

doi: 10.12097/gbc.2023.11.033

董春, 杜林丹, 张禹森. 2025. 小兴安岭地区碳储量时空变化驱动机制及其对碳减排的贡献[J]. 地质通报, 44(7): 1242–1253.

Dong Chun, Du Lindan, Zhang Yusen. 2025. Driving force analysis of carbon storage spatial-temporal variation in Xiaoxing'anling Mountains and its contribution to carbon emission reduction[J]. Geological Bulletin of China, 44(7): 1242–1253(in Chinese with English abstract).

小兴安岭地区碳储量时空变化驱动机制 及其对碳减排的贡献

董春^{1,2}, 杜林丹^{1,2}, 张禹森^{1,2*}

(1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100036)

摘要:【研究目的】生态系统在固碳释氧方面发挥着重要作用, 可有效减缓气候变化。碳储量是衡量生态系统碳汇能力的重要指标, 可为制定碳减排策略提供科学依据。但当前关于碳储分布的研究多聚焦于单一因素影响, 对多因子协同作用及其空间分异规律的系统探讨相对较少, 系统分析了中国小兴安岭地区碳储量的时空分布格局及其变化驱动机制, 并评估了其对于区域碳平衡管理与碳减排目标实现的潜在贡献。【研究方法】针对多因子对生态系统碳储量空间分异的作用机制, 借助 2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据, 基于 InVEST 模型估算小兴安岭地区的碳储量及其空间分布特征, 使用随机森林模型对地形、气象、土壤等重要变量进行筛选, 并选择地理探测器探索驱动研究区碳储量空间分异的主要驱动因子, 探究其驱动机制。【研究结果】①研究区土地利用类型主要以林地(77%)、耕地(20%)为主, 地类结构变化明显, 表现为耕地、建设用地面积增加, 林地、草地面积减少; ②研究区近 20 年碳储总量提升 14.72%, 耕地与林地、草地的相互转化是碳储量减少的主要原因; ③碳储量空间分异的主导因子为植被覆盖度(0.254–0.278)和土壤质地(0.146–0.168)。【结论】尽管小兴安岭地区近 20 年林草面积有所减少, 削弱了生态系统的碳汇能力, 但局部区域碳储量的增长掩盖了局部区域的减少, 体现出研究区具有一定的生态恢复潜力。然而, 人类活动导致区域碳汇能力承压变大, 增加了碳排放控制的难度。因此, 研究区虽然具有生态恢复能力, 但为提升区域碳汇功能, 缓解区域碳排放压力, 应持续加强生态保护和恢复措施。

关键词: 碳储量; 驱动因子; 生态系统服务; 交互探测; 随机森林; 小兴安岭

创新点: 定量分析了碳储量驱动因子的解释程度及因子间的交互作用, 发现植被覆盖度和土壤质地是碳储量空间分异的主要驱动因子。

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)07-1242-12

Driving force analysis of carbon storage spatial-temporal variation in Xiaoxing'anling Mountains and its contribution to carbon emission reduction

DONG Chun^{1,2}, DU Lindan^{1,2}, ZHANG Yusen^{1,2*}

(1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. China Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China)

Abstract: 【Objective】Ecosystems play an important role in carbon fixation and oxygen release, which can effectively mitigate climate change. Carbon storage is an important index to measure the carbon sink capacity of ecosystems, which can provide a scientific basis

收稿日期: 2023-11-25; 修订日期: 2024-01-09

资助项目: 中国测绘科学研究院基本科研业务费《自然资本核算驱动的自然资源调查监测数据分析评价及示范应用》(编号: 2024ZRBHSHZ04)、《多源遥感立体协同森林自然资源调查监测技术》(编号: AR2508)和河南省重点研发与推广专项科技攻关项目《融合自适应波段选择和区域相似性的高分辨率遥感影像分割》(编号: 232102210093)

作者简介: 董春(1971–), 女, 博士, 研究员, 从事自然资源监测、地理时空大数据分析挖掘方面的研究。E-mail: dongchun@casm.ac.cn

* 通信作者: 张禹森(1998–), 男, 硕士, 助理工程师, 从事生态环境地质、地震及地质灾害方面的研究。E-mail: yusen0201@163.com

for formulating carbon emission reduction strategies. However, the current research on the distribution of carbon storage mostly focuses on the influence of a single factor, and there are relatively few systematic discussions on the multi-factor synergy and its spatial differentiation. Therefore, this study systematically analyzes the spatial and temporal distribution pattern of carbon storage in the Xiaoxing'anling region of China and its driving mechanism of change, and evaluates its potential contribution to regional carbon balance management and carbon emission reduction targets. **[Methods]** Aiming at the mechanism of multi-factors on the spatial differentiation of ecosystem carbon storage, this study used the land use data of 2000, 2010 and 2020 to estimate the carbon storage and its spatial distribution characteristics in the Lesser Khingan Mountains based on the InVEST model. The random forest model was used to screen important variables such as topography, meteorology and soil, and the geographical detector was selected to explore the main driving factors driving the spatial differentiation of carbon storage in the study area and explore its driving mechanism. **[Results]** ①The spatial distribution of carbon stocks in the study area is characterized by the following factors. The land use types in the study area are mainly dominated by forest land (77%) and cropland (20%), and the change of land structure is obvious, which is manifested in the increase of cropland and construction land area, and the decrease of forest land and grassland area; ②The total amount of carbon stock in the study area has increased by 14.72% in the last 20 a, and the mutual transformation of cropland and forest land and grassland is the main reason for the decrease of carbon stock; ③The dominant factors in the spatial differentiation of carbon stocks were vegetation cover (0.254~0.278) and soil texture (0.146~0.168). **[Conclusions]** Although the area of forest and grass in the Xiaoxing'anling Mountains has decreased in the past 20 years, which has weakened the carbon sink capacity of the ecosystem, the increase of carbon storage in local areas has covered up the reduction of local areas, reflecting that the study area has certain ecological restoration potential. However, human activities have led to greater pressure on regional carbon sink capacity, increasing the difficulty of carbon emission control. Therefore, although the study area has the ability of ecological restoration, in order to enhance the regional carbon sink function and alleviate the pressure of regional carbon emissions, the ecological protection and restoration measures in the study area should be continuously strengthened.

Key words: carbon storage; driving factors; ecosystem service; interactive detection; random forest; Xiaoxing'an Mountains

Highlights: The interpretation degree of carbon storage driving factors and the interaction between factors are quantitatively analyzed. It is found that vegetation coverage and soil texture are the main driving factors of spatial differentiation of carbon storage. The research provides a scientific basis for improving regional carbon sink function and supporting carbon emission reduction policy formulation.

