

2015—2020年黑龙江大兴安岭地区蓝绿空间 土地利用变化及其对碳储量影响

高铭阳, 张俊玲, 石淞, 刘威

(东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 预测黑龙江大兴安岭地区蓝绿空间用地变化并分析其对碳储量的影响, 为实现大兴安岭“双碳”目标提供科学指引。[方法] 基于2015、2020年黑龙江大兴安岭地区土地利用数据, 通过二元Logistic回归检验的驱动因子引入PLUS模型, 预测2030年蓝绿空间用地格局, 耦合InVEST模型分析蓝绿空间变化对碳储量的影响, 量化并验证蓝绿空间对碳储量波动的主要驱动地类。[结果] ①2015—2030年蓝绿空间持续增长, 林地均达蓝绿空间转入的60%以上, 占绝对优势。②2015—2020年蓝绿空间占碳储量增长空间总面积的96.52%, 2030年自然发展、蓝绿空间保护、城镇快速发展情景碳储量分别为 1.4594×10^9 , 1.4831×10^9 和 1.4647×10^9 t, 主要为大量非蓝绿空间向林地、草地的转入, 其中蓝绿空间保护对碳储量增加作用最明显。③蓝绿空间中林地、草地、水域聚集程度与碳储量呈显著正相关, 林地、草地为碳储量变化第一、第二主导地类。[结论] 未来应延续优良生态政策, 对黑龙江大兴安岭蓝绿空间进行重点保护, 提高林地、草地结构完整性, 助力黑龙江大兴安岭地区实现“双碳”目标。

关键词: 蓝绿空间; InVEST模型; PLUS模型; 碳储量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0000-00

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 高铭阳, 张俊玲, 石淞, 等. 2015—2020年黑龙江大兴安岭地区蓝绿空间土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1):-. Gao Mingyang, Zhang Junling, Shi Song, et al. Land use changes in blue-green space and their impact on carbon storage in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1):-.

Land Use Changes in Blue-green Space and Their Impact on Carbon Storage in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020

Gao Mingyang, Zhang Junling, Shi Song, Liu Wei

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: [Objective] Predicting changes in blue-green space land use and analyzing their impact on carbon storage in Daxing'an Mountains will provide scientific strategic guidance for realizing the “dual-carbon” goal. [Methods] Based on land utilization data for Daxing'an Mountains in 2015 and 2020, the driving factors of a binary logistic regression test were introduced into the PLUS model to predict the blue-green space land utilization pattern in 2030. The InVEST model was coupled with the results to analyze the impact of changes in blue-green space on carbon storage. The main driving land types of blue-green space causing changes in carbon storage were quantified and verified. [Results] ①Blue-green space continued to grow from 2015 to 2030. Forest land increased over this time period, accounting for more than 60% of the blue-green space transfer, indicating that forest land held an absolute advantage. ②From 2015 to 2020, blue-green space accounted for

收稿日期: 2023-06-08

修回日期: 2023-07-11

资助项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导性项目“黑龙江省绿色空间碳储量与景观格局适应性调控路径研究”(LH2022E001); 黑龙江省自然科学基金项目“遗产学视角下的黑龙江省渔猎文化景观的保护传承及其作用机制研究”(LH2020E008); 国家自然科学基金项目“寒地城市森林水平与垂直结构季相变异的冷岛机制研究”(42171246)

第一作者: 高铭阳(1998—), 女(汉族), 黑龙江省绥化市人, 硕士研究生, 研究方向为风景园林规划与设计 and 蓝绿空间碳储量研究。Email: 1733646229@qq.com。

通信作者: 张俊玲(1968—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 副教授, 主要从事少数民族文化景观及其栖息地生态环境研究。Email: zhajl@163.com。

96.52% of the total area of carbon storage growth space. Carbon storage for the natural development, blue-green space protection, and rapid urban development scenarios in 2030 were $1.459\ 4 \times 10^9$ t, $1.483\ 1 \times 10^9$ t, and $1.464\ 7 \times 10^9$ t, respectively, mainly due to the transfer of a large amount of non-blue-green space to forest land and grassland. Protection of blue-green spaces had the most obvious effect on the increase of carbon storage. ③ The degree of aggregation of forest land, grassland, and water areas in the blue-green space was significantly and positively correlated with carbon storage. Forest land and grassland were the first and second most dominant types of carbon storage changes. [Conclusion] Excellent ecological policies should be promoted in the future in order to protect the blue-green space and to improve the structural integrity of forest land and grassland in order to achieve the “dual-carbon” strategic goal in the Da-Hinggan-Ling area.

Keywords: blue-green space; InVEST Model; PLUS Model; carbon storage

中国政府二十大报告提出最新战略部署“积极稳妥推进碳达峰碳中和”，土地利用覆被变化(land use and cover changes, LUCC)被认为是人类活动在政策的驱动及制约下呈现出的不同发展形式，作为改变陆地生态系统时空格局，引起区域碳储能力及碳储量变化的重要原因^[1]，分析土地利用覆被变化对陆地生态系统碳储量的影响，成为中国政府 and 学者关注的焦点。全球碳中和大背景下，将研究范围逐渐聚焦在城市中承载大部分生态功能的蓝绿空间^[2]，综合评价耕地、林地、草地和水域对碳储量时空分布的影响，是保障碳中和目标顺利达成的关键手段。

以往对碳储量的研究多聚焦于土地利用时空格局变化的影响，致力于突破原有实地调查和理化数据分析对成本和尺度的限制，利用逐步丰富的碳密度实测结果，采用模型预测分析。张平等^[3]和 Li Zuzheng 等^[4]利用 Markov-InVEST 模型，在预测保护区用地变化的基础上，验证生态保护政策对碳储量提升具有显著作用，表明模型量化 LUCC 对陆地生态系统碳储量影响的精确性。随国内用地模拟研究的推进，研究区逐渐由重要生态保护或脆弱区转移为城市群，张斌等^[5]利用 Markov-FLUS 模型耦合 InVEST 模拟“三线”约束下武汉城市群 LUCC 对碳储量的影响，探究其下降的主导因素；为提高斑块级研究的模拟精度，伍丹等^[6]和张鹏等^[7]应用在 FLUS 上改进的 PLUS 模型，结合 InVEST 计算多情景碳储量分布，优化空间格局；如克亚·热合曼等^[8]和林彤等^[9]同样利用 PLUS-InVEST 预测用地格局与碳储量变化，探究其时空关联性。目前关于土地利用时空格局对碳储量影响的探索已趋于成熟，随碳汇等概念兴起，蓝绿空间日益受到更广泛关注^[10]，但少有研究涉及蓝绿空间单一地类与碳储量的关系，仅少数学者对蓝绿空间的分布、演变及评估等做出分析。许浩等^[11]以苏锡常都市圈为研究对象，针对蓝绿空间，探究其演变趋势及优化策略；Wang Haoying 等^[12]和

Zhao Chunlei 等^[13]开始结合生态学景观格局指数分析蓝绿空间分布特征；殷利华等^[14]为建立蓝绿空间的科学评估方法，探讨武汉园博园的碳汇绩效。蓝绿空间指的是由河湖水系构成的蓝色空间和绿地系统构成的绿色空间。

目前大部分研究缺乏碳储量层面的区域蓝绿空间规划，对蓝绿空间高比例的“双碳”目标区关注度不足，忽略其单一地类转换引起的碳储量变化，在对蓝绿空间的模型估算中，仍存在 PLUS 驱动因子搭配未检验其适宜性，碳密度仍采用气温降水系数修正，忽视实测数据的权威性与准确性，导致难以支撑以“双碳”目标为决策重心的城市管控等问题。

大兴安岭地区森林覆盖率高，蓝绿空间终年稳步在 85% 以上，其重点国有林区森林碳储量约占全省森林碳储量的 32.67%^[15]，是中国实现碳中和的重要实践区域，伴随城镇化快速推进，“增绿”与“增收”矛盾愈发突出。基于此，本文以黑龙江大兴安岭地区为研究区，通过适宜性检验的驱动因子引入 PLUS 模型分析 2015—2020 年土地利用变化，预测 2030 年自然增长、蓝绿空间保护、城镇快速发展情景下蓝绿空间用地格局，优先选用实测数据耦合 InVEST 模型分析蓝绿空间变化对碳储量的影响，量化与碳储量的数值和空间关联性，验证蓝绿空间影响碳储量波动的主要驱动地类，统筹推进黑龙江大兴安岭地区以碳中和为规划重心的区域层面的有效性。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

