

基于 PLUS-InVEST 模型的大兴安岭农林交错区碳储量 时空变化及驱动力分析

李斯佳¹, 王冰^{1,2*}, 王子昊¹, 张秋良^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 根河 022350)

摘要: 通过分析林地与耕地交错地带的土地利用时空变化及其对碳储量的影响, 探索提升碳汇能力的有效途径。该研究运用 PLUS-InVEST 模型, 以及地理探测器 (Geodetector) 的分析方法, 对大兴安岭农林交错区 1990—2030 年土地利用时空变化对陆地生态系统碳储量时空变化特征的影响, 并分析其碳储量变化的驱动因素。结果表明: 1) 1990—2020 年, 土地类型的转出面积较多的是林地、草地与耕地; 转入率占比较高的分别是裸地 75%、水体 61.33%、不透水面 61.15%。到 2030 年, 自然保护和生态保护情景下林地和草地面积显著增加; 耕地保护情景增加耕地和草地面积, 林地面积减少; 城市发展情景中, 耕地面积减少。2) 研究区碳储量在过去 20 年中总体呈下降趋势, 共减少了 6.08×10^7 t, 林地碳储量减少最多, 其次为草地和耕地, 不透水面的碳储量有所增加; 与 2020 年相比, 2030 年不同情景下的碳储量, 除耕地保护情景外, 其他情景下均呈增加趋势, 碳储量总量分别为 1.555×10^9 、 1.562×10^9 、 1.562×10^9 和 1.561×10^9 t; 3) 高程、人口、坡度是研究区碳储量空间分异的主要驱动因子; 且各驱动因子间的交互作用强度均强于单一因子, 其中坡度和人口密度交互效应最为显著为 0.74。该研究揭示了大兴安岭农林交错区碳储量时空变化特征以及驱动力, 以及模拟未来不同情景下的碳储量, 研究结果可为研究区土地利用合理规划及碳汇能力提升提供数据支撑。

关键词: 碳储量; 多情景模拟; 农林交错区; PLUS-InVEST 模型; 地理探测器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406067

中图分类号: S757

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0232-10

李斯佳, 王冰, 王子昊, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的大兴安岭农林交错区碳储量时空变化及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 232-241. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406067 <http://www.tcsae.org>
LI Sijia, WANG Bing, WANG Zihao, et al. Spatiotemporal changes and driving forces of carbon storage in the forest-agricultural interlacing zone of Greater Khingan Mountains using PLUS-InVEST model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 232-241. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406067 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土地利用的变化已成为影响碳储量的重要因素, 其过程中常伴随大量的碳交换, 其中一些交错区用地类型转化最为活跃^[1-2]。森林砍伐和耕地面积进一步扩展以及建设用地的增加是导致全球及各国碳储量下降的主要原因^[3-4]。而退耕还林等措施则有助于提升区域碳储量^[5]。同时, 区域碳储量与粮食安全也息息相关^[6-7], 掌握耕地时空演变特征及其碳排放效应, 对于保障粮食安全和开展低碳绿色农业具有重要意义。因此, 研究林地与耕地交错地带的土地利用时空变化对陆地生态系统碳储量时空变化特征的影响, 并分析其碳储量变化的驱动因素, 对于碳汇提升具有重要意义。

目前, 关于陆地生态系统的碳储量研究已较为广泛。在研究对象方面, 研究更倾向于以行政区域作为主要的研究单元。这一趋势与行政区划管理和政策制定需求密切相关。例如, 汪勇敢等^[8]、LIU 等^[9-10]、李佳珂^[11]等、LI 等^[12]从不同规模的行政区分析了土地利用变化格局演变和碳储量动态变化特征, 不仅为地方政府提供了科学依据, 还为宏观政策的实施提供了数据支持。其次, 一些特定的生态系统也被广泛研究, 如张宇飞等^[13]、姚楠等^[14]、王瑞利等^[15]、张燕等^[16]、侯建坤等^[17]、苏越等^[18]对不同的特定生态区开展了相关研究, 这类研究有助于揭示不同生态系统在全球碳循环中的角色。在研究方法上, 当前, 研究碳储量主要通过以下 3 种方法^[19-20]: 实地调查法、遥感反演法和模型模拟法。实地调查法能够相对准确地估算碳储量, 但其适用范围较小, 数据收集时可能会对研究区环境造成破坏^[21]; 遥感反演法可以进行大尺度碳储量研究, 但通常以特定生态系统或部分碳库数据为研究对象^[22-23]; 模型模拟法则主要利用 FORECAST、DNDC、HASM、InVEST 等模型实现对区域碳储量的估算^[24-25], 可以有效估计、预测和评估各种尺度下的碳储量。其中, InVEST 模型以其数据需求少、

收稿日期: 2024-06-17 修订日期: 2024-09-27

基金项目: 内蒙古自治区重点研发计划项目 (2023YFDZ0026); 内蒙古自治区科研基础平台项目 (2023KYPT0001)

作者简介: 李斯佳, 研究方向为“3S”技术应用与资源监测评价。

Email: 2093707629@qq.com

※通信作者: 王冰, 教授, 研究方向为“3S”技术应用与资源监测评价。

Email: wbingbing2008@126.com

操作简便的特点，被广泛用于碳储量的时空分布和变化研究。预测未来土地利用变化对碳储量的影响对制定生态保护方案具有重要意义。目前，李倩等^[26]、WANG 等^[27]、邓元杰等^[28]、孙博等^[29]、杨宇萍等^[30]分别基于 SD-PLUS 模型、MCE-CA-Markov 模型、CLUE-S 模型、FLUS 模型和 ANN-CA 模型预测不同地区未来不同情景下土地利用变化。与这些模型相比，斑块级土地利用模拟模型（Patch-level Land Use Simulation Model, PLUS）^[8,11,31]在研究未来土地利用发展潜力方面表现出较好的理论和数学基础，常被用来测算不同情景下碳储量的变化。PLUS 模型能够通过土地扩展分析策略（Land Expansion Analysis Strategy, LEAS）更有效地模拟多种土地利用面积的变化，深入理解土地利用变化背后的驱动机制，可以更准确地反映未来政策情景下土地利用变化对生态系统服务的影响，较适用于土地连片集约发展的情景模拟。当前的研究多集中在将 PLUS 模型应用于城市等行政区环境，而针对一些特殊生态区域和生态敏感区域的研究和应用相对较少。与此同时，基于土地利用变化角度的碳储量研究逐渐倾向于对未来碳储量进行多情景模拟，对于碳储量驱动机制的分析往往是从土地利用变化角度出发，缺少自然与社会经济因子对于碳储量变化的研究。因此，在探讨碳储量驱动机制的研究中还需考虑土地利用变化与自然和社会经济因子的协同影响。