About the first author: DONG Chun, female, born in 1971, Ph.D., resercher, mainly engaged in natural big data analysis and mining. E-mail: dongchun@casm.ac.cn

About the corresponding author: ZHANG Yusen, male, born in 1998, master, assistant engineer, mainly engaged in study of eco-environmental geology, earthquake, and geological hazard. E-mail: yusen0201@163.com

Fund support: Supported by Fees for Basic Scientific Research of Chinese Academy of Surveying and Mapping (Nos.2024ZRBSHZ04, AR2508), Key R & D and Promotion Projects of Henan Province (Scientific and Technological Projects) (No.232102210093)

陆地生态系统的碳储量在维持全球生态平衡和调节区域气候变化的过程中起着关键作用 (Cao et al., 2018)。面对当前经济高速发展、能源消耗和 CO₂ 等温室气体的过度排放, 如何平衡社会可持续发展与生态环境保护两者间的关系成为学者们共同关注的话题。在此背景下, 中国力争 2030 年实现碳中和, 2060 年实现碳达峰, 并将“3060”双碳工作(简称“双碳”)纳入“十四五”规划建议, 二十大报告更是将“双碳”工作视为绿色发展的重点, 可见“双碳”在中国具有十分重要的地位。碳储量是生态系统中植

被、土壤等从大气中吸收 CO₂ 等温室气体的过程, 土地利用类型间的相互转化过程产生了大量的碳交换 (程积民等, 2012), 增加陆地生态系统中的碳储量, 对调节区域气候、深入理解土地利用类型、多驱动因子与碳储量变化之间的相互关系、区域生态环境保护 and 经济社会发展具有重大的实践意义 (高扬等, 2013)。

当前越来越多的学者开展生态系统碳储量评估的相关研究。可分为样地清查法评估 (刘亚男等, 2019; Dangullam et al., 2021)、遥感反演法评估 (赵苗

苗等, 2019; 崔晓宇等, 2021; 吴恒和胥辉, 2021)和模型模拟法评估(刘冠等, 2021; 刘洋等, 2021; 王成武等, 2023; 丁岳等, 2023)。样地清查法通过对实验样地样方的植被进行数据清查、采集样地土壤数据进行碳密度测定进而估算碳储量。该方法可以相对便捷且较准确地评估小区域尺度上的碳储量, 但采集数据时易对研究区环境造成不同程度的破坏, 且在高海拔、地形复杂区域数据采集时存在数据收集耗时耗力, 无法反映大区域尺度长时序上的碳储量动态变化(张萌萌等, 2018), 限制了该方法的应用与推广。遥感反演法评估针对特定生态系统的碳库数据结合研究区遥感影像应用逐步回归法(郭玉东等, 2022)估算出接近实际情况的碳储量空间分布情况, 但受遥感影像质量、实验样地适宜性选取等限制, 无法估算土壤碳储量, 影响实验结果准确性(徐伟义等, 2018)。模型模拟法评估主要有 CASA、InVEST 模型等, CASA 模型根据研究区当地植被的光、有效辐射和光能利用率, 能较好地估算植被净初级生产力(李怀海等, 2022; 王丽霞等, 2022), 相比 CASA 模型, InVEST 模型估算操作简便、可对研究区生态系统植被碳储量、土壤碳储量进行评估, 已被广泛应用在碳储量估算中。丁岳等(2023)以环杭州湾为研究区, 分析地区生态系统碳储量的时空变化, 并运用 PLUS 模型预测研究区 2030 年多种情景下

土地利用变化, 估算不同情景下的生态系统碳储量; 有学者以不同流域为研究区, 分析了近 25 年研究区内土地利用方式与生态系统碳储量变化特征的关系(刘冠等, 2021; 刘洋等, 2021)。上述研究主要通过 InVSET 模型根据不同区域、尺度进行了较全面的碳储量变化分析, 但在获取碳密度数据时多借鉴前人研究成果, 没有定量分析碳储量驱动因子的解释程度及因子间的交互作用。因此, 分析区域碳储量时空变化、识别生态系统碳储量主要驱动因子及交互作用类型, 可深入了解不同影响因子下生态系统碳储量变化的主要因素, 因地制宜进行合理生态修复, 为实现“双碳”目标提供科学依据。

小兴安岭区域属生态亚脆弱区, 林地、湿地被垦毁的面积占比相对较大, 生态系统服务供给功能失衡, 因此, 本次研究以小兴安岭森林生态保育工程地区为例, 基于 InVEST 模型碳储量模块, 结合 2000 年、2010 年和 2020 年近 20 年土地利用数据与碳密度数据, 评估研究区碳储量空间分布特征, 探究影响因子对该地区碳储量驱动变化的主导因素, 为东北森林带生态保护和修复重大工程建设提供重要的科学基础。

1 研究区概况

小兴安岭森林生态保育工程(图 1)涉及嫩江、铁

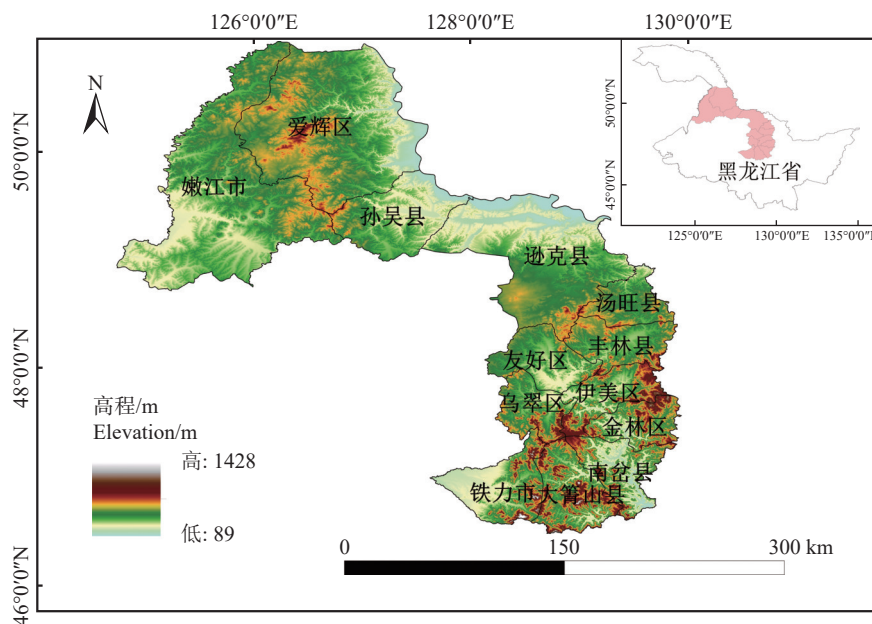


图 1 研究区位置及 DEM 图

Fig. 1 Location and DEM of the study area

力 2 个市和伊春、黑河的 11 个区县(北纬 46°55′~50°13′、东经 125°45′~129°32′)。北接嫩江上游,东至黑龙江岸,南与张广才岭相接,西南与松嫩平原毗连,北部多丘陵盆地,南部多低山,阳坡陡短、阴坡缓长,气候寒冷湿润,年降水量 550~670 mm,无霜期 90~120 d,夏季高温多雨、水热同季,冬季寒冷干燥、低温多雪,气温波动幅度大。区内森林覆盖率 69.4%,森林蓄积量大(李勇等, 2023)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究所用数据包括土地利用数据、数字高程模型、植被覆盖指数、气温数据、降水数据、蒸散量数据、土壤数据、人口密度数据、GDP 空间分布公里网格数据集与夜间灯光指数数据。数据来源与空间分辨率如表 1 所示。

