Open Journal of Natural Science 自然科学, 2026, 14(6), 820-832
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ojns
https://doi.org/10.12677/ojns.2026.146085

Hans汉斯

基于InVEST-PLUS模型的双碳目标下绥化地区土地利用转型：碳储量响应机制与多情景优化

李龙帅[1]，宋　坤[2]，王忠良[1*]

[1]哈尔滨师范大学地理科学学院，黑龙江　哈尔滨
[2]鸡西市鸡东生态环境局，黑龙江　鸡西

收稿日期：2026年9月28日；录用日期：2026年11月9日；发布日期：2026年11月17日

摘　要

以寒地黑土核心区绥化市为对象，基于PLUS和InVEST模型构建多情景土地利用动态模拟框架，设置自然发展、城镇发展、耕地保护与生态保护4种情景，预测2040年不同情景下的碳储量变化。① 2000~2020年，绥化市碳储量整体呈缓慢下降态势，林地与草地持续减少、建设用地快速扩张；空间上碳储量高值区集中于东北部，低值区分布于西南部。② 2040年多情景模拟结果显示：耕地保护情景碳储量最高(6.21×10^8 t)，城镇发展情景最低(6.18×10^8 t)，生态保护情景降幅相对平缓(6.19×10^8 t)。实施生态与耕地保护策略、控制建设用地无序扩张，可有效减少区域碳储量流失。

关键词

土地利用变化，碳储量，多情景模拟，PLUS模型，InVEST模型

Land Use Transformation in Suihua Area under the Dual Carbon Goals Based on InVEST-PLUS Model: Carbon Storage Response Mechanism and Multi-Scenario Optimization

Longshuai Li[1], Kun Song[2], Zhongliang Wang[1*]

[1]College of Geography Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang
[2]Jidong Ecological Environment Bureau, Jixi City, Jixi Heilongjiang

[*]通讯作者。

文章引用: 李龙帅, 宋坤, 王忠良. 基于 InVEST-PLUS 模型的双碳目标下绥化地区土地利用转型: 碳储量响应机制与多情景优化[J]. 自然科学, 2026, 14(6): 820-832. DOI: 10.12677/ojns.2026.146085

Received: September 28, 2026; accepted: November 9, 2026; published: November 17, 2026

Abstract

Taking Suihua City, the core area of cold-region black soil, as the object, a multi-scenario dynamic simulation framework for land use is constructed based on the PLUS and InVEST models. Four scenarios, namely natural development, urban development, farmland protection and ecological protection, are set up to predict the changes in carbon storage under different scenarios in 2040. ① From 2000 to 2020, the carbon storage in Suihua City generally showed a slow downward trend, with the continuous reduction of forest land and grassland and the rapid expansion of construction land. Spatially, high-value areas of carbon storage are concentrated in the northeastern part, while low-value areas are distributed in the southwestern part. ② The multi-scenario simulation results in 2040 show that the carbon storage in the farmland protection scenario is the highest (6.21×10^8 t), the lowest in the urban development scenario (6.18×10^8 t), and the decline in the ecological protection scenario is relatively gentle (6.19×10^8 t). Implementing ecological and farmland protection strategies and controlling the disorderly expansion of construction land can effectively reduce the loss of regional carbon storage.

Keywords

Land Use Change, Carbon Storage, Multi-Scenario Simulation, PLUS Model, InVEST Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

双碳背景下，土地利用转型碳效应是国土空间优化重点。InVEST 模型适用于碳储量评估，PLUS 模型土地模拟精度优于 CA-Markov、FLUS，二者耦合已成为土地利用－碳储量研究常用范式[1]。现有研究仍存在短板：碳密度参数缺少寒地黑土区本地化校正；多局限于历史分析与情景预测，缺少碳损失风险分区及管控全链条研究；松嫩黑土核心区相关研究不足，情景难以平衡粮食安全、生态保护与城镇发展之间的矛盾[2] [3]。

本文以绥化市为案例，优化 PLUS-InVEST 耦合框架：依托东北黑土区文献校正碳密度参数，设置四类情景，增加碳损失风险分区与管控对策，构建“历史演变－多情景模拟－风险识别－落地管控”研究体系，为寒地黑土区协同推进双碳目标与黑土保护提供支撑。

2. 研究方法

2.1. 数据来源与预处理

通过阅读大量文献[4] [5]，搜集相关资料，获取资料收集的途径和方法，得到本文的数据源，利用 ArcGIS10.2 等软件对所得数据进行分析处理，得到本文所需其他数据，具体来源及说明见表 1。

2.2. InVEST 碳储量模型

本研究采用 InVEST 模型的碳储量核算模块开展区域陆地生态系统碳储量评估，将碳储量划分为地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳和死亡有机质碳四个基本碳库进行定量计算。

Table 1. Data types and data sources
表 1. 数据类型与数据来源

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用数据	2000~2020 年绥化市土地利用数据	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
自然因素数据	高度(DEM)、坡度、坡向、年平均降水、年平均气温、土壤类型	国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/) HWSD 世界土壤数据库(https://gaez.fao.org/pages/hwsd)
社会经济数据	人口、GDP	资源环境科学数据注册与出版系统 (https://www.resdc.cn/DOI/)
基础地理信息数据	各级道路、居民点、河流	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn)

碳密度参数的准确性直接决定碳储量核算结果的可靠性。由于模型内置的默认碳密度参数为大尺度通用基准值，难以匹配寒地黑土区高有机质土壤、旱作农业主导的区域特征，易产生系统性偏差。因此本研究未直接采用模型默认参数，而是优先选取气候分区、土壤类型、土地利用结构与绥化市高度相近的东北黑土区已有实测研究成果作为参考依据[6] [7]，最终确定研究各类土地利用类型的碳密度取值，具体参数见表 2。

