

# 哈尔滨市绿色空间碳储量多情景模拟

李雪, 李文, 石淞, 曲琛

(东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** [目的] 预测黑龙江省哈尔滨市未来绿色空间格局碳储量, 分析绿色空间变化对碳储量的影响, 为双碳政策下哈尔滨市绿色空间规划提供决策依据。[方法] 基于 2010、2020 年哈尔滨市绿色空间土地覆盖数据, 将双碳产业驱动因子引入 FLUS 模型预测 2030 年不同情景的绿色空间土地覆盖变化, 利用 InVEST 模型测算 2010、2020、2030 年碳储量, 比较分析碳储量时空变化规律, 探讨绿色空间对碳储量的影响。[结果] ① 将双碳产业因子引入 FLUS 模型后, 较原模型的 kappa 系数提高了 1.30%, 均方根误差减少了 0.21%, 改进后的模型模拟精度更高。② 2010—2020 年, 碳储量呈下降趋势, 共减少了  $5.14 \times 10^6$  t, 耕地的减少是造成碳储量损失的主要因素。地上生物量碳库和土壤碳库碳储量最多, 占总碳储量的 88.52%。③ 2030 年自然发展、生态保护和经济发展情景下的碳储量分别为  $2.58 \times 10^9$ ,  $2.58 \times 10^9$ ,  $2.58 \times 10^9$  t, 同 2020 年相比均呈下降趋势, 其中生态保护情景的下降速率最慢, 是自然发展情景下的 0.12 倍。[结论] 未来应加强生态保护修复措施, 减少耕地和林地面积流失, 控制非绿色空间的扩张, 提高哈尔滨市域碳储量。

**关键词:** 绿色空间; 多情景模拟; 碳储量; 土地覆盖变化; 黑龙江省哈尔滨市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)03-0320-10

**中图分类号:** F301.2, X171.1

**文献参数:** 李雪, 李文, 石淞, 等. 哈尔滨市绿色空间碳储量多情景模拟[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 320-329. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230320.001; Li Xue, Li Wen, Shi Song, et al. Multi-scenario simulation on carbon storage of green space in Harbin City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 320-329.

## Multi-scenario Simulation on Carbon Storage of Green Space in Harbin City

Li Xue, Li Wen, Shi Song, Qu Chen

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

**Abstract:** [Objective] The carbon storage of the future green space patterns was predicted, and the impact of green space changes on carbon storage was analyzed in order to provide a basis for green space planning in Harbin City, Heilongjiang Province under the dual-carbon policy. [Methods] Based on the green space land cover data of Harbin City in 2010 and 2020, the dual-carbon industry driving factors were introduced into the FLUS model, and the changes in green space land cover under different scenarios in 2030 were predicted. The carbon storage values in 2010, 2020, and 2030 were calculated using the InVEST model. The spatial-temporal variation of carbon storage was compared and analyzed, and the influence of green space on carbon storage was discussed. [Results] ① After the dual-carbon industry factors were introduced into the FLUS model, the kappa coefficient increased by 1.30%, and the root mean square error decreased by 0.21% compared with the original model, indicating increased simulation accuracy of the improved model. ② From 2010 to 2020, carbon storage decreased by  $5.14 \times 10^6$  t, primarily as result of decreased cultivated land. Carbon was primarily stored in the aboveground biomass carbon pool and the soil carbon pool, accounting for 88.52% of the total carbon reserves. ③ Carbon storage under natural development, ecological protection, and economic development

收稿日期: 2022-10-25

修回日期: 2023-01-10

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); 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: 李雪(1998—), 女(汉族), 内蒙古自治区莫力达瓦达斡尔族自治旗人, 硕士研究生, 研究方向为风景园林规划与设计 and 绿色空间碳储量研究。Email: 2021187016@qq.com。

通信作者: 李文(1971—), 女(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 副教授, 主要从事城市生态修复与规划与碳中和等方面研究。Email: liwen@nefu.edu.cn。

scenarios in 2030 were  $2.58 \times 10^9$ ,  $2.58 \times 10^9$ , and  $2.58 \times 10^9$  t, respectively, showing a downward trend from 2020. The decline rate in the ecological protection scenario was the slowest of the three scenarios, and was 0.12 times the rate observed for the natural development scenario. [Conclusion] In the future, ecological protection and restoration measures should be strengthened to reduce the loss of cultivated land and forest land, and the expansion of non-green space should be controlled in order to improve carbon storage in Harbin City.