2.2 InVEST 模型

InVEST(Integrated Valuation of Environment Service and Tradeoffs)模型用于数据空间化,评估陆地、淡水和海洋多种生态系统服务功能,其中“Carbon Storage and Sequestration”模块根据陆地生态系统中不同土地利用/覆盖数据计算陆地生态系统中的地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机物碳储量。计算公式如下:

表 1 数据来源及类型

Table 1 Data sources and types

数据源	空间分辨率	数据来源
土地利用数据(2000s、2010s、2020s)	1 km	zenodo(https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810)
数字高程模型(DEM)	30 m	
归一化植被指数	1 km	
年均气温	1 km	国家地球系统科学数据中心
年均降水量	1 km	(http://www.geodata.cn)
年均蒸散量	1 km	
夜间灯光数据	1 km	
土壤数据集(HWSD)	500 m	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)
人口密度数据	1 km	WorldPop(https://www.worldpop.org/)
中国GDP空间分布公里网格数据集	1 km	中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/)

$$C_{i, total} = C_{i, above} + C_{i, below} + C_{i, soil} + C_{i, dead} \quad (1)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (2)$$

式中: i 为土地利用类型; $C_{i, total}$ 表示土地利用类型 i 的碳密度总和(t/ha); $C_{i, above}$ 表示土地利用类型 i 的地上生物碳密度(t/ha); $C_{i, below}$ 表示土地利用类型 i 地下生物的碳密度(t/ha); $C_{i, soil}$ 表示土地利用类型 i 的土壤碳密度(t/ha); $C_{i, dead}$ 表示土地利用类型 i 的凋落物、枯立木或已死亡倒木的有机碳密度(t/ha); C_{total} 为研究区的总碳储量(t); S_i 为土地利用类型 i 的总面积(ha); n 为土地利用类型数, 本次研究中 $n=7$ 。

2.3 碳密度计算及修正

研究区不同碳密度计算所需的土壤属性、生物量等数据参考《1: 100 万世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》。通过公式(3)求得表层土壤碳密度数据(王绍强和周成虎, 1999; 王绍强等, 2003)。计算公式如下:

$$C_{soil} = TOC \times y \times H \times 10^{-1} \quad (3)$$

式中: C_{soil} 为土壤碳密度(t/ha); TOC 为有机碳含量(t/t); y 为平均土壤容重(g/m³); H 为各土种平均表层厚度(m)。

地上、地下碳密度按照生物量转换因子法(焦燕和胡海清, 2005)(比例关系)进行计算。计算公式如下:

$$C_{above} = a \times AGB \quad (4)$$

$$C_{below} = a \times BGB \quad (5)$$

式中: C_{above} 为地上植物碳密度; AGB 为地上生物量(g/m³); a 为转换系数(Fang and Wang, 2001); C_{below} 为地下植物碳密度; BGB 为地下生物量(g/m³)。最终得到碳密度, 见表 2。

研究发现, 生物量和土壤碳密度与降水、气温存在较强的相关性(卢雅焱等, 2022), 为进一步估算研究区的碳储量长时序变化情况, 因此本次研究结合当地实际的年均气温与年均降水对研究区不同时间段的土地利用碳密度进行修正。

气温回归模型($MAP < 10^{\circ}C$)

$$C_{ST} = 100.5 - 5.8 \times MAT \quad (6)$$

$$C_{BP} = 1637 - 1.3 \times MAT \quad (7)$$

表 2 不同土地利用碳密度

Table 2 Carbon density values of different land use types

t/ha

用地类型	地上碳密度			地下碳密度			土壤碳密度			死亡有机物碳密度		
	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年
耕地	10.10	10.47	10.63	26.80	27.77	28.21	147.70	153.48	152.35	0.00	0.00	0.00
林地	41.88	43.40	44.08	31.32	32.46	32.97	173.90	180.71	179.38	2.25	2.33	2.37
草地	6.96	7.21	7.33	51.00	52.85	53.68	74.60	77.52	76.95	2.84	2.94	2.99
水域	8.72	9.04	9.18	2.21	2.29	2.33	23.01	23.91	23.73	0.00	0.00	0.00
建设用地	8.75	9.07	9.21	4.39	4.55	4.62	27.78	28.87	28.66	1.16	1.20	1.22
未利用地	10.03	10.39	10.56	0.00	0.00	0.00	44.79	46.54	46.20	0.00	0.00	0.00
湿地	0.65	0.67	0.68	0.32	0.33	0.34	28.43	29.54	29.33	0.38	0.39	0.40

式中： C_{SP} 为考虑气温得到的土壤有机碳密度 (t/ha)； C_{BP} 为考虑气温得到的生物量碳密度 (t/ha)； MAT 为研究区年均气温(℃)。

降水回归模型(MAP>400 mm)

$$C_{ST} = 157.7 - 3.4 \times MAT \tag{8}$$

$$C_{BT} = 43.0 - 0.4 \times MAT \tag{9}$$

式中： C_{ST} 为考虑气温得到的土壤有机碳密度 (t/ha)； C_{BT} 为考虑气温得到的生物量碳密度 (t/ha)； MAP 为研究区年均降水(mm)。

$$K_{BP} = \frac{C_{1BP}}{C_{2BP}}, K_{BT} = \frac{C_{1BT}}{C_{2BT}} \tag{10}$$

$$K_{SP} = \frac{C_{1SP}}{C_{2SP}}, K_{ST} = \frac{C_{1ST}}{C_{2ST}} \tag{11}$$

式中： K_{BP} 和 K_{BT} 分别为考虑降水和气温的生物量碳密度修正系数； K_{SP} 和 K_{ST} 分别为考虑降水和气温的土壤密度修正系数。根据上述公式得出研究区近 30 年不同土地利用类型的碳密度(表 2)。

2.4 随机森林模型

本次利用随机森林(Random Forest, RF)筛选与碳储量具有显著关系的关键驱动因子。用 RF 拟合碳储量与待筛选驱动因子之间的关系模型,并得出这些环境变量的重要性排序;筛选驱动因子的重要性排序分别由统计软件 R4.2 中 Random Forest 包的“importance”函数和“varImpPlot”函数实现。其中利用“importance”函数提取参与 RF 模型构建的关键环境变量的重要性衡量指标——均方误差增量(I_{ncMSE}), I_{ncMSE} 值越大,表明其所对应的驱动因子的重要性越强(郭澎涛等, 2023)。 I_{ncMSE} 的计算式如下:

$$I_{ncMSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i^1 - e_i) \tag{12}$$