Table 2. Carbon density (t/hm^2) of various land use types in the study area
表 2. 研究区各类土地利用类型的碳密度(t/hm^2)

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
耕地	10.1	26.8	147	0.00
林地	11.46	31.32	173.9	2.25
草地	7.96	51	74.6	2.84
水域	8.72	2.29	23.01	0.00
建设用地	8.75	4.39	27.78	1.16
未利用地	10.03	0.00	44.79	0.00

2.3. PLUS 土地利用模拟模型

采用 PLUS 模型开展 2020~2040 年土地利用多情景模拟，模型由用地扩张分析策略(LEAS)与多类型随机种子元胞自动机(CARS)耦合构成，可精准识别土地利用扩张规则，模拟斑块演化过程[8]。

2.3.1. 驱动因子选取与预处理

结合绥化市黑土连片、东部分布林地、西部平原开阔、城镇沿交通线集聚的区域特征，从自然本底、社会经济、区位条件 3 个维度选取高程、坡度、坡向、年均温、年降水量、土壤类型、人口密度、GDP 及各类距离因子，共 16 项驱动因子。自然因子反映土地利用适宜性；人口与 GDP 表征人为开发强度；距离类因子体现交通、居民点、水系带来的区位约束。所有因子统一投影并重采样至 30 m 分辨率，完成栅格标准化，减少基准差异造成的模拟误差。

PLUS 模型 LEAS 模块依托随机森林算法，采用增益值(Gain)量化驱动因子对地类扩张的解释力，Gain 越大，驱动贡献越强。各因子对地类扩张的贡献结果见表 3。

Table 3. Contribution of each driving factor to the expansion of different land use types (Gain values)
表 3. 各驱动因子对不同土地利用类型扩张的贡献度(Gain 值)

驱动因子	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
DEM	0.080	0.092	0.045	0.222	0.074	0.051
坡度	0.028	0.063	0.026	0.020	0.019	0.018
坡向	0.011	0.012	0.010	0.006	0.007	0.010
年平均降水	0.103	0.090	0.121	0.050	0.039	0.060
年平均气温	0.086	0.134	0.053	0.056	0.041	0.186
土壤类型	0.017	0.019	0.012	0.050	0.013	0.014
人口	0.057	0.042	0.040	0.053	0.117	0.117
GDP	0.056	0.060	0.058	0.060	0.051	0.058
距高速的距离	0.057	0.071	0.055	0.078	0.050	0.094
距国道的距离	0.073	0.046	0.075	0.066	0.088	0.081
距省道的距离	0.065	0.086	0.072	0.044	0.076	0.057
距城市道路的距离	0.084	0.059	0.079	0.046	0.072	0.054
距铁路的距离	0.098	0.045	0.124	0.050	0.062	0.032
距县道的距离	0.054	0.042	0.061	0.035	0.061	0.036
距居民点的距离	0.055	0.076	0.068	0.083	0.152	0.075
距河流的距离	0.075	0.063	0.101	0.082	0.079	0.059

基于 LEAS 模块输出的驱动贡献结果，本研究差异化校准多情景下土地转移概率矩阵与地类邻域权重，降低参数设置主观性，各情景设置如下：1) 自然发展情景(S1)：直接采用 2000~2020 年历史样本训练得到的转移概率与邻域权重，驱动因子贡献保持不变，延续土地利用历史演化规律。2) 城镇发展情景(S2)：居民点距离、人口、国道区位主导建设用地扩张。该情景提高建设用地占用耕地、草地的转移概率，上调其邻域扩张权重，放大人口集聚与干线交通的驱动效应，模拟城镇优先扩张模式。3) 耕地保护情景(S3)：降水、气温、地形控制耕地分布。设置刚性约束，禁止优质耕地转出为建设用地、林地，降低耕地转出概率、上调耕地邻域权重，削弱人口、交通驱动耕地非农化的作用，稳定黑土耕地空间。4) 生态保护情景(S4)：气温、降水、地形主导林草分布。提升林草扩张转移概率与林地邻域权重，限制建设用地侵占林草，强化自然本底驱动，鼓励陡坡耕地退耕还林还草。

2.3.2. 模型设置与情景方案

以 2000 年、2010 年、2015 年土地利用数据为基期，2020 年土地利用数据为验证期，构建 PLUS 模型开展多情景模拟[9] [10]。首先，通过 LEAS (土地扩张分析策略)模块，结合驱动因子数据，挖掘绥化市各地类的扩张概率与驱动机制；随后，基于 CARS (元胞自动机斑块生成)模块，设置不同情景下的土地利用转移规则、邻域权重与斑块生成阈值，模拟 2040 年绥化市土地利用空间格局。

结合绥化市“国家商品粮基地、寒地黑土生态屏障”的发展定位，本研究设置自然发展、城镇发展、耕地保护、生态保护 4 种情景，通过差异化的土地利用转移约束与发展导向，实现不同管控目标下的未

来土地利用格局模拟，各情景具体设置见表 4：

Table 4. Specific settings for each simulation scenario
表 4. 各模拟情景具体设置

情景类型	核心目标	主要约束规则
自然发展(Q1)	延续历史趋势，无额外干预	不设置特殊限制，土地利用转移规则与历史时期保持一致
城镇发展(Q2)	优先保障城镇扩张需求	适当放宽建设用地占用耕地、草地的限制，强化交通干线周边用地扩张概率
耕地保护(Q4)	严格保护黑土耕地资源	禁止优质耕地转为建设用地与生态用地，限制耕地非农化
生态保护(Q3)	强化林地、草地、水域等生态用地保护	限制建设用地扩张，鼓励退耕还林还草，保护生态红线区域

