

基于 PLUS-InVEST 模型的小兴安岭地区 土地利用模拟与碳储量评估

杨德文, 高铭阳, 张碧君, 张俊玲
(东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 评估黑龙江省小兴安岭地区未来不同情景下的土地利用变化与碳储量变化, 为优化生态系统服务, 建设北方生态安全屏障提供科学参考。[方法] 基于 2000, 2010 和 2020 年 3 期土地利用数据, 模拟 2030 年小兴安岭地区土地利用变化, 评估自然发展, 生态保护, 城镇发展 3 种不同情景下的碳储量。[结果] ① 2000—2020 年, 黑龙江省小兴安岭地区的土地利用格局发生显著转变, 林地和草地面积不断缩减, 林地面积缩减尤为突出, 主要转变为耕地。② 黑龙江省小兴安岭地区 2000, 2010 和 2020 年的碳储量分别为 2.204×10^9 t, 2.203×10^9 t, 2.191×10^9 t, 呈现逐年下降趋势。③ 从固碳角度来看, 到 2030 年, 生态保护情景相较于自然发展情景优势显著, 碳储量增加了 1.933×10^7 t, 碳储量下降趋势得到显著缓解, 为后续政策制定提供了有力依据和指导。[结论] 未来应延续科学生态政策, 以维护黑龙江省小兴安岭地区生态安全, 提升碳汇能力, 助力建设北方生态安全屏障。

关键词: 土地利用变化; PLUS-InVEST 模型; 碳储量; 小兴安岭

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0286-09

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 杨德文, 高铭阳, 张碧君, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的小兴安岭地区土地利用模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 286-294. Yang Dewen, Gao Mingyang, Zhang Bijun, et al. Land use simulation and carbon storage assessment in Xiaoxing'an Mountains region based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 286-294. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.012; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.012.

Land use simulation and carbon storage assessment in Xiaoxing'an Mountains region based on PLUS-InVEST model

Yang Dewen, Gao Mingyang, Zhang Bijun, Zhang Junling

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

Abstract: [Objective] The land use change and carbon storage change in the future under different scenarios in the Xiaoxing'an Mountains region of Heilongjiang Province were assessed, in order to optimize ecosystem services and provide scientific reference for the construction of the northern ecological security barrier. [Methods] Based on land use data from 2000, 2010, and 2020, land use changes in the Xiaoxing'an Mountains region in 2030 were simulated, and carbon storage under three scenarios (natural development, ecological protection, and urban development) was evaluated. [Results] ① From 2000 to 2020, significant changes occurred in land use patterns in the Xiaoxing'an Mountains region. The areas of forestland and grassland continuously declined, with forestland being particularly affected, primarily converted into cropland. ② Carbon storage in the region was 2.204×10^9 t in 2000, 2.202×10^9 t in 2010, and 2.191×10^9 t in 2020, exhibiting a trend of annual decline. ③ In terms of carbon sequestration, by 2030, the ecological protection scenario offers significant advantages over the natural development scenario, with an estimated increase of 1.933×10^7 t. This scenario effectively mitigates the decline in carbon storage and provides strong evidence for future policy formulation. [Conclusion] To maintain the ecological security of the Xiaoxing'an Mountains region, scientific ecological policies should be upheld to enhance carbon

收稿日期: 2024-11-18

修回日期: 2025-01-09

采用日期: 2025-01-09

资助项目: 黑龙江省社会科学基金项目“黑龙江省渔猎民族集体记忆研究”(22SHB173)

第一作者: 杨德文(1997—), 男(汉族), 黑龙江省伊春市人, 硕士研究生, 研究方向为风景园林规划与设计。Email: 3576458173@nefu.edu.cn。

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。

sequestration capacity and contribute to the development of a northern ecological security barrier.

Keywords: land use change; PLUS-InVEST Model; carbon storage; Xiaoxing'an Mountains

全球气候变暖问题日益严重,已成为制约人类活动和经济社会可持续发展的重大挑战^[1]。陆地生态系统作为碳储量的重要组成部分,其碳储量调节功能显著,对减缓二氧化碳排放,调节气候变化,可持续发展等具有不可忽视的作用^[2-4]。土地利用变化作为环境变化的重要驱动因素,通过其动态演变过程,进而影响温室气体排放、碳存储能力等多个方面^[5]。2020年中国提出“双碳”目标,引起了全世界高度关注。中国作为世界上最大的发展中国家和碳排放国积极响应政策,对全球气候变化治理产生积极作用。因此,研究土地利用变化与碳储量之间的关系,分析土地利用对碳储量的潜在影响,从而优化土地利用结构以提高生态碳储量,对于实现可持续发展,优化生态系统服务具有重要意义。