式中： n 为决策树个数； e_i 为第 i 棵决策树的袋外误差； e_i^1 为对某一驱动因子加入噪音后重新计算得到的第 i 棵决策树的袋外误差。

2.5 基于随机森林重要变量的筛选

“(主题: 碳储量 AND 影响因素 AND 关键词: 驱动力分析)”作为检索条件,以 2004—2023 年检索多篇文献为前提,整理众多学者的研究指标成果(图 2),归纳总结不同区域、不同尺度下碳储量主要受地形、气象、植被、土壤(程金等, 2023)、人为因素 5 个方面 11 个指标变量的影响,并根据研究区实地情况因地制宜选取指标。经随机森林模型的计算分析,驱动因子的重要性排序结果如图 3 所示,列出所选择的关键变量的重要性,可以看出植被覆盖指数的影响最大。去除重要性小于 30% 的驱动因子(王成武等, 2023)(夜间灯光指数、GDP、人口密度),筛选后得到重要程度较高的驱动因子。

2.6 地理探测器

地理探测器(王劲峰和徐成东, 2017)是一种用于探测地理事物间的空间分异性,分析空间分异的驱动因子的统计学方法。地理探测器不仅可以用于探测驱动因子的空间分异,还可以探测两因子交互作用于因变量时的作用程度。因此,本研究采用地理探测器中的因子探测和交互作用探测模块,分析影响小兴安岭地区生态系统碳储量空间分异的驱动因子作用及相互作用。

(1)因子探测:主要用于探测 Y 的空间分异性,以及探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。因子探测结果用 q 值度量,计算公式为:

表 4 研究区 1990—2020 年土地利用面积
Table 4 The land use area of the study area from 1990 to 2020 ha

土地利用类型	2000年	2010年	2020年
耕地	2143093.32	2338291.08	2429273.16
林地	8267553.45	8146704.6	8028870.75
草地	204012.54	107879.22	109856.16
水域	41408.28	44268.75	43688.34
未利用地	333.27	220.05	418.86
建设用地	64975.86	86683.23	112958.73
湿地	6986.97	4316.76	3297.69

知,耕地与建设用地的面积逐年增加,未利用地面积呈现波动上升,林地、草地、湿地的面积逐年减少。2020 年研究区未利用地、建设用地与耕地面积同比 2000 年分别增加 73.85%、25.86% 和 13.35%;湿地、草地、林地的面积同比 2000 年分别降低 52.80%、46.15% 和 2.89%。

小兴安岭森林生态保育工程 2000—2010 年土地利用类型之间转移主要表现为耕地与建设用地面积的增加,林地、草地和未利用地面积的减少(图 5)。从前 10 年的分析结果看,耕地为主要转入的土地利用类型,林地、草地为主要转出的土地利用类型,土地利用类型转移可概括为林地和草地向耕地的转入。耕地面积相比 2000 年同比增长 9.11%,增长显著;林地、草地面积相比 2000 年分别同比减少 1.46%、47.12%。2010—2020 年土地利用类型之间转移除草地面积小幅度增长外,其他土地利用类型转移与前 10 年相似。整体分析,研究区近 20 年的土地利用变化主要表现为耕地面积的大幅度增加;建设用地、水域和未利用地面积的少量增加,林地面积大量减少,草地、湿地面积少量减少。研究区土地利用结构转变总体可概括为“四增三减”。

3.2 碳储量分析

从 3 个时间段的碳储量分析结果看,2000 年研究区的碳储量为 14718.19×10^5 t;2010 年研究区的碳储量为 16971.70×10^5 t;2020 年研究区的碳储量为 16883.51×10^5 t。近 20 年研究区的碳储量呈现波动上升趋势,2020 年研究区的碳储量相比 2000 年增加 2165.32×10^5 t,同比上升 14.72%。

从碳储量空间分布看(图 6),研究区 2000—

2020 年碳储量呈现出西低东高的分布态势,碳储量高值集中分布在研究区海拔较高的西北部与东南部;其中伊春市(各区县)的碳储量为较高区域;碳储量低值零散分布于研究区低海拔区域的嫩江市、铁力市和逊克县。为方便获取碳储量空间分布演化过程,将研究区碳储量变化值大于 5% 定义为增长区域,变化值小于-5% 定义为碳储量减少区域,将变化值介于±5% 之间的定义为碳储量基本不变区域,对碳储量地区差异进行分析发现(图 7),研究区 2000—2010 年的碳储量空间分布变化明显,主要表现在嫩江市东北部的林地转化为耕地,耕地面积近 10 年不断扩张。研究区 2010—2020 年的碳储量小幅度下降,具体表现为伊春市北部逊克县的草地转化为建设用地,进而导致碳储量降低。

3.3 生态系统碳储量时空分异驱动力分析

选取 2000 年、2010 年和 2020 年 3 个时期各驱动因子进行单因子探测分析,揭示驱动因子对研究区的碳储量空间分布影响。由因子探测结果(图 8)可以看出,各驱动因子对研究区的碳储量影响程度存在不同程度的差异,依次为:植被覆盖指数>土壤质地>土壤类型>年均温度>年降水量>年蒸散量>高程>坡度。其中,植被覆盖指数是研究区的碳储量空间分异的主导驱动因子(驱动因子解释力均大于 25%),对研究取得碳储量的解释力较强,影响最显著,其次是土壤质地,2010—2020 年两者的 q 值均呈现上升趋势,说明植被覆盖指数和土壤质地在一定程度上影响研究区碳储量的变化;高程与坡度的因子解释力相对较弱,2000—2020 年间驱动因子解释力均小于 10%,表明高程和坡度不是驱动研究区碳储量空间分异的主导因素;其余驱动因子 q 值在时间序列上均保持相对稳定。

对影响研究区碳储量空间分异的 8 个驱动因子进行交互作用探测,结果表明各驱动因子交互探测的解释力大于单驱动因子作用,因子之间的交互作用主要表现为双因子增强,其次为非线性增强(图 9)。交互探测作用最显著的是植被覆盖指数与年降水量的交互,对研究区的碳储量空间分异的影响均大于 36%(0.361、0.374 和 0.371),说明在高植被覆盖和强降水协同作用下,不同地形调节了水热分配,优化了区域植被分布,使研究区碳储量更丰富;其次是植被覆盖指数与土壤类型的交互,分别为 0.335、0.331 和 0.327,进一步证明植被覆盖度是驱动研究