2.3.3. 模型精度验证

利用 2020 年实际土地利用数据与模拟结果进行对比，采用总体精度和 Kappa 系数评价模型模拟效果，当 Kappa 系数大于 0.8 时，认为模型模拟结果可靠，可用于后续情景预测与碳储量分析。其计算公式如下：

$$p_e = \frac{\left(n_{1+} \times n_{+1}\right) + \left(n_{2+} \times n_{+2}\right)}{n^2}$$

式中：n_{1+} 是分类器预测为类别 1 的总数(即第一行的总和)，n_{+1} 是真实标签为类别 1 的总数(即第一列的总和)。n_{2+} 是分类器预测为类别 2 的总数(即第二行的总和)，n_{+2} 是真实标签为类别 2 的总数(即第二列的总和)。n 是总样本数。

3. 结果与分析

3.1. Plus 模型检验

本研究以 2000 年土地利用数据为基期，依托 2000~2020 年土地利用演变趋势构建自然发展情景，设定水域为禁止转化区；依据 2000~2010 年各地类扩张占比确定邻域权重(耕地 0.65、林地 0.25、草地 0.05、水域 0.45、建设用地 0.75、未利用地 0.15)，完成 2020 年土地利用格局模拟。

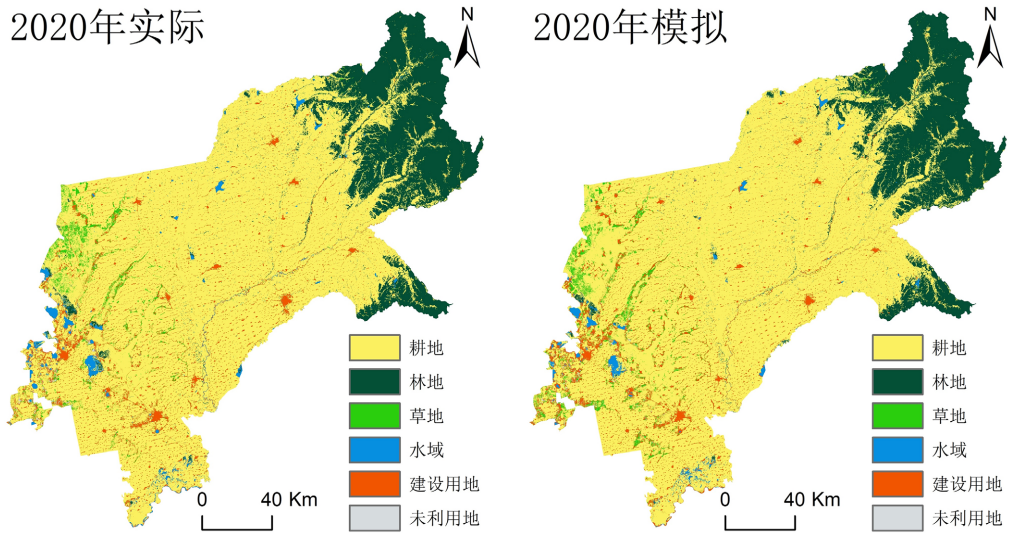
对比 2020 年真实数据：耕地、林地、水域空间模拟效果较好，中西部连片耕地与东北部林地模拟格局和现状基本一致；但建设用地实际扩张规模略大于模拟结果，集中在城区周边与交通沿线，体现城镇化加速带来的建设用地快速侵占耕地、林地的特征。

为检验模型可靠性，开展多组参数对比试验。最优参数方案下模拟总体精度 94.03%，Kappa 系数 0.856，FoM 指数 0.074，高于 Kappa > 0.75 的高度吻合标准。说明 PLUS 模型模拟效果可靠，参数设置合理，可用于 2040 年多情景土地利用预测，见图 1。

3.2. 碳储量时空演变(2000~2020)

将绥化市 2000~2020 年土地利用数据与碳密度参数输入 InVES T 模型，核算区域陆地碳储量时空分布。2000、2005、2010、2015、2020 年碳储量总量依次为 636.97 × 10^6 t、631.95 × 10^6 t、629.45 × 10^6 t、627.45 × 10^6 t 和 626.55 × 10^6 t。20 年间碳储量持续下降，累计减少 10.42 × 10^6 t，减幅达 1.64%，区域生

态固碳能力减弱[11]。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Comparison between the simulation results of land use in Suihua in 2020 and the actual situation
图 1. 2020 年绥化土地利用模拟结果与实际对比

分阶段来看：2000~2005 年降幅最大，之后逐年收窄，碳储量下降趋于平缓。从地类组成上，耕地与林地为碳储量主要来源，合计占比长期高于 96%，二者碳储量持续下降，是区域碳库减少的主因；草地碳储量降幅明显，受农业开发与城镇扩张挤压；建设用地碳储量持续上升，体现城镇化对碳汇的挤占；水域与未利用地碳储量基数小，对总体影响有限。

空间上，绥化市碳储量呈“东北高、西南低”格局。高值区集中在东北部林地、草地，植被与土壤固碳能力强；低值区分布于中西部耕地与城镇区域，人类活动强烈、地类转换频繁，碳储量水平偏低。

3.3. 2000~2020 年土地利用变化及其对碳储量的影响

3.3.1. 2000~2020 年绥化土地利用变化

2000~2020 年绥化市土地利用以耕地为主、林地为辅，两类用地合计占比常年高于 90%，草地、水域、建设用地与未利用地占比较小，20 年间各地类发生明显转换。