农林交错区属于生态交错区的概念范畴，该区域内耕地与林地空间上交错分布，时间上相互重叠，是自然因子和人为干扰作用最为活跃的生态敏感脆弱区^[32-35]。大兴安岭农林交错区位于东北亚腹地，该区域不仅是中国碳储量的重要区域，同时也是中国重要的商品粮供应地，面临着生态保护与经济发展的双重挑战。以往的研究大多对整个大兴安岭地区水源供给和生境质量服务功能的动态评估做了相关研究^[36]，但缺乏对大兴安岭农林交错区的碳储量时空变化特征及驱动力因素分析。因此，本文通过分析 1990—2020 年间该区域的土地利用和碳储量变化数据，结合自然因素和人为因素数据，分析不同驱动因子对碳储量空间的分异性的解释能力，并应用 PLUS 模型预测 2030 年不同发展情景下的碳储量变化趋势，以期为该区域的生态保护、土地利用规划以及双碳目标的应对措施提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

大兴安岭农林交错区（46°~52°N，121°~128°E）位于中国大兴安岭山脉东北部（图 1），主要包含了黑龙江省的嫩江市、齐齐哈尔市富拉尔基区、甘南县、龙江县、梅里斯达斡尔族区、讷河市、碾子山区和内蒙古自治区的呼伦贝尔市阿荣旗、莫力达瓦、扎兰屯市、兴安盟扎赉特旗。该区域为中国东北典型的农林交错地带^[32]，总面积约 87.33 hm²。该区属寒温带大陆季风气候区，冬季寒冷干燥，夏季温凉湿润，年平均气温为 1.5 ℃，年平均降水量为 360~560 mm。主要植被类型包括兴安落叶松、

樟子松、白桦、云杉等；山地连绵起伏，地势西高东低，海拔 113~1 706 m；土壤以淋溶土与半淋溶土为主。研究区森林覆盖率 38.4%，农作物播种面积 51.4 万 hm²，林业与农业较为发达。

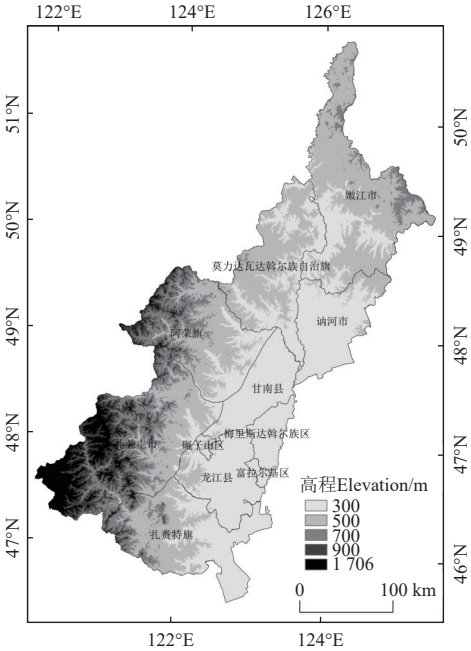


图 1 研究区位置示意
Fig.1 Schematic map of study area

1.2 数据来源及预处理

本文涉及的数据类型、名称及来源见表 1。对数据所做预处理包括：1) 对遥感影像进行几何校正、镶嵌裁剪、重分类及投影变换，确保统一所有数据的坐标系为 WGS1984 UTM 50N，并保持相同的行列号与精度；2) 为了取得空间分辨率和数据处理效率之间的最佳效果，进行了多次试验和计算资源的平衡，将所有数据重采样至分辨率 60 m×60 m。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data sources
土地利用数据 Land-use data	土地利用数据 (1990—2020)	AI Earth (https://engine-aiearth.aliyun.com/)
自然因子 Natural factor	DEM	中科院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn)
	坡度	
	坡向	
	土壤类型	中科院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn) (1990—2020 年)
社会经济因子 Socioeconomic factor	年均气温	中科院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn) (1990—2020 年)
	年均降水	
	人口密度	中科院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn) (1990—2020 年)
	人均 GDP	
	距高速公路距离	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/) ArcGIS 欧式距离分析
	距一级道路距离	
	距主干道距离	
	距铁路距离	
	距城市距离	
	距医院距离	
	距水域距离	
	距火车站距离	
	类 NPP-VIIR 夜间灯 光数据	AI Earth (https://engine-aiearth.aliyun.com/)

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析

本文应用土地利用转移矩阵计算研究区 1990—2020 年各土地类型转化的来源、去向、转出面积和转入面积^[37-38], 分析其土地利用时空变化特征。

1.3.2 碳储量估算

本文运用 InVEST 模型中的 Carbon 模块计算了研究区各年份的碳储量, 并分析了其时空变化特征。其中碳密度参数通过文献检索得到^[8], 并且结合李克让等^[39-41]等的研究, 采用碳密度修正公式^[42]进行修正。最终得到研究区各个土地利用类型的碳密度表 (表 2)。

表 2 研究区各土地利用类型碳密度

土地利用类型 Land-use type	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地 Cropland	3.94	27.43	104.15	0
林地 Forestland	64.42	39.41	152.58	0
草地 Grassland	12.01	29.41	96.53	0
水域 Waterbody	1.21	0	0	0
裸地 Bare land	4.62	0	20.78	0
不透水面 Urban	4.28	9.35	0	0
湿地 Wetland	13.66	6.49	181.94	0

注: C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别代表地上植被碳库、地下植被碳库、土壤有机碳库和死亡有机碳库碳密度。

Note: C_{above} 、 C_{below} represent carbon density of above and below ground vegetation carbon pools, while C_{soil} 、 C_{dead} represent carbon density of soil and dead organic carbon pools, respectively.

1.3.3 基于 PLUS 模型的碳储量预测

1) 影响因子选取。本研究根据前人经验及研究区相关规划政策, 将驱动因子分为自然因素和社会因素两方面^[43], 选取气温、降水量、高程、坡度、土壤类型、GDP 值、人口、距道路距离、距铁路距离和距河流距离作为土地利用变化的驱动因子。

2) 精度验证。使用 PLUS 模型基于 1990 年、2000 年和 2010 年的土地利用数据对 2020 年土地利用状况进行预测, 并对结果进行精度检验。

3) 多情景设定。根据大兴安岭保护与发展的需求, 本文设定自然增长、生态保护、耕地保护和城市发展 4 种不同的情景^[44], 依据 1990—2020 年土地利用转移矩阵, 结合 PLUS 模型以 10 a 为步长预测 2030 大兴安岭的土地利用格局。自然发展情景是在没有特别政策干预下, 土地利用按照当前趋势发展, 不对任何土地类型设定转换限制, 该情景是为了评估在不采取特殊保护或开发措施的情况下, 土地利用及碳储量的未来演变趋势, 为其他情景的效果评估提供基线。生态保护情景是在敏感生态区中, 优先保护自然生态系统, 禁止生态用地 (如林地、草地等) 向非生态用地 (如不透水面、耕地等) 转化, 并鼓励其他类型的土地转化为生态用地。目的是通过限制生态用地的开发和转化, 保护生态系统的功能。耕地保护情景是通过严格控制耕地的转化, 保护耕地不被其

他土地利用形式 (如建设用地或城市用地) 侵占, 确保粮食生产能力。在此情景下, 耕地禁止向非耕地类型转化, 重点限制城市扩张侵占耕地, 同时允许部分非耕地类型转为耕地。城市发展情景是通过优先发展城市用地和建设用地, 满足城市扩张、基础设施建设以及经济发展的需要。城市发展的前提下, 优先允许其他类型的土地 (如耕地、草地等) 向建设用地或城市用地转化, 鼓励城市区域扩大。但在该情景下, 生态用地转化受到一定程度的限制, 确保城市发展不完全侵占生态功能^[45-46]。