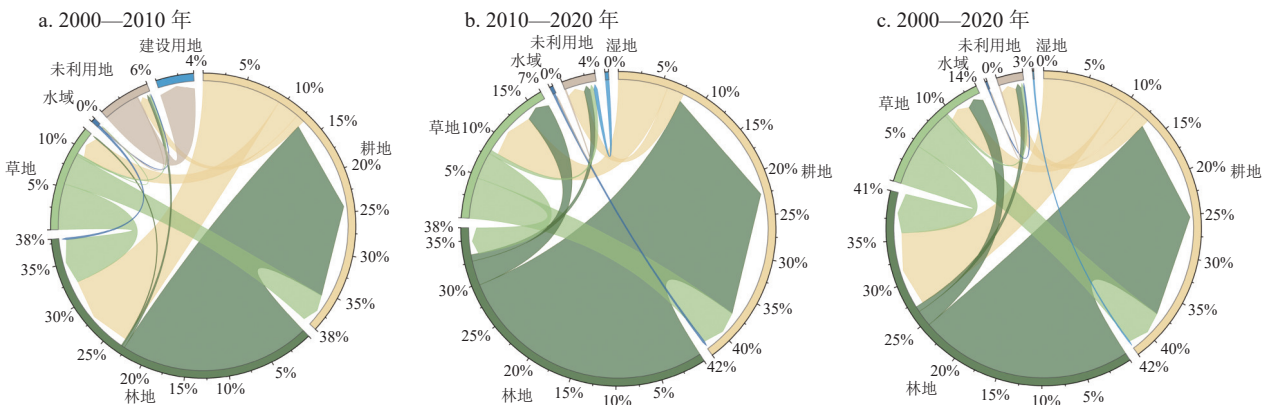


图 5 研究区 2000—2020 年小兴安岭土地利用类型变化

Fig. 5 The change of land use type in the study area from 2000 to 2020

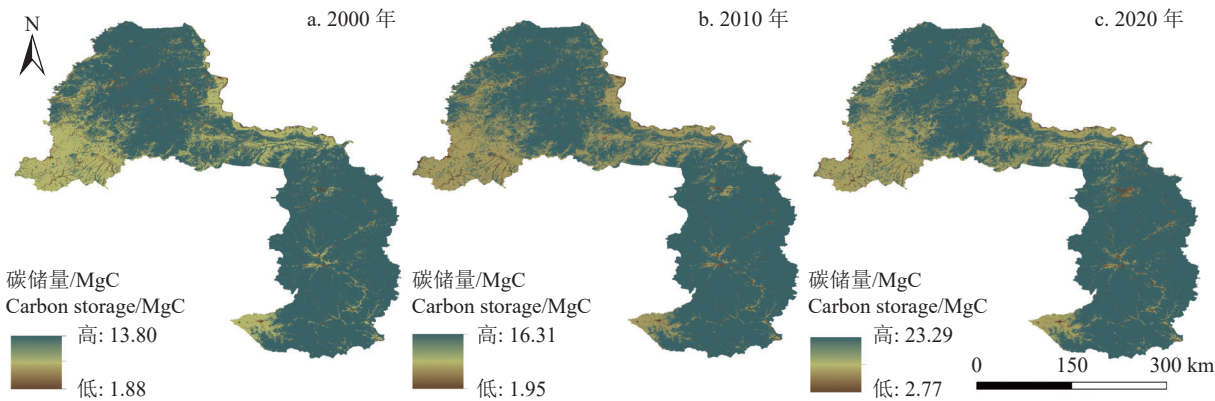


图 6 研究区 2000—2020 年碳储量空间分布图

Fig. 6 The spatial distribution maps of carbon storage in the study area from 2000 to 2020

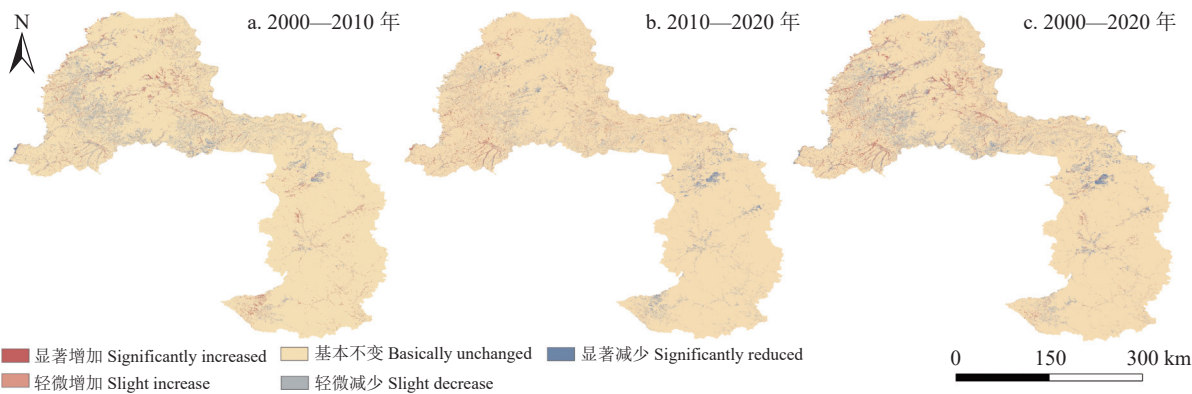
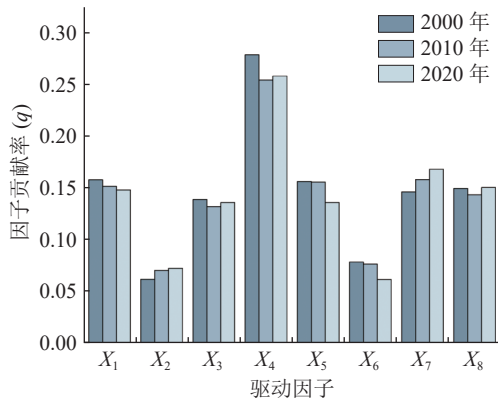


图 7 研究区 2000—2020 年碳储量空间分布变化图

Fig. 7 The spatial distribution change maps of carbon storage in the study area from 2000 to 2020

区碳储量的主要驱动因子; 高程与土壤质地交互作用的解释力分别为 0.255、0.261 和 0.269, 虽在驱动因子交互过程中其解释力较微小, 但其解释力均超过 25%。综上可知, 植被覆盖指数、土壤质地和土壤类型是影响碳储量空间分布的主要驱动因子。年均

气温、年降水量、高程、坡度与其他因子的交互作用对碳储量空间分布的影响均大于单一因子, 表明除植被覆盖指数和土壤因子外, 地形因素和气候因素之间各驱动因子的复杂耦合共同影响着研究区碳储量空间分异的结果。

图 8 2000—2020 年各驱动因子贡献率 (q)Fig. 8 Change of q value of each factor from 2000 to 2020

