

基于PLUS-InVEST-Geodetector模型的黑龙江省 土地利用变化碳储量影响及预测

李 阳, 邱新涵, 李全峰, 李吉程

(东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150000)

摘 要: [目的] 为分析黑龙江省土地利用格局时空变化对区域碳储量的影响, 预测多情景下未来演变, 定量揭示碳储量空间分异的主要驱动因子。[方法] 基于1990—2020年黑龙江省4期土地利用数据, 耦合PLUS-InVEST-Geodetector模型, 分析土地利用格局变化及其碳效应, 预测2060年自然发展、耕地保护、生态保护、城市发展4种情景下的土地利用与碳储量演变。[结果] 1990—2020年全省碳储量净减少 53.46×10^7 t, 空间上呈中间高、四周低, 北高南低, 山区高原原低的格局。林地转为耕地、草地及未利用地是碳损失的主要路径。多情景模拟表明, 2060年碳储量表现为生态保护情景($2\,012.71 \times 10^7$ t) > 自然发展情景($2\,000.59 \times 10^7$ t) > 城市发展情景($1\,996.01 \times 10^7$ t) > 耕地保护情景($1\,992.08 \times 10^7$ t)。地理探测器显示, 碳储量空间分异主要受高程、距水域距离、NDVI等因子影响。因子间交互作用以双因子增强和非线性增强为主, 其中DEM与年平均降水量、DEM与距河流距离、人口密度与DEM, DEM与NDVI的交互作用最强。[结论] 历史阶段, 黑龙江省林地转耕地、草地等导致碳储量持续净减少, 未来预测生态保护情景下碳储量最大, 以DEM为核心的因子交互作用主导碳储量空间分异。因此, 未来黑龙江省需控制碳密度较高地类向碳密度较低地类转化, 严格贯彻执行黑土地保护政策, 实施生态保护措施。制定区域生态保护与经济发展政策时, 需统筹自然与社会经济因素, 促进黑龙江省区域经济可持续发展。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; PLUS模型; InVEST模型; 地理探测器; 多情景模拟

中图分类号: X171.1; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0359-13

Impacts of Land Use Changes on Carbon Storage and Prediction in Heilongjiang Province Based on PLUS-InVEST-Geodetector Model

Li Yang, Qiu Xinhan, Li Quanfeng, Li Jicheng

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the impact of spatiotemporal changes in land use patterns on regional carbon storage in Heilongjiang Province, predict future evolution under multiple scenarios, and quantitatively identify the main driving factors of spatial differentiation in carbon storage. [Methods] Based on four periods of land use data in Heilongjiang Province from 1990 to 2020, the PLUS-InVEST-Geodetector model was coupled to analyze changes in land use patterns and their carbon effects. Future land use and carbon storage in 2060 were simulated under four scenarios: Natural development, cultivated land protection, ecological protection, and urban development. [Results] From 1990 to 2020, carbon storage in Heilongjiang Province showed a net decrease of 53.46×10^7 t, with a spatial pattern of high in central regions and low in surrounding areas, high in the north and low in the south, and high in mountainous areas and low in plains. The conversion of forest land to cultivated land, grassland, and unused land was the primary pathway for carbon loss. Multi-scenario simulations indicated that

收稿日期: 2025-12-31

修回日期: 2026-02-20

录用日期: 2026-03-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-06

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目(YO2024C001); 黑龙江省哲学社会科学规划重点项目(24JYA001); 中国博士后科学基金面上项目(2021M700738); 中国博士后科学基金特别资助项目(2022T150103)

第一作者: 李阳(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事耕地质量保护研究。E-mail: 2137228966@qq.com

通信作者: 李全峰(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事黑土地利用与保护研究。E-mail: quanfeng.li@neu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

carbon storage in 2060 followed the order: ecological protection scenario ($2\ 012.71 \times 10^7$ t) > natural development scenario ($2\ 000.59 \times 10^7$ t) > urban development scenario ($1\ 996.01 \times 10^7$ t) > cultivated land conservation scenario ($1\ 992.08 \times 10^7$ t). Geodetector analysis revealed that the spatial differentiation of carbon storage was mainly influenced by factors such as elevation, distance to water bodies, and normalized difference vegetation index (NDVI). Interactions among factors were mainly characterized by two-factor enhancement and nonlinear enhancement, with the strongest interactions observed between digital elevation model (DEM) and annual precipitation, DEM and distance to rivers, population density and DEM, and DEM and NDVI. [Conclusion] During the historical period, the conversion of forest land to cultivated land and grassland in Heilongjiang Province led to a continuous net decrease in carbon storage. Future projections indicate that carbon storage is the highest under the ecological protection scenario, with factor interactions centered on DEM dominating the spatial differentiation of carbon storage. Therefore, it is necessary to control the conversion of land types with higher carbon density to those with lower carbon density, strictly implement black soil protection policies, and adopt ecological protection measures. The impacts of natural and socio-economic factors should be comprehensively considered when formulating regional ecological protection and economic development policies, so as to promote the sustainable development of the regional economy in Heilongjiang Province.

Keywords: land use change; carbon storage; PLUS model; InVEST model; Geodetector; multi-scenario simulation

Received: 2025-12-31

Revised: 2026-02-20

Accepted: 2026-03-31

Online(www.cnki.net): 2026-05-06

应对全球变暖的关键在于控制碳排放与提升碳汇能力^[1]。而减少碳排放和提高碳储存能力是当前的热点和难题。中国 2020 年正式确立“双碳”战略,明确在 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和^[2]。陆地生态系统碳库是全球碳循环的重要组成部分,其动态变化深刻影响着大气 CO₂ 浓度与气候变化进程。土地利用变化作为关键性环境要素,深刻影响着区域碳储量的时空格局与全球碳循环与气候变化进程^[3]。近年来,随着地理信息系统(GIS)与遥感技术的进步,耦合多种模型对土地利用/覆被变化(LUCC)的碳效应进行模拟、评估与归因是各学者关注的热点^[4]。其中,在碳储量评估方法中,野外调查精度高但局限于小尺度^[5]。遥感反演虽覆盖广却易受数据质量影响^[6]。而 InVEST(生态系统服务和权衡综合评估工具)模型兼顾数据兼容性与尺度适应性,可将土地利用变化与碳储量联系起来,被广泛用于碳储量评估^[7],同时耦合土地利用模拟模型还可进一步探究未来不同发展情景下土地利用变化对区域碳储量的影响。当前,常用的土地利用模拟模型主要包括 CA-Markov 模型^[8]、FLUS 模型^[9]和 PLUS 模型^[10]。其中,PLUS 模型在识别地类扩张驱动因子方面具有优势,可提升土地利用变化模拟精度,可准确研究土地利用变化的空间分布。耦合 PLUS-InVEST 模型,可充分发挥二者在土地利用动态模拟与生态系统服务评估方面的互补优势,提升碳储量研究的时空动态模拟与生态服务评估能力^[11]。最

后,地理探测器(GeoDetector)模型,可定量解析碳储量空间分异的驱动机制^[12]。将 PLUS-InVEST-GeoDetector 3 个模型耦合,能构建从未来格局预测-碳储量评估-驱动机制解析完整分析链条。

黑龙江省地处中国东北部,是国家北方生态安全屏障。长期以来,黑土地、草地和湿地面积流失问题日益严重,生态环境不容乐观^[13]。在此背景下,中央持续关注黑土地保护问题,明确提出东北要做好工业碳达峰工作,加强生态保护。因此,本文以黑龙江省为研究区,基于 1990—2020 年 4 期土地利用数据,揭示土地利用演变的规律。耦合 PLUS-InVEST 模型预测 2060 年黑龙江省多情景土地利用与碳储量演变,借助最优参数地理探测器量化自然及社会经济因素对碳储量空间分异的影响,为区域土地利用结构优化与碳储量提升提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑龙江省($43^{\circ}26' \sim 53^{\circ}33'N$, $121^{\circ}11' \sim 135^{\circ}05'E$)位于中国东北部,总面积约 47.3 万 km²。辖区包括 12 个地级市和大兴安岭地区。属寒温带-温带大陆性季风气候,冬季漫长严寒,夏季温凉短促,年平均气温为 $-5 \sim 5^{\circ}C$,年平均降水量为 400~650 mm。主要河流包括黑龙江、松花江、乌苏里江和绥芬河,湖泊沼泽广布,湿地资源丰富,是中国最大的商品粮生产基地(图 1)。