目前,对于碳储量的研究以往多聚焦于土地利用变化的影响,侯建坤等^[6]结合InVEST和GeoSoS-FULS模型预测并评估黄河源区未来不同情景下土地利用变化对碳储量的影响。朱志强等^[7]通过耦合FLUS-InVEST模型,分析广州市土地类型特征,分析建设用地扩张和碳储量的分布规律,并评估未来碳储量潜力。为了提高斑块研究的模拟精度,张鹏等^[8]采用在FULS模型上改进的PLUS模型,耦合InVEST计算邯郸市未来多情景碳储量空间分布与评估。PLUS模型具有模拟精度高,运行速度快,并在大尺度,多地类等模拟方面具有更精细化的优势^[9],因此具有较好的应用前景。张舟等^[10]基于PLUS-InVEST-Geodector模型研究城市化程度较高地区土地利用变化和人为自然活动对碳储量的影响机制。胡冰清等^[11]运用PLUS和InVEST模型对吉林省中部黑土区因生态退耕所引起的碳储量格局变化并对增汇潜力进行分析。高铭阳等^[12]基于PLUS-InVEST模型,模拟2030年黑龙江省大兴安岭地区土地利用格局变化,量化并研究蓝绿空间对碳储量的主导地类和驱动程度。张平平等^[13]利用CA-Markov与InVEST模型模拟并预测不同情景下秦巴山地生态系统碳储量变化,表明量化土地利用对陆地生态系统碳储量影响的显著优势。目前,国内外学者多集中于城市群、流域、市域等尺度开展研究,但是对于东北大小兴安岭地区研究较少,同时对未来土地利用情景设计较为单一,缺少科学政策指引。探究土地利用多情景模拟对碳储量的影响,对于制定合理的生态保护方案具有积极作用^[14]。黑龙江省依据国家发展改革委、国家林草局研究制定的

《大小兴安岭林区生态保护与经济转型规划(2021—2035年)》,旨在使黑龙江省大小兴安岭北方生态安全屏障功能进一步提升。因此,本研究以黑龙江省小兴安岭地区为研究区,通过耦合PLUS与InVEST模型,基于2000,2010和2020年3期土地利用数据,预测小兴安岭地区2030年自然发展、生态保护和城镇发展3种情景下的土地利用变化及碳储量估算,以期对小兴安岭地区生态保护、土地资源合理配置与碳储功能的提升提供科学依据和建议。

1 研究区概况

小兴安岭纵贯中国黑龙江省中北部,介于东经126°07'—129°22',北纬46°37'—50°17',属寒温带大陆性季风气候,全年平均气温-2~2℃,年平均降水量500mm。小兴安岭地区地形较为复杂,主要由低山丘陵山地,丘陵台地等地貌组成。该地区森林覆盖率高,野生动植物资源丰富,其独特的生态资源使其成为我国重要的森林生态功能区和生态安全保障区。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

小兴安岭地区土地利用数据来源于武汉大学杨杰教授与黄鑫团队发布的中国土地覆盖数据,数据集的整体准确率为79.3%,有9个土地类别^[15]。参照土地资源分类,将小兴安岭地区土地利用类型合并为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。为保证数据模拟精度和减少计算量,空间分辨率被重采样到90m^[16]。

将涉及模拟未来土地利用类型的驱动因子数据分为自然环境因素、可达性数据和社会经济数据3个方面,自然环境因素:数字高程及坡度数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>);土壤类型、NDVI,年平均温度和年平均降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpcd.ac.cn/zh-hans/>);到河流距离数据来源于OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>)。可达性数据包括:到铁路、快速路、主干道、次干道和城市中心距离数据来源于OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>)。社会经济数据:人口数据来源于Open Spatial Demographic Data and Research(<https://www.worldpop.org/>);GDP数据来源于中国科学院资源与环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

2.2 未来土地利用多情景模拟设置

综合考虑黑龙江省小兴安岭地区发展情况与未来发展规划,本研究设置 3 种未来情景模拟: ①自然发展情景。该情景延续 2010—2020 年发展趋势,各类用地参考原土地利用变化趋势正常演变,不设置各类用地的转换概率,借助 PLUS 模型中的 Markov 计算用地需求,预测 2030 年自然发展的土地利用情况。②生态保护情景。依据《大小兴安岭林区生态保护与经济转型规划(2021—2035 年)》,按照保护优先,系统修复的原则,严格限制林地转为建设用地,严格控制林地转为其他农用地。将林地向耕地,草地转移的概率减少 30%,同时将未利用地和建设用地向林地转移的概率提高 20%。③城镇发展情景。该情景适当放宽对建设用地扩张概率的限制,调动具有经济潜力的未利用地向建设用地扩张,将未利用地向建设用地转移的概率提高 20%,草地向建设用地转移的概率提高 20%。

2.3 基于 PLUS 模型的多情景土地利用变化及模拟

PLUS 模型是基于元胞自动机与马尔科夫链的土地利用变化模拟工具,其具有更高的模拟精度和可操作性。PLUS 模型包括 LEAS 和 CARS 两个模块,LEAS 模块通过对土地利用进行抽样,并运用随机森林算法计算各类用地扩张区域和驱动因子的贡献度。CARS 模块通过结合不同土地类型的转换规则和领域权重,以对未来土地利用进行模拟和预测^[17-18]。领域权重依据 2010—2020 年各土地类型的扩张面积占总扩张面积的比例确定,为了取得精度更高的模拟结果,权重值进行如下微调:耕地为 0.609,林地为 0.224,草地为 0.096,水域为 0.011,建设用地区为 0.060,未利用地为 0.001。