其中建设用地扩张最为显著，持续快速增长；水域小幅增加，未利用地不断被耕地、建设用地侵占而缩减。耕地、林地、草地面积呈波动下降，耕地与林地作为主体地类，主导区域土地利用结构变化。地类转换以耕地转为建设用地为主，同时存在部分耕地向林、草地转化。耕地转建设用地集中于城区周边与交通沿线，体现城镇化对耕地的挤占；耕地转为林草则源于生态修复、退耕还林还草政策。总体而言，绥化土地利用变化受城镇化扩张与生态保护政策共同驱动，呈现“城镇扩张占用耕地、生态政策推动还林还草”的特点，见图 2。

3.3.2. 2000~2020 年土地利用变化驱动力

本研究选取 16 个驱动因素，探讨绥化市土地利用变化的原因。结果表明，林地扩展主要受年平均气温影响；耕地扩展主要受年平均降水驱动；草地变化受距铁路距离与降水共同作用；水域变化主要由 DEM 高程主导；建设用地增长主要与距居民点距离、人口密度相关；未利用地变化受年平均气温和人口密度

影响。总体而言，自然条件是生态用地变化的基础约束，社会经济与交通区位因子是生产生活用地变化的关键[12]，见图 3、图 4。

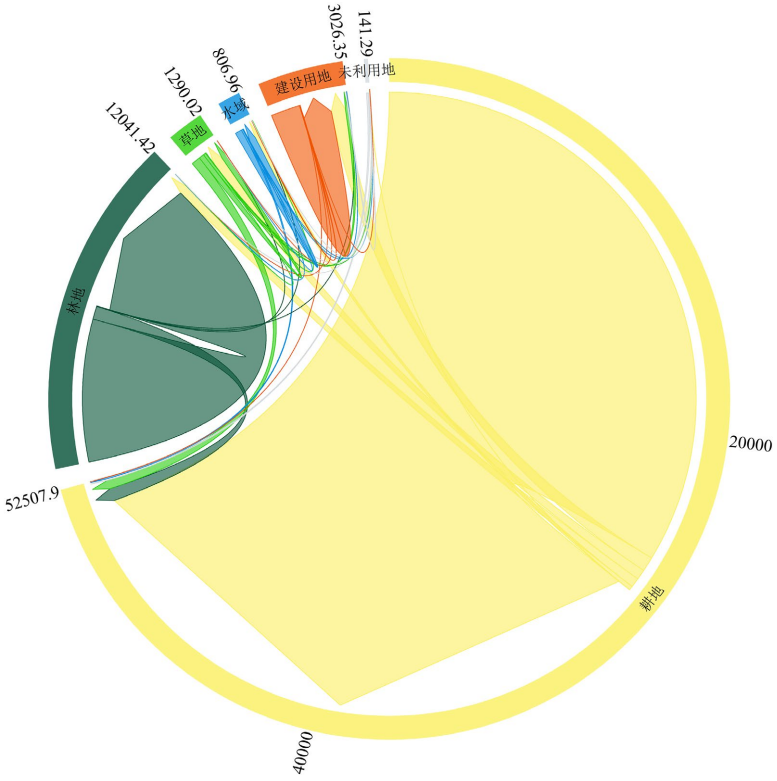


Figure 2. Land use change map of Suihua from 2000 to 2020
图 2. 2000~2020 年绥化土地利用变化图

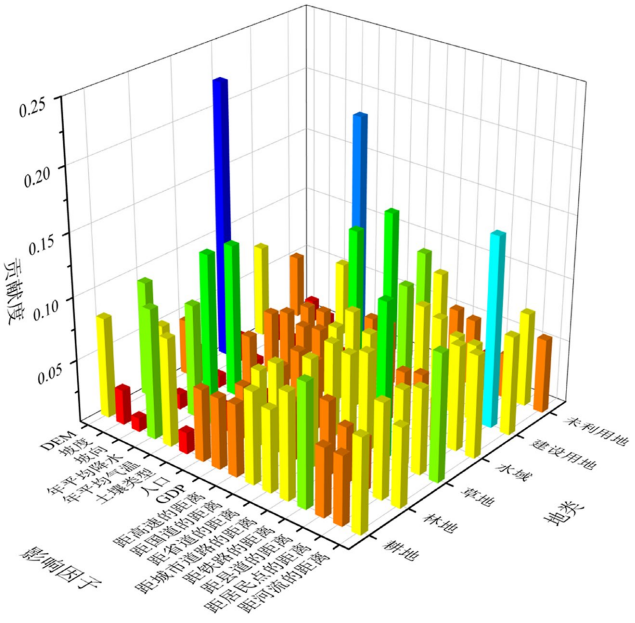
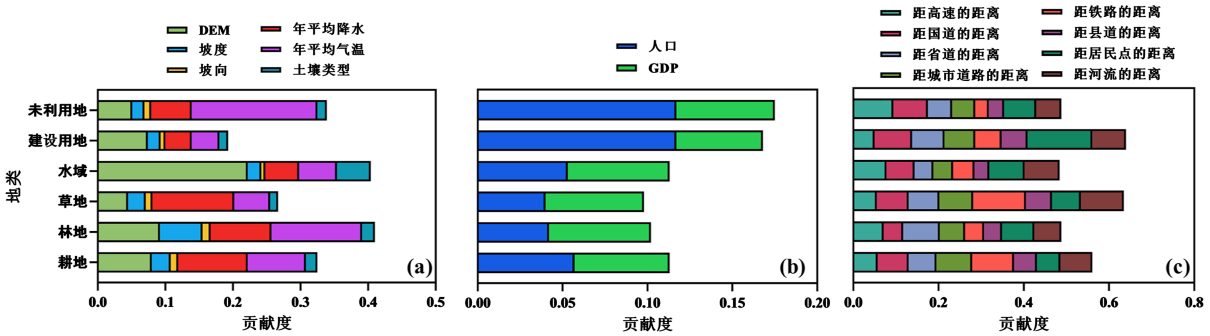