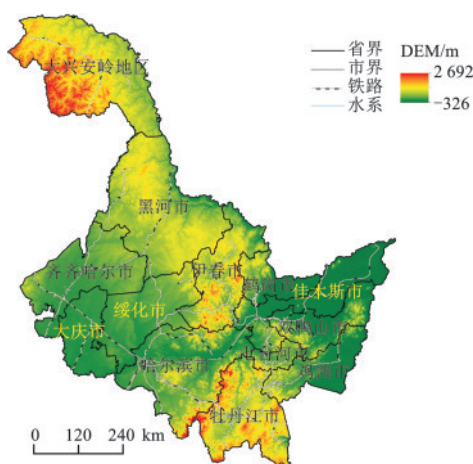


图1 区域概况
Fig.1 Regional overview

1.2 数据来源

研究采用多源数据分析。基于黑龙江省1990—2020年4期土地利用数据。参照相关研究^[14]和数据显著性与可获取性原则,选取13个驱动因子数据预测未来土地利用变化,各驱动因子数据均获取自2020年。自然因素数据包括数字高程模型(DEM)、坡度、坡向(由DEM衍生)、年平均降水量、年平均气温、土壤类型、土壤侵蚀强度、距水域距离及归一化植被指数(NDVI),主要来源于地理空间数据云、国家气象科学数据中心及中国科学院资源环境科学数据中心。社会经济数据包括人口密度、地区生产总值(GDP)及夜间灯光强度,分别来源于WorldPop全球人口分布项目、GitHub网站及全球变化科学出版系统。可达性数据包括距铁路距离和距道路距离,来源于全国地理信息资源目录服务系统。所有栅格数据统一重采样至30 m分辨率,并采用WGS 1984 UTM Zone 52 N坐标系。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化转移矩阵构建 转移矩阵可解析黑龙江省特定时点土地利用结构,量化不同时段各地类转化过程。其一般形式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & & S_{2n} \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为从 t_1 时刻的第 i 类土地转变为 t_2 时刻第 j 类土地的面积,km²; n 为土地利用类型总数,矩阵对角线元素 S_{ii} 为未发生变化的面积,km²;矩阵的行和 $\sum_{j=1}^n S_{ij}$ 为 t_1 时刻第 i 类的总面积,km²;列和 $\sum_{i=1}^n S_{ij}$ 为 t_2 时刻第 j 类的总面积,km²。通过该矩阵可识别LUCC的主要流向、净变化及关键转型路径,为后续碳效应归因提供基础。

1.3.2 基于PLUS模型的土地利用多情景模拟 PLUS模型包括土地扩张分析策略和多类型随机斑块生成机制2大模块,分别用于识别不同用地类型的空间发展概率及扩张驱动因子,结合阈值递减、邻域权重等参数进行土地利用模拟预测^[15]。

本文参考相关研究^[16],首先基于黑龙江省实际,从自然条件、社会经济、区位可达性3个维度选取13个驱动因子参与模拟。基于2000—2010年2期数据,采用土地扩张分析策略提取各地类扩张部分,运用随机森林算法进行训练,获取各驱动因子对不同地类扩张的贡献度及各地类的发展概率,计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N I[h_t(x_i) = j] \quad (2)$$

式中: N 为决策树总数; $h_t(x_i)$ 为第 t 棵决策树对像元特征向量 x_i 的预测类别; $I(\cdot)$ 为指示函数,当括号内条件为真时取值为1,否则为0。

以2010年为基期,将得到的发展概率、领域权重参数(基于2010—2020年各地类变化趋势计算)及2010—2020年土地利用转移矩阵输入CARS模块,模拟得到2020年土地利用格局。CARS模块中,像元 i 转换为地类 j 的总概率 TP_{ij} 由发展概率、邻域效应和转换阻力共同决定,计算公式为:

$$TP_{ij} = P_{ij} \times \Omega_{ij} \times (1 - \theta_{ij}) \quad (3)$$

式中: Ω_{ij} 为地类 j 在像元 i 邻域内的权重; θ_{ij} 为从当前地类转换为地类 j 的阻力系数。

以2010年为基准模拟2020年土地利用格局,Kappa系数0.91、总体精度0.93,验证精度优。故以2020年为基期,通过调整转移矩阵设定2060年4类发展情景。各情景下土地利用转移成本矩阵见表2。

1)自由发展情景:设置转移限制,以历史趋势外推。

2)生态保护情景:严控林地、水域转出与建设用地扩张,将林地向草地、水域向草地/耕地的转移概率下调20%;建设用地/未利用地向生态用地转移概率上调10%;耕地、林地、草地、水域向建设用地转移概率分别降至80%、50%、50%、80%。

3)耕地保护情景:优先保障耕地面积,耕地→其他地类的转移概率降低20%~30%,建设用地/未利用地→耕地的转移概率提高10%~50%。

4)城市发展情景:城市发展情景紧扣黑龙江经济发展导向,推行城乡建设用地增减挂钩机制,适度放宽建设用地扩张约束,限制其转出,同步提升耕地60%、林地与草地各40%、水域20%、未利用地10%向建设用地的转化概率,适配区域城镇化需求。

1.3.3 基于 InVEST 模型的碳储量评估 本文选取碳存储与碳封存模块分析黑龙江省各地类的碳储量。考虑地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机物碳储量 4 个碳库。由于凋落物碳密度所占比例较小,均默认为 0。计算公式为:

$$C_{\text{total}} = \sum_{K=1}^n (C_{\text{above}, K} + C_{\text{below}, K} + C_{\text{soil}, K} + C_{\text{dead}, K}) \times A_K \quad (4)$$

式中: C_{total} 为总的碳储量; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 和 C_{dead} 分别为地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量; A_K 为参与碳储量计算的第 k 类土地利用类型的面积。碳密度是进行碳储量计算的核心要素,本文参考蔡乐山等^[17]、张平平等^[18]和杨洁等^[19]的研究,各土地利用类型碳密度参数见表 1。

表 1 各土地利用类型碳密度参数

Table 1 Carbon density parameters for each land use type t/hm²

土地利用类型	地上生物量碳	地下生物量碳	土壤碳	合计
耕地	25.60	149.0	198.89	373.49
林地	60.23	219.0	288.99	568.22
草地	19.38	105.8	123.62	248.80
水域	58.88	327.8	393.73	780.41
建设用地	2.18	27.5	81.15	110.83
未利用地	2.13	0	92.50	94.63

本研究借鉴 Zhang 等^[20]提出的贡献率量化公式,系统评估黑龙江省各土地利用类型转换对区域总碳储量的差异性影响,计算公式为:

$$CR = \frac{C_1 - C_0}{C_t} \times \frac{LA}{TA} \quad (5)$$

式中:CR 为单一土地利用类型转换引发的碳储量变化对研究区总碳储量变化的贡献率; C_0 为土地利用变化前的初始碳储量规模,10⁷ t; C_1 为土地利用变化后的碳储量值,10⁷ t; C_t 为研究区碳储量变化绝对值的总计值,10⁷ t;LA 为发生类型转换的土地面积总量,km²;TA 为研究区全域总面积,km²。

1.3.4 基于地理探测器的碳储量空间分异驱动因子 本研究选取平均降水(X1)、铁路(X2)、距河流距离(X3)、坡向(X4)、人口密度(X5)、归一化植被指数(X6)、夜间灯光(X7)、GDP(X8)、平均气温(X9)、土壤侵蚀(X10)、坡度(X11)、高程(X12)、道路距离(X13)13 个驱动因子,采用地理探测器中的因子探测器和交互探测器进行碳储量空间分异的驱动力分析。单因子探测主要用于单一驱动因子对碳储量的影响,其结果可用于识别因子间交换关系的强弱情况。二者的探测结果可用 q 值表示,计算公式为:

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

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的样本数; δ_h 和 δ 分别为层 h 和全区的 Y 值方差。

交互因子探测器用于判断 2 个驱动因子共同作用下对碳储量的影响,用于识别不同驱动因子 X_1 和 X_2 间的交互作用,即评估 2 个因子共同作用时对 Y 的解释力 $q(X_1 \cap X_2)$ 与各因子独立作用时 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 的关系,判断交互类型。

2 结果与分析

2.1 1990—2020 年土地利用变化对碳储量的影响

2.1.1 土地利用时空变化特征 1990—2020 年黑龙江省主要土地利用类型以耕地、林地和草地为主,占研究区总面积的 88% 左右(图 2)。分地类来看,1990—2020 年耕地占总面积的比例由 31.3% 增长至 36.1%,扩张主要发生在三江平原湿地垦殖区和松嫩平原的草原开垦区,后期趋于稳定。林地面积先减后增,总体减少。流失区域主要位于大小兴安岭林缘地带、丘陵区及城市周边。建设用地先减后增,总体由 1.9% 增长至 2.1%,哈尔滨、大庆、齐齐哈尔等中心城市及主要交通干线沿线是扩张核心区。1990—2020 年草地和水域面积总体减少,分别由 1990 年的 8.4%、3.4% 减少至 2020 年的 7.2%、2.1%。未利用地总体增加,由 1990 年的 7.2% 增长至 2020 年的 7.8%,总体呈三减三增状态。

2.1.2 碳储量时空演变 黑龙江省 1990—2020 年碳储量总体呈波动下降趋势(表 2),1990 年碳储量为 2 014.02×10⁷ t,2020 年碳储量减少至 1 960.56×10⁷ t,降幅达 2.65。分时间阶段来看,1990—2000 年碳储量减少 53.46×10⁷ t,2000—2010 年碳储量下降 56.91×10⁷ t,2010—2020 年碳储量上升 5.59×10⁷ t。分地类来看,耕地碳储量累计增加 80.43×10⁷ t,是主要的碳汇贡献类型。林地碳储量 2000—2010 年损失 74.62×10⁷ t,2010 年后随着黑龙江省生态修复措施实施,碳储量有所恢复 45.01×10⁷ t。草地与水域碳储量总体下降,分别减少 13.48×10⁷ t、46.58×10⁷ t。

黑龙江省 4 种情景下碳储量整体在空间分布(图 3),碳储量高值为 780.41,碳储量低值为 94.63,空间分布整体呈中间高、四周低、北高南低、山区高平原低的特点。碳储量高值主要分布在中部小兴安岭,长白山山脉区域。

进一步分析黑龙江省 1990—2020 年碳储量局部变化特征(图 4)。将碳储量变化值分为明显增加、明显减少和基本不变 3 类。碳储量不变区域占绝大部分,减少区域主要分布于城市建成区周边,增加区域则呈零星分布。

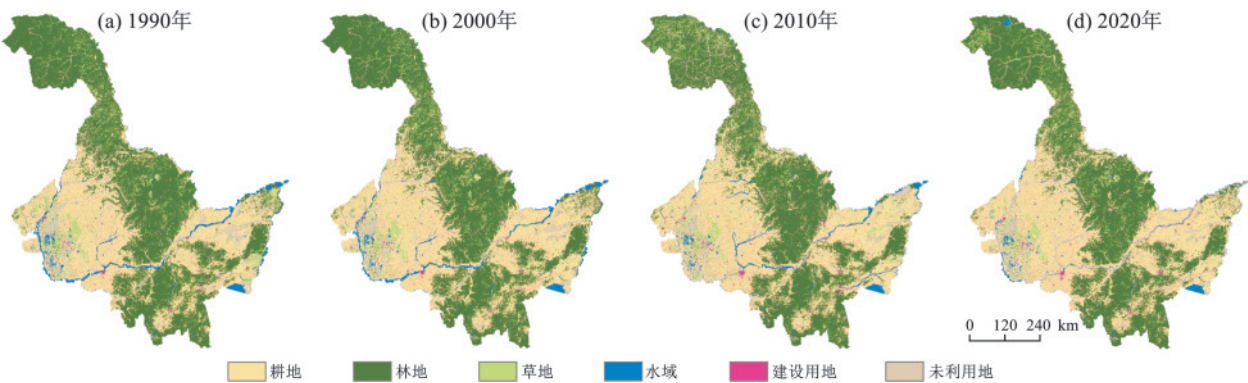


图 2 年土地利用空间分布
Fig.2 Annual land use spatial distribution

表 2 土地利用碳储量变化结果

Table 2 Results of carbon storage changes associated with land use								10 ⁷ tC
土地利用 类型	碳储量				碳储量变化			
	1990年	2000年	2010年	2020年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年	1990—2020年
耕地	530.01	598.24	608.55	610.44	68.23	10.31	1.89	80.43
林地	1 227.99	1 180.38	1 105.76	1 150.77	−47.61	−74.62	45.01	−77.22
草地	94.32	79.62	88.67	80.84	−14.70	9.05	−7.83	−13.48
水域	121.18	116.27	106.97	74.59	−4.91	−9.30	−32.38	−46.58
建设用地	9.59	9.73	10.73	10.55	0.15	0.99	−0.18	0.96
未利用地	30.94	27.64	34.30	33.38	−3.30	6.65	−0.92	2.43
总计	2 014.02	2 011.88	1 954.97	1 960.56	−2.14	−56.91	5.59	−53.46

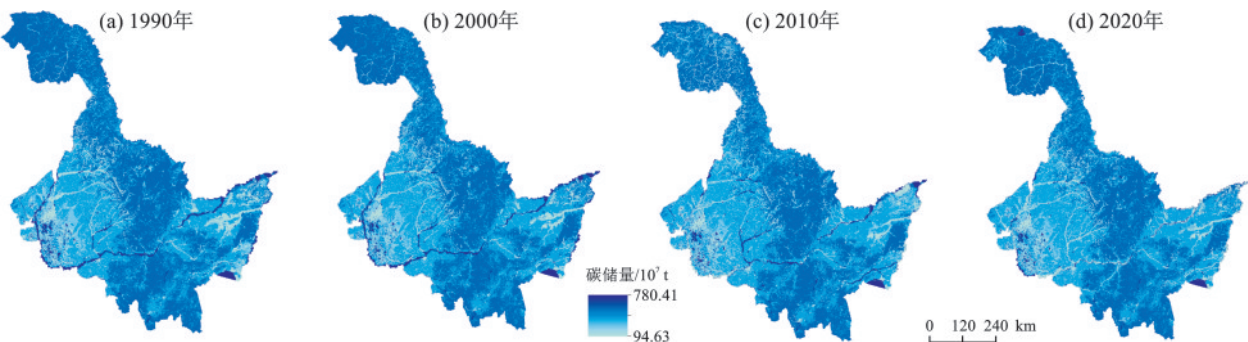


图 3 1990—2020年碳储量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of carbon storage from 1990 to 2020

