

黑龙江黑土地保护利用对碳储量的潜在影响

曲琛¹, 李文^{1*}, 徐嘉¹, 尚禹含²

(1. 东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088)

摘要:基于2000—2020年黑龙江省土地利用数据,利用CA-Markov模型模拟2030年黑土地保护利用情景,采用InVEST模型测算不同情景下的碳储量时空变化差异,并耦合分析景观生态风险响应。结果表明:1)黑龙江省2030年黑土地保护利用情景相较于自然发展情景的耕地被占用情况得到有效缓解,耕地显著增加,林地减幅放缓,建设用地也得到有效管控。2)至2030年,自然发展情景和黑土地保护利用情景下的碳储量分别为 $7\,629.49 \times 10^6$ 、 $7\,759.75 \times 10^6$ t,黑土地保护利用将减少 130.26×10^6 t的碳损失。3)在黑土地保护利用情景下,建设用地合理扩张和未利用地有效利用,使碳储量面状减少区域大幅缩减,耕地的转入也使省域内出现大量碳储量点状增加区域。4)生态风险与林地、草地、建设用地和未利用地碳储量间呈负相关,与耕地、水域碳储量呈正相关,未来应充分考虑各地类占比和分布,以保障区域生态安全。

关键词:碳储量;黑土地;土地利用变化;景观生态风险;黑龙江省

中图分类号:S154.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0194-10

Potential Impact of Black Land Conservation and Utilization on Carbon Storage in Heilongjiang Province

QU Chen¹, LI Wen^{1*}, XU Jia¹, SHANG Yu-han²

(1. College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. China Jingye Engineering Corporation Ltd, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the land use data of Heilongjiang Province from 2000 to 2020, the CA-Markov model was used to simulate the black land conservation and utilization scenario in 2030. The InVEST model was used to calculate the temporal and spatial variations of carbon storage under different scenarios, and the ecological risk response of landscape was analyzed. The results showed that 1) compared with the natural development scenario, the occupation of arable land was effectively alleviated in the black land protection and utilization scenario of the province in 2030, with a significant increase of arable land, a slower reduction of woodland, and an effective control of construction land. 2) By 2030, the carbon storage under natural development scenario and black land conservation scenario would be $7\,629.49 \times 10^6$ and $7\,759.75 \times 10^6$ t, respectively, and the black land conservation scenario would reduce the carbon loss by 130.26×10^6 t. 3) Under the scenario of black land protection and utilization, the rational expansion of construction land and the effective utilization of unused land greatly reduced the area of carbon storage surface reduction, and the transfer of cultivated land also resulted in a large number of areas of carbon storage point increase within the province. 4) Ecological risk was negatively correlated with carbon storage of woodland, grassland, built-up land and unused land, and positively correlated with carbon storage of cultivated land and water area. In the future, the proportion and distribution of different types should be fully considered to ensure regional eco-

收稿日期:2022-06-13 修回日期:2022-10-17

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导性项目(LH2022E001);国家自然科学基金(42171246)。

第一作者:曲琛。研究方向:大地景观规划与生态修复。E-mail:939464304@qq.com

*通信作者:李文,副教授,博士生导师。研究方向:城市生态修复与规划。E-mail:liwen@nefu.edu.cn

logical security.

Key words: carbon storage; black soil; land use/cover change; landscape ecological risk; Heilongjiang Province

陆地生态系统碳储量对于缓解气候变化至关重要^[1]。土地利用覆被变化(land use and cover changes, LUCC)通过改变生态系统的时空格局和功能进而影响碳循环过程^[2]。近年来,诸多学者对LUCC与碳储量和生态系统功能状态的关系开展了大量研究^[3-4],这些研究涵盖了政策保护、工程影响等多种角度,张逸如等^[5]结合森林资源清查数据,采用生物量加权平均法测算了天然林保护工程近20年来对森林植被碳储量的影响。邓元杰等^[6]耦合InVEST模型和FLUS模型评估了退耕还林还草工程影响下黄土高原生态系统碳储存服务能力的变化,并预测了未来4种不同实施情景下的碳汇效益。上述研究实现了对生态系统碳储量的动态评估,但在情景设置中缺乏已有决策对未来土地利用变化的约束,同时忽略了由土地利用变化同时引发的其他生态系统状态响应。在区域尺度碳储量的估算方法中,生物量转换法和遥感估算法多应用于特定生态系统如森林^[5]、草地^[7]等的碳密度测算,而较难体现区域碳储量的整体状态。作为模型模拟方法,InVEST模型为碳储量估算提供了一种直观、可靠的方式,在区域碳储量模拟与评估中应用广泛^[8],部分研究人员将InVEST模型与CA-Markov、PLUS等土地利用预测模型相结合^[3,4,9],以评估不同措施在未来情景下产生的影响。

黑龙江省黑土区范围涉及全省,黑土资源有机质含量高,固碳潜力大。为了有效保护利用黑土地,2021年《黑龙江省黑土地保护利用条例》表决通过,对省域范围黑土地将实施严格用途管制。目前,关注于黑龙江省生态系统碳储量和固碳能力的研究较多,如对森林^[10]、农田^[11]的生物量和土壤碳库的测算,表征了各土地利用类型在碳汇方面的能力,但针对黑龙江省土地利用变化引发碳储量变化相关研究尚未见报道。黑土地保护利用将改变土地利用方式,以驱动土地利用数量和结构变化,对生态系统碳储量与固碳功能影响显著的同时也引发生态风险的响应。土地利用数量变化决定了生态系统碳储量的质量和空间分布格局^[12],而生态风险时空分布与土地利用结构及其强度关系密切^[13]。目前已有区域生态系统服务与生态风险的关联研究大多聚焦在应用价值当量法测算生态系统服务综合价值^[14-15],而对碳储量等特定生态服务类型的关注较为有限^[16],对各地类碳储量与区域景观生态风险关系的分析也