4) 不同情景下的碳储量预估。基于 2030 年不同情景下的土地利用格局, 开展研究区碳储量预估。

1.3.4 碳储量驱动因子分析

本研究采用地理探测器中的因子探测和交互作用探测两种探测方法监测研究区碳储量的空间分异性及驱动因子对其的解释力^[1,47-48]。

1) 因子探测。因子探测器可探测因变量 Y 的空间分异性以及某因子 XY 空间分异的解释力度。

2) 交互作用探测。交互作用探测是通过比较影响因子 X_1 和 X_2 对因变量 Y 的 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与其交互作用后的 $q(X_1 \cap X_2)$ 大小, 来评估 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增强或减弱对因变量 Y 的解释力度。

2 结果与分析

2.1 1990—2020 年碳储量时空变化特征

2.1.1 土地利用时空变化

大兴安岭农林交错区是由 7 种地类组成 (图 2), 其中主要地类为耕地与林地。截至 2020 年, 二者的面积占比分别为 51.4% 和 38.4%。1990—2020 年, 研究区用地类型耕地增加最多, 为 5 175.74 km², 林地减少最多, 为 3 482.5 km², 尤其是在研究区北部的黑龙江省嫩江市以及内蒙古自治区莫力达瓦达翰尔族自治旗变化较为明显。在此期间, 其他地类如水体、裸地和不透水面的面积也有所增加, 草地与湿地的面积均处于减少状态。

通过 1990—2020 年土地利用转移矩阵可知 (图 3), 研究区土地利用类型变化较为明显, 除了耕地与林地之外, 草地的变化也较为显著。

1) 1990—2020 年大兴安岭农林交错区的转出率为湿地最高, 达 97.51%, 主要转为耕地、林地和草地, 其中转化为耕地的面积最多, 占湿地转出面积的 59.8%; 其次为草地; 其余土地利用类型的转出率从大到小依次为: 水体 (31.09%)、林地 (17.38%)、不透水面 (13.4%), 耕地转出率最少, 只有 11.74%, 主要转为草地、林地以及不透水面。2) 1990—2020 年研究区各用地类型的转入率裸地最高, 达 75%, 其次为水体和不透水面。由此可见, 1990—2020 年研究区各用地类型面积转化较为活跃的是耕地、林地以及草地。其中林地与草地转为耕地面积最多, 分别为 5 836.47 与 3 759.01 km²。

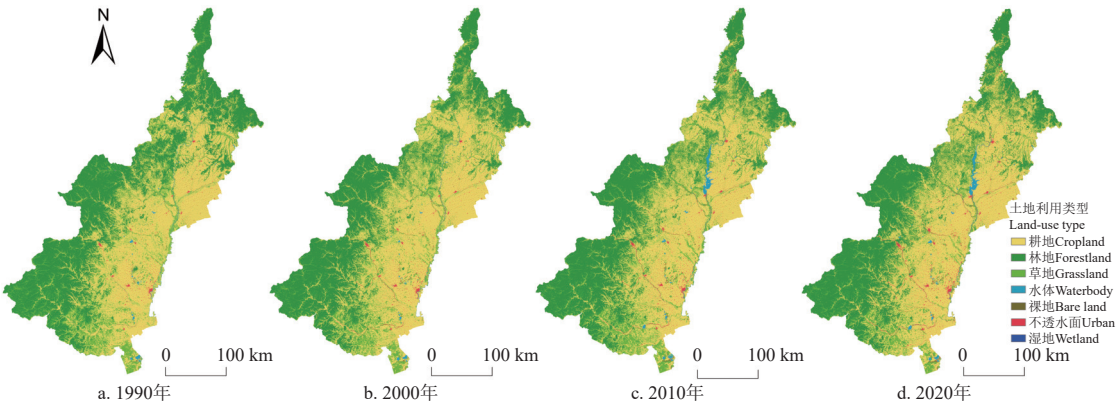


图 2 1990—2020 土地利用变化空间分布
Fig.2 Spatial distribution map of land use changes from 1990 to 2020

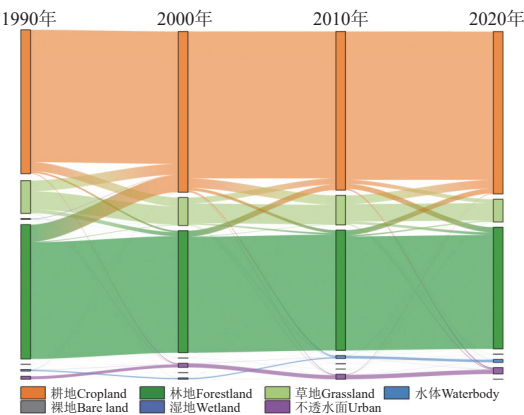


图 3 1990—2020 年土地利用转移矩阵
Fig.3 Land use transition matrix from 1990 to 2020

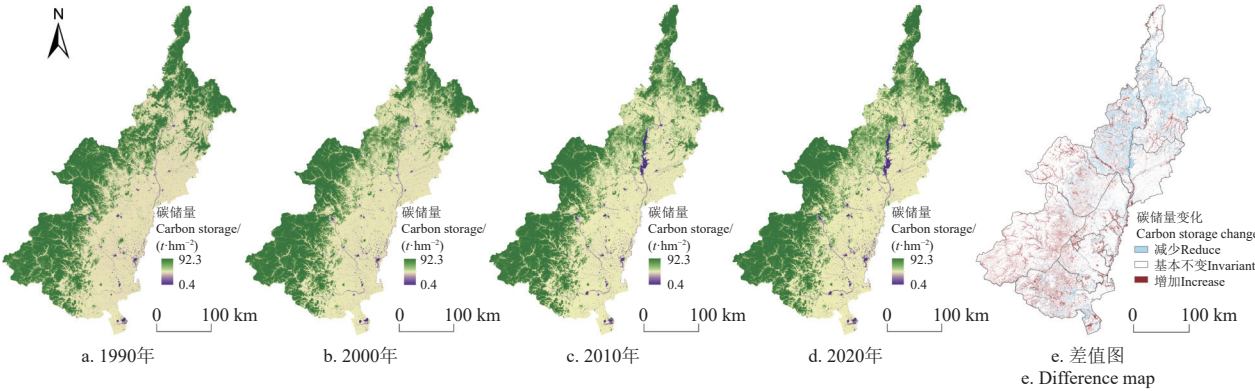


图 4 1990-2020 年碳储量空间分布及差值图
Fig.4 Spatial distribution and difference map of carbon storage from 1990 to 2020

表 3 1990—2020 不同土地利用类型碳储量

Table 3 Carbon storage of different land use types from 1990 to 2020

土地利用类型 Land-use type	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
耕地 Cropland	5.38×10^8	6.02×10^8	5.94×10^8	6.08×10^8
林地 Forestland	9.50×10^8	8.63×10^8	8.51×10^8	8.61×10^8
草地 Grassland	1.25×10^8	1.06×10^8	1.12×10^8	8.64×10^7
水体 Waterbody	5.33×10^4	4.37×10^4	9.44×10^4	9.49×10^4
裸地 Bare land	6.65×10^4	3.88×10^4	7.28×10^4	1.01×10^5
不透水面 Urban	1.08×10^6	1.54×10^6	1.85×10^6	2.41×10^6
湿地 Wetland	4.37×10^6	7.27×10^5	3.43×10^5	2.22×10^5
总计 Total	1.62×10^9	1.57×10^9	1.56×10^9	1.56×10^9