黑龙江大兴安岭地区(图 1)面积 6.48×10^4 km²，下辖漠河 1 市和呼玛、塔河 2 县(不含加格达奇、松岭、新林、呼中 4 区 1.82×10^4 km²)，东经 121°12′—127°00′，北纬 50°11′—53°33′。南靠大兴安岭山脉呈浅山丘陵地带，属寒温带大陆性季风气候，蓝绿空间面积所占比例从 2015 年的 89.93% 至 2020 年 96.90%，

特性资源禀赋使其成为国家生态安全重要保障区和木材资源战略储备基地。

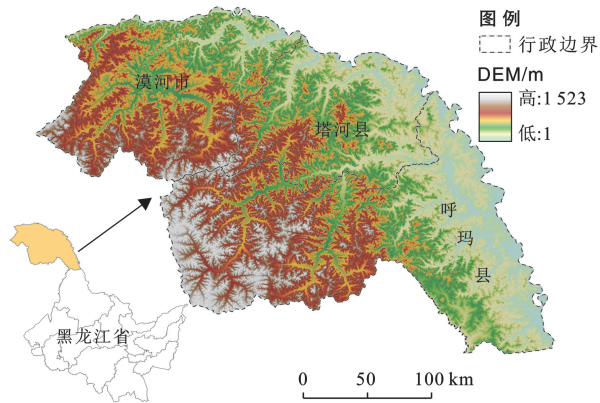


图 1 黑龙江大兴安岭地区位置与地形

Fig.1 Location and topography of Daxing'an Mountains in Heilongjiang Province

1.2 数据来源与处理

2015, 2020 年土地利用数据选自全球 30 m 地表覆盖 (GlobeLand30) 数据集 (<http://www.globallandcover.com/>), 空间分辨率为 30 m × 30 m, 分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类, 统一投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_50N, 严格保证分辨率和行列数一致。

根据文献[16—17], 选取贡献度较高的 13 个模拟驱动因子。5 个气候环境因子: 年均降水、气温、土壤类型源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 数字高程及坡度数据源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/search>)。8 个

社会经济因子: 人口、GDP 源于资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) (个别缺失数据根据当年各区县统计数据计算补充); 到县政府驻地、河流、铁路、一级、二级、三级道路的距离来源于 Open Street Map (<https://www.openhistoricalmap.org>)。InVEST 模型碳密度选取以实测数据为基准、以同研究区或同气候带同类研究内容、相近年份数据优先为原则, 结合国家生态科学数据中心下载的数据, 剔除异常值, 获取各地类平均碳密度数据。

2 研究方法

2.1 基于 PLUS 模型的蓝绿空间土地利用变化及模拟

PLUS (patch-generating land use simulation model) 模型在 Markov 基础上发展出精度更高的 LEAS (land expansion analysis strategy: 土地扩展分析策略) 和 CARS (cellular Automata Model Based on Multi-class Random Patch Seeds: 多类型随机斑块种子的元胞自动机模型) 模块。在 LEAS 中利用随机森林算法, 提取原有用地扩张, 将各地类发展概率作为约束条件, 利用 Markov 计算得到的未来用地需求输入 CARS 中, 模拟土地利用变化^[18]。该模型在动态模拟林地和草地斑块变化中更具适用性, 对于以蓝绿空间为主体的黑龙江大兴安岭地区, 其模拟优势显著。

2.1.1 土地利用模型参数设定 邻域权重反映各土地利用类型转化的难度系数, 范围为 0~1, 值越大则稳定性越高, 发生转变概率越小。本文类比相似研究区前人研究成果^[6-9, 17, 19-20], 参考 2015—2020 年各地类扩张面积比例, 得到邻域权重参数, 见表 1。

表 1 黑龙江大兴安岭地区各土地利用类型邻域权重参数

Table 1 Neighborly weight parameters of land use types in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province

| 土地利用类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 邻域权重 | 0.428 1 | 0.081 7 | 0.034 9 | 0.001 2 | 0.436 4 | 0.017 7 |

2.1.2 未来土地利用情景模拟设置 2015 年黑龙江大兴安岭地区进入天然林全面保护新阶段, 大肆开采状态有效缓解, 蓝绿空间全方位管控, 此前的用地转换趋势对转型发展后的研究区参考意义不大。因此, 本文基于 2015, 2020 年蓝绿空间土地利用数据, 模拟 2030 年自然增长、蓝绿空间保护、城镇快速发展 3 种情景。

(1) 自然增长情景 (S_1)。依现行自然经济社会情况, 延续 2015—2020 年发展趋势, 借助 Markov 计算 2030 年用地需求, 预测蓝绿空间土地利用情况。

(2) 蓝绿空间保护情景 (S_2)。依据《大兴安岭地区国家生态文明建设示范区规划 (2022—2030 年)》

及《河北雄安新区规划纲要》的参数^[21], 保持其蓝绿空间所占比例在 70% 以上, 参照同样进行“天然林保护工程”的临近研究地 (吉林、黑龙江和内蒙古等) 将林地、草地向建设用地转移概率降低 50%, 结合“基本农田保护”将耕地向建设用地转移降低 30%, 建设用地、耕地、草地向林地转移增加 30%。

(3) 城镇快速发展情景 (S_3)。参考《大兴安岭地区国土空间总体规划 (2021—2035 年)》, 鼓励建设用地扩张, 耕地、林地、草地向建设用地转移概率增加 20%, 建设用地向其他用地 (除耕地) 转移概率减少 20%。

2.1.3 模型精度验证 通过 ROC 曲线验证驱动因子的搭配是否具有较好解释力^[22], 利用 kappa 系数

和 OA 系数检验 PLUS 模型精度。用二元 Logistic 回归分析各地类与驱动因子关系(表 2), ROC 取值越接近 1 精度越高, 经检验 6 种地类 ROC 值均大于 0.700, 分别为 0.832, 0.873, 0.854, 0.757, 0.812, 0.869。驱动因子对蓝绿空间具有较好解释力, 搭配具

有合理性。基于 2015 年模拟 2020 年黑龙江大兴安岭地区土地利用分布, 与实际用地对比, 计算 kappa 系数和 OA 系数, 当数值超过 0.700 0 表示模拟结果与真实情况较接近。经计算 kappa 系数为 0.742 8, OA 系数为 0.797 3, PLUS 模型模拟精度较高。

表 2 2015—2020 年黑龙江省大兴安岭地区土地利用变化的 Logistic 回归结果

Table 2 Logistic regression results of land use change in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020