尚未见报道。本研究应用InVEST模型分析2000—2020年黑龙江省碳储量的动态特征,并耦合CA-Markov模型对比测算未来情景下碳储量的时空差异,探究黑土地管控的潜在固碳效益,并实现与景观生态风险的耦合评价,以期为黑龙江省国土空间优化与安全管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑龙江省($43^{\circ}26' - 53^{\circ}33'N$, $121^{\circ}11' - 135^{\circ}05'E$),是我国最北端以及陆域最东端的省级行政区,辖区包括12个地级市和大兴安岭地区,总面积47.3万 km^2 。黑土地遍及耕地、林草地、湿地、湖泊等范围,黑土资源在全省分布广泛,土壤有机质含量丰富(图1)。

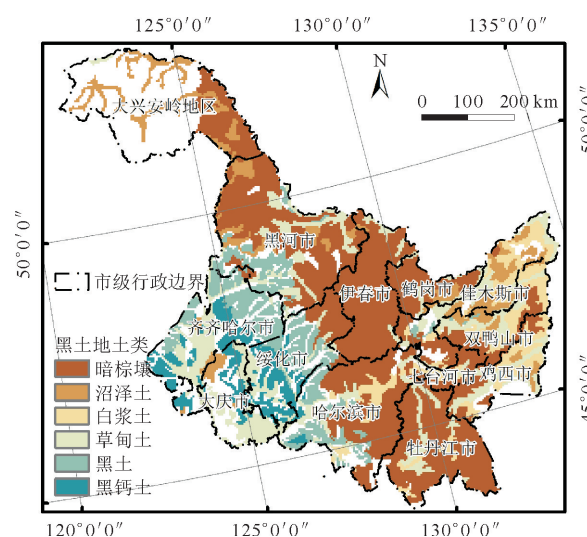


图1 研究区地理位置及黑土资源分布

Fig. 1 Geographical location and distribution map of black soil resources in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 所研究数据主要包括:黑龙江省土地利用覆被(LUCC)数据、行政边界矢量数据、数字高程模型(DEM)数据、平均气温空间插值数据、年降水量空间插值数据,均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。土地利用数据年份为2000、2010和2020年,依据LUCC分类体系将土地利用覆被数据中22个二级地类合并为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6大类,空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。在ArcGIS10.8

中利用 DEM 数据得到坡度栅格数据,空间分辨率为 90 m×90 m。中国黑土分布数据、道路分布数据均来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);使用黑龙江省行政边界数据裁剪,得到黑龙江省黑土分布数据。人口和 GDP 数据来源于省统计年鉴(<http://tjj.hlj.gov.cn>)。道路分布数据包括国道、省道与高速公路,数据格式为矢量。不同地类的碳密度数据来源于对前人研究成果的参考^[10,19-23]。

1.2.2 基于 CA-Markov 模型的土地利用预测
在 IDRISI17.0 软件中应用 CA-Markov 模型实现情景设置和模拟的具体步骤如下。

1)根据黑龙江省 2000、2020 年的土地利用数据,获得转移概率和转移面积矩阵。

2)利用 MCE 模型建立黑龙江省土地利用变化适应性图集。设置自然发展和黑土地保护利用 2 种土地利用变化情景,借鉴前人研究成果^[17-18],考虑到数据可获取性和影响因素全面性,选取了高程、坡度、气温、降水在内的 4 项自然驱动因素,包括人口密度、地均 GDP、距国道、省道及高速路距离的 5 项社会驱动因素,并输入限制性因子。自然发展情景(Q1)按照 2000—2020 年黑龙江省土地利用变化趋势预测 2030 年土地利用格局。黑土地保护利用情景(Q2)根据《黑龙江省黑土地保护利用条例》中的管控要求,黑土区内:其他地类不能转换成建设用地、耕地不能转化成其他地类;耕地坡度>15°为禁止开发区域;坡度>15°的耕地将转化为林地、草地,不可转化为其他地类;建设用地转化占用黑土地受

到严格控制。

3)基于 2010 年 LUCC、转移概率和面积矩阵、适宜性规则图集,采用 5×5 的 CA 滤波器迭代 10 次,模拟得到 2020 年不同情景下黑龙江省的 LUCC,并采用 Kappa 指数检验模拟精度,得到自然发展和黑土地保护利用情景的 Kappa 系数分别为 0.85 和 0.79,表明模拟效果较好。

4)基于通过验证的规则模拟获得自然发展情景及黑土地保护利用情景下 2030 年黑龙江省 LUCC。

1.2.3 基于 InVEST 模型的碳储量服务模拟 采用 InVEST3.9.0 模型碳储量(carbon storage and sequestration)模块将生态系统分类为植被地上碳库、植被地下碳库、土壤有机碳库和死亡有机质碳库。碳储量计算公式如下。

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

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

式中: i 为第 i 种土地利用类型; C_i 为土地利用类型 i 的总碳密度; $C_{i,above}$ 为土地利用类型 i 的植被地上部分碳密度; $C_{i,below}$ 为土地利用类型 i 的植被地下部分碳密度; $C_{i,soil}$ 为土地利用类型 i 的土壤有机碳密度; $C_{i,dead}$ 为土地利用类型 i 的死亡有机质碳密度; C_{total} 为总碳储量; S_i 为土地利用类型 i 的面积。

碳密度数据的获取基于前人研究成果^[10,19-23](表 1),优先选用黑龙江省内实测数据,若数据全面性不足,则使用邻近黑龙江省的实测或文献整理数据,因黑土区和非黑土区碳密度数据难以区分,对同一地类的碳密度数据取相关文献的平均值。

表 1 生物量碳密度和土壤碳密度值

Table 1 Biomass carbon density and soil carbon density

(t·hm⁻²)

土地利用类型	地上生物量碳密度		地下生物量碳密度		土壤碳密度		死亡有机物碳密度	
	碳密度	研究范围	碳密度	研究范围	碳密度	研究范围	碳密度	研究范围
耕地	10.10	寒温带 ^[19]	26.80	黑龙江 ^[23]	147.00	黑龙江 ^[21]	0.00	—
林地	11.46	黑龙江 ^[10]	31.32	黑龙江 ^[10]	173.90	黑龙江 ^[21]	2.25	东北
草地	7.96	黑龙江 ^[20]	51.00	黑龙江 ^[20]	74.60	黑龙江 ^[21]	2.84	东北
水域	8.72	寒温带 ^[19]	2.21	东北 ^[22]	23.01	黑龙江 ^[21]	0.00	—
建设用地	8.75	寒温带 ^[19]	4.39	东北 ^[22]	27.78	黑龙江 ^[21]	1.16	东北
未利用地	10.03	寒温带 ^[19]	0.00	—	44.79	黑龙江 ^[21]	0.00	—