2.1.2 碳储量时空变化特征

1990—2020 年间，研究区高碳储量区域主要位于研究区西部的阿荣旗、扎兰屯市，碳储量低值区主要分布在中东部地区，整体呈现出“西高东低”的空间分布特点，与土地利用类型空间分布一致，即西部林地碳储量明显高于东部耕地（图 4）。

从碳储量差值图可看出，该农林交错区林地与耕地转化最为活跃的区域碳储量变化也较为明显，且 1990—2020 年期间研究区碳储量总体减少。其中，研究区北部如嫩江市以及莫力达瓦达斡尔族自治旗的碳储量显著减少，其他区域则呈现出缓慢下降趋势；相比之下，研究区西部阿荣旗和扎兰屯市等地的碳储量表现出较为明显地增长。1990—2020 年期间，研究区总碳储量呈下降趋势，共减少了 $6.08 \times 10^7 \text{t}$ （表 3）。

耕地增加了 $7.01 \times 10^7 \text{t}$ 碳储量，占总增量的 96.29%，林地碳储量减少最多，为 $8.93 \times 10^7 \text{t}$ ，占碳储总损失量的 79.03%，其次草地减少了 $3.89 \times 10^7 \text{t}$ 。即使是规模较小的土地类型，通过恰当管理同样可以对区域碳平衡产生积极影响。

2.2 碳储量驱动力分析

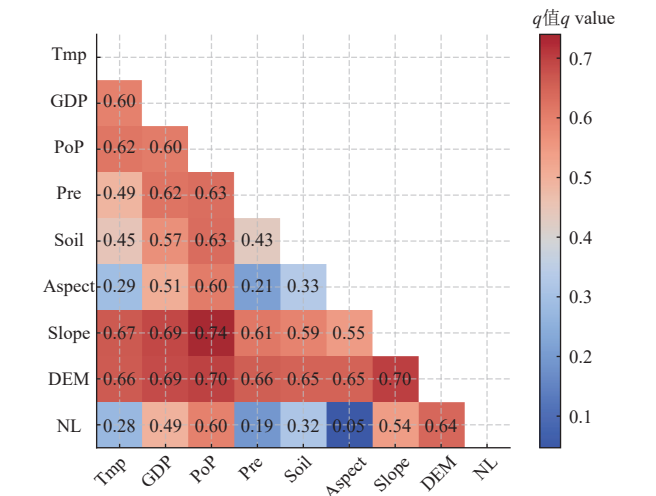
2.2.1 单因子探测分析

单因子探测结果揭示了不同变量对碳储量的具体影响程度，1990—2020 年期间，9 个驱动因子对碳储量空间分异性的解释力排序为：DEM（0.640）、人口（0.596）、

坡度 (0.542)、GDP (0.492)、土壤 (0.316)、年均温度 (0.271)、年均降水 (0.182)、坡向 (0.037)、夜光 (0.011)。其中 DEM、人口、坡度和 GDP 对碳储量影响较大, 而坡向和夜光影响较小。

2.2.2 因子交互作用探测分析

交互探测结果显示 (图 5), 不同因素之间的相互作用对碳储量有积极作用, 且交互因子的解释力均高于单因子, 表明影响因子对碳储量影响的过程不是孤立的, 而是彼此相互联系并相互协同作用的。其中坡度和人口密度交互效应最为显著为 0.74, 其次是 DEM 和人口密度以及 DEM 和坡度的交互效应均为 0.70, 表明在这些因素的联合作用对碳储量的影响显著增强。



注: DEM: 高程; Pop: 人口密度; Slope: 坡度; GDP: 生产总值; Soil: 土壤类型; Tmp: 年均气温; Pre: 年均降水; Aspect: 坡向; NL: 夜光数据。
Note: DEM: Elevation; Pop: Population density; Slope: the Slope; GDP: Gross domestic product; Soil: Type of soil; Tmp: Average annual temperature; Pre: Average annual precipitation; Aspect: Alope aspect; NL: Luminous data.

图 5 交互探测结果图
Fig.5 Interactive detection result

2.3 2030 年不同情景碳储量空间格局

2.3.1 2030 年不同情景土地利用预测

基于 1990 年、2000 年和 2010 年的土地利用数据, 使用 PLUS 模型预测 2020 年土地利用状况, Kappa 系数为 0.821, 精度满足本文研究要求。2030 年不同情景下研究区土地利用预测结果体现了不同管理策略对土地利用类型的影响 (表 4)。

表 4 2030 年不同情景 (自然发展、耕地保护、生态保护、城市发展) 研究区各地类面积
Table 4 Area of different land classes under various scenarios of natural development(ND), cultivated land protection(CP), ecological protection(EP), urban development(ND) in 2030 km²

土地利用类型 Land-use type	ND	CP	EP	UD
耕地 Cropland	44 532.68	45 011.73	44 478.78	44 481.82
林地 Forestland	33 812.42	33 231.64	33 812.42	33 812.42
草地 Grassland	6 435.49	6 536.83	6 486.01	6 432.55
水域 Waterbody	782.29	782.25	784.24	782.31
裸地 Bare land	39.75	39.75	39.72	39.74
不透水面 Urban	1 715.68	1 716.12	1 717.32	1 769.49
湿地 Wetland	10.99	10.99	10.82	10.99

在自然发展情景下, 该农林交错区的林地面积增加, 耕地面积减少, 具体为: 研究区在 2030 年耕地面积预计比 2020 年减少 356.57 km², 林地面积预计比 2020 年增加 240.92 km², 其余用地类型变化较为明显的为草地与不透水面; 在耕地保护情景下, 研究区耕地面积明显增加, 而林地面积显著减少, 具体为: 耕地面积扩增 122.48 km², 林地面积减少 339.86 km², 其余用地类型变化中草地与不透水面变化也较为明显; 在生态保护情景下, 研究区的土地使用政策明显倾向于强化生态环境的保护, 这种政策导向在 2020 到 2030 年间使得该农林交错区耕地面积下降最多, 林地面积显著增加。具体表现为林地和草地面积的大幅增加, 分别增长了 240.92 和 222.25 km²。同时, 耕地和不透水面的面积出现了下降, 分别减少了 410.47 和 52.16 km²; 在城市发展情景下, 研究区林地面积增加, 耕地面积减少。