| 驱动因子 | 耕地 | | 林地 | | 草地 | | 水域 | | 建设用地 | | 未利用地 | |
|--------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | B | Exp(B) | B | Exp(B) | B | Exp(B) | B | Exp(B) | B | Exp(B) | B | Exp(B) |
| 坡度 | -1.142 6* | 0.582 4* | 0.149 3* | 1.173 1* | 0.067 2* | 1.079 8* | -0.050 1* | 0.932 4* | -0.058 3* | 0.854 1* | 0.112 4* | 1.129 5* |
| 高程 | -0.002 8* | 0.984 3* | 0.054 0* | 1.056 5* | 0.037 1* | 1.033 7* | -0.072 9* | 0.842 8* | -0.053 2* | 0.860 4* | -0.050 3* | 0.932 6* |
| 年均气温 | 0.214 6* | 1.358 1* | 0.013 4* | 1.014 2* | -0.217 9* | 0.799 5* | -0.050 2* | 0.932 4* | 0.008 7* | 1.008 4* | -0.030 7 | 0.951 3 |
| 年均降水 | -0.003 4* | 0.981 5* | 0.002 3* | 1.002 8* | 0.051 2* | 1.054 7* | 0.023 8* | 1.021 8* | 0.043 4* | 1.047 8* | -0.068 3* | 0.849 6* |
| 土壤类型 | 0.054 3* | 1.056 7* | -0.078 6* | 0.844 7* | -0.089 3 | 0.796 5 | -0.061 3* | 0.849 9* | 0.003 2* | 1.003 9* | -0.030 7 | 0.952 9 |
| 人口 | -0.001 2* | 0.998 5* | -0.000 8* | 0.997 9* | -0.001 9* | 0.996 1* | -0.002 4 | 0.988 7 | 0.413 2* | 1.537 5* | -0.054 1* | 0.857 2* |
| GDP | -0.001 8* | 0.996 5* | -0.001 7* | 0.996 5* | 0.002 1 | 1.002 4 | -0.002 9 | 0.984 0 | 0.001 2* | 1.002 3* | 0.016 4 | 1.017 3 |
| 到县政府距离 | -0.097 0* | 0.737 8* | -0.086 1* | 0.795 2* | 0.054 7* | 1.056 8* | 0.053 6* | 1.056 2* | 0.174 2* | 1.234 3* | -0.002 4* | 0.988 5* |
| 到河流距离 | 0.054 0* | 1.056 6* | -0.132 5* | 0.761 7* | 0.014 2* | 1.016 1* | 0.745 3 | 1.894 6 | 0.000 0* | 1.000 0* | 0.001 4* | 1.002 3* |
| 到铁路距离 | -0.007 3* | 0.979 2* | 0.002 1* | 1.002 5* | -0.003 4* | 0.981 4* | -0.684 2 | 0.321 4 | -0.000 7* | 0.998 1* | 0.541 2 | 1.679 3 |
| 到一级路距离 | -0.001 3* | 0.998 4* | 0.002 2* | 1.002 5* | 0.004 7* | 1.005 9* | 0.005 8* | 1.006 1* | -0.007 8* | 0.984 0* | 0.013 6* | 1.014 7* |
| 到二级路距离 | 0.003 3 | 1.004 0 | 0.001 4* | 1.001 6* | 0.050 7* | 1.054 1* | 0.004 7* | 1.005 8* | 0.006 1 | 1.006 3 | 0.007 2* | 1.006 8* |
| 到三级路距离 | 0.014 2 | 1.016 3 | 0.003 6* | 1.004 7* | 0.051 3* | 1.054 4* | 0.003 1* | 1.003 8* | 0.015 6* | 1.014 9* | 0.068 0 | 1.081 3 |
| ROC 值 | 0.832 | | 0.873 | | 0.854 | | 0.757 | | 0.812 | | 0.869 | |

注: * 表示结果 p 值通过显著性检验; B 值为回归系数; Exp(B) 为发生比率即地类分布概率。

2.2 基于 InVEST 模型的碳储量评估

2.2.1 碳储量计算 本研究采用 InVEST 模型 carbon 模块, 估算研究时段内碳储量。总碳储量划为 4 个基本碳库, 包括地上生物碳库、地下生物碳库、土壤有机质碳库和死亡有机质碳库。公式如下:

$$C_i = C_{i-\text{above}} + C_{i-\text{below}} + C_{i-\text{dead}} + C_{i-\text{soil}} \quad (1)$$

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

式中: C_i 为地类 i 的总碳密度; $C_{i-\text{above}}$ 为地类 i 的地上碳密度; $C_{i-\text{below}}$ 为地类 i 的地下碳密度; $C_{i-\text{dead}}$ 为地类 i 的死亡有机质碳密度; $C_{i-\text{soil}}$ 为地类 i 的土壤碳密度; $C_{i-\text{total}}$ 为区域内所有地类 i 的总碳储量之和; S_i 为地类 i 的区域面积。

2.2.2 碳密度确定 碳密度数据优先选择省内或气候带相同、时段邻近的实测数据, 基于前人研究成果, 参照以蓝绿空间为主要研究对象的实测或文献, 结合黑龙江大兴安岭土壤类型, 整理结果见表 3。

2.3 验证蓝绿空间对碳储量的主要驱动地类

2.3.1 空间关联性分析 双变量空间自相关分析研究区生成的 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 共 2 673 个格网, 选用土地利用强度与碳储量数据链接, 计算双变量全局和局部 Moran' I 指数, 得到 4 种空间聚集类型^[28] 的 LISA 集聚图, 其中高一低代表高土地利用强度和低碳储量分

布聚集区, 低—低、低—高、高—高类型依次类推。依据人类活动对各地类开发程度量化不同地类, 参考已有研究划分强度等级^[29] 设定: 未利用地开发(1); 林地、草地、水域开发(2); 耕地开发(3); 建设用地开发(4)。

表 3 黑龙江大兴安岭地区碳密度参数^[15, 23-25, 32]

Table 3 Carbon density parameters in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

| 土地利用类型 | 地上碳密度 | 地下碳密度 | 土壤碳密度 | 死亡有机物碳密度 |
|--------|-------|-------|--------|----------|
| 耕地 | 10.12 | 26.83 | 147.00 | 0.00 |
| 林地 | 11.62 | 30.24 | 173.90 | 2.25 |
| 草地 | 8.56 | 51.23 | 74.60 | 2.84 |
| 水域 | 8.72 | 2.14 | 23.01 | 0.00 |
| 建设用地 | 8.75 | 4.38 | 27.78 | 1.16 |
| 未利用地 | 10.02 | 0.00 | 44.79 | 0.00 |

2.3.2 数值相关性及地类驱动力分析 蓝绿空间主要地类比例与碳储量经正态性检验后, 验证两者数值波动是否存在共性, 计算两者间的皮尔逊相关系数 (Pearson's r)^[30], 值为正, 则呈正相关, 反之为负相关, p 值 < 0.05 , 则显著。为量化主要地类对碳储量的驱动力, 判断各地类影响程度高低, 运用地理探测器模型, 其 q 值^[31] 表示各因素对碳储量空间分布的影响, 区间为 $[0, 1]$ 值越大影响越大, 反之越小。

3 结果与分析

3.1 黑龙江大兴安岭地区蓝绿空间土地利用变化分析

3.1.1 2015—2020 年蓝绿空间用地变化 由黑龙江大兴安岭地区蓝绿空间变化(图 2)可知,2015—2020 年蓝绿空间面积比例持续增加,新增用地以林地和水域为主,明显集聚在西北侧漠河市和塔河县周边,区政府对“天保二期”的积极响应是西北近 5 a 蓝绿空间面积迅速扩张的重要原因。结合土地利用变化(表

4),蓝绿空间比例由 89.83%增至 96.90%。南侧蓝绿空间大幅增加的林地多由林区转型发展期间的草地与非蓝绿空间转入,林地、耕地和水域面积达蓝绿空间总转入的 137.33%,1.41%,1.96%,虽草地面积减少明显,占蓝绿空间总转入面积的 40.70%,但整体趋向蓝绿空间发展更完好状态。东南侧呼玛县作为经济和人口的重要流动区,存在一定规模的非蓝绿空间,“北南西侧多,东侧少,林草变化为主”的蓝绿空间半包围式格局已初具雏形。

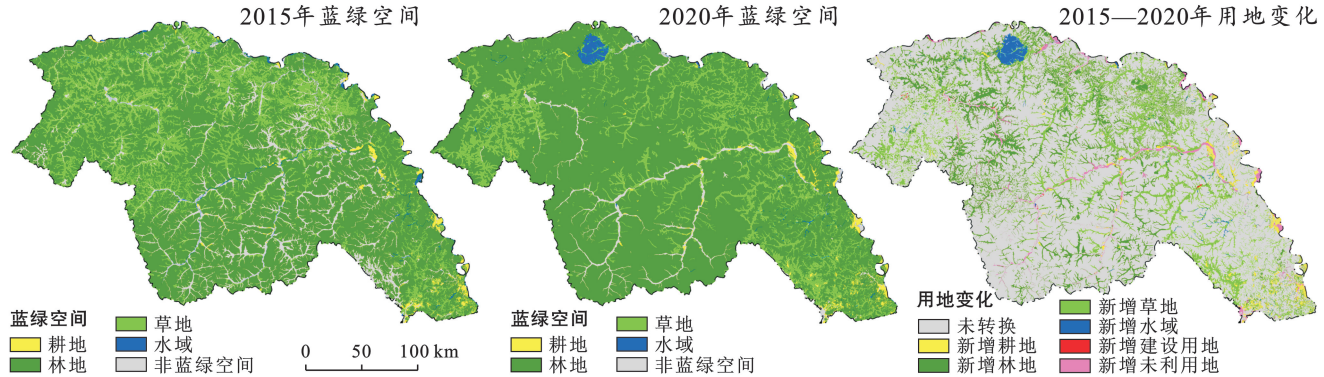


图 2 2015—2020 年黑龙江省大兴安岭地区蓝绿空间土地利用分布及变化

Fig.2 Distribution and change of land use in blue-green space in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020