1.2.4 景观生态风险评价模型的构建 为实现生态风险的空间化分析,引入景观风险指数(ecology risks index,ERI)^[24],将研究区按 20 km×20 km 的矩形网格进行划分,得到 1 273 个生态风险小区。利用自然断点法将 2030 年景观生态风险数据划分出低风险(<0.010)、较低风险(0.010~0.012)、中风险(0.012~0.013)、较高风险(0.013~0.015)、高风险(>0.015)5 种等级带。景观生态风险指数计

算公式^[25-27]如下。

$$E_{RI} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i I_i R_i}{A_n} \quad (4)$$

式中: n 为生态风险小区内景观类型数量; A_i 为景观类型 i 的面积; A_n 为生态风险小区总面积; R_i 为景观类型 i 的脆弱度指数,参考其他相关研究^[26-27]将建设用地、水域、草地、林地、未利用地、耕地的脆弱度指数 R_i 经过归一化处理后分别为 0.048、

0.095、0.143、0.191、0.238 和 0.286。 I_i 为景观类型 i 的干扰度指数,其公式为

$$I_i = a \times C_i + b \times F_i + c \times D_i \quad (4)$$

$$C_i = n_i / A_i \quad (5)$$

$$F_i = \sqrt{n_i \times A_n} / 2 \times A_i \quad (6)$$

$$D_i = 0.4L_i + 0.6P_i \quad (7)$$

式中: C_i 为景观破碎度指数; F_i 为景观分离度指数; D_i 为景观优势度指数; n_i 为景观类型 i 的斑块数; A_i 为景观类型 i 的总面积; L_i 为景观类型 i 的斑块数/斑块总数; P_i 为景观类型 i 的斑块面积/总面积; a 、 b 和 c 分别反应了景观破碎度、分离度和优势度对景观的影响程度,借鉴前人研究成果,将其分别赋予 0.5、0.3 和 0.2 的权重值^[27]。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年黑龙江省土地利用变化特征

2000—2020 年间黑龙江省主要地类为耕地和林地,两者持续占比在 35% 和 40% 以上;而草地、水域、建设用地和未利用地的面积较少,均不足省域总面积的 10%。整体来看,20 a 间,耕地、建设用地和

未利用地面积都在增加,其中未利用地面积增加最大,为 13 398 km²,耕地和建设用地分别增加 11 817 km² 和 2 274 km²,林地、草地和水域的面积减少,分别减少 14 438、9 680 km² 和 3 673 km²。各地类转化面积来看,20 a 间林地转出面积最多,达 43 603 km²,主要是转向耕地,为 16 946 km²。耕地大量转出为林地和草地,分别转出 12 266 km² 和 4 538 km²,主要是受退耕还林还草工程的影响。耕地转入面积最大,为 41 698 km²,建设用地转入面积高达 9 037 km²,来自耕地的面积占 65%,建设用地侵占耕地现象严峻。

2.2 2020—2030 年黑龙江省土地利用变化特征

预测结果表明(图 2),到 2030 年,自然发展情景下林地持续减少,预计较 2020 年减少 25 592 km²,耕地、草地、水域、建设用地和未利用地分别增加 3 168、5 492、246、5 532 km² 和 11 286 km²,其中建设用地增幅最高,达 5.1%。各地类转化方向来看,耕地主要由未利用地转入 7 495 km²,减少的耕地主要转为建设用地,转移面积为 9 895 km²;林地呈减少趋势,主要转变为未利用地,转移面积为