2.3.2 2030 年不同情景碳储量格局

从各个土地利用类型的碳储量变化来看 (表 5), 在耕地保护情景中, 林地碳储量最高 (8.521×10⁸ t), 其次为耕地 (6.10×10⁸ t), 草地碳储量相对较低 (9.02×10⁷t), 但仍得到一定程度的保护。在生态保护情景中, 林地的碳储量最高, 为 8.67×10⁸ t, 耕地碳储量与城市发展情景接近, 约为 6.03×10⁸ t, 草地相比耕地与林地的碳储量相对较低, 为 8.95×10⁷ t。在自然发展情景下, 所有土地利用类型的碳储量与生态保护情景相似, 耕地和不透水面上略有下降, 分别为 6.035×10⁸、2.339×10⁶ t。在城市发展情景下, 介于城市化和工业化扩张, 不透水面碳储量有明显的增加, 为 2.412×10⁶ t, 虽然耕地和林地的碳储量依然较高, 分别为 6.028×10⁸、8.67×10⁸ t, 但与其他情景相比略有下降。

表 5 2030 年不同情景碳储量
Table 5 Carbon storage under different scenarios in 2030 t

土地利用类型 Land-use type	ND	CP	EP	UD
耕地 Cropland	6.035×10 ⁸	6.100×10 ⁸	6.028×10 ⁸	6.028×10 ⁸
林地 Forestland	8.670×10 ⁸	8.521×10 ⁸	8.670×10 ⁸	8.670×10 ⁸
草地 Grassland	8.880×10 ⁷	9.020×10 ⁷	8.950×10 ⁷	8.870×10 ⁷
水域 Waterbody	9.470×10 ⁴	9.470×10 ⁴	9.490×10 ⁴	9.470×10 ⁴
裸地 Bare land	1.010×10 ⁵	1.010×10 ⁵	1.010×10 ⁵	1.009×10 ⁵
不透水面 Urban	2.339×10 ⁶	2.339×10 ⁶	2.341×10 ⁶	2.412×10 ⁶
湿地 Wetland	2.221×10 ⁵	2.221×10 ⁵	2.187×10 ⁵	2.221×10 ⁵
总计 Total	1.562×10 ⁹	1.555×10 ⁹	1.562×10 ⁹	1.561×10 ⁹

从 2030 年不同情景碳储量空间分布与 2020 年差值图来看 (图 6), 在耕地保护情景下, 预计碳储量相较于 2020 年减少了 3.36×10⁶ t, 减少较为明显的区域在扎兰屯市, 增加区域较为分散, 大部分区域碳储量基本不变。生态保护情景下碳储量则预计增加 3.61×10⁶ t, 主要增加区域在莫力达瓦达翰尔族自治旗, 扎赉特旗也有少量增加, 扎兰屯市稍有减少, 其余地区碳储量基本保持不变。自然发展情景下, 预计 2030 年研究区碳储量相比于 2020 年增加 3.64×10⁶ t, 主要增加地区仍然在莫力达瓦达翰尔族自治旗, 其余扎赉特旗、阿荣旗和甘南县等均

有少量增加。在城市发展情景下, 预计碳储量增加 2.98×10^6 t, 其中显著增加区域仍然在莫力达瓦达斡尔族自治旗。这些数据的差异强调了在制定环保政策时考虑不同管理策略的重要性。整体而言, 预计 2030 年耕

地保护情景预见碳储量微减, 生态保护和城市发展情景则预示碳储量增加, 自然发展情景也表现出稳定的增长。这些数据对制定有效的城市发展和环境保护政策至关重要。

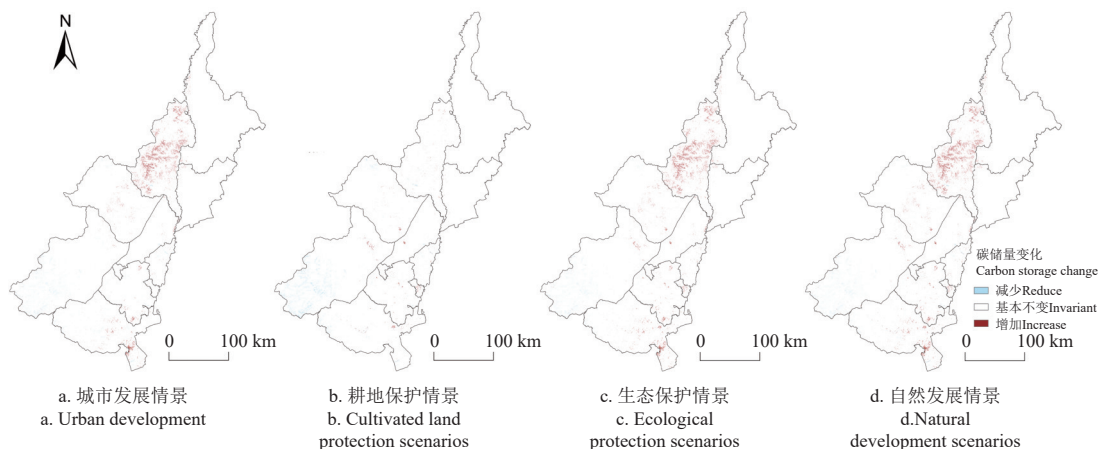


图 6 2030 年不同情景碳储量变化空间分布 (与 2020 年差值)

Fig.6 Spatial distribution of changes in carbon storage under different scenarios in 2030 (difference from 2020)

3 讨论

3.1 30 a 间研究区碳储量变化

土地利用被认为对碳储量有着显著影响^[37,49], 1990—2020 年间由于研究区用地类型的变化, 碳储量也有着较大的变化。本文的碳密度数据是采用汪勇政等^[8] 安徽省的碳密度数据通过温度及降水数据推算出全国碳密度数据进而再推算出的, 通过与刘华超等^[33] 研究大兴安岭地区碳密度数据进行对比, 数据十分接近, 因此碳储量估算结果具有较高的准确性。对 1990—2020 年大兴安岭农林交错区碳储量的研究表明: 研究区碳储量的空间异质性明显, 高碳储量区域主要位于阿荣旗和扎兰屯市, 这些区域的林地面积广泛, 具有较强的固碳能力。碳储量低值区分布在中东部地区, 该地区行政区较为密集, 用地类型以耕地为主, 其次为不透水面和水体, 固碳能力较弱。整体碳储量空间分布呈现出“西高东低”的空间分布特点。大兴安岭农林交错区近 30 a 间总碳储量呈现减少趋势 (表 5), 各用地类型的碳储量在此期间均有或多或少的变化, 这一结果与王少剑等^[50] 研究碳储量 30 a 间中国碳储量时间变化总体呈现出先加速下降后减缓的倒 S 曲线就较为一致。这主要是由于自 1999 年以来, 中国随着经济的增长以及城市的建设, 人口高速增长, 粮食安全得到重视, 导致不透水面面积与耕地面积显著增加, 林地与草地被大量转出, 用地类型主要以碳密度较高的林地与草地转为碳密度较低的不透水面与耕地。研究表明^[51], 随着林地逐渐被耕地和其他土地利用类型替代, 碳储量将会出现明显的下降趋势。大兴安岭是中国最大的国有林区之一, 森林覆盖率高, 是国家重要的生态屏障, 本研究区又作为大兴安岭林地与耕地交错最为典型的地区, 由于其地理位置和土地利用类型的特点, 林地的大规模转化对区域碳储量的影响尤为显著, 因此