X_1 —年均气温; X_2 —高程; X_3 —年降水量; X_4 —植被覆盖指数; X_5 —土壤类型; X_6 —坡度; X_7 —土壤质地; X_8 —年蒸散量

X_1 —Annual average temperature; X_2 —Elevation; X_3 —Annual precipitation; X_4 —Vegetation coverage index; X_5 —Soil type; X_6 —Slope; X_7 —Soil texture; X_8 —Annual evapotranspiration

4 讨论

4.1 碳储量时空格局

研究显示,近 20 年小兴安岭地区碳储量呈波动上升趋势,增幅达 14.72%。土地利用类型的变化是影响碳储量演变的关键因素,其中耕地和建设用地面积持续增加,而林地、湿地面积显著减少。耕地和建设用地的扩张主要来源于林地和草地的转出,这与李勇等(2023)、满卫东等(2016)、曲琛等(2023)的研究结论一致。未来在保障 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 耕地红线的同时,需加强嫩江市的“退耕还林还草”政策,协同推进三北防护林工程,并优化未利用地的管理及荒漠化治理,以维持区域碳储量的稳定增长。此外,本次选取的 InVEST 模型已广泛应用于不同区域尺度上的碳储量评估,其科学性得到了广泛学者的认可。通过 InVEST 模型对研究区的碳储量进行评估时,碳密度的准确性和可靠性可对评估结果产生直接影响。本次研究通过研究区的生物量、土壤容重、土壤有机碳含量等科学数据进行碳密度计算,并与前人数据进行对比。张春华等(2018)以森林清查数据和实验样地实测数据为基础,通过生物量转换因子连续函数法研究黑龙江省森林近 40 年的碳储量、碳密度的动态变化,结果显示黑龙江森林地上碳密度为 $37.63 \sim 44.51 \text{ t/hm}^2$;郭树平(2011)根据样地实测数据,对小兴安岭耕地的碳密度进行预测,研究发现

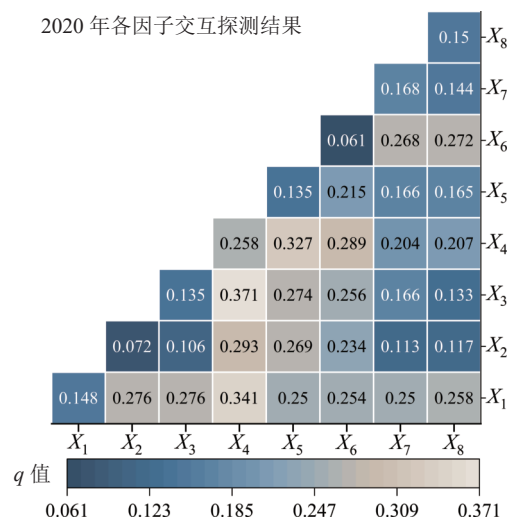
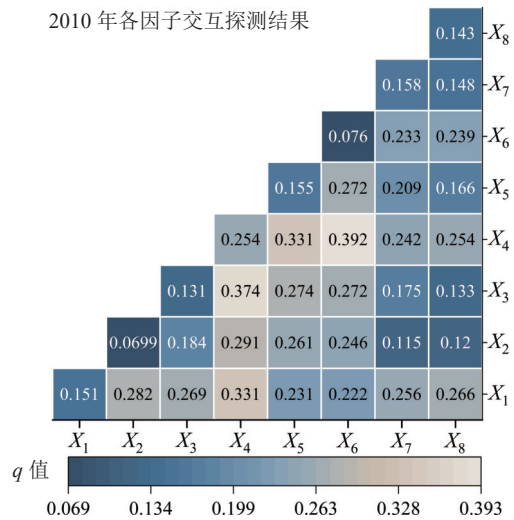
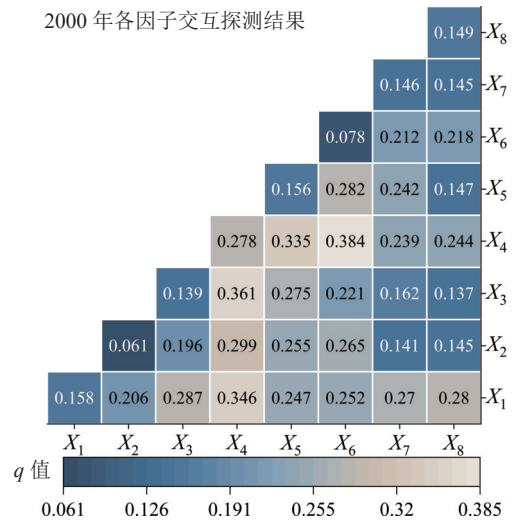
图 9 2000—2020 年各驱动因子交互探测结果 ($X_1 \sim X_8$ 说明参考图 8)

Fig. 9 The interactive detection results of driving factors from 2000 to 2020

耕地土壤碳密度为 147 t/ha, 与本次研究计算得出的耕地土壤碳密度相比, 相对误差为 1.56%, 一方面, 因为获取碳密度的方法不同, 其次在土壤采集与处理过程中的不确定因素较多, 如土壤的烘干时间、采集深度等; 朴世龙等(2004)根据中国草地植被生物量与归一化植被指数 (NDVI) 建立预测模型评估中国草地植被生物量, 并根据转换因子计算得出中国东北(寒温带)草地地上碳密度为 6.19 t/a, 研究计算得出草地地上碳密度与该结果十分接近。与众多学者的研究成果对比发现, 本次碳密度计算结果与其相差不大, 能较清楚地反映研究区的碳储量实际演化情况。

4.2 驱动力分析

本次研究表明, 植被覆盖指数和土壤质地是研究区内碳储量空间分异的主要驱动因子, 年均气温、年降水量、土壤类型等驱动因子对碳储量的空间分异也产生了不同程度的影响, 植被覆盖指数较高区域(林地、草地)的固碳能力明显高于其他地类, 地区固碳能力与植被覆盖指数成正相关, 与王成武等(2023)通过因子探测得出碳储量空间分异主要受植被覆盖指数的影响较吻合; 土壤质地的驱动影响仅次于植被覆盖指数, 表明土壤质地在一定程度上决定植被的生长结果, 进而影响地区的固碳能力, 这与李若玮等(2021)通过结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM) 分析寒带地区碳储量空间分异受土壤质地影响较大, 结论较一致。因此, 要选择适合植被生长的区域, 因地制宜推进退耕还林还草政策。年均气温与年降水量分别对研究区的碳储量空间分异产生一定程度的影响, 植被的生长通常受水热条件影响, 较好的水热条件会促进植被的生长, 从而提升区域的固碳能力, 这与杨小琬等(2022)利用过程模型与经验模型进行碳储量空间分异的驱动因子探究结果较接近。双因子交互探测结果(图 9)显示, 不同驱动因子类型间相互作用均对小兴安岭地区的碳储量产生较强的影响力。