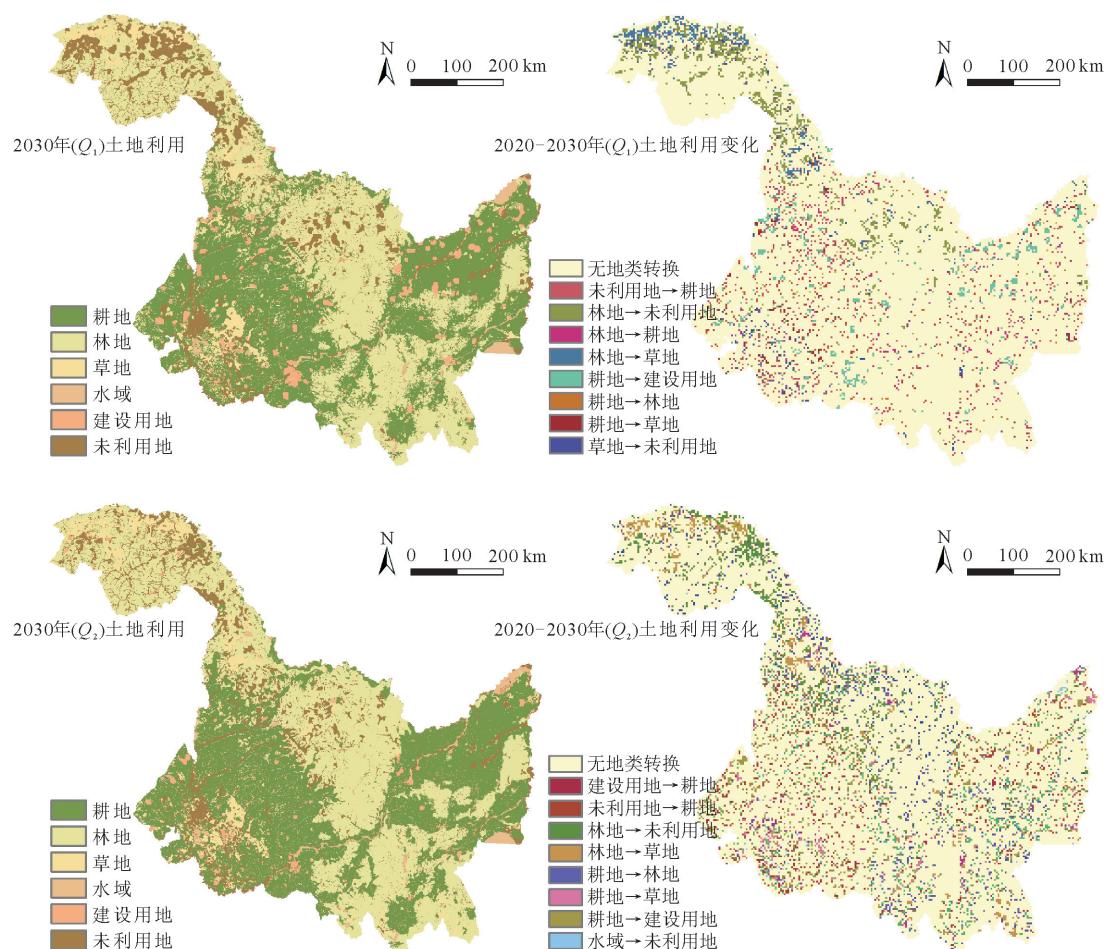


图 2 黑龙江省 2030 年土地利用格局和主要转换

Fig. 2 Land use pattern and main transformation in Heilongjiang Province in 2030

15 944 km²;草地主要由林地转入,主要流向未利用地;建设用地来自耕地的面积占 97.99%,未利用地来自林地的面积占 94.35%。

黑土地保护利用情景下,相较于 2020 年,除林地外其他地类均有所增加,其中耕地、草地和未利用地增加量较多,分别增加 8 204、5 634、8 800 km²;林地主要转变为草地和未利用地,林地总面积较 2020 年减少 22 379 km²;耕地主要转化为林地和建设用地,因大量从林地、建设用地和未利用地转入因此呈增加趋势;草地很少向其他地类转出,但主要由耕地和林地转入,转入面积分别为 3 678、9 219 km²;水域主要转为未利用地,建设用地和未利用地大面积转化成耕地,分别为 6 691 km² 和 7 692 km²。

不同情景下土地利用格局差异较大。黑土地保护利用情景下,耕地、林地占比较自然发展情景分别由 38.91%和 36.85%提升至 39.97%和 37.5%,同时耕地转化为建设用地的面积由 9 895 km² 减少到 6 204 km²。

2.3 2000—2030 年黑龙江省碳储量变化特征

从整体来看,2000、2010 年和 2020 年黑龙江省碳储量分别为 $8\,132.84 \times 10^6$ 、 $8\,171.63 \times 10^6$ t 和 $7\,971.93 \times 10^6$ t,总碳密度分别为 171.94、172.76 t·hm⁻² 和 168.54 t·hm⁻²。20 a 间黑龙江省域范围总碳储量呈先增加再减少的状态,总体减少了 160.91×10^6 t,年均减少 8.05×10^6 t。从不同时期来看,2000—2010 年碳储量增加 38.78×10^6 t,增加率为 0.48%,而 2010—2020 年碳储量大幅减少,净减少量为 199.69×10^6 t,减少率为 2.44%。到 2030 年,自然发展情景下黑龙江省碳储量为 $7\,629.49 \times 10^6$ t,较 2020 年下降 342.44×10^6 t,降幅达 4.3%,总碳密度减少 7.24 t·hm⁻²;而黑土地保护利用情景下的下降趋势有所缓解,更加接近 2020 年的水平,碳储量为 $7\,759.79 \times 10^6$ t,较 2020 年下降 212.18×10^6 t,降幅为 2.66%,总碳密度减少 4.49 t·hm⁻²,说明实施黑土地保护利用措施能大幅减少碳储量的损失。

碳储量的空间格局及变化来看(图 3),2000、2010、2020 年黑龙江省碳储量空间分布整体均呈西北、东南高而东北、西南低的格局,大兴安岭地区、黑河、伊春、哈尔滨和牡丹江市碳储量较高,而齐齐哈尔、大庆、佳木斯和双鸭山市碳储量较低区域范围较大。2000—2010 年碳储量有所增加但空间分布变化不明显,增加区主要在佳木斯、双鸭山、齐齐哈尔、大庆和绥化市呈点状分布。2010—2020 年碳储量有所下降,具体表现为大兴安岭地区、黑河和伊春市内林地转向草地和未利用地,佳木斯市内水域大

量占据林地导致碳储量降低,齐齐哈尔、绥化、哈尔滨、鹤岗和佳木斯市碳储量的增加由点状转为面状分布,其原因主要是未利用地、水域发生向耕地的转变。2030 年自然发展情景下黑龙江省碳储量大体呈东南高,西北低的特征。2020—2030 年碳储量持续减少,其中大兴安岭地区、黑河、伊春、鹤岗、佳木斯和双鸭山市内均有较大面积的减少区域,大多呈面状分布,主要原因为大兴安岭地区、黑河、伊春市内林地大量转化为未利用地,鹤岗和佳木斯市耕地大面积被建设用地占用。在黑土地保护利用情景下,碳储量空间分布与自然发展情景基本相同,但上述不利情况得到有效缓解,特别是大兴安岭地区、黑河、鹤岗和佳木斯市内碳储量降低区域范围明显大幅缩小,且在黑龙江省全域范围内出现大量点状增加区域,其原因主要是各地类发生了向耕地不同程度的转换。

2.4 黑土地保护利用对碳储量的潜在影响

土地利用类型数量变化决定了生态系统碳储量的质量和空间分布格局^[12]。土地利用类型与碳储量关系中(表 2),2020 年林地是最主要的碳库,耕地次之,碳储量分别为 $4\,177.16 \times 10^6$ t 和 $3\,149.69 \times 10^6$ t,2 种地类碳储量约占总数的 92.26%。其次为草地和未利用地,碳储量分别为 299.84×10^6 t 和 232.02×10^6 t,约占总碳储量的 3.78%和 2.92%。水域、建设用地的碳储量最低,分别占总碳储量的 0.47%和 0.57%。由此可见,耕地和林地是黑龙江省碳储量的主要部分。数据显示,过去 20 a 间林地碳储量减少了 316.1×10^6 t,是造成黑龙江省碳损失的最主要原因,即使耕地碳储量升高 217.31×10^6 t,仍无法弥补林地导致的碳损失。2020—2030 年自然发展情景下,林地碳储量仍大幅下降,为 560.28×10^6 t,耕地、草地、建设用地和未利用地的碳储量均有一定程度的提升,分别增加 58.26×10^6 、 74.91×10^6 、 23.28×10^6 t 和 61.87×10^6 t。而黑土地保护利用情景下,耕地碳储量大幅提升,增加量为 150.88×10^6 t,较自然发展情景提高了近 3 倍,且林地碳储量减少量降低为 489.94×10^6 t,表明林地碳储量下降趋势得到有效缓解。