碳储量变化明显。

3.2 不同情景对碳储量的影响

本文模拟预测了 2030 年大兴安岭农林交错区 4 种情景下的土地利用类型空间分布格局。结果显示, 除了耕地保护情景外, 其余的 3 种情景下碳储量均表现为增加的趋势。在耕地保护情景下, 大兴安岭农林交错区碳储量呈现减少趋势。这与大部分研究结果相一致。这是由于加强了对大部分研究区耕地的保护, 平衡了农业发展和生态保护的需求, 导致这些研究区大量林地与草地等高碳密度地类转化为耕地这个低碳密度地类。而在自然发展情景下, 研究区碳储量增加。这与傅楷翔等^[52] 与汪勇政等^[8] 研究的预测 2030 年新疆地区与安徽省在自然保护情景下碳储量减少结果不一致, 其中安徽省在自然发展情景下碳储量下降显著, 这是由于新疆地区与安徽省均作为行政区, 人口密度高, 因此在自然发展情景下不透水面将迅速扩张, 生态用地面积将减少。同时也与张爽等^[53] 的研究结果预测纳帕海流域不同情景下的碳储量不一致, 虽然纳帕海流域作为生态区, 但其人口密度大, 因此在自然发展情景下林地增加的面积显著少于建设用地扩张的面积, 故而碳储量下降。而大兴安岭农林交错区作为我国重要生态屏障, 预测在 2030 年自然保护情景下大量的非生态用地 (如耕地等) 向生态用地 (如林地、草地等) 转化, 导致碳储量增加。在生态保护情景下, 研究区碳储量增加。这是由于研究区的土地使用政策明显倾向于强化生态环境的保护, 城市和工业发展将受到了一定的限制, 与大多研究结果一致。在城市发展情景下, 研究区碳储量增加。这表明, 大兴安岭农林交错区在城市发展的情景下尽管有一定的土地用途转换压力, 相关政策和规划仍努力在城市发展与生态保护之间找到平衡点, 以促进区域的可持续发展和生态健康。

基于本研究结果, 建议政府在制定土地利用和生态

政策时,进一步考虑碳储量的变化,通过提升林地和草地的面积及质量,增加区域碳汇能力。同时,推动碳交易市场的发展,鼓励农民和土地使用者参与碳汇项目,实现生态保护与经济发展的双重收益。其次,为缓解城市扩展带来的土地资源紧张问题,建议通过优化城市规划、控制城市发展边界以及提升城市内部土地利用效率,减少对耕地和林地的占用。同时,推动城市绿化项目,增强城市区域的碳汇能力,减缓碳储量的下降趋势。

3.3 不确定性分析

本文运用 PLUS 模型和 InVEST 模型结合地理探测器分析,为研究区碳储量评估的长远发展提供了更为系统、科学的研究方法。并且本文通过修正气温和降水量数据获取了更可靠的碳密度数据,有助于提高研究准确性。不过 InVEST 模型是一种基于土地利用类型和 4 个碳库的碳密度来估算区域碳储量的方法。其估算结果仅受区域土地利用状况的影响,并没有考虑到同一地类上植被的差异性,对于精确性可能有所影响,不过影响较小,可以接受。未来研究应结合实地调研和遥感技术,提高监测精准度和模型可靠性。PLUS 模型中驱动因子的选择和参数设定存在一定的主观性,不够客观,应考虑引入更多因素,如政策法规等定性因素,以增强模型的全面性和准确性。

4 结 论

1) 截至 2020 年,研究区各用地类型的面积从大到小依次为:耕地、林地、草地、不透水面、水体、裸地和湿地。1990—2020 年,研究区耕地面积明显增加,林地面积显著减少,其中耕地增加了 $5\,175.74\text{ km}^2$,林地面积减少了 $3\,482.5\text{ km}^2$ 。在 2030 年土地利用预测情景中,耕地保护情景下,耕地面积增加,林地面积减少;其余 3 种情景地类变化与此结果相反。

2) 截至 2020 年,研究区各用地类型的碳储量从高到低依次为林地、耕地、草地、不透水面、湿地、裸地和水体。1990—2020 年,研究区碳储量西高东低,总体呈减少趋势,减少了 $6.08\times 10^7\text{ t}$,林地和耕地是大兴安岭农林交错区最主要的碳库。预测到 2030 年,耕地保护情景下碳储量减少 $3.36\times 10^6\text{ t}$,而其余情景下碳储量均有所增加。

3) 碳储量时空变化是多因素共同作用的结果。DEM 是主要驱动因子,其次为人口密度和坡度,且各因子交互作用均对碳储量空间分异性具有更强的解释能力。

【参 考 文 献】

- JING N, FU J, ZHANG S, et al. Analysis of gradient characteristics of ecological potential power in farm-forest ecotone a case on Mudanjiang in Heilongjiang Province[J]. Energy Procedia, 2011, 11: 2849-2855.
- HOUGHTON R A, HACKLER J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia[J]. Global Change Biology, 1999, 5(4): 481-492.
- 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. Geographical detector: Principles and prospects[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese with English abstract)
- LEI J, ZHANG L, CHEN Z, et al. The impact of land use change on carbon storage and multi-scenario prediction in Hainan Island using InVEST and CA-Markov models[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2024, 7: 1349057-.
- ZAI X Y, XUE M J, QING W G, et al. Converting cropland to plantation decreases soil organic carbon stock and liable fractions in the fertile alluvial plain of eastern China[J]. Geoderma Regional, 2021, 24: e00356.
- 杨悦, 杨贵军, 龙慧灵, 等. 基于遥感时序物候特征的耕地非粮化多模式监测方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 283-294.
- YANG Yue, YANG Guijun, LONG Huiling, et al. Multi-model monitoring method of cultivated land non-grain production based on remote sensing temporal phenological characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE), 2024, 40(2): 283-294. (in Chinese with English abstract)
- 程鹏, 柳可, 张杨, 等. 碳排放约束下耕地利用推动粮食生产的逻辑关联、现实矛盾与路径优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 246-254.
- CHENG Peng, LIU Ke, ZHANG Yang, et al. The logical correlation, realistic contradiction and path optimization of cultivated land use in promoting grain production under the constraint of carbon emission [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE), 2018, 40(12): 246-254. (in Chinese with English abstract)
- 汪勇政, 徐雅利, 余浩然. 基于 PLUS-InVEST 模型的安徽省碳储量时空变化预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 277-289.
- WANG Yongzheng, XU Yali, YU Haoran. Prediction of spatiotemporal changes in carbon storage in Anhui Province based on PLUS-InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 277-289. (in Chinese with English abstract)
- LIU P J, HU Y C, JIA W T. Land use optimization research based on FLUS model and ecosystem services-setting Jinan City as an example[J]. Urban Climate, 2021, 40: 100984.
- LIU X Q, LIU Y S, WANG Y S, et al. Evaluating potential impacts of land use changes on water supply-demand under multiple development scenarios in dryland region[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127811.
- 李佳珂, 邵战林. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的乌鲁木齐碳储量时空演变与预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 499-508.
- LI Jiake, SHAO Zhanlin. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Urumqi City based on PLUS and InVEST models[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(3): 499-508. (in Chinese with English abstract)
- LI K M, CAO J J, ADAMOWSKI J F, et al. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China[J]. Environmental Development, 2021, 39: 100641.
- 张宇飞, 王子昊, 王冰, 等. 基于 InVEST 模型的大兴安岭天保工程区碳储量时空变化研究[J]. 西部林业科学, 2024, 53(1): 108-118.
- ZHANG Yufei, WANG Zihao, WANG Bing, et al. Study on