**Keywords:** green space; multi-scenario simulation; carbon storage; land cover change; Harbin City, Heilongjiang Province

后疫情时代,全球的气候问题不容乐观,及时应对恶劣的气候形势是全人类的思想共鸣<sup>[1]</sup>。中国政府提出力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和(简称“双碳”)的重大战略<sup>[2]</sup>。生态系统是城市实现碳平衡的重要保障,陆地生态系统碳储量是表征碳储存服务的重要指标<sup>[3]</sup>。城市绿色空间是一种复合生态系统,可以固碳释氧,有效缓解气候问题,是实现“碳达峰、碳中和”的重要空间载体<sup>[4]</sup>。

国内外研究者计算生态系统碳储量主要是通过实地调查、模型模拟和遥感反演等。Zhang 等<sup>[5]</sup>、李宁<sup>[6]</sup>和侯瑞萍等<sup>[7]</sup>运用生物量—蓄积量等计算方法进行碳储量计算。Sohl T L<sup>[8]</sup>和邓喆等<sup>[9]</sup>运用 InVEST模型结合土地利用/覆盖数据进行模拟估算。夏安全等<sup>[10]</sup>、杨鑫等<sup>[11]</sup>和张桂莲等<sup>[12]</sup>则是借助遥感影像估算碳储量进行相关研究。情景设置可以对比分析不同发展情景下的事物发展状态<sup>[13]</sup>。Liu Xiaoping 等<sup>[14]</sup>已证明 FLUS 模型可以有效地预测各种设计场景下的复杂土地利用变化。庄子薛等<sup>[15]</sup>对 2030 年生态修复力度不同的 3 种情景下的碳储量进行模拟预测。孙定钊等<sup>[16]</sup>模拟了黄土高原历史趋势延续情景、生态保育管护情景、城镇发展建设情景下土地利用变化。目前,大多研究单纯从土地利用/覆盖变化的角度探讨其对碳储量的影响,而对市域范围内的绿色空间的生态系统碳储量研究较少。

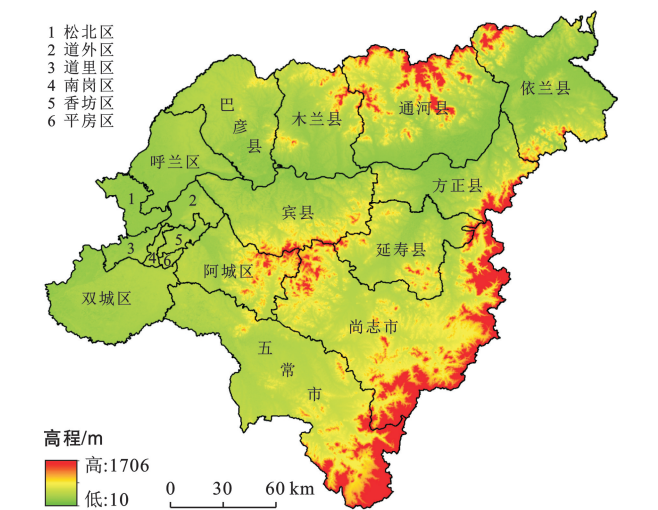
本研究采用 GeoSOS-FLUS 软件,以 2010 年和 2020 年哈尔滨市土地覆盖数据为基础,设置自然发展情景、生态保护情景、经济发展情景 3 种情景,进行 2030 年哈尔滨市绿色空间的多情景模拟预测,结合哈尔滨市目前的双碳产业规划,提取双碳项目平台等作为双碳产业驱动因子,形成改进的 FLUS 模型,为优化哈尔滨市的绿色空间格局提出合理的规划决策和实现“双碳”政策提供参考。