土地利用转换引起碳储量变化(表 3),耕地、林地、建设用地和未利用地之间相互转化是导致 2020—2030 年碳储量剧烈变化的主要原因。到 2030 年,黑龙江省黑土地保护利用情景下碳储量为 $7\,759.75 \times 10^6$ t,高于自然发展情景的 $7\,629.49 \times 10^6$ t,主要原因是 2 种情景中各地类的转换状态不同。黑土地保护利用情景和自然变化情景下,黑龙江省碳储量分别较 2020 年减少了 212.18×10^6 t 和

342.44×10^6 t。自然发展情景中,碳储量的下降主要由耕地转化为建设用地和林地向未利用地的转换所导致,分别为 140.34×10^6 t 和 261.66×10^6 t。其中,建设用地和未利用地向耕地的转换对碳储量增加意义重大,但建设用地和耕地、未利用地和耕地之间的相互转换使得碳增加量与排放量相互抵消。与自然发展情景相比,黑土地保护利用情景下,随着坡耕地退耕还林还草工程的实施,林地、草地由耕地转入的规模有所增加,使碳储量较自然变化情景增加了 19.42×10^6 t;2种情景下耕地面积均呈增加趋势,但黑土地保护利用情景下增幅更大,碳储量增加

150.87×10^6 t,因为黑土区内耕地的转化受到严格限制,其他地类能转化为耕地,而耕地不能发生向其他地类的转化;林地为最大的碳库,其面积缩减趋势较自然发展情景有所缓解,减少了 70.34×10^6 t 碳储量流失;建设用地向耕地转化剧烈,而耕地向建设用地的转化面积大幅减少,使得碳储量增加 83.39×10^6 t,建设用地扩张趋势得到有效遏制,使区域总碳储量增加 0.22×10^6 t,分析其原因为该情景下对建设用地实施严格管控,黑土区内建设用地只能发生向其他用地的转换,其他地类不能转化为建设用地,使农田得到良好保护。

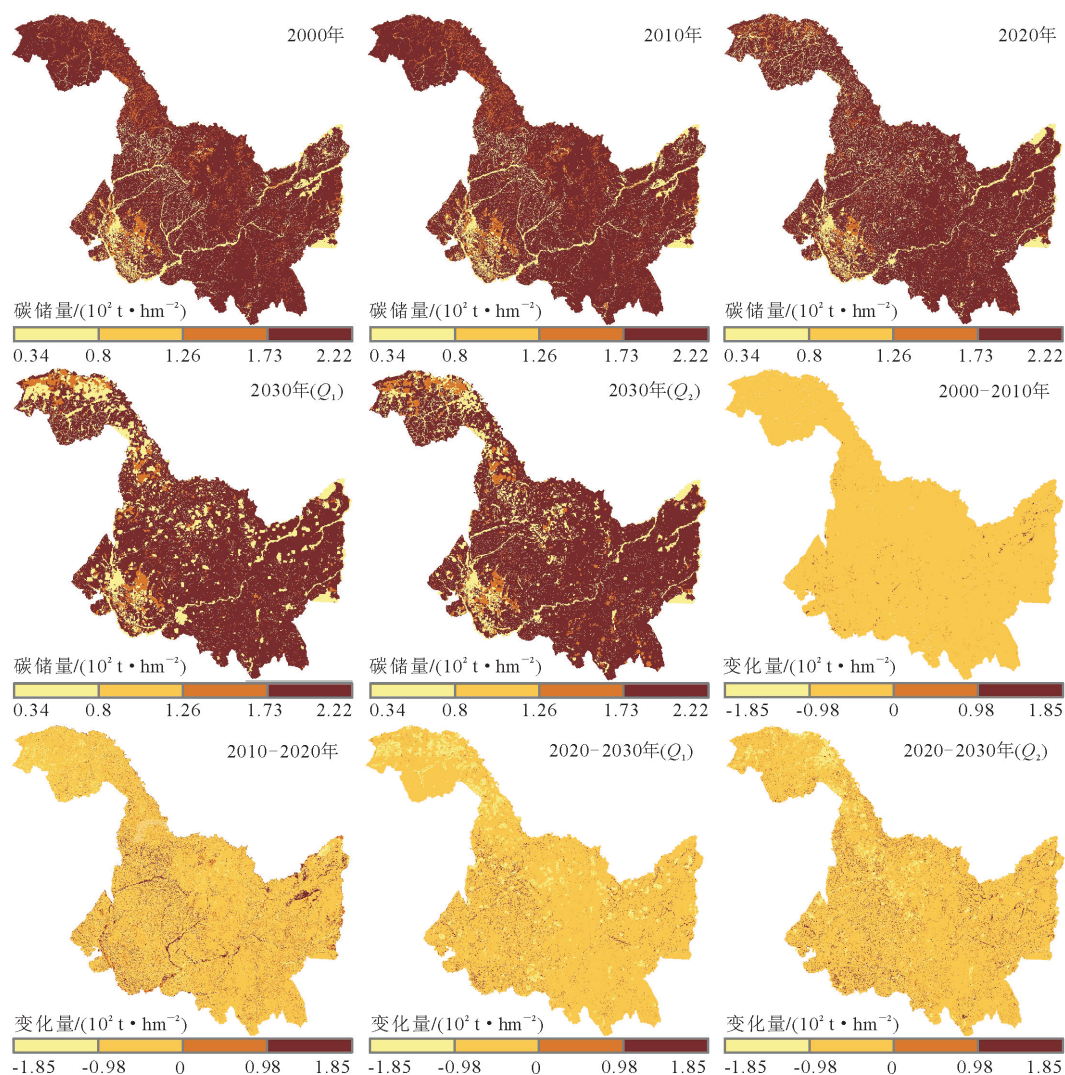


图3 黑龙江省2000—2020年和2030年各情景下碳储量及其变化量的空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of carbon storage and its variation under different scenarios in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 and 2030