- the spatiotemporal changes of carbon storage in the Tianbao project area of the Greater Khingan Mountains based on InVEST model[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2024, 53(1): 108-118. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 329-336.
YAO Nan, LIU Guangquan, YAO Shunbo, et al. Impact assessment of the Grain for Green project on ecosystem carbon storage in the loess hilly and gully region based on InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 329-336. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王瑞利, 张存厚, 王明玖. 基于 DNDC 模型的赛罕乌拉自然保护区草地生态系统碳动态[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(4): 167-172.
WANG Ruili, ZHANG Cunhou, WANG Mingjiu. Carbon dynamics of grassland ecosystem in Saihanwula Nature Reserve based on DNDC model[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(4): 167-172. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 360-373.
ZHANG Yan, SHI Xueyi, TANG Qian. Evaluation of carbon storage in the upper reaches of the Fen River under different land use scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 360-373. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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. Characteristics of spatiotemporal changes in carbon storage in the source area of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and their responses to future scenarios[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5253-5262. (in Chinese with English abstract)
- [18] 苏越, 朱峻珩, 朱从谋, 等. 浙江平原地区耕地非粮化时空演变特征及碳排放效应分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 278-286.
SU Yue, ZHU Junhui, ZHU Congmou, et al. Spatial and temporal evolution of farmland non-grain conversion and its carbon emission effect in northern Zhejiang Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2023, 39(24): 278-286. (in Chinese with English abstract)
- [19] GAO J, WANG L. Embedding spatiotemporal changes in carbon storage into urban agglomeration ecosystem management: A case study of the Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237(10): 1-12
- [20] 王磊, 高阳, 沈振. 气候变化背景下农田土壤碳储量评估方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2024, 40 (16): 1-11.
WANG Lei, GAO Yang, SHEN Zhen. Research progress on evaluation methods of farmland soil carbon storage under the background of climate change [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2019, 40(16): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张志堂. 上海城市典型绿地的碳汇估算[J]. *绿色科技*, 2017 (15): 60-62.
ZHANG Zhitang. Carbon sink estimation of typical urban green space in Shanghai. *Green Science and Technology*, 2017 (15): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- [22] DANGULLA M, ABD M L, RAMLI M F, et al. Exploring urban tree diversity and carbon stocks in Zaria Metropolis, North Western Nigeria[J]. *Applied Geography*, 2021, 127(1): 102385.
- [23] LPATOVL D N, SHCHEGLOV A I, MANAKHOV D V, et al. Spatial variation of organic carbon stocks in peat soils and Gleysols in the northeast of Sakhalin Island[J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54(2): 226-237.
- [24] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. *资源科学*, 2022, 44(8): 1545-1559.
YI Dan, OU Minghao, GUO Jie, et al. Research progress and prospect of land use carbon emission and low-carbon optimization[J]. *Resources Science*, 2022, 44(8): 1545-1559. (in Chinese with English abstract)
- [25] 马露露, 徐婷, 李泽森, 等. 基于 DNDC 模型分析降水变化对黄土丘陵区草地生物量和土壤有机碳的影响[J]. *草业科学*, 2023, 40(1): 25-36.
MA Lulu, XU Ting, LI Zesen, et al. Analysis of the impact of precipitation changes on grassland biomass and soil organic carbon in the loess hilly area based on DNDC model[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(1): 25-36. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李倩, 王成军, 冯涛, 等. 基于 SD-PLUS 耦合模型的陕西省土地利用变化及碳储量多情景预测[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 195-206, 215.
LI Qian, WANG Chengjun, FENG Tao, et al. Multi-scenario prediction of land use change and carbon storage in Shaanxi Province based on SD-PLUS coupling model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 195-206, 215. (in Chinese with English abstract)
- [27] WANG L G, ZHU R, YIN Z L, et al. Impacts of land-use change on the spatio-temporal patterns of terrestrial ecosystem carbon storage in the Gansu province, Northwest China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3164.
- [28] 邓元杰, 潘洪义, 陈丹, 等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的土地利用变化模拟预测——以德阳市为例[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(24): 321-327.
DENG Yuanjie, PAN Hongyi, CHEN Dan, et al. Simulation and prediction of land use change based on CLUE-S model and Markov model: A case study of Deyang City[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(24): 321-327. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙博, 吴雨珂, 闫白冰, 等. 1990—2020 年淮河生态经济带耕地资源分布变化特征与驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(23): 247-258.
SUN Bo, WU Yuke, YAN Baibing, et al. Characteristics and driving mechanisms of cultivated land resource distribution in the Huaihe River ecological Economic Belt from 1990 to 2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2023, 39(23): 247-258. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨宇萍, 胡文敏, 贾冠宇, 等. 基于 InVEST 与 ANN-CA 模型的环洞庭湖区土地利用碳储量情景模拟[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2023, 47(4): 175-184.
YANG Yuping, HU Wenmin, JIA Guanyu, et al. Scenario simulation of land use carbon storage based on InVEST and ANN-CA models: A case study of the area around Dongting Lake[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(4): 175-184. (in Chinese with English abstract)