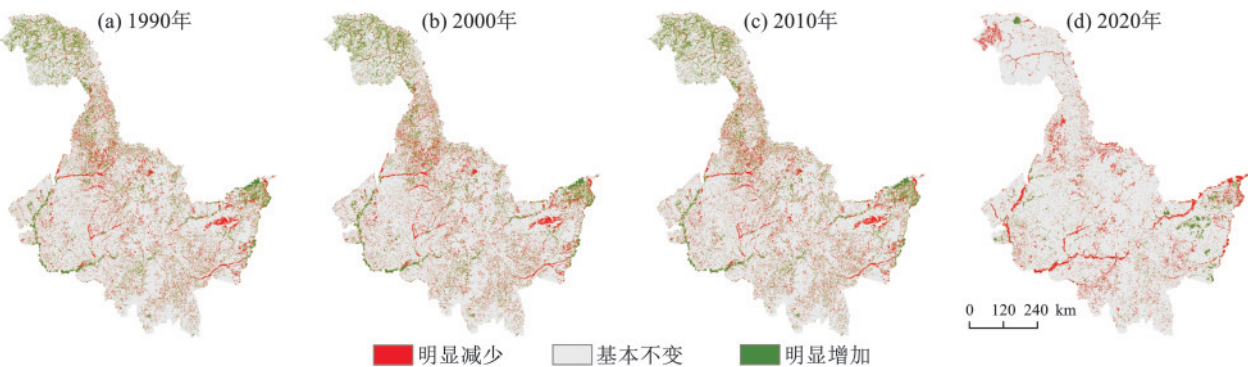


图 4 1990—2020年碳储量空间变化
Fig.4 Spatial changes in carbon storage from 1990 to 2020

2.1.3 土地利用转型的碳效应 为理清土地利用变化对碳储量的影响,本文深入分析土地利用类型转化对于碳储量的影响。1990—2020年黑龙江省土地利用类型转型呈阶段性特征与结构性变迁(图5)。主要为耕地与林地间的相互转化,以林地转为耕地为主导方向,耕地面积由141 907.95 km²增至160 175.13 km²,建设用地增长缓慢,表明该阶段以农业扩张为主导。2000—2010年建设用地增速显著提升,由8 783.01 km²增至9 679.10 km²,主要由耕地转入,同时林地面积出现增长,反映城镇化加速与生态修复政策初步见效。2010—2020年建设用地扩张趋缓,林地面积进一步恢复至202 521.35 km²,草地与

水域动态趋于稳定。

1990—2020年黑龙江省土地利用转型对碳储量的影响,呈现耕地、林地、草地向其他地类的转化主导碳储量的变化格局。林地转为耕地、草地及未利用地是碳损失的主要途径。分类型来看,林地转耕地导致的碳储量损失累计超过30 877.94万t,林地转草地损失约66 080.20万t,表明林地转出显著削弱区域碳汇功能。耕地转为林地及未利用地转耕地,碳储量分别累计增加28 691.86万、29 753.83万t,有效缓解区域碳损失趋势。此外,建设用地扩张,耕地和林地转化为建设用地造成14 874.48×10⁴t的碳损失。总之,该时段土地利用转换对碳储量的影响以净损失为主(表3)。

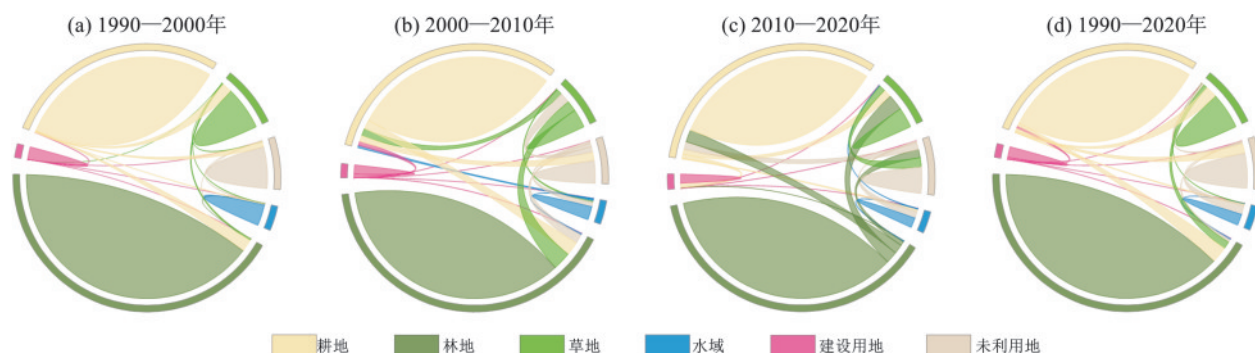


图5 土地利用转移弦图

Fig.5 Chord diagrams of land use conversion

2.2 碳储量空间分异驱动因素

基于最优参数地理探测器,对黑龙江省13个驱动因子进行探测(图6)。单因子探测结果显示,碳储量空间分异主要受高程、距水域距离、NDVI等驱动因子的影响,其解释力均在0.009 4以上。年平均气温、GDP、人口密度、夜间灯光、年平均降水量、坡度等驱动因子也具有明显作用,解释力超过0.002 5。而距河流距离、土壤侵蚀、与距道路距离等相对较弱,均在0.000 1以下。交互探测结果表明,驱动因子间多表现为双因子增强及非线性增强效应,说明碳储量空间格局由多因子共同作用所致。其中,DEM与年平均降水量、DEM与距河流距离、人口密度与DEM、DEM与NDVI的交互作用最强(q 均达0.035),关键驱动因子叠加可显著增强碳储量的空间分异性。

2.3 未来不同情景下土地利用及碳储量预测

2.3.1 2060年不同情景下土地利用格局模拟 2060年黑龙江省4种发展情境下土地利用类型的数量变化特征和土地利用空间分布格局见表4、图7。不同发展情景下,土地利用类型数量变化存在差异。自然发展情景下除林地外,其余地类占总面积的比例较2020年基期均有所下降。城市发展情境下除林地

和建设用地外,其余地类占总面积的比例较基期均有所下降,该情景下建设用地面积增加幅度远高于其他情景。耕地保护情景下除耕地、林地面积占总面积的比例较2020年基期有所上升,草地、水域、建设用地、未利用地占总面积的比例均较2020年基期有所下降。其中耕地面积的增加幅度远高于其他情景。生态保护情景下,除林地外,其余地类占总面积的比例较基期均有所下降,其中林地面积增加幅度远高于其他情景。

2.3.2 2060年不同情景下碳储量预测 基于InVEST模型,2060年黑龙江省4种不同情景下碳储量变化见表5。在数量变化上,4种情景较2020年碳储量都有所增长。分情景来看,生态保护情景($2\,012.71 \times 10^7$ t) > 自然发展情景($2\,000.59 \times 10^7$ t) > 城市发展情景($1\,996.01 \times 10^7$ t) > 耕地保护情景($1\,992.08 \times 10^7$ t)。其中增加值,生态保护情景(52.15×10^7 t) > 自然发展情景(40.03×10^7 t) > 城市发展情景(35.45×10^7 t) > 耕地保护情景(31.52×10^7 t)。

碳储量空间分异显著,高值区集中分布于中部小兴安岭及东部长白山余脉,低值区主要位于西部松嫩平原及三江平原的农耕密集区,整体呈中部高、两侧低、山区高、平原低的格局(图8)。

表 3 1990—2020 年土地利用转型对碳储量变化的贡献
Table 3 Contribution of land use conversions to carbon storage changes from 1990 to 2020

土地利用类型转换	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年	1990—2020 年
耕地-林地	955.75	11 845.17	16 846.69	3 949.65
耕地-草地	−383.40	−6 538.04	−4 386.08	−1 218.62
耕地-水域	708.77	6 603.13	1 984.30	1 659.99
耕地-建设用地	−415.79	−7 466.58	−7 407.90	−4 448.09
耕地-未利用地	−1 094.50	−11 245.20	−14 463.30	−4 640.79
林地-耕地	−16 596.91	−18 388.47	−12 489.47	−22 030.02
林地-草地	−3 835.12	−40 164.57	−25 915.63	−16 312.27
林地-水域	39.21	1 830.90	1 277.19	1 700.72
林地-建设用地	−102.68	−1 043.95	−858.61	−884.78
林地-未利用地	−390.90	−29 869.65	−13 433.71	−8 777.42
草地-耕地	8 899.76	5 156.70	6 941.89	10 484.83
草地-林地	2 963.07	23 420.26	35 070.27	8 511.58
草地-水域	303.28	2 687.61	2 816.15	1 273.63
草地-建设用地	−11.80	−269.36	−301.24	−230.41
草地-未利用地	−45.87	−10 941.58	−6 829.13	−2 412.98
水域-耕地	−1 497.18	−4 057.81	−5 411.51	−3 685.27
水域-林地	−59.56	−754.59	−1 161.19	−748.71
水域-草地	−1 756.76	−6 457.31	−1 751.81	−1 816.72
水域-建设用地	−2.81	−554.88	−557.36	−363.51
水域-未利用地	−2 337.82	−21 920.96	−31 867.99	−42 399.65
建设用地-耕地	63.72	5 682.54	7 969.10	3 032.30
建设用地-林地	0.23	590.63	951.14	342.72
建设用地-草地	45.97	192.61	231.40	83.89
建设用地-水域	2.54	377.24	432.21	175.36
建设用地-未利用地	0	−13.95	−24.10	−6.40
未利用地-耕地	10 422.95	16 301.15	13 452.68	18 189.51
未利用地-林地	106.56	11 285.60	26 939.36	2 640.88
未利用地-草地	589.08	5 750.73	9 943.53	1 760.48
未利用地-水域	1 293.72	11 029.33	7 571.70	2 694.77
未利用地-建设用地	0.24	19.72	24.77	18.87