2.5 黑土地保护利用生态风险响应及与碳储量的关系

碳储量变化伴随景观生态风险响应(图4),黑土地保护利用情景下低生态风险区面积所占比例较自然发展情景有大幅提升,由8.65%提升至27.24%,中风险区、较高风险区面积所占比例均有

所下降,分别由22.13%、20.7%降至18.58%、18.75%。相较于自然发展情景,黑土地保护利用情景下大兴安岭地区和伊春市生态风险显著降低,低风险区范围大幅扩张,同时齐齐哈尔市西南部高风险区、哈尔滨市中部和牡丹江市东北部区域的较高风险区均有大幅收缩。

根据 2030 年黑土地保护利用情景下黑龙江省景观生态风险等级与各地类碳储量的拟合结果可知(图 5),省域景观生态风险与林地、草地、建设用地和未利用地碳储量呈负相关关系,省域生态风险的降低通常伴随着上述地类碳储量的增加;而省域景观生态风险与耕地、水域碳储量呈现正相关关系,伴随区域生态风险的升高,耕地、水域碳储量也将有所提升。

3 结论与讨论

3.1 结论

黑龙江省主要地类为耕地和林地。2030 年,自然发展情景下黑龙江省林地持续减少,建设用地占用耕地的趋势更为严峻。黑土地保护利用情景下,

林地减幅小于自然发展情景,耕地增加显著,建设用地规模也得到有效管控。

表 2 黑龙江省 2020—2030 年自然发展情景(Q_1)和黑土地保护利用情景(Q_2)下各地类碳储量

Table 2 Carbon reserves under natural development scenario (Q_1) and black land protection and utilization scenario (Q_2) in

Heilongjiang Province from 2020 to 2030					10 ⁶ t
土地利用类型	2020	2030		2020—2030 年	
		Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂
耕地	3 149.69	3 207.95	3 300.57	58.26	150.88
林地	4 177.16	3 616.88	3 687.22	—560.28	—489.94
草地	299.84	374.75	376.69	74.91	76.85
水域	37.10	37.93	38.12	0.84	1.02
建设用地	45.60	68.88	47.18	23.28	1.57
未利用地	232.02	293.89	280.26	61.87	48.24

表 3 黑龙江省 2020—2030 年自然发展情景(Q_1)和黑土地保护利用情景(Q_2)下各地类转化引起的碳储量变化

Table 3 Carbon storage changes caused by category transformation under natural development scenario (Q_1) and black land conservation and utilization scenario (Q_2) in Heilongjiang Province from 2020 to 2030

土地利用类型转移	面积/km ²		碳储量变化/10 ⁶ t		总计/10 ⁶ t	
	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
耕地→林地	1 105	7 389	3.87	25.89	—160.44	—135.89
耕地→草地	3 131	3 678	—14.87	—17.47		
耕地→水域	149	424	—2.23	—6.35		
耕地→建设用地	9 895	6 204	—140.34	—87.98		
耕地→未利用地	532	3 871	—6.87	—49.97		
林地→耕地	5 436	12 364	—19.04	—43.31	—346.05	—377.26
林地→草地	5 979	9 219	—49.34	—76.09		
林地→水域	807	1 202	—14.93	—22.24		
林地→建设用地	61	604	—1.08	—10.68		
林地→未利用地	15 944	13 707	—261.66	—224.94		
草地→耕地	479	2 543	2.28	12.08	—13.19	22.10
草地→林地	979	3 628	8.08	29.94		
草地→水域	38	63	—0.39	—0.65		
草地→建设用地	9	279	—0.08	—2.63		
草地→未利用地	2 827	2 040	—23.07	—16.65		
水域→耕地	77	522	1.15	7.83	3.25	11.53
水域→林地	—	47	—	0.87		
水域→草地	6	51	0.06	0.52		
水域→建设用地	—	111	—	0.09		
水域→未利用地	976	1 063	2.04	2.22		
建设用地→耕地	4 503	6 691	63.86	94.89	64.30	106.58
建设用地→林地	—	492	—	8.69		
建设用地→草地	47	281	0.44	2.65		
建设用地→水域	7	21	—0.01	—0.02		
建设用地→未利用地	—	288	—	0.37		
未利用地→耕地	7 495	7 692	96.74	99.29	108.45	156.70
未利用地→林地	433	3 080	7.11	50.55		
未利用地→草地	657	986	5.36	8.04		
未利用地→水域	280	306	—0.58	—0.64		
未利用地→建设用地	132	420	—0.17	—0.54		

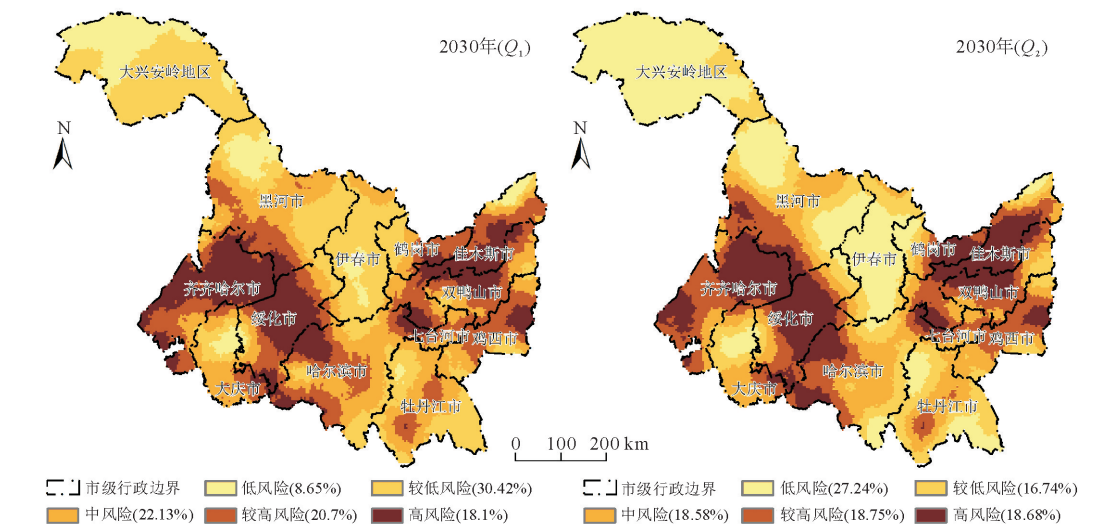


Fig. 4 Pattern response of landscape ecological risk under two scenarios in Heilongjiang Province in 2030