# 1 研究方法数据来源

## 1.1 研究区概况

哈尔滨市位于黑龙江省南部,地势西低东高(图 1),总面积  $5.31 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,作为中国东北北部政

治、文化和经济枢纽,具有不可替代的地位,更是国际性空中交通走廊的关键。哈尔滨市北部是小兴安岭,东南侧被张广才岭支脉所包围,市内具有丰富的植被资源,山势平缓,溪流纵横,松花江穿其而过。2020 年,哈尔滨市常住人口  $1.00 \times 10^7$  人,GDP 为  $5.14 \times 10^{11}$  元,占黑龙江省 GDP 的 37.49%。哈尔滨市属中温带大陆性季风气候,四季分明,冬长夏短,年均气温和年均降水量分别为 3.5℃和 569.1 mm。耕地面积占整个市域的 48.60%,是面积最大的土地覆盖类型。此外,哈尔滨市域的土地覆盖类型还包括林地、草地、人造地表、湿地和水域及裸地,覆盖面积比例分别为 35.89%,7.91%,4.13%,1.71%,1.73%和 0.03%。



注:本图地理底图源于地理空间数据云 V2020,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)3266 号标准地图校准制作。下同。

图 1 哈尔滨市高程分布图  
Fig.1 Elevation distribution map of Harbin City

## 1.2 数据来源和预处理

本文使用的数据主要包括土地利用/覆盖数据、驱动因子数据、限制因子数据和碳密度数据。土地利用/覆盖数据从 Globe Land 30 全球地表覆盖数据(<http://www.globallandcover.com/>)选取 2010 年和 2020 年的土地覆盖数据,依据 Globelland 30 分类系统,在 ArcGIS 中进行去黑边、合并和裁剪。

驱动因子数据包括自然因子、社会因子、交通因子及双碳产业因子。DEM 数据由地理空间数据云获

得,在 ArcGIS 中进行合并,按掩膜提取,并经过坡度、坡向计算得到坡度、坡向数据,其他的自然因子年均气温和年均降水数据来源于高分辨率网格化数据集([https:// crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/](https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/)),再经过反距离权重法处理。社会因子包括人口密度、人均 GDP 公里格网数据,分别来源于 World Pop(<https:// www.worldpop.org/>)和地理国情监测云平台(<http:// www.dsac.cn/>)。距离水系、国道、公路、高速、县道、铁路、碳研究点距离等交通因子来源于全球地理信息资源目录服务系统(<https:// www.webmap.cn/>)再通过欧式距离求得。选取资源环境科学与数据中心(<https:// www.resdc.cn/>)中的哈尔滨市域自然保护区数据进行栅格化处理作为限制因子。为保证数据的一致性,土地利用/覆盖数据、驱动因子和限制因子确定 WGS\_1 984\_UTM 作为统一的坐标系,分辨率均为 100 m×100 m,其中驱动因子数据设置相同的行列数并进行归一化处理。

参考以往研究中的绿色空间分类体系<sup>[17-19]</sup>,绿色空间包括耕地、林地、草地、湿地、水域,非绿色空间包括人造地表、裸地等。本次研究对象包括哈尔滨市域内的耕地、林地、草地、湿地、水域等。

### 1.3 研究方法

1.3.1 模型介绍 FLUS 模型是一种用来模拟未来

不同情景下的土地利用情况的模型,主要由两个模块组成,第一个模块是自底向上 CA 模型,第 2 个模块是自顶向下 SD 模型。在模拟过程中,首先要利用基础土地利用/覆盖数据结合驱动力数据通过 ANN 算法得出适宜性概率,随后再给出自适应惯性和基于轮盘赌结果的竞争机制。