表 4 2015—2020 年黑龙江省大兴安岭地区蓝绿空间土地利用面积及变化

Table 4 Land use area and change of blue and green space in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020

| 项目 | 蓝绿空间 | | | | 非蓝绿空间 |
|----------------------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|
| | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | |
| 利用面积/km ² | | | | | |
| 2015 年 | 685.50 | 48 021.63 | 9 088.78 | 631.92 | 6 613.12 |
| 2020 年 | 748.87 | 54 213.69 | 7 253.83 | 720.24 | 1 991.70 |
| 2015—2020 年 | 63.37 | 6 192.06 | -1 834.95 | 88.32 | -4 621.42 |

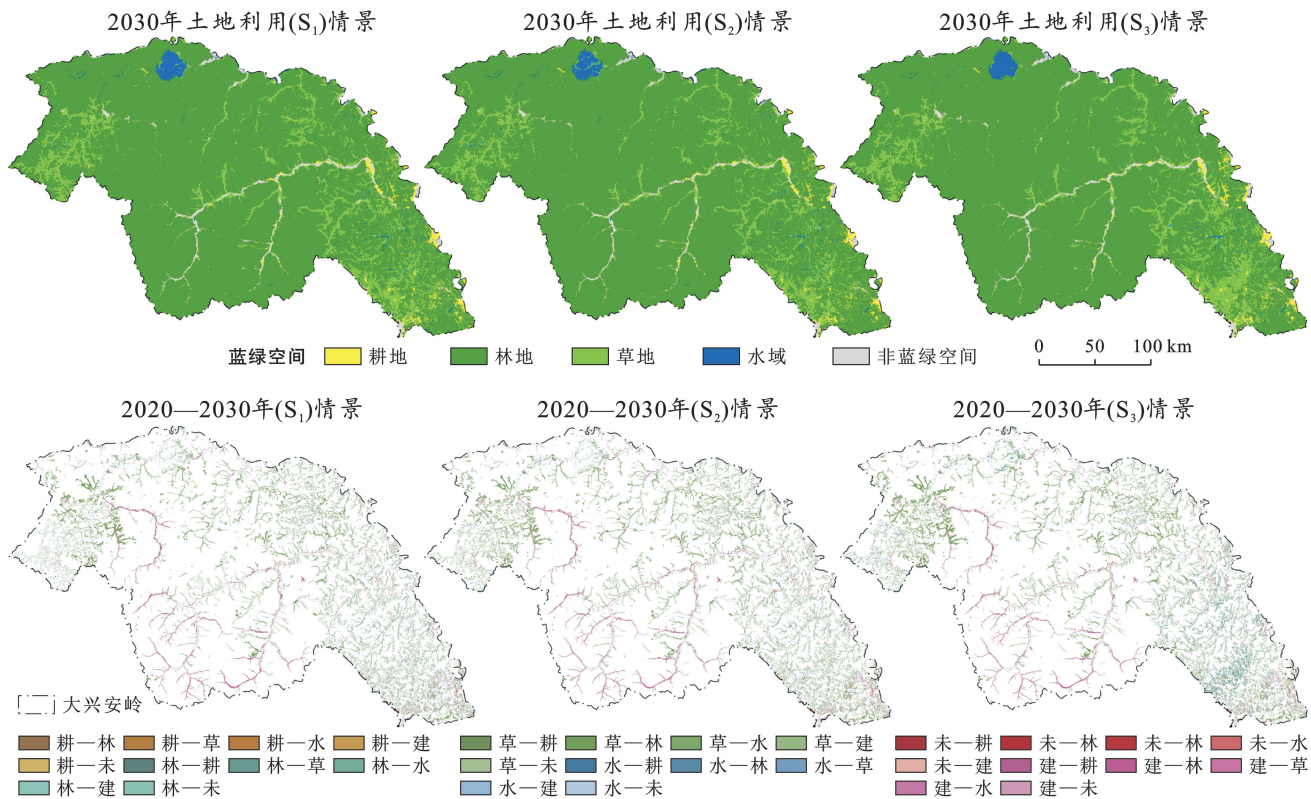
3.1.2 2030 年多情景蓝绿空间用地变化预测 预测 2030 年自然增长(S_1)、蓝绿空间保护(S_2)、城镇快速发展(S_3)多情景用地变化:2020—2030 年蓝绿空间面积持续增加(图 3),主要以北侧漠河市和东南侧呼玛县的林草转入为主,但土地利用结构基本不变。

S_2 情景中,在商业性禁伐基础上,政策设置更倾向蓝绿空间生态养护,期间林地和草地转入较其他情景显著提升(表 5),分别增加 5 528.11,3 051.44 km²。南侧在快速城镇化的 S_3 情景中仍为生态保护主导区,东南侧呼玛县在进行重点经济建设的同时,提升城市公园、绿道等蓝绿空间所占比例,因此较 S_1 的蓝绿空间转入增加 1 124.46 km²,但城镇发展对周边生态用地的侵占导致其转入小于 S_2 情景。综上, S_2 最大程度上促进现有非蓝绿空间向生态型用地转化,强化了对现存蓝绿空间的管控,使 S_2 情景对蓝绿空间转入作用最明显,其次为 S_3 ,其次为 S_1 。黑龙江大兴

安岭地区在“天然林保护工程”长效惠及下,持续加强天然次生林保护与修复力度,南侧林区生态系统的质量和稳定性提高,因此 3 种情景下蓝绿空间均增速较快,分别转入 6 627.91,8 943.92,7 752.37 km²,林地和草地转入情况与 2015—2020 年基本相同,均占蓝绿空间转入的绝对优势。

3.2 黑龙江大兴安岭地区碳储量变化分析

3.2.1 2015—2020 年碳储量变化 分析黑龙江大兴安岭地区碳储量变化(图 4),高碳储量区主要集中在南侧大兴安岭山脉附近,低碳储量区位于东南侧非蓝绿空间所占比例较高的呼玛县周边,整体与蓝绿空间分布相似,呈“北南西侧高,东侧低,林草变化为主”的时空格局。北侧的漠河市与塔河县汇集大量具有转林潜力的优质草地,以不到研究区 1/2 的土地,分布超 2/3 的碳储增长面积。



注:耕为耕地;林为林地;草为草地;水为水域;建为建设用地;未为未利用地(耕-林为耕地转为林地,以此类推)。

图 3 2030 年黑龙江省大兴安岭地区多情景蓝绿空间土地利用分布及变化

Fig.3 Distribution and change of land use in blue-green space under multi-scenario scenarios in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province in 2010

表 5 2020—2030 年黑龙江省大兴安岭地区蓝绿空间土地利用转移矩阵

Table 5 Blue-green space land use transfer matrix in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2020 to 2030