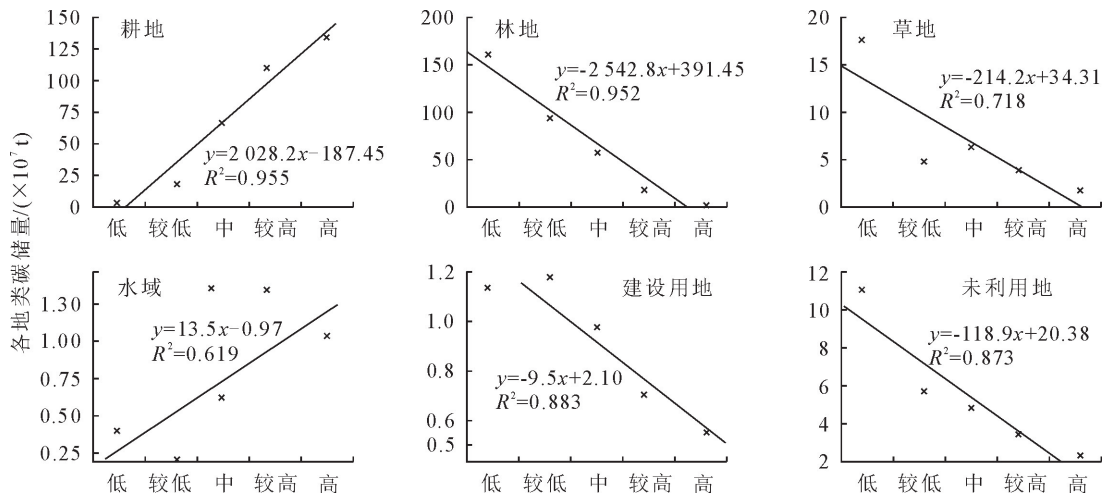


Fig. 5 The relationship between landscape ecological risk and carbon storage in Heilongjiang Province in 2030 under black land conservation and utilization scenario

2000、2010、2020 年黑龙江省碳储量分别为 $8\,132.84 \times 10^6$ 、 $8\,171.63 \times 10^6$ t 和 $7\,971.93 \times 10^6$ t,呈先增加后减少趋势,共减少 160.91×10^6 t,年均减少 8.05×10^6 t。碳储量空间分布整体均呈西北、东南高而东北、西南低的格局。

2030 年,黑土地保护利用情景下碳储量为 $7\,759.75 \times 10^6$ t,高于自然发展情景的 $7\,629.49 \times 10^6$ t,分别较 2020 年减少 212.18×10^6 、 342.44×10^6 t。相较于自然发展情景,黑土地保护利用情景下,大兴安岭地区、黑河、鹤岗和佳木斯市内碳储量面状减少情况得到有效缓解,省域范围内也出现大量点状增加区域。黑土地保护利用措施主要增加了耕地的碳储量并缓解了林地碳储量的损失,有效发挥了固碳效益。

景观生态风险与各地类碳储量间存在显著相关

性,与林地、草地、建设用地和未利用地呈现负相关性,与耕地和水域呈正相关性。

3.2 讨论

情景模拟和效益评估是本次研究的重点,研究表明,黑土地保护利用能有效降低区域碳储量下降幅度,主要原因是耕地、林草地转入面积有大幅提升,上述地类碳密度大于其他用地,因此增加了区域碳储量,这与郝翔翔等^[28]的研究结果相一致。结合黑土地保护利用情景碳储量变化可知,黑龙江省未来应通过限制黑土区内土地流转、未利用地适度合理开发等措施,实施坡耕地退耕,逐步还林还草,推进未利用地转化为耕地、林草地,控制建设用地违规占用耕地,在保护利用黑土地的同时,关注对区域碳储量的增加,尤其是大兴安岭地区、黑河、伊春、鹤岗和佳木斯市碳储量变化显著,开展土地利用调控和

生态修复措施时应重点关注。研究表明,生态风险与各地类碳储量之间具有不同的相关关系,相较于自然发展情景,黑土地保护利用情景下鹤岗市东部和佳木斯市中部景观生态风险的增加,主要是因为建设用度和未利用地向碳密度更高的耕地大量转化,而耕地碳储量与景观生态风险呈正相关关系。林地、草地大量转出为耕地导致了齐齐哈尔市西部景观生态风险的增加。在未来的发展中应严格保护林地、草地,可通过在不适宜耕作区域退耕还林还草以增加二者面积的占比,同时合理利用黑土资源,对耕地实施用途管制,增加碳储量的同时也应注重生态风险的管控。本研究仅初步探讨了景观生态风险等级与各地类碳储量之间的相关关系,未来可通过新方法明晰两变量间的作用过程和影响机理。

碳储量测算的不确定性分析,受数据获取的限制,仅通过文献参考获取了各地类碳密度数据的平均值,实际上,碳密度还与有机质含量相关,黑土区内碳密度普遍大于非黑土区。另一个不确定因素在于 InVEST 模型主要关注大尺度土地变化,忽视了黑土地保护利用过程中侵蚀阻控、肥沃耕层构建等具体措施对土壤质量的提升。未来需要长期调查和大量实测以获得更为详细的数据,并利用各种遥感技术对碳密度的不均匀性加以考虑^[29]。尽管黑土地管控促使建设用地、未利用地向碳密度更高的耕地转化,但由于生物和土壤变化的复杂过程,难以在较短时间内实现碳储量的大幅增加,在制定决策时应充分考虑生态系统服务响应时间的影响。