在气候多变的背景下,哈尔滨市为响应国家“双碳”政策,把握时代机遇,积极开展相关研究工作,制定“碳达峰、碳中和”科技创新行动方案,鼓励开展有关碳中和相关研究产业,实现中微观层面的相关规划。为了更好地模拟在双碳政策下的未来发展情景,有必要提取“双碳”研究平台等作为双碳产业驱动因子引入 FLUS 模型,进行模型的进一步改进。

地理学第一定律(Tobler’s First Law)表明“任何事物都相关,相近的事物关联更紧密”<sup>[20]</sup>,相关产业的崛起与布局影响着周围土地覆盖尤其是人造地表的未来发展情况。再根据地理邻近性<sup>[21]</sup>,研究环境一旦形成会带动周围研究院所和公司企业进一步开展相关研究<sup>[22]</sup>。因此,首先要找寻到“双碳”研究的源头,经调查研究,选取哈尔滨市现有的碳汇项目的公司和“双碳”研究院所(表 1),并计算研究区栅格至规划双碳产业平台的距离,并将此作为双碳产业驱动因子引入模型。

表 1 “双碳”研究院所项目名称及经纬度

Table 1 Project name, longitude, and latitude of “double carbon” research institute			
双碳研究院所/公司名称	研究院/项目名称	经度(°E)	纬度(°N)
东北林业大学	碳中和技术创新研究院	126.634 252	45.720 355
哈尔滨工业大学	双碳产业技术研究院	126.631 115	45.741 465
哈尔滨理工大学	战略合作协议	126.616 657	45.714 903
黑龙江大学	校企合作	126.630 882	45.713 36
黑龙江省生态环境厅	同研究院所合作	126.706 473	45.743 326
黑龙江省自然资源厅	同研究院所合作	126.696	45.744 4
黑龙江省林业和草原局	同研究院所合作、林业碳汇项目	126.676 79	45.739 657
尚志国有林场管理局	林业碳汇项目	127.960 5	45.210 55
哈电集团江北科研基地大楼	战略合作协议	126.507 462	45.791 356
龙江森工集团	碳中和服务交易合作协议	126.661 896	45.747 458

1.3.2 绿色空间情景设置 本研究设定了自然发展、生态保护、经济发展 3 种情景。

(1) 自然发展情景主要考虑自然因素,不考虑国家相关政策的影响,主要是土地利用变化趋势的再延续。该情境依据 2010—2020 年的土地利用/覆盖转移矩阵,邻域因子参数和转移成本矩阵保持不变,结合 Markov 模型进行预测绿色空间土地覆盖的变化。

(2) 生态保护情景主要优先考虑生态环境的保护与发展,参考哈尔滨市十四五规划健全绿色发展体系,改善生态环境质量,及国务院颁布的《2030 年前

碳达峰行动方案》中构建有利于碳达峰、碳中和的国土空间开发保护格局,依据自然发展情景下土地利用/覆盖转移矩阵,控制城镇化发展,设定林地、草地向人造地表的转移概率减少 50%,耕地向人造地表转移减少 30%,耕地向林地、草地转移概率增加 30%。

(3) 经济发展情景下,优先发展市域的经济,自然环境则会受到一定的影响。哈尔滨市作为东北地区北部政治、经济、文化中心,哈大齐工业走廊的起点,具有重要的经济地位,在自然情景发展的基础上,人造地表进一步扩张,其他用地如林地和草地等相应



减少,该情景设置林地、草地向人造地表转化概率增加 50%,耕地向人造地表增加 20%。

1.3.3 绿色空间多情景模拟 本研究使用 Geo SoS-FLUS 软件对哈尔滨市绿色空间进行模拟,模型在使用过程中需要设置以下参数:

(1) 计算适宜性概率 ANN。适宜性概率代表每种土地覆盖类型在每个像元上的出现概率。输入哈尔滨市 2010 年绿色空间土地覆盖数据作为基础数据,采用随机取样策略,采样参数设置为 20,神经网络的隐藏层数设为 12。再结合以上 14 种驱动因子数据,将其进行归一化处理,同时保证数据的行列号完全一致。最终,经 ANN 训练得到 2010 年哈尔滨市绿色空间的适宜性图集,其均方根误差为 0.205 546,训练精度较好。

(2) 邻域因子参数设定。邻域因子代表不同土地利用类型之间的相互作用,其参数与土地利用和土地覆盖类型的扩张能力是成正比的,其参数范围为 0~1,越接近 1 则代表更容易进行转化,其扩张能力越强。本研究首先对土地利用类型进行无量纲化处理,经过不同情境下多次调试,并对试验结果进行比较,最终确定结果。

(3) 转移成本矩阵设定。转移成本矩阵指各土地利用/覆盖类型间相互转化的可能,成本矩阵中只有 0,1,0 代表不能够发生转化,1 则代表可以发生转化。本研究依据 2010—2020 年哈尔滨市土地覆盖转移特征,结合各情景需求设计 3 种对应的转换成本矩阵。

(4) 精度验证。kappa 指数是由 Cohen 提出衡量分类精度的指标,常用来衡量土地利用/覆盖布局模拟结果的精确度,取值范围为[0,1],当 kappa 指数大于 0.75 时,代表具有较高的可信度,认为该模型可用,计算公式为:

$$\text{kappa} = (P_o - P_e) / (1 - P_e) \quad (1)$$

式中: $P_o$  为模拟的正确率; $P_e$  为随机条件下期望的正确率。

FOM 系数是由 Pratt 提出来的,用来做性能评价,指优值,取值范围为[0,1],计算公式为:

$$\text{FOM} = B / (A + B + C + D) \quad (2)$$

式中: $A$  指真实情景下土地覆盖转变模拟的情景未变引起的误差; $B$  指真实和模拟情景均发生了同样的转变的土地; $C$  代表真实和模拟情景下土地覆盖都转变了,但两者变化不同而引起的误差; $D$  代表模拟情景发生了真实情景未发生的转变的误差。

本研究以 2010 年哈尔滨市土地覆盖数据为基础进行预测模拟 2020 年的土地覆盖数据,将得到的数

据同实际的 2020 年数据进行 kappa 指数和 FoM 精度验证,kappa 指数越大精度越高,FoM 值则越小精度越高。

### 1.3.4 InVEST 模型与碳密度系数及修正

(1) InVEST 模型。本研究通过 InVEST 模型对研究区域绿色空间土地覆盖碳储量进行计算。InVEST 模型中碳储量模块包括 4 个基本碳库:地上生物碳储量( $C_{\text{above}}$ )、地下生物碳储量( $C_{\text{below}}$ )、土壤碳储量( $C_{\text{soil}}$ )、死亡有机质碳储量( $C_{\text{dead}}$ )。根据这 4 个碳库,碳密度又分为地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机质碳密度。碳储量的计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{total}}$  表示总体碳储量; $C_{\text{above}}$  表示植被的地上生物碳储量; $C_{\text{below}}$  表示植被的地下生物碳储量; $C_{\text{soil}}$  表示土壤碳储量; $C_{\text{dead}}$  表示植被的死亡有机质碳储量。

$$C_{\text{total}_i} = (C_{\text{above}_i} + C_{\text{below}_i} + C_{\text{soil}_i} + C_{\text{dead}_i}) \times S_i \quad (4)$$

式中: $C_{\text{above}_i}$ ,  $C_{\text{below}_i}$ ,  $C_{\text{soil}_i}$  和  $C_{\text{dead}_i}$  为每种土地覆盖的地上生物、地下生物、土壤和死亡有机质的平均碳密度; $S_i$  为该土地覆盖的面积; $C_{\text{total}_i}$  为每种土地覆盖类型的总碳储量。