本研究根据小兴安岭地区 2010—2020 年的历史土地利用数据,结合 14 个驱动因子进行模拟,得到 2020 年的模拟的土地利用空间分布数据。为了验证 PLUS 模型模拟的准确性,将 PLUS 模型模拟的 2020

$$K_{BP} = \frac{0.03 \times P' + 14.4}{0.03 \times P'' + 14.4}, \quad K_{BT} = \frac{-0.4 \times T' + 43.0}{-0.4 \times T'' + 43.0}, \quad K_B = \text{Average}(K_{BP}, K_{BT}) \quad (3)$$

$$K_{SP} = \frac{0.07 \times P' + 79.1}{0.07 \times P'' + 79.1}, \quad K_{ST} = \frac{-3.4 \times T' + 157.7}{-3.4 \times T'' + 157.7}, \quad K_S = \text{Average}(K_{SP}, K_{ST}) \quad (4)$$

$$K_{DP} = \frac{0.01 \times P' + 0.58}{0.01 \times P'' + 0.58}, \quad K_{DT} = \frac{-0.03 \times T' + 2.03}{-0.03 \times T'' + 2.03}, \quad K_D = \text{Average}(K_{DP}, K_{DT}) \quad (5)$$

式中: K_{BP} , K_{BT} 分别代表降水和温度的生物量系数; K_B 代表最终的生物量修正系数; K_{SP} 代表由降水决定的土壤系数; K_{ST} 代表由温度决定的土壤系数; K_S 代表最终的土壤有机修正系数; K_{DP} 代表由降水决定的死亡系数; K_{DT} 代表由温度决定的死亡系数; K_D 代表

年小兴安岭地区的土地利用数据与 2020 年小兴安岭地区的实际土地利用数据进行比对,利用 kappa 系数和总体精度来验证模拟精度^[19]。通常,当 kappa 系数 ≥ 0.75 时,可以认为模拟结果较为精准且具有参考性^[20]。验证结果表明 kappa 系数为 0.881,总体精度为 94.31%,证明模拟结果精度满足研究要求。

2.4 基于 InVEST 模型的碳储量评估

2.4.1 碳储量计算 本研究运用 InVEST 模型中 carbon 模块以土地利用类型相对应的碳密度值对碳存储进行估算。生态系统中的碳存储分为 4 个基本碳库,分别是地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳^[21]。为确定总碳储量,先将各种土地利用类型的所有面积乘以碳密度,然后进行求和。计算公式为:

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

式中: C_i 为地类 i 的总碳密度; $C_{i,above}$ 为地上生物碳密度; $C_{i,below}$ 为地下碳密度; $C_{i,soil}$ 为土壤碳密度和 $C_{i,dead}$ 为死亡有机物碳密度。

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

式中: $C_{i,total}$ 为总的碳储量; S_i 为土地利用类型 i 的面积。

2.4.2 碳密度系数修正 碳密度作为计算碳储量的重要参数,为提高 InVEST 模型准确评估,本研究优先选择在黑龙江省内、时段邻近和同一气候带相关学者的研究数据碳密度库,以减少碳储量评估的误差^[22-25]。然而,这些碳密度数据仍然存在非实际测量值,故对其进行校正。生态系统受到人类和自然因素的影响^[26]。因此,本文选择与气候条件更为相似且具有更高普遍性的碳密度校正公式。许多研究表明,碳密度与年平均气温和年平均降水量具有显著联系^[27-28]。2000—2020 年,小兴安岭地区和黑龙江省的年平均降水量分别为 595.15 和 572.17 mm,年平均气温分别为 1.05, 1.68 °C。相关计算公式为:

最终的死亡有机修正系数; P' 代表小兴安岭地区降水量(mm); P'' 代表黑龙江省降水量(mm); T' 代表小兴安岭地区温度(°C); T'' 代表黑龙江省温度(°C)。最终得到黑龙江省小兴安岭地区各土地利用的碳密度(表 1)。

表1 小兴安岭地区碳密度参数
Table 1 Carbon density parameters in Xiaoxing'an Mountains region

土地利用类型	碳密度/(t·hm ⁻²)			
	地上	地下	土壤	死亡有机物
耕地	7.66	20.32	114.77	0
林地	8.69	23.75	135.77	1.69
草地	6.04	38.67	58.24	2.13
水域	6.61	1.68	17.97	0
建设用地	6.63	3.33	21.69	0.87
未利用地	7.60	0	34.97	0

3 结果与分析

3.1 土地利用变化对碳储量的影响

根据2000—2020年黑龙江省小兴安岭地区基于

土地利用变化引起的碳储量变化(表2)所示。在20 a间,大量林地转化为耕地、草地和建设用地,共计转出1 933.05 km²,直接导致2.030×10⁷ t的碳储量损失。耕地向建设用地转换较为明显,导致损失7.720×10⁶ t碳储量。

草地和建设用地的转换使碳储量得到一定程度的增加,分别为7.43×10⁶ t和2.723×10⁶ t,综上所述,林地转为耕地、草地和建设用地是碳储量减少的主要原因,而耕地和未利用地转化为林地则在一定程度上缓解了碳损失。研究结果表明,保护林地和减少非生态用地扩张对于维持区域碳储量、缓解气候变化具有重要意义。同时,合理规划土地利用,尤其是控制林地的开发与破坏,是实现区域碳平衡的关键。