参考文献:

- [1] IT O, AKIHIK O, NISHIN A, *et al.* Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data[J]. *Polar Science*, 2016, 10(3): 346-355.
- [2] 位盼盼, 咎梅. 伊犁地区土地覆被变化及其对植被碳储量的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4): 158-166.
WEI P P, ZAN M. Changes of land coverage and the impact on vegetation carbon storage in Yili region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 158-166. (in Chinese)
- [3] 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 J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6): 1018-1029. (in Chinese)
- [4] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的广东省碳储量空间关联性及预测[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4827-4839.
LIN T, YANG M Z, WU D F, *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. (in Chinese)
- [5] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5093-5105.
ZHANG Y R, LIU X T, GAO W Q, *et al.* Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the natural forest protection project region for the past 20 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5093-5105. (in Chinese)
- [6] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 826-844.
ZHENG Y J, YAO S B, HOU M Y, *et al.* Assessing the effects of the green for grain program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: a case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(4): 826-844. (in Chinese)
- [7] UMAIR M, KIM D, RAY R L, *et al.* Evaluation of atmospheric and terrestrial effects in the carbon cycle for forest and grassland ecosystems using a remote sensing and modeling approach[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 295: 108187.
- [8] 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 等. 基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J]. *草地学报*, 2021, 29(Sup. 1): 43-51.
LI R W, YE C C, WANG Y, *et al.* Carbon storage estimation and its driving force analysis based on InVEST model in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(Sup. 1): 43-51. (in Chinese)
- [9] ZHAO M, HE Z, DU J, *et al.* Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 29-38.
- [10] 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 C H, WANG L Y, SONG Q W, *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. (in Chinese)
- [11] 吴晓华, 贺萍. 黑龙江省农田生态系统减排增汇研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33(4): 106-112.
WU X H, HE P. Research on reducing carbon emission and enhancing carbon sink of farmland ecosystems in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2021, 33(4): 106-112. (in Chinese)
- [12] 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 P P, LI Y H, YIN H R, *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. (in Chinese)

- [13] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等.黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性——以子午岭区为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1623-1632.
JIN T T,ZHANG Y X,ZHU Y H,*et al.* Spatiotemporal variations of ecosystem service values and landscape ecological risk and their correlation in forest area of Loess Plateau,China: a case study of Ziwuling region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(5):1623-1632. (in Chinese)
- [14] 朱润苗,陈松林.1980-2020年福建省景观生态风险与生态系统服务价值的空间关系[J].应用生态学报,2022,33(6):1599-1607.
ZHU R M,CHEN S L. Spatial relationship between landscape ecological risk and ecosystem service value in Fujian Province,China during 1980-2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(6):1599-1607. (in Chinese)
- [15] 贾艳艳,唐晓岚.长江流域安徽段生态系统服务价值与景观生态风险时空演变及其关联分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2022,46(3):31-40.
JIA Y Y,TANG X L. Spatial-temporal evolution and correlation analyses of ecosystem service values and landscape ecological risks in Anhui section of the Yangtze River basin[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition,2022,46(3):31-40. (in Chinese)
- [16] GONG J,CAO E,XIE Y,*et al.* Integrating ecosystem services and landscape ecological risk into adaptive management: Insights from a western mountain-basin area,China[J]. Journal of Environmental Management,2020,281:111817.
- [17] XING G,JIE W,CHENXI L,*et al.* Land use change simulation and spatial analysis of ecosystem service value in Shijiazhuang under multi-scenarios[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(24):31043-31058.
- [18] 高星,杨刘婉青,李晨曦,等.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].生态学报,2021,41(20):7974-7988.
GAO X,YANGLIU W Q,LI C X,*et al.* Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian basin under the simulated multiple scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(20):7974-7988. (in Chinese)
- [19] 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 X J,LI X,LIANG X,*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. (in Chinese)
- [20] 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 S L,FNAG J Y,HE J S,*et al.* Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. Acta Phytocologica Sinica,2004,28(4):491-498. (in Chinese)
- [21] 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):9-11,6.
GUO S P. Analysis on carbon stock and potential carbon sequestration in Heilongjiang Province[J]. Forest Engineering,2011,27(3):9-11,6. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] CHUAI X,HUANG X,LAI L,*et al.* Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China[J]. Environmental Science and Policy,2013,25:50-61.
- [24] 王俊俊,弓弼.西咸新区景观格局演变及其生态风险分析[J].西北林学院学报,2019,34(2):250-256.
WANG J J,GONG B. Evolution of landscape pattern and ecological risk in Xixian new area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(2):250-256. (in Chinese)
- [25] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].生态学报,2020,40(18):6472-6485.
ZHANG Z W,ZHANG Z Y,WEI H,*et al.* Landscape ecological risk assessment in Manas River basin based on land use change[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(18):6472-6485. (in Chinese)
- [26] 张彪,刘万波,张俊华.基于土地利用变化的三江平原景观生态风险研究[J].国土与自然资源研究,2021(2):53-55.
ZHANG B,LIU W B,ZHANG J H. Landscape ecological risk of the Sanjiang Plain based on land use change[J]. Territory & Natural Resources Study,2021(2):53-55. (in Chinese)
- [27] 孙丽娜,宋戈.松嫩高原黑土区土地利用/覆被变化及其景观生态风险分析[J].水土保持研究,2012,19(1):148-153,58.
SUN L N,SONG G. Land use/cover change and its landscape ecological risk analysis in the black soil region of Songnen High Plain—a case study of Bayan County[J]. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(1):148-153,58. (in Chinese)
- [28] 郝翔翔,韩晓增,李禄军,等.土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响[J].应用生态学报,2015,26(4):965-972.
HAO X X,HAN X Z,LI L J,*et al.* Profile distribution and storage of soil organic carbon in a black soil as affected by land use types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(4):965-972. (in Chinese)
- [29] JIAZHENG H,ZHENQI H,ZHEN M,*et al.* How to account for changes in carbon storage from coal mining and reclamation in eastern China? Taking Yanzhou coalfield as an example to simulate and estimate[J]. Remote Sensing,2022,14(9):2014.