(2) 碳密度系数修正。本研究所用的碳密度来源于以往的研究<sup>[23-25]</sup>结果,为提高碳密度的准确度,大都选用同一个团队的、本省市或者周边省市的数据,避免使用距离较远的省份或者全国数据。不同的土地覆盖类型和气候差异会造成不同的碳密度结果,因此需要对其修正。植被的碳密度和土壤碳密度已经有诸多研究者证明同当地的年均降水量成正比,同时与研究区的年均气温呈现一定的弱相关关系。本研究考虑年均降水和气温因素来对碳密度数据进行修正。采用 Alam 等<sup>[26]</sup>研究的降水因素修正公式(公式 5,公式 6)和用 Giardina 等<sup>[27]</sup>研究中年均气温因素的修正公式(公式 7)。

$$C_{\text{SP}} = 3.396\ 8 \times P + 3\ 996.1 \quad (R^2 = 0.11) \quad (5)$$

$$C_{\text{BP}} = 6.798\ 1 \times e^{0.005\ 41\ P} \quad (R^2 = 0.70) \quad (6)$$

$$C_{\text{BT}} = 28 \times T + 398 \quad (R^2 = 0.47, p < 0.01) \quad (7)$$

$$K_{\text{BP}} = C_{\text{BP1}} / C_{\text{BP2}} \quad (8)$$

$$K_{\text{BT}} = C_{\text{BT1}} / C_{\text{BT2}} \quad (9)$$

$$K_B = K_{\text{BT}} \times K_{\text{BP}} \quad (10)$$

$$K_S = C_{\text{SP1}} / C_{\text{SP2}} \quad (11)$$

式中: $P$ ,  $T$  分别为年均降水量(mm)和年均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $C_{\text{BP}}$ ,  $C_{\text{BT}}$  分别是通过年降水量和年均气温得到的生物量碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $C_{\text{SP}}$  为依据年降水量得到的土壤碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ )。  $K_{\text{BP}}$  和  $K_{\text{BT}}$  分别为生物量碳密度的降水和气温因子修正系数; $C_{\text{BP1}}$  和  $C_{\text{BT1}}$  分别为



哈尔滨市域根据年降水量和年均温得到的生物量碳密度数据, $C_{BP2}$ 和 $C_{BT2}$ 分别为黑龙江省域根据年降水量和年均温得到的生物量碳密度数据, $C_{SP1}$ 和 $C_{SP2}$ 分别为哈尔滨市域与黑龙江省域根据年均降水得到的土壤碳密度数据, $K_B$ , $K_S$ 分别为生物量碳密度修正

系数和土壤碳密度修正系数。根据国家气象科学数据共享服务平台和 NCEI 平台等资料,哈尔滨市域和黑龙江省域 2010—2020 年均降水量和年均气温分别取值 654.99 mm/637.87 mm 和 4.19 ℃/3.44 ℃。所参考的碳密度和修正的数据如表 2。

表 2 哈尔滨市域修正前与修正后碳密度数据  
Table 2 Pre-correction and post-correction carbon density data of Harbin City

土地覆盖类型	地上生物量碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )		地下生物量碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )		土壤碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )		死亡有机物碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
耕地	3.87	4.41	14.90	16.99	20.66	20.87	0	0
林地	5.33	6.08	21.90	24.97	30.02	30.32	0.20	0.14
草地	2.93	3.34	10.58	12.06	14.45	14.59	2.27	1.54
湿地	8.90	10.15	32.78	37.37	40.90	41.31	0.24	0.16
水域	3.31	3.77	14.64	16.69	15.70	15.86	0.01	0.01
修正系数	1.14				1.01		0.68	
数据来源	韩晋榕 <sup>[23]</sup>				奚小环等 <sup>[24]</sup>		朱丽亚等 <sup>[25]</sup>	