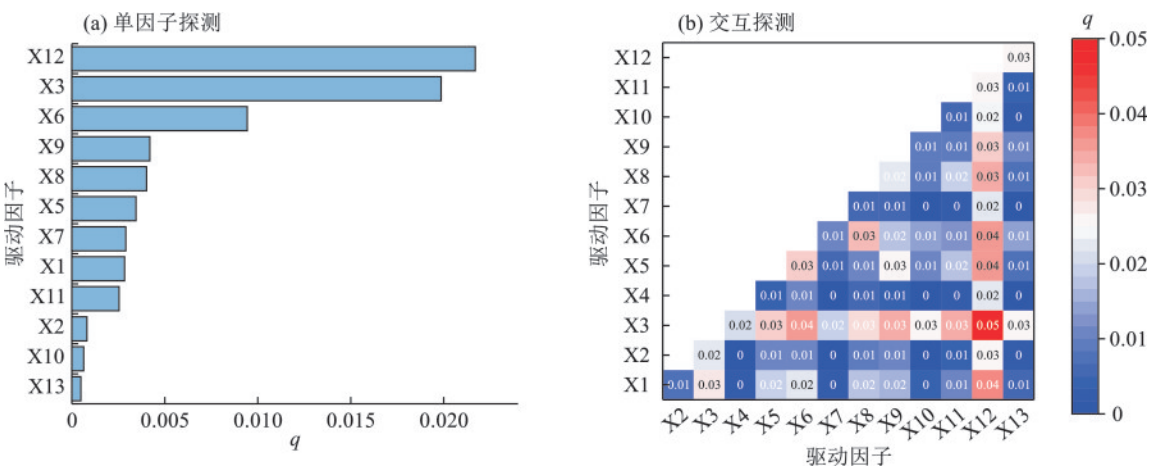


图 6 单因子探测和交互探测结果
Fig.6 Single factor detection and interaction detection results

表 4 2060 年各情景下各土地利用类型面积
Table 4 Areas of each land use type under each scenario in 2060

地类	2020 年		2060 年自然发展情景		2060 年城市发展情景		2060 年耕地保护情景		2060 年生态保护情景	
	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %
耕地	163 441.49	36.10	159 955.81	35.32	158 556.39	35.02	170 786.65	37.72	156 669.61	34.60
林地	202 521.35	44.73	218 676.28	48.29	218 503.68	48.25	211 107.50	46.62	219 766.75	48.53
草地	32 491.79	7.18	29 870.54	6.60	29 858.46	6.59	28 475.48	6.29	30 942.26	6.83
水域	9 558.23	2.11	6 252.69	1.38	6 238.57	1.38	6 187.60	1.37	8 387.55	1.85
建设用地	9 518.67	2.10	9 086.47	2.01	10 714.16	2.37	7 466.68	1.65	8 025.57	1.77
未利用地	35 271.34	7.79	28 975.14	6.40	28 945.67	6.39	28 793.02	6.36	29 025.19	6.41

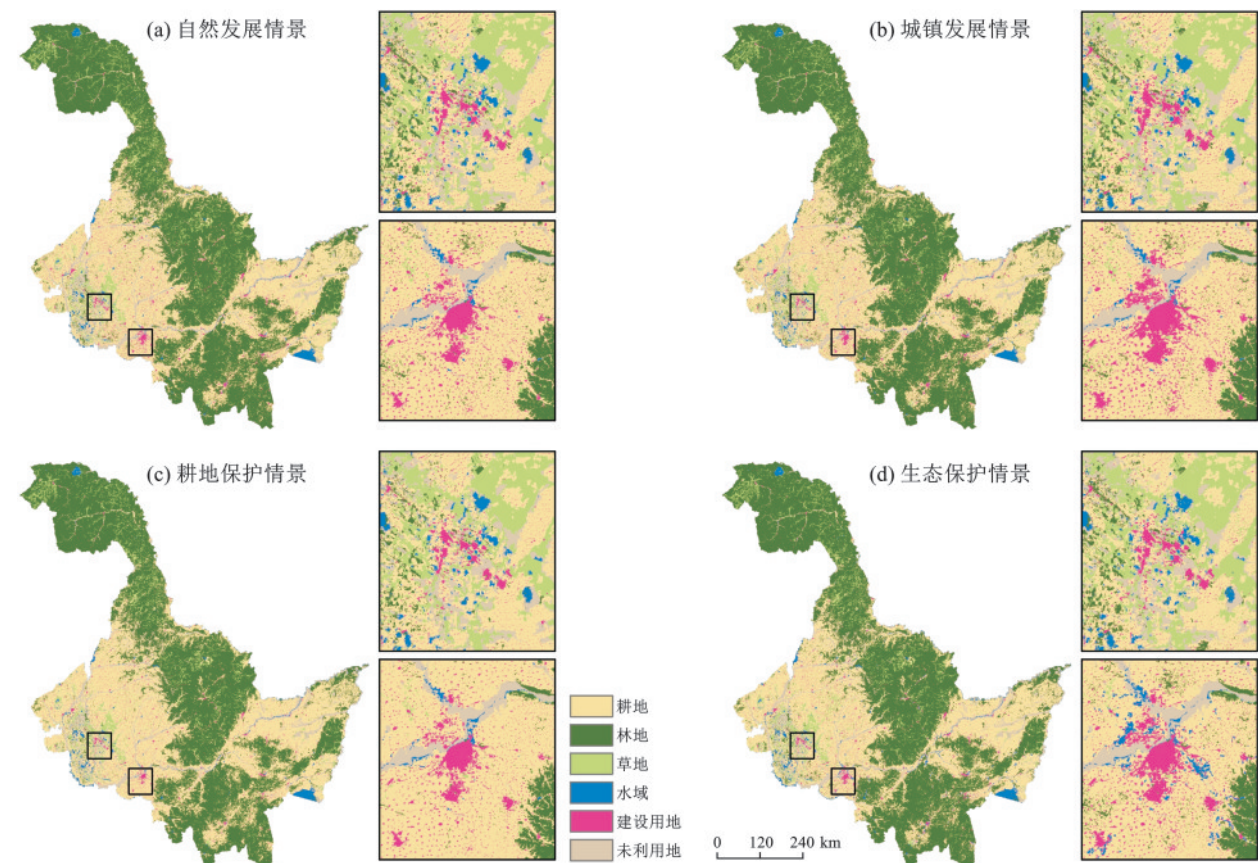


图 7 2060 年土地利用多情景空间分布
Fig.7 Spatial distribution of land use under different scenarios in 2060

表 5 不同情景下各土地利用类型碳储量变化
Table 5 Changes in carbon storage across land use types under different scenarios

地类	2020 年	自然发 展情景	城市发 展情景	耕地保 护情景	生态保 护情景
耕地	610.44	597.42	592.19	637.87	585.15
林地	1 150.77	1 242.56	1 241.58	1 199.55	1 248.76
草地	80.84	74.32	74.29	70.85	76.98
水域	74.59	48.80	48.69	48.29	65.46
建设用地	10.55	10.07	11.87	8.28	8.89
未利用地	33.38	27.42	27.39	27.25	27.47
总计	1 960.56	2 000.59	1 996.01	1 992.08	2 012.71

4 种情景下碳储量整体在空间变化见图 9。耕地保护情景和生态保护情景下碳储量整体分布较 2020 年差异较小,耕地和林地得到较好的保护,城市建设用地扩张受限,整体碳储量增长。自然发展情景下,固碳能力相对较弱的水域和建设用地减少,固碳能力相对较强的林地增加,进而出现碳储量上升现象。城市发展情景下,建设用地增加,哈尔滨,长春等城市碳储量较 2020 年有所下降。结果表明,未来黑龙江省应更加严格地贯彻执行黑土地保护政策,实施生态保护措施,进而促进区域可持续发展。