| 项目 | 2020 年面积/km ² | | | | | 转入 | 蓝绿空间 转入 | 占蓝绿空间 转入比例/% | |
|-----------------------|--------------------------|--------|-----------|----------|--------|----------|------------|-----------------|-------|
| | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 非蓝绿空间 | | | | |
| S ₁ | 耕地 | 444.6 | 118.39 | 48.08 | 12.47 | 42.53 | 221.47 | 6 627.91 | 3.34 |
| | 林地 | 215.72 | 52 772.27 | 3 818.75 | 106.32 | 834.05 | 4 974.84 | | 75.06 |
| | 草地 | 53.35 | 1 093.06 | 3 267.75 | 32.05 | 65.12 | 1 243.58 | | 18.76 |
| | 水域 | 4.89 | 103.09 | 56.53 | 540.03 | 23.51 | 188.02 | | 2.84 |
| | 非蓝绿空间 | 30.31 | 126.87 | 62.71 | 29.37 | 1 026.48 | 249.26 | — | — |
| 2030 年 S ₂ | 耕地 | 412.38 | 99.97 | 33.61 | 12.62 | 46.05 | 192.25 | 8 943.92 | 2.15 |
| | 林地 | 246.04 | 53 112.24 | 4 295.17 | 111.39 | 875.51 | 5 528.11 | | 61.81 |
| | 草地 | 62.24 | 795.61 | 2 856.5 | 36.29 | 96.41 | 3 051.44 | | 34.12 |
| | 水域 | 4.92 | 102.87 | 41.73 | 531.30 | 22.60 | 172.12 | | 1.92 |
| | 非蓝绿空间 | 8.85 | 11.81 | 8.25 | 1.19 | 101.59 | 30.10 | — | — |
| S ₃ | 耕地 | 426.92 | 137.38 | 46.42 | 12.89 | 40.99 | 237.68 | 7 752.37 | 3.07 |
| | 林地 | 224.73 | 52 370.34 | 4 185.12 | 148.28 | 842.49 | 5 400.62 | | 69.66 |
| | 草地 | 57.01 | 1 791.34 | 2 905.61 | 35.48 | 64.92 | 1 948.75 | | 25.14 |
| | 水域 | 4.30 | 81.77 | 59.20 | 491.49 | 20.05 | 165.32 | | 2.13 |
| | 非蓝绿空间 | 24.74 | 107.68 | 35.77 | 30.60 | 139.30 | 198.79 | — | — |

注:S₁、S₂、S₃ 分别表示自然增长、蓝绿空间保护、城镇快速发展情况。

分析碳储量变化(表 6),5 a 间研究区天然林保护卓有成效,林区生态带动蓝绿空间各地类主导碳储量

增长,2015—2020 年以蓝绿空间增长为主体提升了 2.366 9×10⁹ t,达总增量的 96.52%。与同时期土地

利用变化情况相似,蓝绿空间林草地类的碳储增量占 18.01%,其余地类不足 5%。相比之下,除耕地因面积绝对优势,分别达蓝绿空间碳储增量的 81.88% 和 18.01%,其余地类不足 5%。相比之下,除耕地因面积减少略有降低,蓝绿空间碳储量整体呈增长势。

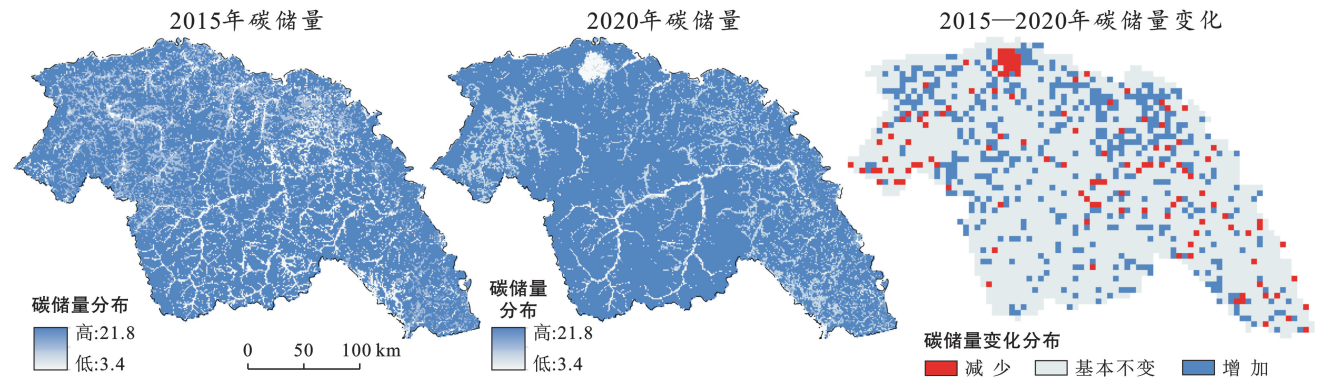


图 4 2015—2020 年黑龙江省大兴安岭地区碳储量空间分布及变化

Fig.4 Spatial distribution and change of carbon stocks in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020

表 6 2015—2020 年黑龙江省大兴安岭地区碳储量及变化

Table 6 Carbon storage and change in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020

| 项目 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 非蓝绿空间 | 总计 |
|------------------------|-------|----------|-------|------|-------|----------|
| 2015 年 | | | | | | |
| 面积/10 ⁶ t | 12.53 | 1 158.24 | 13.86 | 2.01 | 4.78 | 1 191.42 |
| 2020 年 | | | | | | |
| 面积/10 ⁶ t | 12.27 | 1 350.53 | 56.16 | 2.53 | 6.62 | 1 428.11 |
| 2015—2020 年 | | | | | | |
| 变化面积/10 ⁶ t | -0.26 | 192.29 | 42.3 | 0.52 | 1.84 | 236.69 |
| 占蓝绿空间碳储量变化比例/% | -0.11 | 81.88 | 18.01 | 0.22 | — | — |

3.2.2 2030 年多情景碳储量变化及预测

2030 年蓝绿空间碳储量变化(表 7)占总增长量的 90% 以上,3 种情景分别增加 3.062 × 10⁷, 5.046 × 10⁷ 和 3.598 × 10⁷ t。与蓝绿空间分布格局相似(图 5),均为“西北南高、东低”态势,期间林地和草地

持续主导,其他地类碳储提供量微乎其微。因低碳储量区的东侧呼玛县对建设用地需求较高,城镇发展水平较高,生态空间呈破碎化,故相比之下城镇发展水平较低、林草地分布广的西南北侧,一直稳定为高碳储量区。

表 7 2020—2030 年黑龙江省大兴安岭地区多情景碳储量及变化

Table 7 Carbon storage and changes under multiple scenarios in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2020 to 2030

| 年份 | 情景 | 项目 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 蓝绿空间 | 非蓝绿空间 | 总计 |
|-----------|----------------|-------------------------|-------|----------|--------|-------|----------|-------|----------|
| 2020 | | 碳储量/10 ⁶ t | 12.27 | 1 350.53 | 56.16 | 2.53 | 1 421.49 | 6.62 | 1 428.11 |
| 2030 | S ₁ | 碳储量/10 ⁶ t | 13.70 | 1 366.67 | 69.12 | 2.62 | 1 452.11 | 7.25 | 1 459.36 |
| | S ₂ | 碳储量/10 ⁶ t | 14.32 | 1 371.06 | 83.95 | 2.62 | 1 479.92 | 11.14 | 1 483.09 |
| | S ₃ | 碳储量/10 ⁶ t | 13.48 | 1 333.08 | 108.51 | 2.40 | 1 457.17 | 7.24 | 1 464.71 |
| 2020—2030 | S ₁ | 碳储量变化/10 ⁶ t | 1.43 | 16.14 | 12.96 | 0.09 | 30.62 | 0.63 | 31.25 |
| | | 占蓝绿空间碳储量变化比例/% | 4.67 | 52.71 | 42.33 | 0.2% | — | — | — |
| | S ₂ | 碳储量变化/10 ⁶ t | 2.05 | 20.53 | 27.79 | 0.09 | 50.46 | 4.52 | 54.98 |
| | | 占蓝绿空间碳储量变化比例/% | 4.06 | 40.69 | 55.07 | 0.18 | — | — | — |
| | S ₃ | 碳储量变化/10 ⁶ t | 1.21 | -17.45 | 52.35 | -0.13 | 35.98 | 0.62 | 36.60 |
| | | 占蓝绿空间碳储量变化比例/% | 3.36 | -48.50 | 145.50 | -0.36 | — | — | — |

自然增长情景中(S₁),具备高碳储量的林地和草地增加 1.614 × 10⁷ 和 1.096 × 10⁷ t,占蓝绿空间碳储增量的 95.04%。蓝绿空间保护情景(S₂)下提升了蓝绿空间完整性,使得林地和草地对蓝绿空间碳储增量的贡献高达 95.73%,带动部分非蓝绿空间转为生态服务型用地,大面积天然次生林生态功能得以恢复。在城镇快速发展情况(S₃)中林地与草地仍为

变化主体,但城镇快速发展下,非蓝绿空间的无序扩张破坏了生态用地结构,象征顶层生态的林地部分退化为草地,其碳储量大幅减少 1.745 × 10⁷ t,然而前期“天保工程”的中幼龄林所占比例较高,林地碳储量大幅提升具有滞后性,其增量爆发于 2020—2030 阶段,带动增设的公园和绿道等蓝绿空间提供大量碳储量,整体导致 S₃ 情景较 S₁ 情景变化更明显。3 种