4.3 对减碳增汇的贡献

研究采用 InVEST 模型评估碳储量, 并通过对比张春华等(2018)、郭树平(2011)、朴世龙等(2004)的实测数据验证了碳密度计算的合理性, 表明模型结果能较准确地反映区域碳储量的实际变化。然而, 模型仍存在局限性, 如未考虑不同树种、树龄、耕作方式及植被生理过程(呼吸、光合作用)的影响。未

来需结合长期样地监测获取更精细的实测数据, 并优化驱动因子分析(如增加因子作用方向的探讨), 以提高碳储量评估的精确性。该研究为小兴安岭生态修复和碳汇管理提供了科学依据, 建议因地制宜推进植被恢复策略, 以增强区域碳汇能力, 助力碳中和目标实现。

研究利用 InVEST 模型对小兴安岭地区近 20 年生态系统服务碳储量进行评估, 并分析研究区内碳储量空间分异的驱动因子影响。该模型在进行碳储量评估时多聚焦在地类的动态变化上, 忽视了不同树种、树龄、耕作物及其他植被的呼吸与光合效率。为更加真实反映不同尺度上的碳储量演变, 未来还需要针对研究区样地进行多树种、多植被等长时序监测以获得物种丰富的实测数据, 进而进行更加深入的研究; 在驱动因子定量分析方面, 目前学者们在研究不同尺度的碳储量影响因子时多采用定性分析(尤海丹等, 2018; 杨小琬等, 2022), 本次研究利用地理探测器对研究区碳储量的空间分异进行定量分析, 但在驱动因子选取时可能不够全面, 缺少对影响因子作用方向的讨论, 未来还需更加深入探究驱动因子的影响作用。

5 结 论

(1) 研究基于 2000—2020 年小兴安岭地区的土地利用数据, 利用 InVEST 模型测算碳储量变化。结果表明, 3 个时期的碳储量分别为 14718.19×10^5 t、 16971.70×10^5 t 和 16883.51×10^5 t, 整体呈波动上升趋势, 20 年间累计增长 14.72%。从土地利用变化看, 林地与耕地的相互转化是碳储量变化的主要原因, 其中林地作为研究区的主要碳库, 其面积变化直接影响碳储量的增减。

(2) 因子探测结果表明, 小兴安岭地区生态系统的碳储量空间分异主要受到植被覆盖指数和土壤因素的影响。年降水量、年均气温等驱动因子对区域内的碳储量空间分异也存在不同程度上的作用。多因子交互作用探测结果显示, 各驱动因子间的交互作用大多数强于单一因子对碳储量空间分异的影响, 其中协同作用能力最强的是植被覆盖指数与年降水量协同影响类型(0.361~0.374)。

(3) 进行东北森林带生态保护和修复重大工程建设过程中, 坚守耕地 1.2×10^8 ha 线的同时, 要推进“退耕还林”政策的实施, 考虑不同驱动因素间的作

用特点,根据不同土壤类型因地制宜种植适宜的树种,采取多样化的修复策略,通过科学手段修复东北森林带的生态系统,进而提升该地区生态系统的碳汇能力。

References

- Cao S X, Liu Y J, Su W, et al. 2018. The net ecosystem services value in mainland China[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 595–603.
- Cheng J M, Cheng J, Yang X M, et al. 2012. Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(1): 226–237(in Chinese with English abstract).
- Cheng J, Huang W Q, Zhang S C, et al. 2023. Spatial distribution and influencing factors of topsoil organic carbon density in Fujian Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 40(4): 805–816(in Chinese with English abstract).
- Cui X Y, Xu W T, Guan Q R. 2021. Estimation of organic carbon stocks in the East China Sea[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 50(6): 110–121(in Chinese with English abstract).
- Dangullam M, Manaf L A, Ramli M F, et al. 2021. Exploring urban tree diversity and carbon stocks in Zaria Metropolis, North Western Nigeria[J]. *Applied Geography*, 127(1): 102385.
- Ding Y, Wang G Q, Gui F, et al. 2023. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay Area based on InVEST and PLUS models[J]. *Environmental Science*, 44(6): 3343–3352 (in Chinese with English abstract).
- Fang J Y, Wang Z M. 2001. Forest biomass estimation at region-al and global levels, with special reference to China's forest biomass[J]. *Ecological Research*, 16(3): 587–592.
- Gao Y, He N P, Wang Y F. 2013. Characteristics of carbon sequestration by ecosystem and progress in its research.[J]. *Journal of Natural Resources*, 28(7): 1264–1274 (in Chinese with English abstract).
- Guo P T, Cha Z Z, Luo W, 2023. Acquiring environmental factor weights using normalized difference vegetation index for soil management zoning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 39(3): 60–67(in Chinese with English abstract).
- Guo S P. 2011. Analysis on carbon stock and potential carbon sequestration in Heilongjiang Province[J]. *Forest Engineering*, 27(3): 9–11,6(in Chinese with English abstract).
- Guo Y D, Zhang Q L, Zhang R, et al. 2022. Construction of remote sensing model for biomass estimation of artificial shrubbery in Kubuqi Desert[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 50(9): 56–60(in Chinese with English abstract).
- Jiao Y, Hu H Q. 2005. Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(12): 2248–2252(in Chinese with English abstract).
- Li H H, Li C B, Wu J, et al. 2022. Spatio-temporal dynamics and climate response ofgrassland net primary productivity in Shiyang River basin from 2000 to 2020[J]. *Pratacultural Science*, 39(10): 2048–2061(in Chinese with English abstract).
- Li R W, Ye C C, Wang Y, et al. 2021. Carbon storage estimation and its driving force analysis based on InVEST model in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 29(z1): 43–51(in Chinese with English abstract).
- Li Y, Zhao Y Z, Zhuo Z Q, et al. 2023. Analysis of ecological problems and its conservation-restoration strategy of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasslands in the Xiaoxing'an Mountains-Sanjiang Plain[J]. *Ecological Science*. 42(1): 95–104(in Chinese with English abstract).
- Liu G, Zhang J, Li Jie, et al. 2021. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. *Arid Zone Research*, 38(1): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y N, Xi M, Zhang L X, et al. 2019. Carbon storage distribution characteristics of wetlands in China and its influencing factors[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 30(7): 2481–2489 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Zang J, Zhuo D M, et al. 2021. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(10): 4052–4065 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y Y, Xu X L, Li J C, et al. 2022. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. *Arid Zone Research*, 39(6): 1896–1906(in Chinese with English abstract).
- Man W D, Wang Z M, Liu M Y, et al. 2016. Spatio-temporal dynamics analysis of cropland in Northeast China during 1990–2013 based on remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(7): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Piao S L, Fang J Y, He J S, et al. 2004. Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, (4): 491–498(in Chinese with English abstract).
- Qu C, Li W, Xu J, et al. 2023. Potential impact of black land conservation and utilization on carbon storage in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 38(5): 194–203(in Chinese with English abstract).
- Wang C W, Luo J J, Tang H H. 2023. Analysis on the driving force of spatial and temporal differentiation of carbon storage in the Taihang Mountains based on InVEST model[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 32(2): 215–225 (in Chinese with English abstract).
- Wang J F, Xu C D. 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116–134(in Chinese with English abstract).
- Wang L X, Ding H L, Liu Z. 2022. Spatiotemporal change of NPP based on CASA model and its response to climate change in Jing River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 29(1): 190–196(in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, Liu J Y, Yu G R. 2003. Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon storage in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(5): 797–802(in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, Zhou C H. 1999. Estimating soil carbon reservior of terrestrial ecosystem in China[J]. *Geographical Research*, 18(4): 349–356(in Chinese with English abstract).