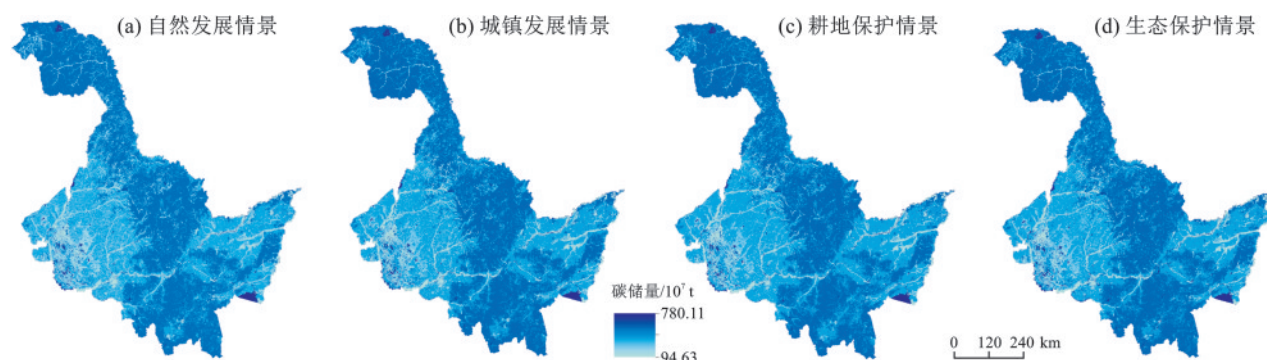


图8 2060年4种情景下碳储量空间格局模拟

Fig.8 Simulated spatial patterns of carbon storage under four scenarios in 2060

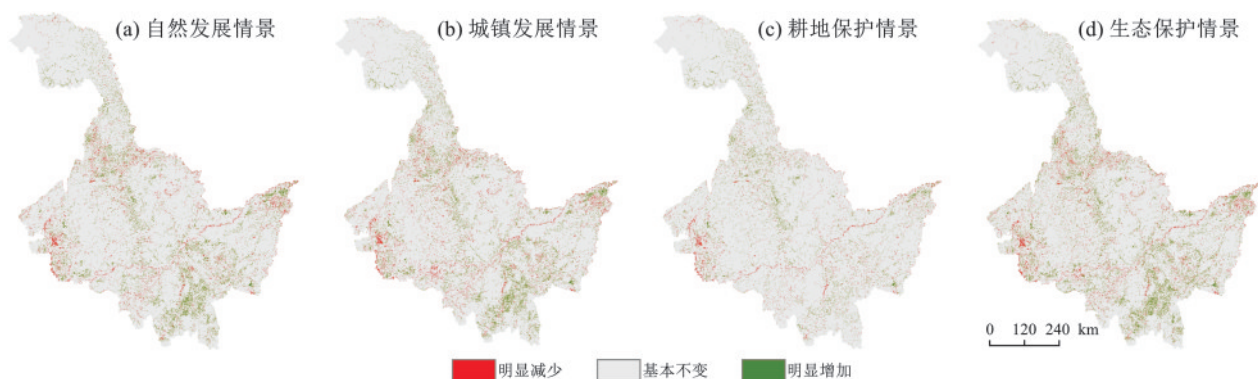


图9 2060年4种情景下碳储量空间变化

Fig.9 Spatial changes in carbon storage under four scenarios by 2060

3 讨论

3.1 土地利用转型对区域碳储功能的影响

碳储量动态与土地利用演变高度耦合,土地利用类型转换是调控黑龙江省碳储量变化的核心驱动因素。当土地利用向高碳密度类型转变时,区域碳储量呈上升趋势;反之,向低碳密度类型转变则呈下降趋势。本文借助公式(5)定量核算不同时期土地利用变化对碳储量的贡献程度(图10)。

1990—2000年,对碳储量变化最主要的积极贡献来自未利用地向耕地的转化,贡献率为0.16,与刘康等^[21]、王洪彦等^[22]研究结果一致。反之,林地、草地、耕地、水域、耕地及草地向未利用地转化,均对碳储量产生负向影响,贡献率分别为-0.11、-0.33、-0.35、-0.01、-0.01。2000—2010年,未利用地、草地向耕地转化及草地向林地转化,均正向促进区域碳储量提升,贡献率分别为0.16、0.26、0.01。与此相反,对碳储量变化最主要的消极影响来自林地、草地、耕地、未利用地转化,耕地、未利用地转化,耕地向草地、建设用地、未利用

地转化,均对区域碳储量变化产生负向影响,贡献率分别为-0.42、-0.15、-0.16、-0.03、-0.02、-0.04。

总之,1990—2020年,未利用地、耕地和草地向林地的转化有利于区域碳储量增加。而水域、林地、耕地、草地向未利用地的转化及耕地向建设用地的转化等则不利于碳储量增加。因此,为提升黑龙江省碳储量,应一方面限制高碳密度地类向低碳密度地类转化;另一方面,引导未利用地向高碳密度地类转化。

3.2 多政策情景下未来碳储量的差异化响应

多情景模拟发现,黑龙江省在自然发展、城市发展、耕地保护与生态保护4种路径下2060年碳储量均较2020年基期有所提升,与于小博等^[23]的研究结果一致。

其中生态保护情景下的碳储量潜力最高,李雪等^[24]研究结论一致,主要是森林与湿地生态系统是黑龙江省的碳汇基石,严格的保护能直接增加其碳储量。其次,耕地保护情景对碳储量的提升作用同样明显,詹泽东等^[25]、齐宏运等^[26]研究结果一致,一方面在于黑龙江省严格保护优质黑土耕地、实施保护性耕作能有效维持或提升土壤有机碳储量;另一方面,黑龙江省委一号文件全面禁止毁林开垦和林粮间作,严禁侵占草地、湿地等行为,有效防止区域碳损失。自然

发展情景下,作为林业大省,黑龙江现有森林的自然生长和演替过程持续固碳。特别是三北防护林的自然增加,能显著提升单位面积的碳储量,与朴世龙等^[27]、焦燕等^[28]研究结论一致。最后城市发展情景的碳汇增益最为有限,主要是由于随着建设用地的增

加,侵占水域和草地等固碳能力较强的地类;另一方面,在城市发展情景下,林地同步在扩张,建设用地扩张导致的碳损失被森林自然固碳增长所覆盖;此外,还与黑龙江省严格划定三区三线,限制建设用地无序扩张有关,与李继红等^[29]研究结论一致。