情景下, S_2 碳储增量最明显, S_3 次之, S_1 最小。从“双碳”角度规划黑龙江大兴安岭地区, 应在重点保护蓝绿空间基础上辅以城镇发展策略, 合理增加城市生态用地比例, 进一步加强蓝绿空间和碳储量的协同

发展。

综上所述, 结合 2015—2030 年蓝绿空间和碳储量分布情况, 初步假设研究区碳储量变化, 均以蓝绿空间中的林地和草地变化为主, 需待进一步验证。

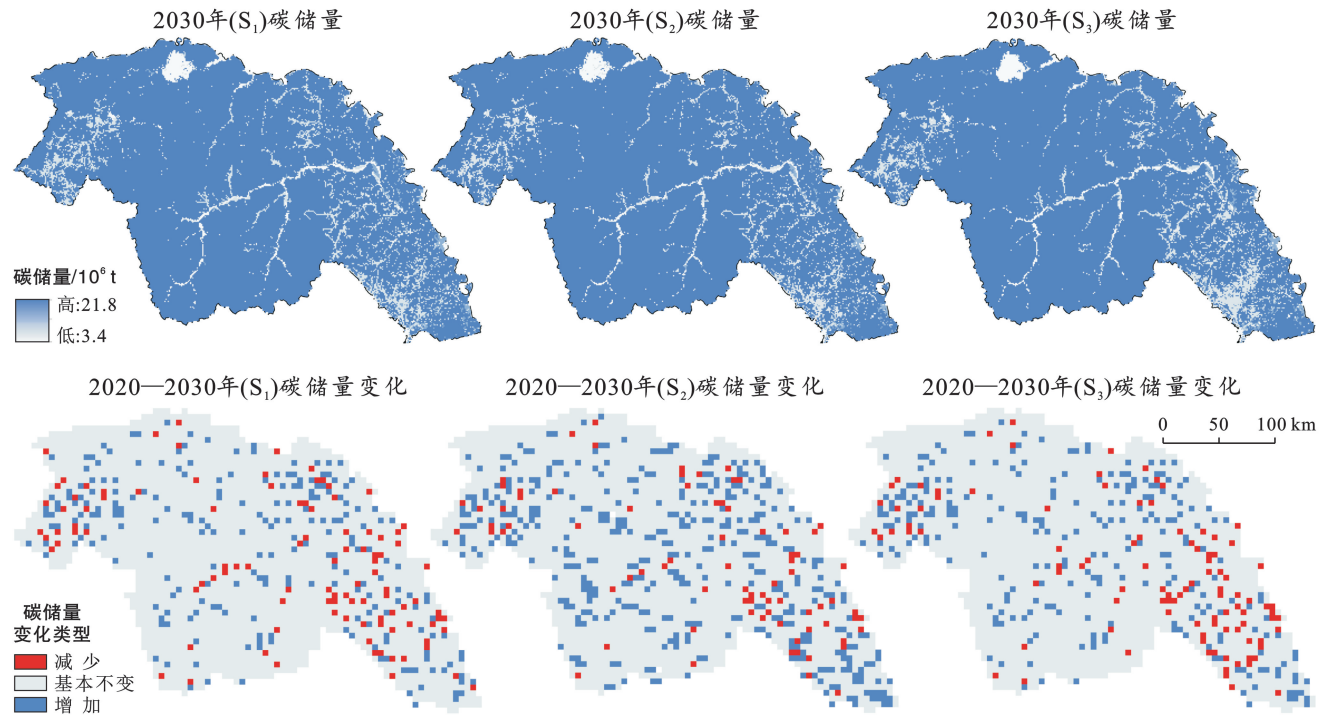


图 5 2030 年黑龙江省大兴安岭地区多情景碳储量空间分布及变化

Fig.5 Spatial distribution and change of carbon stocks under multiple scenarios in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province in 2030

3.3 大兴安岭蓝绿空间对碳储量的主要驱动地类验证

3.3.1 蓝绿空间与碳储量的空间相关性分析 为验证碳储量高值分布区的蓝绿空间聚集情况, 用双变量空间自相关法分析土地利用强度和碳储量的空间相关性, 结果见图 6。5 期数据均通过显著性检验 ($p < 0.05, z > 1.96$), 表现为 95% 置信度的明显聚类特征, 双变量 Moran's I 指数均 < 0 , 分别为 -0.2693 , -0.2374 , -0.2498 , -0.2591 , -0.2322 , 证明存在空间负相关, 且结果显著, 即低—高聚集现象显著存在。

低用地强度定义为蓝绿空间的聚集, 以林地、草地和水域聚集为主(图 6)(图 3 中表明未利用地极易向蓝绿空间转化, 故不作考虑)。研究时段内均以低—高聚集最为显著, 蓝绿空间多集中在南侧大兴安岭山脉附近, 形成黑龙江大兴安岭地区的“碳储高值保障带”, 研究区整体国土空间开发程度较低, 现存植被生长发育状态良好, 碳储量增长趋势有长期保障。高一高聚集呈散点分布, 且多集中在低—高聚集的周围, 表明该区域虽受人为活动影响导致城市化水平相对较高, 但若对蓝绿空间管控合理, 其对周边碳储量增长仍起一定保护作用。高一低聚集现象出现在林

地、草地和水域面积所占比例较小、开发程度和蓝绿空间破碎化程度较高的东侧。综上所述, 整体结构特点为低—高聚集的半包围式, 蓝绿空间聚集程度与碳储量呈显著正相关, 林地、草地和水域分布对高碳储量聚集作用明显。

3.3.2 蓝绿空间对碳储量变化的驱动分析 基于蓝绿空间中林地、草地和水域分布对高碳储量聚集作用明显, 分析 3 种地类面积占比与碳储量变化的数值相关性, 并量化各地类驱动力, 验证前文假设是否成立, 即林地和草地为碳储量变化的主导地类。

将各地类与碳储量变化对比(图 7), 初步判断“林草叠加比例”与碳储量波动可能存在一致性, 利用 Pearson's r 进一步确认两者数值波动是否存在共性。在下限为 0.864, 上限为 0.942 的 95% 置信区间中, 进行正态性分析(表 8), 结果表示皮尔逊相关系数为 0.897, 呈正相关; $p = 0.013$, 符合 $p < 0.05$, 呈显著。经验证, 林地和草地占比与碳储量波动呈显著正相关。地理探测器分析各地类对碳储量变化的驱动力(图 7), $p < 0.05$ 通过显著性检验, 各地类因子按决定力 q 值依次为林地(0.8973) > 草地(0.8142) > 水

域(0.759 8) > 耕地(0.673 7) > 未利用地(0.548 7) > 建设用地(0.329 4)。因子探测结果可知影响碳储量分布的主导地类依次为林地和草地,其中林地贡献率最高,达0.897 3,其次是草地为 0.814 2。交互产生作用最大的为林地∩草地(0.915 1),说明研究区“林草交