表2 小兴安岭地区土地利用变化引起的碳储量变化

Table 2 Changes in carbon storage caused by land use changes in Xiaoxing'an Mountains region

土地利用类型	面积/km ²	碳储量变化/ 10 ⁴ t	合计/10 ⁴ t	土地利用类型	面积/km ²	碳储量变化/ 10 ⁴ t	合计/10 ⁴ t
耕地—林地	2 513.309	682.363		水域—耕地	97.119	113.134	
耕地—草地	475.324	-179.055		水域—林地	106.888	153.533	
耕地—水域	122.820	-143.073	-412.697	水域—草地	3.872	3.052	272.381
耕地—建设用地	700.383	-772.032		水域—建设用地	36.628	2.293	
耕地—未利用地	0.899	-0.901		水域—未利用地	2.260	0.369	
林地—耕地	5 775.430	-1568.029		建设用地—耕地	113.335	124.929	
林地—草地	325.758	-211.156		建设用地—林地	18.241	25.060	
林地—水域	67.570	-97.058	-2 030.416	建设用地—草地	4.463	3.238	151.347
林地—建设用地	111.999	-153.864		建设用地—水域	32.141	-2.012	
林地—未利用地	0.243	-0.309		建设用地—未利用地	1.312	0.132	
草地—耕地	843.761	317.845		未利用地—耕地	0.867	0.868	
草地—林地	738.906	478.959		未利用地—林地	0.130	0.165	
草地—水域	13.033	-10.273	742.964	未利用地—草地	0.203	0.127	0.867
草地—建设用地	59.219	-42.969		未利用地—水域	0.381	-0.062	
草地—未利用地	0.956	-0.597		未利用地—建设用地	2.292	-0.230	

3.2 黑龙江省小兴安岭地区土地利用变化模拟及预测

黑龙江省小兴安岭地区2000—2020年的各地类及变化情况详见表3。表3显示,2000—2020年,黑龙江省小兴安岭地区的土地利用类型发生了显著变化,呈现出农业扩张、林地减少和城镇化发展的综合趋势。结果显示,耕地面积从42 509.48 km²增加至45 527.26 km²,体现了农业用地的扩张。同时,林地面积由92 396.72 km²下降至89 493.20 km²,反映出林地资源的减少,这可能与耕地扩张和建设用地增加对林地的占用有关。

此外,草地面积也显著减少,从1 971.56 km²降

至1 125.30 km²,可能是由于部分草地转化为耕地或建设用地。水域面积基本保持稳定,略有下降,从1 027.98 km²减少至1 017.16 km²。这表明在2000—2020年,水域并未经过大规模的转变,保持了相对稳定的状态。然而,建设用地的面积则从1 252.57 km²增至1 993.60 km²,增长幅度较大,反映出城镇化进程的加快。未利用地在该时段的变化不大,始终保持在一个较小的比例水平。

结合2030年3种发展情景的土地利用分布(图1,表2)可以发现,与2020年相比,2030年自然发展情景下,按照土地利用变化趋势正常演变,耕地面积增加了1 893.00 km²,建设用地增加了395.548 km²,而

林地面积减少了 2 272.706 km², 草地、水域和未利用地面积均发生小幅度减少, 分别为 11.762, 2.171 和 1.911 km²; 2030 年生态保护情境下, 耕地、草地和建设用地分别增加了 807.764, 261.694 和 68.275 km², 然而林地面积减少了 1 134.99 km², 但与同期自然发展情景相比, 林地面积减少程度得到缓解, 符合相关

政策的保护效果, 水域面积小幅度减少为 2.017 km², 未利用地减幅最小为 0.729 km²。2030 年城镇发展情景下, 建设用地面积增加 391.878 km², 可能是由于在进行经济建设的同时, 提高了城市公园, 绿道等空间比例。草地和未利用地面积相对减少, 耕地、林地和水域类似于同期自然发展情景下的用地面积。

表 3 2000—2030 年小兴安岭地区土地利用类型面积及比例

Table 3 Area and proportion of land use types in Xiaoxing'an Mountains region from 2000 to 2030

情景模式	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %
2000 年	42 509.480	30.547	92 396.724	66.395	1 971.556	1.417	1 027.979	0.739	1 252.568	0.90	4.552	0.003
2010 年	43 403.072	31.189	91 931.217	66.060	1 200.169	0.862	1 026.610	0.738	1 599.094	1.149	2.697	0.002
2020 年	45 527.257	32.715	89 493.198	64.308	1 125.301	0.809	1 017.158	0.731	1 993.596	1.433	6.350	0.005
2030 自然发展	47 420.259	34.075	87 220.492	62.675	1 113.539	0.800	1 014.987	0.729	2 389.144	1.717	4.439	0.003
2030 生态保护	46 335.021	33.296	88 358.210	63.493	1 386.995	0.997	1 015.141	0.729	2 061.871	1.482	5.621	0.004
2030 城镇发展	47 419.717	34.075	87 224.696	62.678	1 113.499	0.800	1 015.035	0.729	2 385.474	1.714	4.439	0.003