- [31] 王子昊, 王冰, 张宇飞, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 292-304.
WANG Zihao, WANG Bing, ZHANG Yufei, et al. Dynamic simulation of land use change and carbon storage evaluation in Hohhot City based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2): 292-304. (in Chinese with English abstract)
- [32] GAO J, LV S, ZHENG Z, et al. Ecological ecotone in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(4): 297-307.
- [33] XIONG S, YANG F. Ecological resilience in water-land transition zones: A case study of the Dongting Lake region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112284.
- [34] SINAN L, CONGMOU Z, YUE L, et al. Conflicts between agricultural and ecological functions and their driving mechanisms in agroforestry ecotone areas from the perspective of land use functions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317: 128453.
- [35] 逯玉兰, 李广, 闫丽娟, 等. 气候变化对甘肃农牧交错带春小麦种植区划的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 144-152.
LU Yulan, LI Guang, YAN Lijuan, et al. Effects of climate change on planting regionalization of spring wheat in the agro-pastoral ecotone of Gansu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CASE)*, 2023, 39(24): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘华超, 任春颖, 王宗明, 等. 大兴安岭生态功能区生态系统服务功能动态及权衡协同关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 587-598.
LIU Huachao, REN Chunying, WANG Zongming, et al. Study on ecosystem service function dynamics and tradeoff synergistic relationship in the Greater Khinganling ecological functional zone[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(5): 587-598. (in Chinese with English abstract)
- [37] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 174-182.
LIU Mengzhu, WANG Yanfang, PEI Hongwei. Land use and carbon storage changes in the agro-pastoral ecotone of northern China under the background of the Grain for Green project[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(1): 174-182. (in Chinese with English abstract)
- [38] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
LIU Xiaojuan, LI Xia, LIANG Xun, et al. Simulation of future land use change and its impact on carbon storage in China based on FLUS-InVEST model[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3): 397-409. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(1): 72-80.
LI Kerang, WANG Shaoqiang, CAO Mingkui. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 33(1): 72-80. (in Chinese with English abstract)
- [40] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699.
XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen, et al. Storage and influencing factors of soil organic carbon under different vegetation in China[J]. *Acta Edologica Sinica*, 2004, 41(5): 687-699. (in Chinese with English abstract)
- [41] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 129-135, 164.
CHEN Lijun, LIU Gaohuan, LI Huiguo. Dynamic monitoring of net primary productivity of vegetation in China using remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2): 129-135, 164. (in Chinese with English abstract)
- [42] 任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 等. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态科学, 2021, 40(4): 66-74.
REN Xijin, PEI Tingting, CHEN Ying, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4): 66-74. (in Chinese with English abstract)
- [43] 吕晶, 金日, 王镜植, 等. 基于 PLUS 的耕地驱动因素分析与未来预测——以图们江流域为例[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 203-212, 224.
LV Jing, JIN Ri, WANG Jingzhi, et al. Analysis and future prediction of cultivated land driving factors based on PLUS: A case study of the Tumen River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3): 203-212, 224. (in Chinese with English abstract)
- [44] 白雪霖, 王利, 杜鹏, 等. 基于 PLUS 模型的土地利用动态模拟及多情景预测分析[J]. 绿色科技, 2023, 25(5): 228-233.
BAI Xuelin, WANG Li, DU Peng, et al. Dynamic simulation and multi-scenario prediction analysis of land use based on PLUS model[J]. *Green Technology*, 2023, 25(5): 228-233. (in Chinese with English abstract)
- [45] LIANG Y, HASHIMOTO S, LIU L. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106939.
- [46] WANG Z, LI X, MAO Y, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108499.
- [47] 张子晴, 张道军, 陈亮, 等. 黄河流域城镇化与耕地利用生态效率的耦合协调度评价、时空特征及驱动因素[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 240-250.
ZHANG Ziqing, ZHANG Daojun, CHEN Liang, et al. Evaluation of the coupling coordination degree, spatial-temporal characteristics and driving factors of urbanization and cropland use eco-efficiency in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CASE)*, 2024, 40(16): 240-250. (in Chinese with English abstract)
- [48] SHI T Z, HU Z W, SHI Z. Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 451-459.
- [49] THOMPSON T M. Modeling the climate and carbon systems to estimate the social cost of carbon[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2018, 9(5): 532.
- [50] 王少剑, 周诗洁, 方创琳. 1980~2020 年中国陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律[J/OL]. 中国科学: 地球科学, (2024-08-30) [2024-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5842.P.20240829.1005.002.html>.
WANG S J, ZHOU S J, FANG C L. Spatiotemporal pattern

- and evolution of carbon storage in terrestrial ecosystems in China from 1980 to 2020 [J/OL]. *China Science, Earth Science*, (2024-08-30) [2024-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5842.P.20240829.1005.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- [51] 李文杰, 杨俊毅, 傅博, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的大兴安岭生态系统碳储量时空变化与预测[J/OL]. *环境工程技术学报*, (2024-09-10)[2024-09-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20240907.1419.030.html>.
- LI Wenjie, YANG Junyi, FU Bo, et al. Temporal and spatial changes and prediction of carbon storage in the Greater Khingan Mountains ecosystem based on PLUS-InVEST model [J/OL]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, (2024-09-10) [2024-09-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20240907.1419.030.html>. (in Chinese with English abstract)
- [52] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等. 耦合 PLUS-InVEST-Geodetector 模型的新疆地区碳储量时空变化及驱动机制分析[J/OL]. *环境科学*, 2024, 45(9): 5416-5430.
- FU Kaixiang, JIA Guodong, YU Xinxiao, et al. Spatiotemporal variation and driving mechanism of carbon storage in Xinjiang region based on PLUS-InVEST-Geodetector model[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5416-5430(in Chinese with English abstract)
- [53] 张爽, 高启晨, 张戎, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的纳帕河流域碳储量时空演变及驱动因素分析[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(9): 5192-5201.
- ZHANG Shuang, GAO Qichen, ZHANG Rong, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of carbon storage in Napa Sea Basin based on PLUS-InVEST model[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(9): 5192-5201. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal changes and driving forces of carbon storage in the forest-agricultural interlacing zone of Greater Khingan Mountains using PLUS-InVEST model

LI Sijia¹, WANG Bing^{1,2✉}, WANG Zihao¹, ZHANG Qiuliang^{1,2}

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Daxinganling, Inner Mongolia, Genhe 022350, China)

Abstract: This study aims to analyze the spatiotemporal land-use patterns in the forest-farmland ecotone of ecologically sensitive areas, together with their effects on carbon storage. Effective approaches were proposed to enhance carbon sequestration. The PLUS-InVEST model was also utilized along with the Geodetector. A systematic investigation was implemented to assess the impacts of spatiotemporal land-use patterns from 1990 to 2030 on the carbon storage of terrestrial ecosystems in the forest-farmland ecotone of the Greater Khingan Mountains. Additionally, the driving factors were determined responsible for the changes in carbon storage. The results were summarized as follows: 1) The land-use types that experienced the largest area of transition were forests, grasslands, and croplands between 1990 and 2020. Notably, the highest conversion rates were observed in bare land (75%), water bodies (61.33%), and impervious surfaces (61.15%). The forest and grassland areas were expected to significantly increase under natural conservation and ecological protection scenarios by 2030. Furthermore, the areas of cropland and grassland were projected to increase under the cropland protection scenario, while the forest areas decreased greatly. The area of cropland declined in the urban development scenario, due to the urban expansion and land-use changes. 2) The total carbon storage in the study area exhibited a general downward trend, decreasing by 6.08×10^7 t over the past two decades. The largest decrease in carbon storage occurred in forests, followed by grasslands and croplands. In contrast, there was the increasing carbon storage in the impervious surfaces. The carbon storage in 2020 was compared to the projections for 2030. The total carbon storage for 2030 was projected as 1.555×10^9 , 1.562×10^9 , 1.562×10^9 , and 1.561×10^9 t, respectively, under the forests, grasslands, croplands, and impervious surfaces. All scenarios indicated an increase in the total carbon storage, except for the cropland protection. Different scenarios of land-use management varied greatly in the potential of overall carbon sequestration at regional. Natural conservation and ecological protection share the most promise to increase carbon storage. 3) The elevation, population density, and slope were identified as the primary driving factors behind the spatial differentiation of carbon storage in the study area. Among them, there was the most significant interaction between slope and population density, with an interaction strength of 0.74. There was a much stronger impact of multiple driving factors on carbon storage, compared with any single factor. Multi-factorial approaches were also required to analyze the spatial dynamics of carbon storage. Therefore, the carbon dynamics of the ecosystem depended mainly on the land-use transitions in the ecotonal regions, like forest-farmland interfaces. The important implications were gained to develop the data-driven strategies of land management. Carbon sinks were also optimized to support biodiversity conservation. Overall, the significant role of targeted interventions was highlighted for the land-use changes in carbon storage and sequestration at regional scales. The findings can greatly contribute to ecosystem management and climate adaptation in the Greater Khingan Mountains.

Keywords: carbon storage; multi-scenario modelling; agroforestry interface; PLUS-InVEST model; geographic detector