互”的分布及面积增减,势必影响区域碳储量大幅变化。

综上所述,充分验证黑龙江大兴安岭地区蓝绿空间与碳储量分布呈显著正相关,其中林地和草地分别为碳储量的第一和第二驱动地类,即前文假设成立。

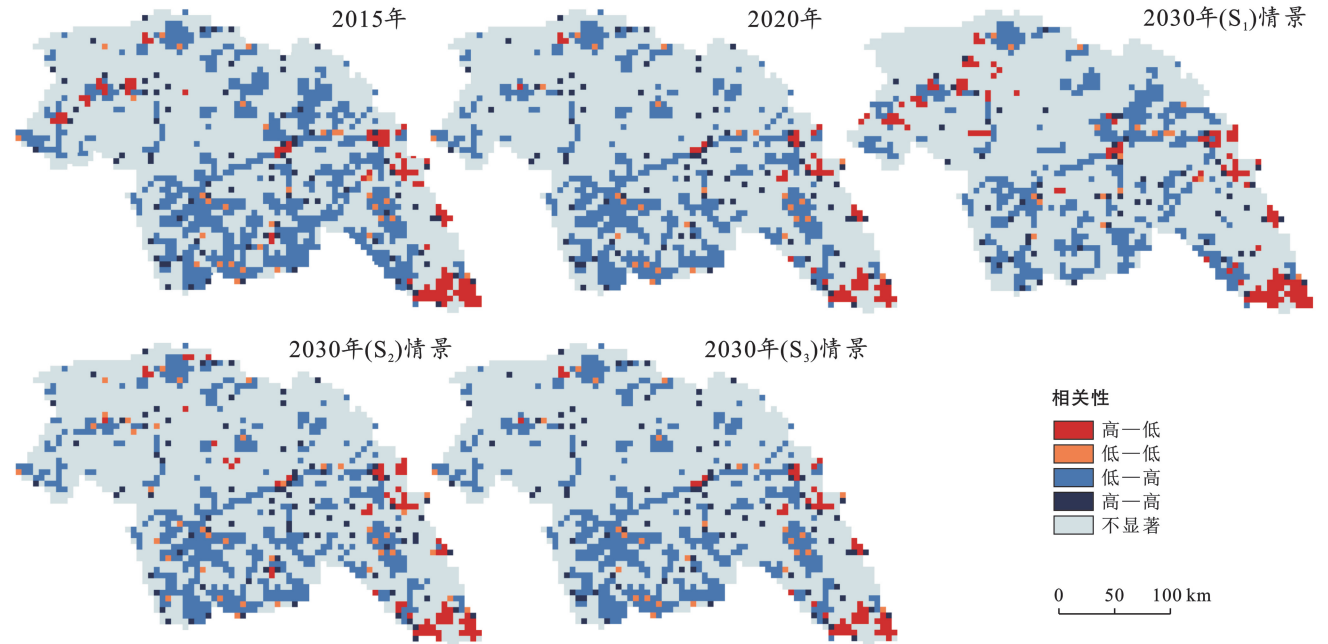


图 6 2015—2030 年黑龙江省大兴安岭地区双变量空间自相关分析

Fig.6 Bivariate spatial autocorrelation analysis in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2030

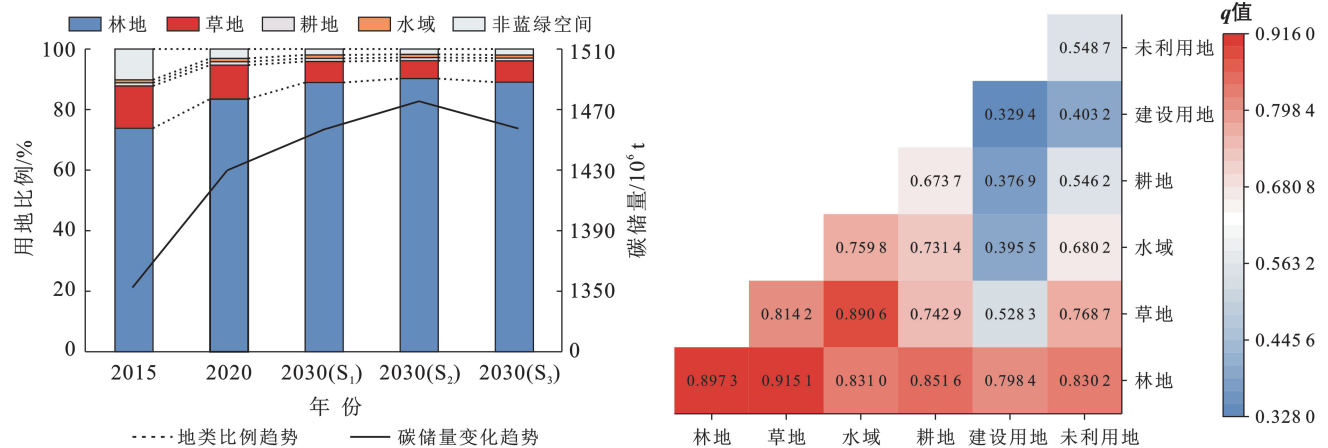


图 7 蓝绿空间比例与碳储量变化趋势及各地类交互作用热力图

Fig.7 Trend of spatial proportion of blue and green space and carbon storage and thermal maps of interaction between different classes

表 8 林地、草地总面积比例及碳储量相关性

Table 8 Correlation between the total area of forest land and grassland and carbon storage

| 项目 | 偏度/ 标准误差 | 峰度/ 标准误差 | 科尔莫哥洛夫— 斯米诺夫(V) ^a | 夏皮洛— 威尔克 | 皮尔逊 相关系数 | Sig 值(双尾) |
|-------------------------|-------------|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 蓝绿空间面积比例/% | 0.612 | 0.490 | 0.200 * | 0.523 | 0.897 ** | 0.013 |
| 年总碳储量/10 ⁶ t | 1.321 | 0.408 | 0.200 * | 0.384 | | |

注:正态检验显著性 * .真显著性的下限;皮尔逊相关性 * * .在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

4 讨论与结论

4.1 讨论

黑龙江大兴安岭地区是紧抓“双碳”机遇的重要森林生态功能区,本研究量化蓝绿空间对陆地生态系统碳储量的影响,验证其主导地类,明确碳中和规划重点。2015—2030 年研究区碳储量与蓝绿空间持续增加,南侧依附大兴安岭山脉形成黑龙江省重要的生态屏障区及水源涵养区,因天然次生林占绝大部分,“天保工程”对现存林地质量的修复及有效提升是碳储量大幅增加的主要原因,这与陈科屹等^[23]研究结果相似。但与曲琛等^[32]的研究结果有所差异,可能是由于研究年份不同导致,天然林保护早期,草地转化为林地,碳储量减少,初生林地处于低碳储提供阶段,随树龄增长,碳储量开始稳步增加,但仍小于 2010—2015 年减少部分,故 2010—2020 年研究区碳储量呈下降状态。

研究发现,该地区东低态势的碳储量分布,与蓝绿空间中林地、草地和水域聚集程度呈显著正相关,其中林地与草地为第一、第二驱动地类,“林草交互”主导研究区碳储量变化。林彤等^[9]认为非蓝绿空间对高碳密度林地和草地的侵占,是区域碳储量降低的显著因素。周汝波等^[33]同样认为区域内林草的转出为碳储量减少的重要原因,应对高碳储区域的林地和草地转出进行重点管控。以上研究与本文结论高度一致,均肯定林地和草地对碳储量变化的贡献度。在情景模拟设置基本相同的情况下,本文与邵壮等^[34]均预测 2030 年城镇快速发展较自然增长情景的碳储增加量更多,但与部分研究出现分歧,雒舒琪等^[20]认为城镇发展会阻碍碳储量增长,结果差异可能为是否考虑城镇发展对生态型用地的贡献所造成。

本研究在区政府规划基础上,选取与现行发展状况相似的研究区进行数据参考,耦合 PLUS 和 InVEST 模型,量化蓝绿空间对碳储量的影响,从新思路确定驱动其变化的主导地类,明确“双碳”政策规划重点。然而仍具有一定不确定性,首先,未来情景设置中,应在蓝绿空间保护基础上适当辅以城镇发展策略,进一步明确城镇发展对碳储量增加的影响;其次,碳密度虽优先选择实测数据,但研究时段和测量方法等因素仍会导致一定偏差,今后应尽量以连续近年实测为主,使碳储量计算更准确;最后,本文虽探究蓝绿空间各地类对碳储量的驱动影响,判断碳中和规划下的重点保护地类,但尚未与生态学指数紧密结合,未来如何利用生态学景观连通性量化蓝绿空间对碳储量的影响,对城市用地进行更精准的科学管控,将是

今后研究重点。

4.2 结论

本文基于 PLUS-InVEST 模型,在验证驱动因子适宜性基础上,提取 2015,2020 年黑龙江省大兴安岭地区蓝绿空间用地数据,模拟 2030 年多情景土地利用格局变化,量化并验证蓝绿空间对碳储量的驱动程度及主导地类。

(1) 研究时段内蓝绿空间占比持续增长,蓝绿空间保护情景下的面积变化最为显著,占增量的 98.26%,其中非蓝绿空间向林地转化为主,集中分布在北西南 3 侧,林地、草地和水域占蓝绿空间构成的 85%以上,3 种情景下林地转入比例均超蓝绿空间转入的 60%,呈绝对优势,草地次之。