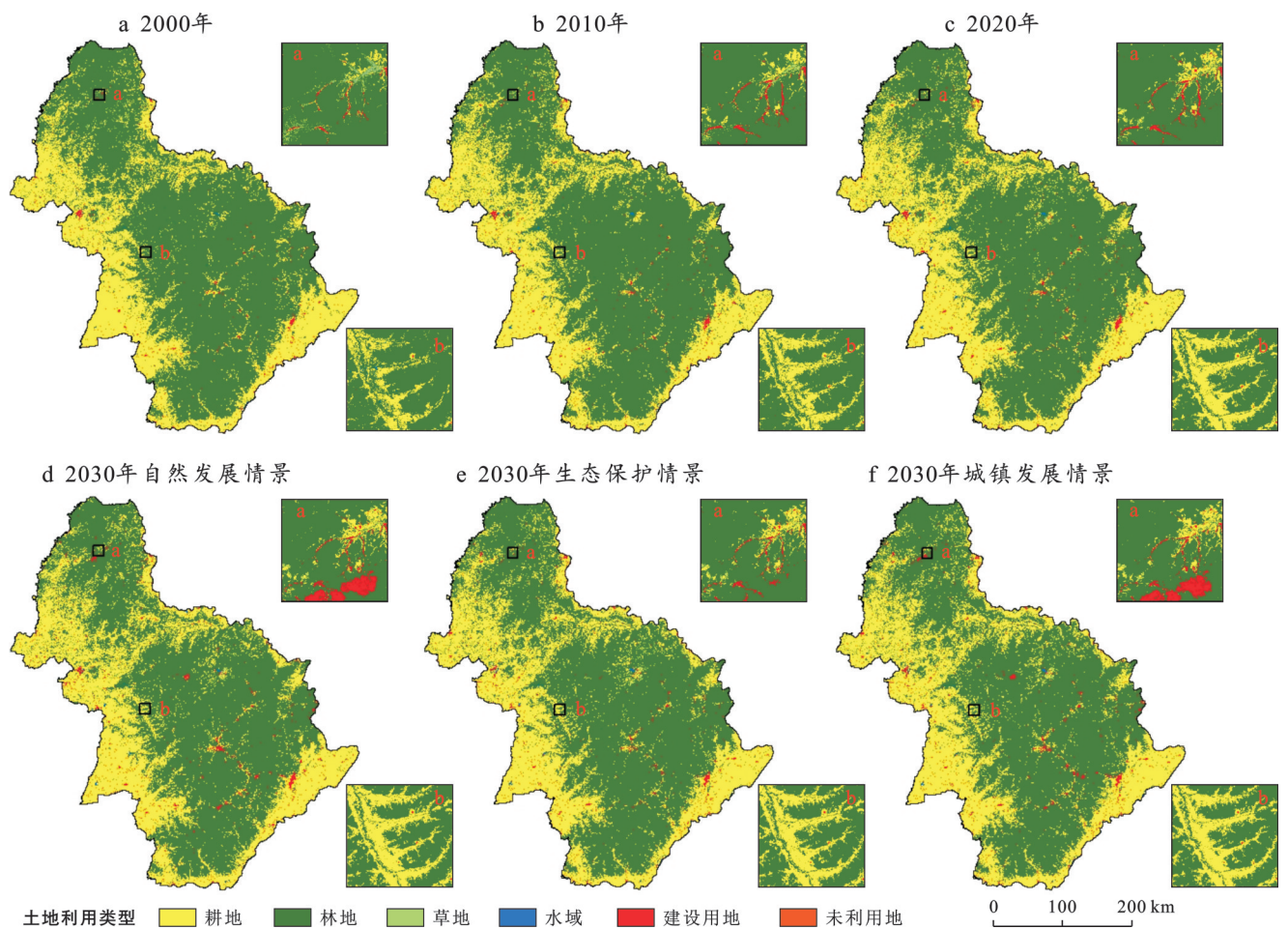


图 1 2000—2030 年小兴安岭地区多情景土地利用空间分布模拟

Fig.1 Spatial distribution simulation of land use under multiple scenarios in Xiaoxing'an Mountains region from 2000 to 2030

3.3 黑龙江省小兴安岭地区碳储量变化评估
运用 InVEST 模型得出黑龙江省小兴安岭地区

2000—2020 年和 2030 年不同情景下的碳储量, 计算结果详见表 4。

由表4可知,2000,2010和2020年的碳储量分别为 2.204×10^9 t, 2.202×10^9 t, 2.191×10^9 t, 整体呈现持续下降的趋势。从2000—2010年,经济的快速发展导致建设用地扩张,草地面积明显减少,总碳储量减少了 2.143×10^6 t。而2010—2020年,由于耕地保护等措施,耕地面积增加较为明显,但林地面积继续减少,进而导致碳储量下降趋势加快,减少了 1.061×10^7 t。

到2030年,自然发展情景下总碳储量为 2.181×10^9 t,较2020年下降 1.044×10^7 t;城镇发展情景下碳储量为 2.187×10^9 t,较2020年下降 1.039×10^7 t;这两种情景碳储量与2020年相比没有显著差异。而在生态保护情景下的碳储量减少程度得到缓解,较2020年下降 4.789×10^6 t。这一结果说明,实施生态保护措施能够有效缓解碳储量的下降趋势。