Figure 3. Overall contribution of driving factors
图 3. 总体驱动因子贡献度

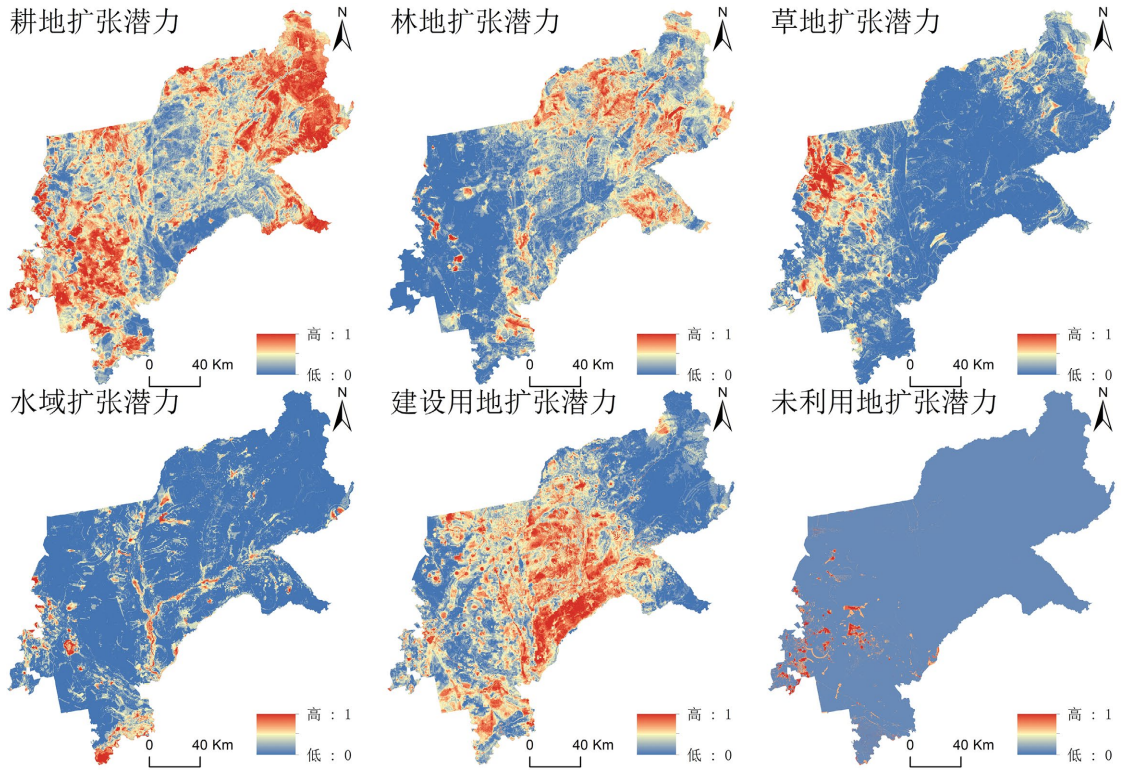


(a) 自然因素，(b) 社会经济，(c) 基础地理信息

Figure 4. Contribution of various land use expansion drivers
图 4. 各类用地扩张驱动因子贡献度

3.3.3. 各地类扩张潜力空间分布特征

基于 PLUS 模型 LEAS 模块得到绥化市各地类扩张潜力空间分布。结果表明，不同地类扩张潜力空间差异显著：建设用地高值区集中在中心城区及国省道路沿线，受人类活动与交通区位驱动；耕地高值区分布于中西部平原，受地形、降水、土壤条件共同控制，与粮食生产格局匹配；林地扩张潜力集中在东北部丘陵区，受气温、高程等自然条件约束；草地、水域及未利用地整体扩张潜力偏低，仅局部存在小范围高值区，受水文、地形和生态政策影响。总体上，绥化市土地扩张潜力格局与自然本底、社会经济条件高度耦合，可为多情景土地利用模拟与管控提供支撑，见图 5。



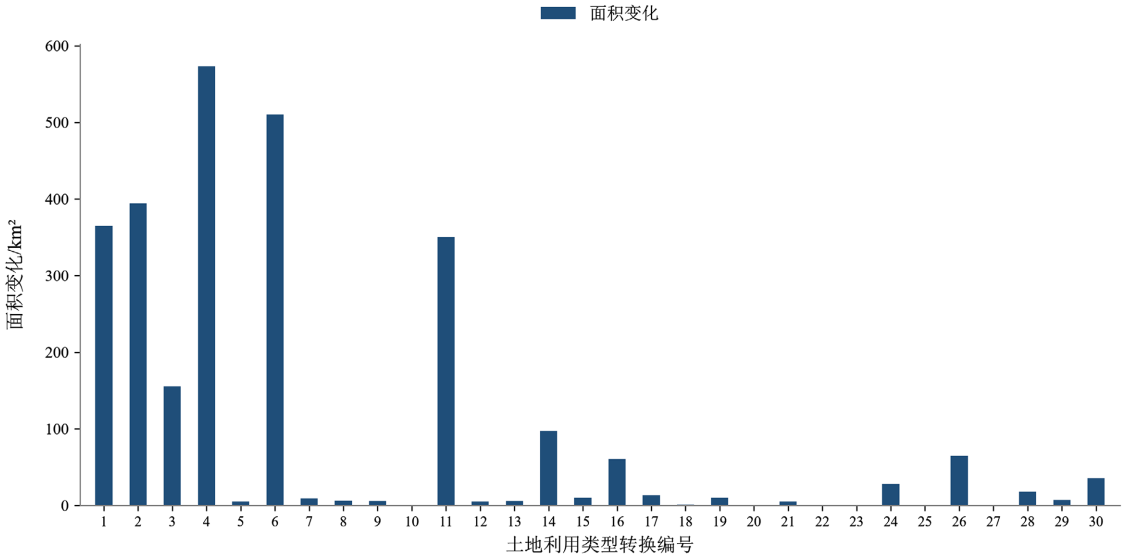
注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 5. Expansion potential of various types of land use
图 5. 各类用地扩张潜力