(2) 碳储量变化稳步增长,与蓝绿空间波动基本一致,2015—2020 年蓝绿空间占碳储量总增长的 96.52%,以非蓝绿空间向林地和草地转入为主导的变化格局已基本形成,2030 年 3 种情景分别为 1.4594×10^9 t, 1.4831×10^9 t 和 1.4647×10^9 t,林地、耕地和草地的大面积增长使蓝绿空间保护情景中的碳储量增加最显著,持续呈“北南西侧高,东侧低”的特点。

(3) 南侧蓝绿空间高聚集区持续为核心碳储区,林地、草地和水域聚集程度与碳储量呈显著正相关,即越聚集,碳储量越高,其中林地和草地为碳储量变化的主导地类,林地为第一驱动地类。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Fan, Zhan Jinyan, Zhang Qian, et al. Impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101:195-203.
- [2] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas [J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(2):293-301.
- [3] 张平平,李艳红,殷浩然,等.中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5):1183-1197.
Zhang Pingping, Li Yanhong, Yin Haoran, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5):1183-1197.
- [4] Li Zuzheng, Cheng Xiaoqin, Han Hairong. Future impacts of land use change on ecosystem services under different scenarios in the ecological conservation area, Beijing, China [J]. *Forests*, 2020, 11(5):584.
- [5] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J]. *生态学报*,

- 2022,42(6):2265-2280.
- Zhang Bin, Li Lu, Xia Qiuyue, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of "three lines": a case study of Wuhan City circle [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(6):2265-2280.
- [6] 伍丹,朱康文,张晟,等.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J].*三峡生态环境监测*, 2022,7(2):85-96.
- Wu Dan, Zhu Kangwen, Zhang Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in chengdu-chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022,7(2):85-96.
- [7] 张鹏,李良涛,苏玉姣等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J].*水土保持通报*, 2023,43(03):338-348.
- Zhang Peng, Li Liangtao, Su Yuzheng, et al. The research on the distribution of carbon reserves in Handan City based on Plus and Invest models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(03):338-348.
- [8] 如克亚·热合曼,阿里木江·卡斯木,希丽娜依·多来提,等.天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J].*中国环境科学*, 2022,42(12):5905-5917.
- Reheman·Rukeya, Kasimu·Alimujiang, Duolat·Xilinay, et al. Temporal and spatial variation and prediction of carbon storage in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(12):5905-5917.
- [9] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测:以广东省为例[J].*中国环境科学*, 2022,42(10):4827-4839.
- Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: a case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4827-4839.
- [10] Taylor L, Hochuli D F. Defining greenspace: multiple uses across multiple disciplines [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017,158:25-38.
- [11] 许浩,金婷,刘伟.苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022,46(1):219-226.
- Xu Hao, Jin Ting, Liu Wei. Study on the scale and landscape pattern evolution characteristics of blue-green space in Suzhou-Wuxi-Changzhou metropolitan area, China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022,46(1):219-226.
- [12] Wang Haoying, Hu Yunfeng, Tang Li, et al. Distribution of urban blue and green space in Beijing and its influence factors [J]. *Sustainability*, 2020,12(6):2252.
- [13] Zhao Chunlei, Qian Shuan, Meng Chengzhen, et al. Blue-green space changes of Baiyangdian wetland in Xiong'an new area, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2022,2022:4873393.
- [14] 殷利华,杭天,徐亚如.武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究[J].*南方建筑*, 2020(3):41-48.
- Yin Lihua, Hang Tian, Xu Yaru. Research on carbon sink performance of blue-green landscape spaces in the Wuhan garden expo park [J]. *South Architecture*, 2020(3):41-48.
- [15] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等.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*, 2018,38(12):4678-4686.
- Zhang Chunhua, Wang Liyuan, Song Qianwei, et al. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013 [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(12):4678-4686.
- [16] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J].*水土保持通报*, 2023,43(1):378-387.
- Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):378-387.
- [17] 石晶,石培基,王梓洋,等.基于 PLUS-InVEST 模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J/OL].*环境科学*.<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202302222>.
- Shi Jing, Shi Peiji, Wang Ziyang, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiuquan City based on PLUS-InVEST model [J/OL]. *Environmental Science*. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202302222>.
- [18] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021,85:101569.
- [19] 丁岳,王柳柱,桂峰,等.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*, 2023,44(6):3343-3352.
- Ding Yue, Wang Liuzhu, Gui Feng, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay area based on InVEST and PLUS models [J]. *Environmental Science*, 2023,44(6):3343-3352.
- [20] 雒舒琪,胡晓萌,孙媛,等.耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2023,31(2):300-314.
- Luo Shuqi, Hu Xiaomeng, Sun Yuan, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage

- based on coupled Plus-Invest model [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2):300-314.
- [21] 新华社. 河北雄安新区规划纲要[EB/OL]. (2018-04-21) [2023-06-01]. http://www.xiongan.gov.cn/2018-04/21/c_129855813.htm
Xinhua News Agency. Planning outline of Xiong' an New Area in Hebei[EB/OL]. (2018-04-21)[2023-06-01]. http://www.xiongan.gov.cn/2018-04/21/c_129855813.htm
- [22] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
Wang Xu, Ma Bowen, Li Dan, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1):230-242.
- [23] 陈科屹, 王建军, 何友均, 等. 黑龙江大兴安岭重点国有林区森林碳储量及固碳潜力评估[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9):1725-1734.
Chen Keyi, Wang Jianjun, He Youjun, et al. Estimations of forest carbon storage and carbon sequestration potential of key state-owned forest region in Daxing' anling, Heilongjiang Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9):1725-1734.
- [24] 郭树平. 黑龙江省碳储量及碳汇潜力分析[J]. *森林工程*, 2011, 27(3):9-11.
Guo Shuping. Analysis on carbon stock and potential carbon sequestration in Heilongjiang Province [J]. *Forest Engineering*, 2011, 27(3):9-11.
- [25] 李慧颖. 基于遥感和 InVEST 模型的辽宁省退耕还林工程生态效应评估[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [26] 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. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model [J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3):397-409.
- [27] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4):491-498.
Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4):491-498.
- [28] 李冰, 周兴, 陈海萍. 2010—2019 年中国乡村振兴与土地可持续利用的耦合协调时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5):247-255.
Li Bing, Zhou Xing, Chen Haiping. Spatio-temporal characteristics of coupling coordination between rural revitalization and sustainable land use in China during 2010—2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):247-255.
- [29] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 等. 近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(8):2555-2566.
Han Zenglin, Meng Qiqi, Yan Xiaolu, et al. Spatial and temporal relationships between land use intensity and the value of Ecosystem Services in northern Liaodong Bay over the past 30 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8):2555-2566.
- [30] 杨丰玮, 崔秀萍, 赵冰洁, 等. 基于 Pearson 相关系数的西部城市群土地演变与社会经济发展研究[J]. *自然资源情报*, 2022(12):22-29.
Yang Fengwei, Cui Xiuping, Zhao Bingjie, et al. Study on land evolution and social-economic development in western urban agglomeration based on Pearson correlation coefficient [J]. *Natural Resources Information*, 2022(12):22-29.
- [31] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(10):4566-4577.
Gong Cang, Wang Liang, Wang Shunxiang, et al. Spatial differentiation and influencing factor analysis of soil heavy metal content at town level based on geographic detector [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10):4566-4577.
- [32] 曲琛, 李文, 徐嘉等. 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*, 2023(5):194-203.
Qu Chen, Li Wen, Xu Jia, et al. Potential impact of black land conservation and utilization on carbon storage in Heilongjiang[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023(5):194-203.
- [33] 周汝波, 林媚珍, 吴卓, 等. 珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J]. *生态科学*, 2018, 37(6):175-183.
Zhou Rubo, Lin Meizhen, Wu Zhuo, et al. Responses of ecosystem carbon stocks to land use change on the west side of the Pearl River [J]. *Ecological Science*, PLUS-InVEST 模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 2018, 37(6):175-183.
- [34] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *生态学报*, 2022, 42(23):9456-9469.
Shao Zhuang, Chen Ran, Zhao Jing, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23):9456-9469.