表4 2000—2030年小兴安岭地区不同土地利用类型碳储量
Table 4 Carbon storage of different land use types in Xiaoxing'an Mountains region 2000 to 2030

情景模式	土地利用类型碳储量/ 10^4 t					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000年	60 682.28	156 982.03	2 071.71	269.95	407.34	1.94
2010年	61 957.89	156 191.14	1 261.14	269.59	520.03	1.15
2020年	64 990.16	152 048.94	1 182.47	267.11	648.32	2.70
2030年自然发展	67 692.42	148 187.62	1 170.11	266.54	776.95	1.89
2030年生态保护	66 143.24	150 120.60	1 457.45	266.58	670.52	2.39
2030年城镇发展	67 691.65	148 194.76	1 170.06	266.55	775.76	1.89

由图2可知,从2000—2020年,小兴安岭地区的碳储量主要集中在东北部和中部的大面积林地区域,呈现出较高的碳储存值,而南部、边缘区域的碳储量相对较低。这表明林地在小兴安岭碳储量分布中占据主导地位,对该地区碳储量贡献突出。在这一时期,碳储量的空间格局整体保持稳定,表明土地利用类型的变化有限,林地占据较大比重,碳储能力较强。到2030年,在自然发展情景下,碳储量分布与2020年相比略有下降,特别是在林地边缘和部分生态敏感区域出现了碳储量的轻微减少,表明在自然条件下,碳储量可能受一些人类活动或自然变化的影响而有所波动,但整体格局变化不大;在生态保护情景下,碳储量的空间格局基本保持稳定,林地区域的碳储量得到有效保护,尤其是在北部和中部的高碳储区没有明显变化。这表明生态保护政策有助于维护现有的碳储格局,防止碳储量的进一步流失;在城镇发展情景下,碳储量减少最为明显,特别是靠近城镇扩展区域的碳储量出现显著下降。南部和边缘地区的碳储量减少尤为显著,表明城镇扩张导致林地减少,碳储存能力受到削弱。此情景下的碳储量分布显示出集中减少的趋势,尤其是在发展压力较大的区域。综合来看,小兴安岭地区的碳储量分布高度依赖于林地的空间分布,林地占据的区域碳储量较高,对整体碳储格局有显著贡献。在2030年的3种情景中,生态保护情景能最大程度保持现有碳储格局,自然发展情景对碳储量的负面影响最为显著,其原因为未合理规划与人为控制,放任其发展,导致

林地,草地等高密度土地利用类型被侵占,是区域碳储量降低的显著原因,城镇发展情景次之,尤其是在开发强度较大的边缘区域。这些结果表明,在未来的土地利用规划中,合理的生态保护措施对维持区域碳储量的稳定具有重要意义。

4 讨论

通过模拟与预测研究区未来土地利用和碳储量的变化可知,在2000—2020年,耕地面积与建设用地显著增加,侵占了具有高碳储能力的林地,导致碳储量逐年减少。建筑用地扩张会侵占林地和草地等地类的面积,具有高碳储能力地类的面积减少会显著降低区域的碳储量。如张凯琪等^[29]认为建筑用地的扩张会加快碳储量的减少速度,进而影响桂林市区域碳储能力。周汝波等^[30]研究认为珠江西岸区域内林地、草地转出是碳储量减少的重要原因,需要对林地、草地和耕地的转出进行调控。林彤等^[31]认为林地,草地等高密度土地利用类型被侵占,是广东省区域碳储量降低的显著原因。董春等^[32]研究表明林地是小兴安岭地区的重要碳库,林地向耕地的转入是碳储量变化的主要原因。

在2030年自然发展情景下,延续2010—2020年发展趋势,结果显示大量林地转化为耕地,导致碳储量总量呈下降趋势。在城镇发展情景下,碳储量总量变化情况与自然发展情景基本相似。这一结果表明,尽管考虑土地利用变化的因素,城镇发展并未能显著增加碳储量。这主要是因为城市化进程中,土

地的快速转化,尤其是林地转为耕地或建设用地,导致碳储量的下降。基于《大小兴安岭林区生态保护与经济转型规划(2021—2035年)》,在生态保护情景下,碳储量总量下降趋势最为缓慢,该研究结果与部分学者的研究结果一致^[33-34]。这表明积极的生态保护和科学政策能够有效地恢复生态系统的稳定性和完整性,并增强区域碳储能力,从而为实现碳中和目标、应对气候变化提供重要支撑。碳储量变化的量值反映生态系统对人类活动干扰的敏感性及其固碳能力的变化,揭示土地利用类型的转换如何直接影

响区域碳汇的强弱。

综合考虑3种情景,未来小兴安岭地区发展应当注重土地利用的可持续性发展以提升区域碳储量。一方面,应加强对林地,草地等生态用地的保护,以巩固退耕还林还草工程所带来的生态效益;另一方面,需严格划定永久基本农田,明确生态保护红线和严格管理城镇开发边界,从而减少人为活动对自然耕地和林草地的负面影响。这些措施将有助于促进生态保护与城市建设的和谐共生,进而提升区域碳储量的积累。