3.3.4. 土地利用变化对碳储量的影响

绥化市 2000~2020 年土地利用与碳储量分析表明，碳储量随土地格局调整波动，受地类转换方向和规模控制。不同地类碳密度差异明显，林地、耕地等高碳密度用地转为建设用地是碳储量下降的主因，也是碳流失核心路径；林地开垦为耕地同样带来碳损失。林地碳密度最高，被占用会造成生物量碳与土壤有机碳流失，削弱碳汇。2000~2020 年建设用地扩张侵占林、耕地，引发大量碳损失。可见，林地缩减与建设用地扩张严重威胁区域碳储量稳定，见图 6 和见表 5。

因此，国土空间规划与生态保护应关注土地利用变化的碳效应，严控建设用地侵占林地与优质耕地，通过林地保护和生态修复维持碳储能力，支撑区域双碳目标[13] [14]。



注：土地利用类型转换编号。(1. 耕地→林地，2. 耕地→草地，3. 耕地→水域，4. 耕地→建设用地，5. 耕地→未利用地，6. 林地→耕地，7. 林地→草地，8. 林地→水域，9. 林地→建设用地，10. 林地→未利用地，11. 草地→耕地，12. 草地→林地，13. 草地→水域，14. 草地→建设用地，15. 草地→未利用地，16. 水域→耕地，17. 水域→林地，18. 水域→草地，19. 水域→建设用地，20. 水域→未利用地，21. 建设用地→耕地，22. 建设用地→林地，23. 建设用地→草地，24. 建设用地→水域，25. 建设用地→未利用地，26. 未利用地→耕地，27. 未利用地→林地，28. 未利用地→草地，29. 未利用地→水域，30. 未利用地→建设用地)。

Figure 6. Changes in land use types and areas in Suihua from 2000 to 2020
图 6. 2000~2020 年绥化土地利用类型面积变化

Table 5. Carbon storage of various land use types in Suihua from 2000 to 2020
表 5. 2000~2020 年绥化各土地利用类型碳储量

碳储量	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地/10^6 t	487.51	475.15	474.78	480.15	478.25
林地/10^6 t	133.42	130.73	132.7	128.22	130.13
草地/10^6 t	9.07	12.21	13.41	9.88	8.49
水域/10^6 t	1.18	2.41	1.4	1.57	1.57
建设用地/10^6 t	4.91	10.23	6.61	7.26	7.82
未利用地/10^6 t	0.89	1.22	0.54	0.38	0.29
总计/10^6 t	636.97	631.95	629.44	627.46	626.55

3.4. 2040 年绥化碳储量预测变化

3.4.1. 多情景土地变化

以 2020 年土地利用格局为基准，设置自然发展、城镇扩张、耕地保护、生态保护 4 类情景，模拟绥化市 2040 年土地利用格局，并耦合 InVEST 模型核算碳储量。不同情景下土地演化路径与碳储量变化差异显著，见表 6。

自然发展情景延续 2000~2020 年演变特征，耕地、林地、草地、未利用地缩减，建设用地与水域扩张，碳储量降至 6.20×10^8 t；城镇扩张情景建设用地快速侵占其他地类，碳储量最低，为 6.18×10^8 t；耕地保护情景严控耕地非农化，碳储量降幅最小，达 6.21×10^8；生态保护情景林地、水域增加，建设用地扩张放缓，碳储量为 6.19×10^8 t。

对比可见，耕地保护情景保耕地、固碳效果最优，生态保护情景有利于生态修复。绥化国土空间规划应统筹耕地保护与生态修复，实施差异化管控，协调城镇建设、粮食安全与生态保护，实现国土空间可持续利用，见图 7。

Table 6. Prediction results of various land-use categories in Suihua under different development scenarios
表 6. 绥化不同发展情景下各地类预测结果

时间	面积(km²)					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000	26504.93	6094.40	667.52	345.21	1169.23	163.07
2010	25813.64	6063.10	984.40	412.60	1572.13	98.49
2020	26002.97	5947.01	622.51	461.77	1857.11	52.99
2040 年自然发展情景	25849.17	5760.78	496.10	455.49	2363.31	19.53
2040 年城镇发展情景	25756.18	5730.13	501.14	438.07	2499.38	19.46
2040 年耕地保护情景	25980.63	5728.01	486.50	452.12	2272.40	24.69
2040 年生态保护情景	25612.25	5868.99	604.11	484.08	2345.01	29.92