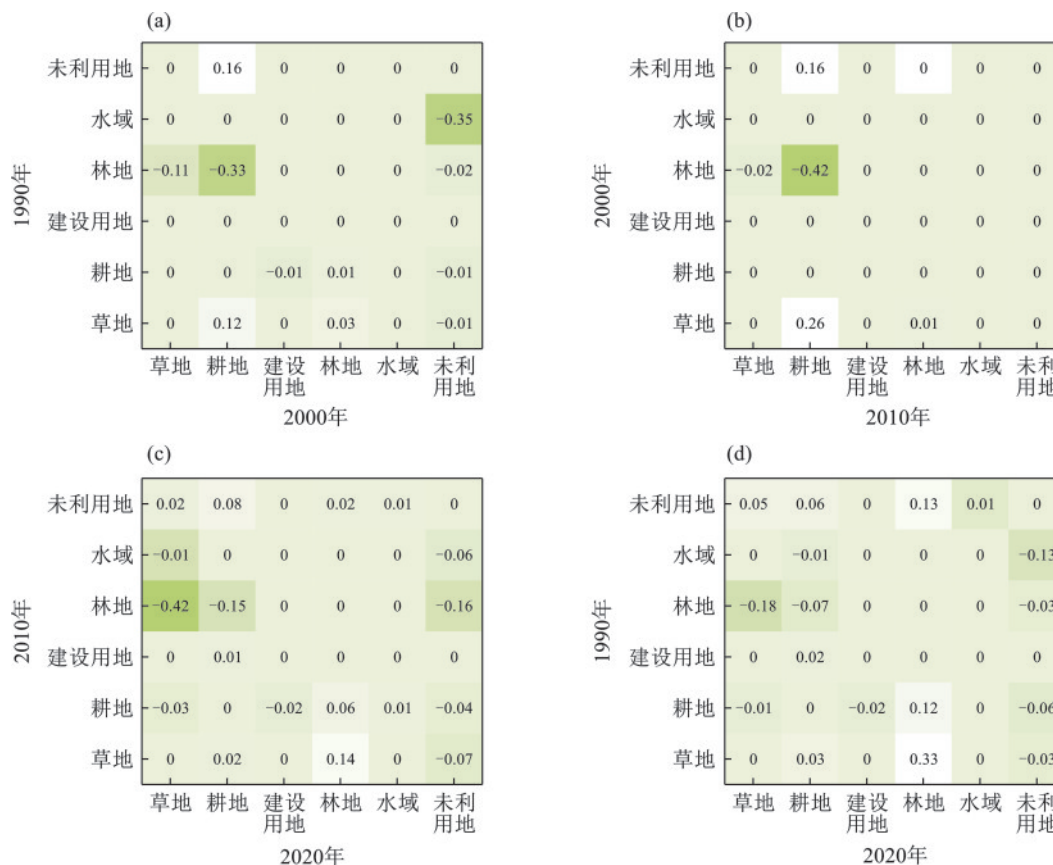


图 10 主要土地利用转型类型的碳储量变化贡献

Fig.10 Contribution of major land use conversion types to carbon storage changes

3.3 碳储量空间分异的主导驱动机制

基于地理探测器模型分析,在 13 个驱动因子中,高程(0.021 7)、距河流距离(0.019 8)、归一化植被指数 NDVI(0.009 4)、年平均气温(0.004 2)、GDP(0.004 0)、人口密度(0.003 4)、夜间灯光(0.002 9)、年平均降水量(0.002 8)和坡度(0.002 5)为主要影响因素,各因子间亦存在强交互作用。

单因子探测结果表明,高程、距水域距离、NDVI 对黑龙江省碳储量空间分异的解释力最强。具体来看,自然因素中 DEM 调控水热条件和光合作用影响植被分布,从而直接影响碳储量。NDVI 值越高,反映植被覆盖度越好、生物量越大,从而固碳能力越强,与熊国来等^[30]研究结果一致。年平均气温制约区域水热条件,影响土壤有机质的分解速率,从而影响土壤碳储量。年平均降水量通过影响植被光合作用,直接影响生态系统生产力,从而影响碳储量。坡度通过影响水土流失和植被生长,影响土壤保持和

碳储量能力,与赵慧等^[31]研究结果一致。

社会经济要素通过调控空间可达性特征,间接推动区域碳储量的动态演变。人口密度、GDP 通过影响人类活动强度,导致快速城市化和城市建设用地扩张,从碳密度较高的土地类型向碳密度低的类型转化,从而影响区域碳储量。夜间灯光作为人类活动重要指标,其强度增加常伴随自然用地转化为建设用地,导致碳储量直接流失,与王益明等^[32]研究结果一致。距河流的距离通过影响人类农业需求及调控土地利用类型等方式间接作用于碳储量,并在空间上存在梯度差异性。

交互探测结果显示,驱动因子间多呈双因子增强效应,与以往研究^[33]结论一致。距河流距离与高程的交互作用对碳储量空间分异的解释力最强,年平均降水量与道路距离的交互作用次之。表明自然因素与社会经济因素的交互作用对黑龙江省碳储量空间分异具有主导作用。因此,在制定区域生态保

护与经济发展政策时,需统筹考虑自然与社会经济因素的综合影响。

3.4 研究特色与局限性

本研究耦合 PLUS-InVEST 模型,定量模拟黑龙江省 2060 年多情景土地利用与碳储量变化,克服单一模型局限,提升研究结果综合性,运用最优参数地理探测器,识别碳储量主控因子及交互作用,揭示核心驱动机制。但本文仍存在一些局限。碳密度数据来源于前人研究,碳储量估算存在一定不确定性,后续应开展野外采样与调查以提升评估精度。其次,大尺度土地利用变化是 InVEST 模型的研究侧重,其无法反映黑土地保护中侵蚀防控、耕层培育等举措对土壤质量的改善效果。

4 结论

1) 耕地、林地与草地为研究区主要土地利用类型,其总面积占研究区全域的 88%,碳储量分别占总碳储量的 31.14%、58.70% 和 4.12%。1990—2020 年黑龙江省总碳储量呈持续降低趋势,30 a 间净减少 53.46×10^7 t。

2) 1990—2020 年黑龙江省以耕地、林地、草地向其他地类的转化为主导碳储量的变化格局。林地转为耕地、草地及未利用地是碳损失的主要途径。分类型看,林地转耕地导致碳储量损失 30 877.94 万 t,林地转草地损失约 66 080.20 万 t,耕地转为林地累计增加约 28 691.86 万 t,未利用地转耕地增加约 29 753.83 万 t。建设用地扩张持续占用耕地与林地,造成约 14 874.48 万 t 的碳损失。总体以净损失为主。

3) 2020—2060 年黑龙江省 4 种情景下碳储量均呈现碳储量都有所增长,分情景来看,生态保护情景 (52.15×10^7 t) > 自然发展情景 (40.03×10^7 t) > 城市发展情景 (35.45×10^7 t) > 耕地保护情景 (31.52×10^7 t)。

4) 自然因素与社会经济因素的交互作用主导黑龙江省碳储量的空间分异。其中,DEM 与年平均降水量、DEM 与距离河流距离、人口密度与 DEM、DEM 与 NDVI 的交互作用最强, q 均达 0.035 及以上。

参考文献:

- [1] 毛永发,周启刚,王陶,等.耦合 PLUS-InVEST-Geodetector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J].长江流域资源与环境,2023,32(5):1042-1057.
- Mao Yongfa, Zhou Qigang, Wang Tao, et al. Spatio-temporal variations and quantitative attribution of carbon stock in the Three Gorges Reservoir area using a coupled PLUS-InVEST-Geodetector model[J]. Resources and

Environment in the Yangtze River Basin, 2023, 32(5): 1042-1057.

- [2] 甘容,沈家威,卞维龙,等.基于 RHESys 模型的伊洛河流域碳储量估算及驱动因素分析[J].环境科学,2025,46(12):7780-7792.

Gan Rong, Shen Jiawei, Bian Weilong, et al. Carbon stock estimation and driving factor analysis of the Yiluo River basin based on the RHESys model[J]. Environmental Science, 2025, 46(12): 7780-7792.

- [3] 张鹏岩,杨丹,刘宇,等.基于复合生态系统视角的土地利用变化碳源/汇效应研究进展[J].生态学报,2025,45(5):2058-2073.

Zhang Pengyan, Yang Dan, Liu Yu, et al. Research progress on carbon source/sink effects of land-use change from a composite ecosystem perspective[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2058-2073.

- [4] 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 optimisation and carbon stock assessment in Northwest China[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4655-4665.

- [5] Tang Xuli, Zhao Xia, Bai Yongfei, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.

- [6] Steve M R, Lucy R H, Jared D. Mapping carbon storage in urban trees with multi-source remote sensing data: Relationships between biomass, land use, and demographics in Boston neighborhoods [J]. Science of the Total Environment 538. (2015): 1039-1041.

- [7] 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. Spatio-temporal variations in carbon stock in the Yellow River source region based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and their responses to future scenario patterns[J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5253-5262.

- [8] 马银,郑敏睿,郑新奇,等.基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析:以京津冀城市群为例[J].生态学报,2023,43(16):6785-6797.