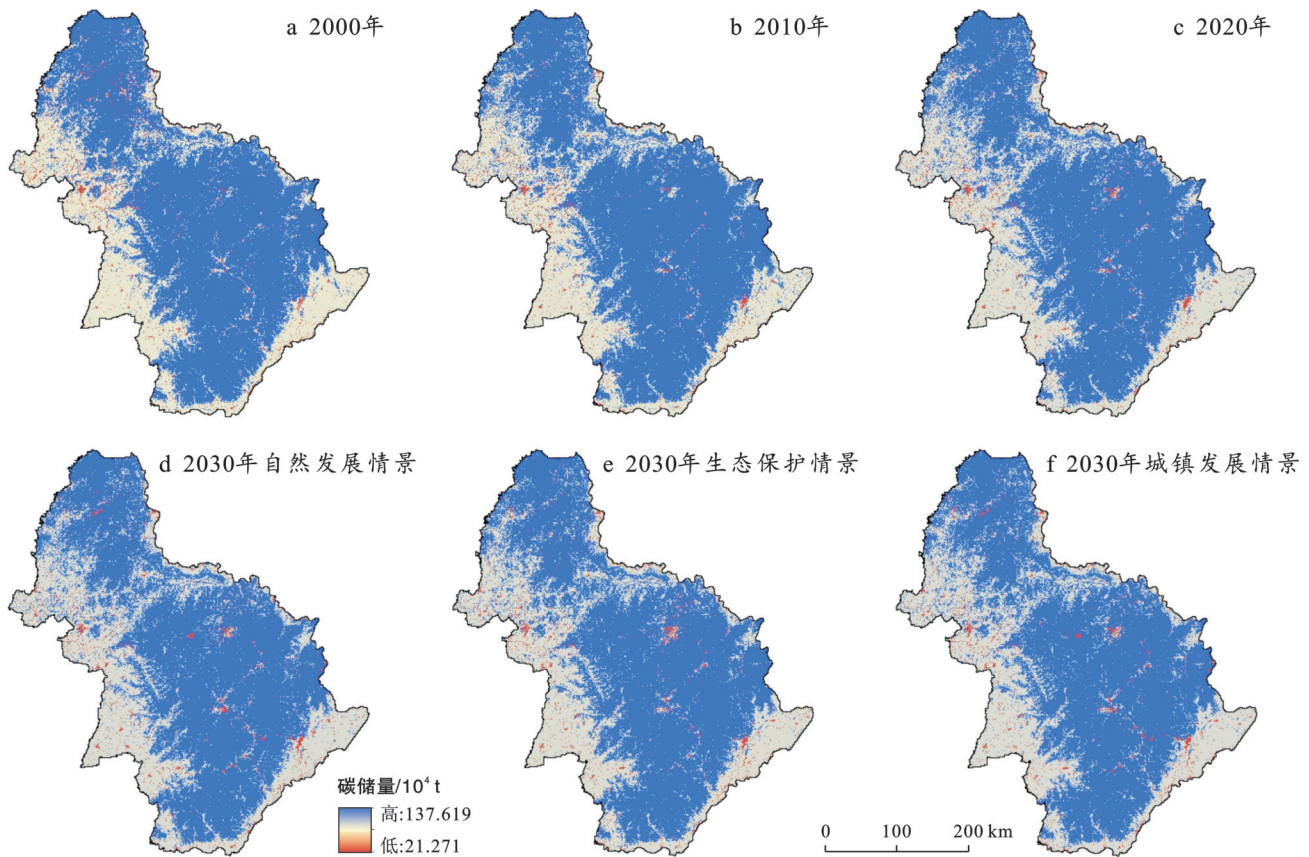


图2 2000—2030年小兴安岭地区多情景碳储量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon storage under multiple scenarios in Xiaoxing'anling region of Heilongjiang Province from 2000 to 2030

本研究采用的PLUS模型广泛应用于未来土地利用情景的预测与模拟,但仍存在一定的局限性。首先,土地利用变化的驱动因子对模拟结果有显著影响,因此在选择这些因子时应考虑政策背景,确保其合理性。此外,未来各类土地利用类型的预测主要依赖于前人的经验和文献资料,这一过程不可避免地受到主观因素的影响,可能导致预测结果的偏差。为克服碳密度选择中的局限性,本研究利用气象数据与碳密度的显著相关性,选取邻近或相似地区学者研究中获得的碳密度值,并结合气象数据进行二次修正,从而最大程度减少碳密度的误差,使其

更接近实际值。本研究的碳储量计算仅从土地利用变化角度进行,后续研究将在此基础上结合实测数据,以进一步提高碳密度值的准确性。此外,本研究仅针对2030年3种情景下的碳储量进行了预测,未来研究可延伸时间范围,深入探讨不同情景下固碳潜力的变化与差异。

5 结论

(1) 在2000—2020年,黑龙江省小兴安岭地区的土地利用发生变化,林地、草地和水域面积持续减少,而耕地和建设用地面积则不断增加。至2030年,

在自然发展情景下,耕地面积达到67 692.42 km²,接近峰值。

(2) 在2000—2020年,黑龙江省小兴安岭地区碳储量持续下降,总损失为 1.28×10^7 t。土地利用类型的变化直接影响碳储量,尤其是林地转化为耕地,导致碳储量损失 4.93×10^7 t,转换面积为5 755.43 km²。