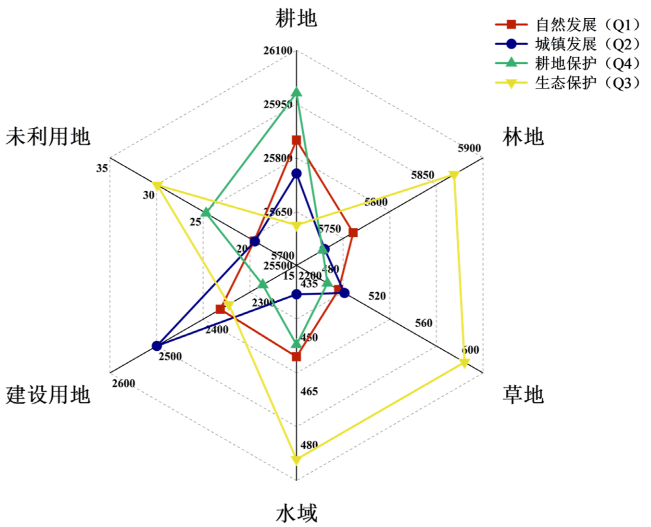


Figure 7. Comparison of land use demand in Suihua under different scenarios in 2040
图 7. 绥化 2040 年不同情景下土地利用需求量比较

3.4.2. 多情景碳储量变化分析

基于 PLUS 模型得到 2040 年土地利用格局，结合区域碳密度参数，采用 InVEST 模型开展碳储量多情景评估，解析不同发展路径下碳储量演变规律。结果显示：2040 年各情景碳储量均低于 2020 年基准值，但降幅差异明显；碳储量空间格局延续“东北高、西南低”的特征，存在显著路径依赖效应。

碳储量排序：耕地保护情景(6.21×10^8 t) > 自然发展情景(6.20×10^8 t) > 生态保护情景(6.19×10^8 t) > 城镇发展情景(6.18×10^8 t)。城镇发展情景碳储量降幅最大，源于建设用地扩张侵占高碳密度地类；自然发展情景延续历史用地变化趋势，碳储量持续下降；耕地保护情景严控耕地非农化，有效减缓碳损失；生态保护情景依靠林地修复缩小碳储量降幅，具备碳汇提升潜力[15]-[17]。

单纯城镇扩张或自然发展将加剧碳流失，耕地与生态保护协同管控可兼顾粮食安全、生态保护与碳汇维持，为绥化市双碳目标及黑土地保护提供支撑。

3.5. 碳损失风险分区与差异化管控

3.5.1. 碳损失风险分区识别

基于 2000~2020 年碳储量变化率与土地利用转移强度，采用自然断点法将绥化市划分为高、中、低风险区及稳碳区，识别各区碳库流失风险等级与驱动特征。

高风险区集中于主城区及周边乡镇，建设用地扩张侵占大量耕地、林地，碳储量年均降幅超 2%，是碳流失核心敏感区；中风险区沿交通干线呈条带状分布，以中部平原城镇密集区为主，耕地零星转为建设用地，年均碳储量降幅 1%~2%；低风险区覆盖中西部连片耕地，用地结构稳定，碳储量年均降幅不足 1%，耕地土壤碳库为主要碳汇来源；稳碳区分布在东北部林地集中地带，人为干扰弱，林地碳库稳定，部分区域经生态修复实现碳储量小幅增长，是区域关键碳汇屏障。

3.5.2. 分区差异化管控策略

结合多情景碳储量预测与碳损失分区结果，本研究构建分区、分类、分情景协同的低碳土地利用管控方案，为寒地黑土区国土空间规划、碳损失防控及双碳落地提供支撑。

(1) 高风险区(城镇扩张管控区)：以城镇发展情景为约束，严控建设用地无序扩张破坏碳库。划定城镇开发边界，禁止占用优质耕地与林地；盘活存量低效用地，配套建设城区绿地，完善城市碳汇网络。

(2) 中风险区(协调发展管控区)：兼顾城镇建设与碳汇保护，城镇开发优先选用未利用地、劣质草地，严禁占用黑土耕地；构建“耕地－林草－水系”生态格局，推广免耕、秸秆还田等保护性耕作，提升耕地土壤碳汇。

(3) 低风险区(黑土耕地保护区)：以耕地保护情景为导向稳定耕地碳库。严守永久基本农田，遏制耕地非农化、非粮化；通过深松整地、测土配方施肥、秸秆还田提升黑土有机质，打造旱作农业碳汇基地。

(4) 稳碳区(生态碳汇核心区)：依托生态保护情景实施严格生态管控。禁止林草转为耕地与建设用地，维护原生生态；实施天然林保护、退耕还林还草工程，挖掘林草碳汇潜力，筑牢碳汇安全屏障。

4. 讨论

(1) 多情景模拟结果对比与政策启示。本研究耦合 PLUS-InVEST 模型，并完成寒地黑土区碳密度本地化校正。结果显示耕地保护情景碳储量最优，与已有研究结论一致。黑土耕地土壤有机碳储量高，保护耕地可同时保障粮食安全与土壤碳库；生态保护情景能够提升林草碳汇；城镇扩张情景碳损失最为显著。这表明寒地黑土区耕地保护即是碳保护，粮食安全与双碳目标并非对立。本情景模拟可为国土空间规划提供参考，但受政策、重大工程、社会经济波动影响，结果存在不确定性，不过各情景间相对差异仍具备参考价值。

(2) 碳储量评估的不确定性来源。尽管本研究校正了碳密度参数，仍存在局限：① InVEST 碳储量模块假设同类用地碳密度均质，忽略地类内部土壤、植被空间异质性；② 碳密度参数源于文献统计，缺少区域大量实地采样数据；③ PLUS 模型对细碎小斑块模拟存在误差。本研究侧重宏观格局与情景对比，后续可结合实地采样、高分辨率遥感优化碳密度空间分布，借助地理探测器解析碳储量空间分异的驱动机制，进一步揭示寒地黑土区土地利用－碳循环机理。