Ma Yin, Zheng Minrui, Zheng Xinqi, et al. Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: A case study of

- the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6785-6797.
- [9] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于FLUS-InVEST的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响: 以呼包鄂榆城市群为例[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1667-1679.
- Wang Chaoyue, Guo Xianhua, Guo Li, et al. Land-use change in Northwest China and its impact on carbon stocks based on FLUS-InVEST: A case study of the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban cluster[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 31(8): 1667-1679.
- [10] 智菲, 周振宏, 赵铭, 等. 基于PLUS和InVEST模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 205-215.
- Zhi Fei, Zhou Zhenhong, Zhao Ming, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of carbon stock in Hefei's ecosystem based on PLUS and InVEST models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 205-215.
- [11] 董春, 杜林丹, 张禹森. 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*, 2025, 44(7): 1242-1253.
- Dong Chun, Du Lidan, Zhang Yusen. Spatiotemporal variation mechanisms of carbon stock in the Lesser Khingan Mountains and their contribution to carbon emission reduction[J]. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(7): 1242-1253.
- [12] 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 等. 基于FLUS-InVEST模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 345-355.
- Zhao Yincheng, Qin Menglin, Pang Yayue, et al. Simulation of ecological space carbon sink evolution and driving factors in the Beibu Gulf urban agglomeration based on the FLUS-InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 345-355.
- [13] 李玉恒, 赵宁, 张云, 等. 东北黑土区土地生境质量演化及多情景预测: 以黑龙江省为例[J]. *环境科学*, 2025, 46(12): 7958-7970.
- Li Yuheng, Zhao Ning, Zhang Yun, et al. Evolution and multi-scenario prediction of land habitat quality in the north-east black soil region: A case study of Heilongjiang Province[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(12): 7958-7970.
- [14] 魏熙乐, 李倩, 邓爱平, 等. 基于土地利用变化的四川省碳储量时空演变与预测及驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3): 373-383.
- Wei Xile, Li Qian, Deng Aiping, et al. Spatiotemporal evolution, prediction and driving factors analysis of carbon stocks in Sichuan Province based on land use change[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 373-383.
- [15] 孙方虎, 方凤满, 洪伟林, 等. 基于PLUS和InVEST模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 151-158.
- Sun Fanghu, Fang Fengman, Hong Weilin, et al. Analysis and prediction of carbon stock evolution in Anhui Province based on PLUS and InVEST models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 151-158.
- [16] 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. Changes and projections of carbon stocks in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on the PLUS-InVEST model[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2023, 37(6): 20-28.
- [17] 蔡乐山, 唐相龙. 生态过渡带三生空间多情景模拟与碳储量评估: 以甘肃省为例[J]. *环境科学*, 2025, 46(6): 3806-3817.
- Cai Leshan, Tang Xianglong. Multi-scenario simulation and carbon stock assessment of the three-life space in ecological transition zones: A case study in Gansu Province[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6): 3806-3817.
- [18] 张平平, 王飞, 王蕾钦, 等. 黄土高原县域农业生产效率时空变化分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 218-225.
- Zhang Pingping, Wang Fei, Wang Leiqin, et al. Spatiotemporal variations in agricultural production efficiency at the county level in the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2018, 36(2): 218-225.
- [19] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(6): 1018-1029.
- Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatiotemporal variations in carbon stock of the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture (Chinese and English)*, 2021, 29(6): 1018-1029.
- [20] Zhang Yu, Yuan Ji, You Chengming, et al. Contributions of national key forestry ecology projects to the forest vegetation carbon storage in China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 462117981-117981.
- [21] 刘康, 张寒, 张道军, 等. 黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素: 基于PLUS-InVEST-Geodector模型的研究[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(4): 2159-2170.
- Liu Kang, Zhang Han, Zhang Daojun, et al. Scenario simulation and driving factors of carbon stock in the Loess Plateau ecosystem: A study based on the PLUS-InVEST-Geodector model[J]. *Chinese Journal of Envi-*

- ronmental Science, 2025, 45(4): 2159-2170.
- [22] 王洪彦, 郑文璐, 盖兆雪. 基于InVEST模型的黑土区碳储量时空分异特征[J]. 环境科学学报, 2024, 44(7): 473-481.
- Wang Hongyan, Zheng Wenlu, Gai Zhaoxue. Spatiotemporal variation characteristics of carbon stock in the black soil region based on the InVEST model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(7): 473-481.
- [23] 于小博, 周宇欣, 蒲一帆, 等. 黑龙江省绥棱县多情景景观格局变化特征及碳储量时空演变分析[J]. 北方园艺, 2024(2): 68-78.
- Yu Xiaobo, Zhou Yuxin, Pu Yifan, et al. Spatiotemporal analysis of landscape pattern dynamics and carbon stock evolution in multiple scenarios of Suiling County, Heilongjiang Province [J]. Northern Horticulture, 2024(2): 68-78.
- [24] 李雪, 李文, 高宇. 基于FLUS-InVEST模型的大庆市土地覆盖模拟与碳储量评估[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5983-5993.
- Li Xue, Li Wen, Gao Yu. Land cover simulation and carbon stock assessment of Daqing City based on the FLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 5983-5993.
- [25] 詹泽东, 西广越, 任柄璋, 等. 黑龙江省齐齐哈尔五县碳存储量空间变化规律及固碳潜力研究[J]. 地质通报, 2024, 43(9): 1470-1484.
- Zhan Zedong, Xi Guangyue, Ren Bingzhang, et al. Spatial patterns of carbon storage and carbon sequestration potential in five counties of Qiqihar, Heilongjiang Province [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(9): 1470-1484.
- [26] 齐宏运, 周传芳, 孙彦峰, 等. 基于碳足迹的黑龙江省黑河市农田生态系统碳源/汇时序变化及其对碳中和的贡献[J]. 地质通报, 2025, 44(7): 1254-1271.
- Qi Hongyun, Zhou Chuanfang, Sun Yanfeng, et al. Carbon source/sink temporal variations in farmland ecosystems of Heihe City, Heilongjiang Province based on carbon footprint analysis and their contribution to carbon neutrality[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(7): 1254-1271.
- [27] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1010-1020.
- Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects [J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(6): 1010-1020.
- [28] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化[J]. 应用生态学报, 2005(12): 2248-2252.
- Jiao Yan, Hu Haiqing. Carbon stock and its dynamic changes in forest vegetation of Heilongjiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(12): 2248-2252.
- [29] 李继红, 支伟峰, 陈文曲, 等. 基于RS的哈尔滨市土地利用变化对碳储量的影响[J]. 森林工程, 2018, 34(2): 40-44.
- Li Jihong, Zhi Weifeng, Chen Wenqu, et al. Impact of land use change in Harbin City on carbon stock based on remote sensing data [J]. Forest Engineering, 2018, 34(2): 40-44.
- [30] 熊国来, 吴学群, 杨明龙, 等. 基于PLUS-InVEST模型的喀斯特地区碳储量时空变化及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(6): 307-315.
- Xiong Guolai, Wu Xuequn, Yang Minglong, et al. Analysis of spatiotemporal variations and influencing factors of carbon stock in karst regions based on the PLUS-InVEST model [J]. Research on Soil and Water Conservation, 2025, 32(6): 307-315.
- [31] 赵慧, 刘茜, 张敏, 等. 基于XGBoost-SHAP模型的北京市生态系统服务空间格局及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2026, 47(2): 1025-1037.
- Zhao Hui, Liu Qian, Zhang Min, et al. Analysis of the spatial patterns and driving factors of ecosystem services in Beijing based on the XGBoost-SHAP model [J]. Environmental Science, 2026, 47(2): 1025-1037.
- [32] 王益明, 张增信, 陈喜. 基于PLUS-InVEST-GeoDetector模型的鄱阳湖生态经济区碳储量时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2026, 47(7): 2720-2732.
- Wang Yiming, Zhang Zengxin, Chen Xi. Analysis of spatiotemporal variations and driving factors of carbon stocks in the Poyang Lake Eco-Economic Zone based on the PLUS-InVEST-GeoDetector model [J]. Environmental Science, 2026, 47(7): 2720-2732.
- [33] 贾纪昂, 郭伟玲, 徐刘洋, 等. 耦合PLUS-InVEST-GeoDetector模型的安徽省碳储量时空演变及驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1703-1715.
- Jia Jiang, Guo Weiling, Xu Liuyang, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of carbon stocks in Anhui Province using a coupled PLUS-InVEST-GeoDetector model [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1703-1715.