(3) 到2030年,在自然发展和城镇发展情景下,碳储量继续下降;而在生态保护情景下,碳储量减少趋势得到有效缓解,部分区域出现碳储量增长。生态保护情景的固碳效果最为显著,表明生态政策有助于提升碳存储。未来应以生态恢复为主导,推动“碳中和”目标的实现。

参考文献 (References)

- [1] Udara Wilhelm Abeydeera L H, Wadu Mesthrige J, Samarasinghalage T I. Global research on carbon emissions: A scientometric review [J]. Sustainability, 2019, 11(14):3972.
- [2] Lu Fei, Hu Huifeng, Sun Wenjuan, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16):4039-4044.
- [3] 方精云,于贵瑞,任小波,等.中国陆地生态系统固碳效应:中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J].中国科学院院刊,2015,30(6):848-857.
Fang Jingyun, Yu Guirui, Ren Xiaobo, et al. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change: Progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6):848-857.
- [4] Kauffman J B, Adame M F, Arifanti V B, et al. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients [J]. Ecological Monographs, 2020, 90(2):e01405.
- [5] Leta M K, Demissie T A, Tränckner J. Modeling and prediction of land use land cover change dynamics based on land change modeler (LCM) in Nashe watershed, upper Blue Nile basin, Ethiopia [J]. Sustainability, 2021, 13(7):3740.
- [6] 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. Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios [J]. Environmental Science, 2022, 43(11):5253-5262.
- [7] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229.
Zhu Zhiqiang, Ma Xiaoshuang, Hu Hong. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou City by coupling FLUS-InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):222-229.
- [8] 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(3):338-348.
Zhang Peng, Li Liangtao, Su Yujiao, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of carbon storage in Handan City based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3):338-348.
- [9] 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.
- [10] 张舟,刘晶晶,张权,等.基于PLUS-InVEST-Geodector模型的苏州市碳储量时空变化及驱动力分析[J].环境科学,2025,46(5):2963-2975.
Zhang Zhou, Liu Jingjing, Zhang Quan, et al. Spatio-temporal change and driving force analysis of carbon storage in Suzhou based on PLUS-InVEST-Geodector model [J]. China Industrial Economics, 2025, 46(5):2963-2975.
- [11] 胡冰清,李文博,祝元丽.基于多退耕情景的吉林省中部黑土区固碳潜力与增汇格局研究[J].水土保持研究,2024,31(3):230-238.
Hu Bingqing, Li Wenbo, Zhu Yuanli. Estimating carbon sequestration potential and sinking pattern under multi-level fallowing scenarios in central Jilin Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3):230-238.
- [12] 高铭阳,张俊玲,石淞,等.2015—2020年黑龙江省大兴安岭地区蓝绿空间土地利用变化及其对碳储量的影响[J].水土保持通报,2024,44(1):453-464.
Gao Mingyang, Zhang Junling, Shi Song, et al. Land use changes in blue-green space and their impacts on carbon storage in Daxing'an Mountains of Heilongjiang Province from 2015 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1):453-464.
- [13] 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.
- [14] Gomes E, Inácio M, Bogdzevič K, et al. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: A review [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 781:146716.
- [15] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [16] Li Pengcheng, Chen Jundian, Li Yixin, et al. Using the InVEST-PLUS model to predict and analyze the pattern of ecosystem carbon storage in Liaoning Province, China [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16):4050.
- [17] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟: 以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10):86-95.
- Yang Shuo, Su Hao, Zhao Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10):86-95.
- [18] Liang Youjia, Liu Lijun, Huang Jiejun. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China [J]. *PLoS One*, 2017, 12(2):e0172494.
- [19] 贾天朝, 胡西武. 基于 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三江源国家公园碳储量时空变化及驱动力[J]. 环境科学, 2024, 45(10):5931-5942.
- Jia Tianchao, Hu Xiwu. Spatial-temporal change and driving force of carbon storage in three-river-source National Park based on PLUS-InVEST-geodector model [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(10):5931-5942.
- [20] 孙毅中, 杨静, 宋书颖, 等. 多层次矢量元胞自动机建模及土地利用变化模拟[J]. 地理学报, 2020, 75(10):2164-2179.
- Sun Yizhong, Yang Jing, Song Shuying, et al. Modeling of multilevel vector cellular automata and its simulation of land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10):2164-2179.
- [21] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Kanagawa: IGES, 2006.
- [22] 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, 38(5):194-203.
- Qu Chen, Li Wen, Xu Jia, et al. Potential impact of black land conservation and utilization on carbon storage in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(5):194-203.
- [23] Zhao Minmin, He Zhibin, Du Jun, 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Reang D, Hazarika A, Sileshi G W, et al. Assessing tree diversity and carbon storage during land use transitioning from shifting cultivation to indigenous agroforestry systems: Implications for REDD+ initiatives [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298:113470.
- [27] 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.
- [28] Xu Li, Yu Guirui, He Nianpeng. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1):49-66.
- [29] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6):2799-2809.
- Zhang Kaiqi, Chen Jianjun, Hou Jiankun, et al. Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6):2799-2809.
- [30] 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*, 2018, 37(6):175-183.