥,赵娜,等. 基于 HASM 的中国森林植被碳储量空间分布模拟[J]. 地理学报,2013,68(9):1212–1224.
ZHAO Mingwei, YUE Tianxiang, ZHAO Na, et al. Spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China based on HASM[J]. Journal of Geographical Sciences,2013,68(9):1212–1224. (in Chinese)

[19] 潘萍,孙玉军,欧阳勋志,等. 基于不同空间模型的马尾松林生态系统碳密度研究[J]. 生态学报,2020,40(15):5230–5238.
PAN Ping, SUN Yujun, OUYANG Xunzhi, et al. Study on carbon density in *Pinus massoniana* forest ecosystem based on different spatial models[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(15):5230–5238. (in Chinese)

[20] 兰秀,杜虎,宋同清,等. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素[J]. 生态学报,2019,39(6):2043–2053.
LAN Xiu, DU Hu, SONG Tongqing, et al. Vegetation carbon storage in the main forest types in Guangxi and the related influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(6):2043–2053. (in Chinese)

[21] 李彦娥,王化齐,刘江,等. 西北地区生态系统碳汇时空分布特征及相关驱动因子分析[J]. 西北地质,2023,56(4):185–195.
LI Yan'e, WANG Huaqi, LIU Jiang, et al. Spatial and temporal distribution and driving factors of ecosystem carbon sink in Northwest China[J]. Northwest Geology,2023,56(4):185–195. (in Chinese)

[22] 刘国栋,戴慧敏,杨泽,等. 三江平原土壤碳库时空变化和影响因素研究[J]. 现代地质,2021,35(2):443–454.
LIU Guodong, DAI Huimin, YANG Ze, et al. Temporal and spatial changes of soil carbon pool and its influencing factors in the Sanjiang Plain[J]. Geoscience,2021,35(2):443–454. (in Chinese)

[23] GAI Z, XU Y, DU G. Spatio-temporal differentiation and driving factors of carbon storage in cultivated land-use transition[J]. Sustainability,2023,15(5):3897.

[24] 李姣,汪杰,李朗,等. 洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(6):1156–1165.
LI Jiao, WANG Jie, LI Lang, et al. Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake Eco-economic Zone[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(6):1156–1165. (in Chinese)

[25] 丁学谦,吴群,文高辉,等. 2005—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及空间格局[J]. 农业工程学报,2021,37(15):258–266.
DING Xueqian, WU Qun, WEN Gaohui, et al. Migration trajectory and spatial pattern of cultivated land non-source pollution in Dongting Lake Plain from 2005 to 2019[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(15):258–266. (in Chinese)

[26] 盖兆雪,詹汶羲,王洪彦,等. 耕地利用转型碳排放时空分异特征与形成机理研究[J]. 农业机械学报,2022,53(7):187–196.
GAI Zhaoxue, ZHAN Wenxi, WANG Hongyan, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and formation mechanism of carbon emission from cultivated land use transformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):187–196. (in Chinese)

[27] 陈宁,辛存林,唐道斌,等. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J]. 环境科学,2023,44(8):4655–4665.
CHEN Ning, XIN Cunlin, TANG Daobin, et al. Multi-scenario land use optimization and carbon storage assessment in Northwest China[J]. Environmental Science,2023,44(8):4655–4665. (in Chinese)

[28] 郭晓敏,揣小伟,张梅,等. 扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(2):269–280.
GUO Xiaomin, CHUAI Xiaowei, ZHANG Mei, et al. Spatial-temporal analysis of land-use change and the impact on terrestrial ecosystems carbon storage in Yangtze River city group[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(2):269–280. (in Chinese)