(3) 管控落地思考。本研究提出碳损失风险分区差异化管控，将碳储量评估成果对接国土空间管控，区别于仅开展情景预测的相关研究。但碳损失风险分区如何衔接国土空间 “三区三线”、碳汇指标如何纳入地方考核体系，仍需结合地方实践细化研究。

5. 结论

(1) 2000~2020 年绥化市呈“城扩农退”的土地利用特征，建设用地持续扩张，耕地、林地、草地缩减；碳储量累计下降 1.64%，空间上呈“东北高、西南低”格局，耕地与林地向建设用地转换是碳流失主因[18]-[20]。

(2) 2040 年多情景模拟显示，耕地保护情景碳储量最高，城镇发展情景最低；生态保护情景可有效收窄碳储量降幅[21]-[25]，提升林草碳汇能力。单一城镇扩张会加剧碳流失，耕地与生态保护协同管控是最优路径。

(3) 绥化市土地利用与碳储量格局受人类活动驱动与自然条件约束双重控制。基于碳损失风险划分四类管控区并实施差异化策略，可为寒地黑土区低碳国土空间调控提供科学支撑，助力双碳目标与黑土保护协同推进。

基金项目

黑龙江省省属本科高校基本科研业务费科研项目(No.2025-KYYWF-ZR0110)、黑龙江省生态环境厅科研项目(No.HST2025QT003)。

参考文献

[1] Ma, Y., Wang, J., Xin, P., Zhao, Z., Zhang, X., Yang, Y., *et al*. (2025) Assessing Carbon Storage Dynamics and Policy Impacts: Application of InVEST-PLUS Framework in the Qinling Mountains, China. *Land Use Policy*, **164**, Article 107947. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2026.107947

[2] Bai, Y., Tang, X., Xue, F., Long, D., Li, J. and Tang, Y. (2025) Spatiotemporal Variation and Dynamic Simulation of Carbon Stock Based on PLUS and Invest Models in the Li River Basin, China. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 6060. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86226-1

[3] Rong, T., Zhang, P., Zhu, H., Jiang, L., Li, Y. and Liu, Z. (2022) Spatial Correlation Evolution and Prediction Scenario of Land Use Carbon Emissions in China. *Ecological Informatics*, **71**, Article 101802. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101802

[4] Yu, Z., Chen, L., Tong, H., Chen, L., Zhang, T., Li, L., *et al*. (2022) Spatial Correlations of Land-Use Carbon Emissions in the Yangtze River Delta Region: A Perspective from Social Network Analysis. *Ecological Indicators*, **142**, Article 109147. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109147

[5] Ang, B.W. (2005) The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide. *Energy Policy*, **33**, 867-871. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.010

[6] Wan, D., Liu, J. and Zhao, D. (2023) Assessment of Carbon Storage under Different SSP-RCP Scenarios in Terrestrial Ecosystems of Jilin Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, Article 3691. https://doi.org/10.3390/ijerph20043691

[7] Li, X., Huang, C., Jin, H., Han, Y., Kang, S., Liu, J., *et al*. (2022) Spatio-Temporal Patterns of Carbon Storage Derived Using the Invest Model in Heilongjiang Province, Northeast China. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 846456. https://doi.org/10.3389/feart.2022.846456

[8] 张坤, 吴新萍, 刘永强, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的新疆碳储量时空演变与预测[J]. 干旱区研究, 2025, 42(9):

1521-1530.

[9] 丁岳, 桂峰, 李阳, 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, 46(6): 2833-2842.

[10] 王悦, 于福东, 张月, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的东北黑土区景观格局与碳储量变化多情景模拟[J]. 生态环境学报, 2026, 35(2): 178-189.

[11] 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.

[12] 侯红艳, 戴尔阜, 张明庆. InVEST 模型应用研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 62-67.

[13] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.

[14] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于InVEST模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.

[15] 吴先雯, 郭风成. 基于 InVEST 模型和 FLUS 模型的江苏省碳储量变化模拟与预测[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(2): 230-239.

[16] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1545-1559.

[17] 黄庆华, 向静, 潘婷. 成渝地区双城经济圈产业融合发展: 水平测度、时空分布及动力机制[]. 重庆大学学报(社会科学版), 2023, 29(6): 17-35.

[18] Bai, K., Li, K., Sun, Y., Wu, L., Zhang, Y., Chang, N., *et al*. (2023) Global Synthesis of Two Decades of Research on Improving $PM_{2.5}$ Estimation Models from Remote Sensing and Data Science Perspectives. *Earth-Science Reviews*, **241**, Article 104461. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104461

[19] 杨静媛, 张明, 多玲花, 等. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2312-2321.

[20] 杜海波, 杨山, 李振亚, 等. 碳中和目标下长三角碳源/汇时空特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 6848-6857.

[21] 卢培嘉, 张洁, 王昕, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的土地利用类型变化和碳储存量时空演变及预测——以广西东融片区为例[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(9): 148-156.

[22] 李军, 邓云思, 黄泳杰, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的川西山地区土地利用变化和碳储量时空演变及预测——以雅安市为例[J]. 西南农业学报, 2024, 37(8): 1797-1808.

[23] 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+875.

[24] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业 资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019.

[25] Fang, J., Shugart, H.H., Liu, F., Yan, X., Song, Y. and Lv, F. (2022) FORCCHN V2.0: An Individual-Based Model for Predicting Multiscale Forest Carbon Dynamics. *Geoscientific Model Development*, **15**, 6863-6872. https://doi.org/10.5194/gmd-15-6863-2022