- Wu H, Xu H. 2021. Remote sensing retrieval and calibration of forest vegetation carbon density based on time-series data[J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 281(6): 43–51 (in Chinese with English abstract).
- Xu W Y, Jin X B, Yang X H, et al. 2018. The estimation of forest vegetation biomass in China in spatial grid[J]. *Journal of Natural Resources*, 33(10): 1725–1741(in Chinese with English abstract).
- Yang X W, Zhang L J, Qin Y C, et al. 2022. Temporal and spatial variation and driving factors of carbon storage in the lower yellow river since 1995[J]. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 52(1): 20–33(in Chinese with English abstract).
- You H Z, Bi J, Wang C, et al. 2018. Altitudinal distribution rule of betula platyphylla forest's soil organic carbon density and its influencing factors in Xiaowutai Mountain in Hebei[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(3): 432–437(in Chinese with English abstract).
- Zhang C H, Wang L Y, Song Q W, et al. 2018. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013[J]. *China Environmental Science*, 38(12): 4678–4686(in Chinese with English abstract).
- Zhang M M, Liu M Y, Chang Q R, et al. 2018. Spatial distribution of organic carbon in topsoil of the loess tableland in Shaanxi Province during 1985–2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 33(11): 2032–2045 (in Chinese with English abstract).
- Zhao M M, Zhao N, Liu Y, et al. 2019. An overview of forest carbon measurement methods[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(11): 3797–3807 (in Chinese with English abstract).
- 李怀海, 李纯斌, 吴静, 吉珍霞, 等. 2022. 2000—2020 年石羊河流域草地净初级生产力时空动态及其对气候的响应[J]. *草业科学*, 39(10): 2048–2061.
- 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 等. 2021. 基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J]. *草地学报*, 29(z1): 43–51.
- 李勇, 赵云泽, 卓志清, 等. 2023. 小兴安岭—三江平原区生态问题辨析及山水林田湖草保护修复策略[J]. *生态科学*, 42(1): 95–104.
- 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 2021. 基于 InVEST 模型的 1999–2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. *干旱区研究*, 38(1): 267–274.
- 刘亚男, 郝敏, 张希丽, 等. 2019. 中国湿地碳储量分布特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 30(7): 2481–2489.
- 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 2021. 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*, 41(10): 4052–4065.
- 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 2022. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. *干旱区研究*, 39(6): 1896–1906.
- 满卫东, 王宗明, 刘明月, 等. 2016. 1990–2013 年东北地区耕地时空变化遥感分析[J]. *农业工程学报*, 32(7): 1–10.
- 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. *植物生态学报*, (4): 491–498.
- 曲琛, 李文, 徐嘉, 等. 2023. 黑龙江黑土地保护利用对碳储量的潜在影响[J]. *西北林学院学报*, 38(5): 194–203.
- 王成武, 罗俊杰, 唐鸿湖. 2023. 基于 InVEST 模型的太行山沿线地区生态系统碳储量时空分异驱动力分析[J]. *生态环境学报*, 32(2): 215–225.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 72(1): 116–134.
- 王丽霞, 丁慧兰, 刘招, 等. 2022. 基于 CASA 模型探究泾河流域植被 NPP 时空动态及其对气候变化的响应[J]. *水土保持通报*, 29(1): 190–196.
- 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 2003. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. *应用生态学报*, 14(5): 797–802.
- 王绍强, 周成虎. 1999. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. *地理研究*, 18(4): 349–356.
- 吴恒, 胥辉. 2021. 森林植被碳密度遥感反演和校准研究[J]. *林业资源管理*, 281(6): 43–51.
- 徐伟义, 金晓斌, 杨绪红, 等. 2018. 中国森林植被生物量空间网格化估计[J]. *自然资源学报*, 33(10): 1725–1741.
- 杨小琬, 张丽君, 秦耀辰, 等. 2022. 1995 年以来黄河下游碳储量时空变化及驱动因素[J]. *河南大学学报 (自然科学版)*, 52(1): 20–33.
- 尤海丹, 毕君, 王超, 等. 2018. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素[J]. *生态环境学报*, 27(3): 432–437.
- 张春华, 王莉媛, 宋茜薇, 等. 2018. 1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J]. *中国环境科学*, 38(12): 4678–4686.
- 张萌萌, 刘梦云, 常庆瑞, 等. 2018. 1985—2015 年陕西黄土台塬表层土壤有机碳空间分布[J]. *自然资源学报*, 33(11): 2032–2045.
- 赵苗苗, 赵娜, 刘羽, 等. 2019. 森林碳计量方法研究进展[J]. *生态学报*, 39(11): 3797–3807.

附中文参考文献

- 程积民, 程杰, 杨晓梅, 等. 2012. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征[J]. *生态学报*, 32(1): 226–237.
- 程金, 黄文卿, 张世昌, 等. 2023. 福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析[J]. *农业资源与环境学报*, 40(4): 805–816.
- 崔晓宇, 徐文韬, 关其锐. 2021. 东海有机碳存量估算[J]. *红外与激光工程*, 50(6): 110–121.
- 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 2023. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. *环境科学*, 44(6): 3343–3352.
- 高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 2013. 生态系统固碳特征及其研究进展[J]. *自然资源学报*, 28(7): 1264–1274.
- 郭澎湃, 茶正早, 罗微. 2023. 基于归一化植被指数获取环境因子权重的土壤管理分区方法[J]. *农业工程学报*, 39(3): 60–67.
- 郭树平. 2011. 黑龙江省碳储量及碳汇潜力分析[J]. *森林工程*, 27(3): 9–11, 6.
- 郭玉东, 张秋良, 张榕, 等. 2022. 库布齐沙漠人工灌木林生物量的遥感估测模型构建[J]. *东北林业大学学报*, 50(9): 56–60.
- 焦燕, 胡海清. 2005. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化[J]. *应用生态学报*, 16(12): 2248–2252.