## 2 结果与分析

### 2.1 改进模型精度验证

本研究在原来模型的基础上,引入“双碳”产业因子作为驱动因子来改进 FLUS 模型。利用研究区域 2010 年的土地覆盖数据模拟 2020 年的土地覆盖情况,在驱动因子选择上,分别引入带“双碳”产业驱动因子等 14 个驱动因子改进模型和不带“双碳”产业驱动因子的 13 个驱动因子的原模型进行模拟并对比模拟结果(图 2)。其中原模型的 ANN 适宜性计算中均方根误差为 0.205 324,而改进模型的均方根误差为 0.203 242,比原模型均方根误差小了 0.21%。将原模型和改进模型模拟出来的结果同 2020 年实际土地覆盖类型的栅格数进行对比,通过对比可知(表 3),各

个土地覆盖类型改进的模型的模拟结果更高,更加接近实际值。其中,林地的模拟精度最高,与实际值的误差只有 0.92%。改进模型模拟绿色空间比原模型模拟误差减小了 0.58%,非绿色空间模拟误差缩小了 0.36%。

从整体空间布局的模拟精度上来看,两个模型 kappa 系数均大于 0.75,添加双碳产业因子改进的模型的 kappa 系数为 0.876 42,OA 系数为 0.916 072,原模型的 kappa 系数为 0.863 44,OA 系数为 0.915 527,改进后的模型的 kappa 系数和 OA 值均大于原模型的值,FOM 系数也从 0.004 65 244 降低到 0.004 64 002。改进的模型引入双碳产业因子更加符合未来双碳政策下的土地覆盖扩张需求,模拟结果的空间布局的精度更准确。

表 3 哈尔滨市 2020 年土地利用模拟结果对比  
Table 3 Comparison of land use simulation results in Harbin City in 2020

土地覆盖类型		耕地	林地	草地	湿地	水域	人造地皮	裸地
实际值	栅格数/ $10^2$ 个	26 235.15	19 379.10	4 271.00	920.74	936.26	2 230.62	1.73
	栅格数/ $10^2$ 个	27 314.35	19 170.08	4 460.46	758.34	702.39	1 584.44	0.12
	模拟误差/%	4.11	1.08	4.44	17.64	24.98	28.97	99.31
改进模型模拟	栅格数/ $10^2$ 个	27 277.94	19 200.9	4 456.24	759.14	703.26	1 592.58	0.12
	模拟误差/%	3.97	0.92	4.34	17.55	24.89	28.60	99.31

### 2.2 2010—2020 年绿色空间碳储量时空变化特征

2.2.1 绿色空间碳储量数量变化特征 哈尔滨市域绿色空间碳储量在这 10 a 间总体上呈现下降趋势,2010, 2020 年的碳储量分别为  $2.588 \times 10^9$  t 和  $2.58 \times 10^9$  t, 共减少了  $5.14 \times 10^6$  t,2010,2020 年碳密度平均值分别

为  $493.81 \text{ t/hm}^2$  和  $499.21 \text{ t/hm}^2$ (表 4)。碳储量表现为耕地和草地分别减少了  $4.36 \times 10^7$  t 和  $9.50 \times 10^6$  t 碳储量,耕地的碳储量减量占总损失量的 82.10%,林地碳储量增加最多,增加了  $2.74 \times 10^7$  t,占碳储总增量的 57.11%,湿地和水域碳储量增量分别是

$8.51\times10^6$  t和  $1.20\times10^7$  t。总体上看,10 a 间耕地和林地的碳储量是哈尔滨市域绿色空间碳储量的变化的主要引导因素。

根据哈尔滨市域绿色空间的碳库变化结果来看(表 5),其 4 个碳库均呈下降趋势,土壤碳库和地下生

物量碳库分别减少了  $2.42\times10^6$  t 和  $2.13\times10^6$  t,占总碳库损失量的 88.52%,死亡有机碳库的减少量最小,仅有  $4.00\times10^4$  t。因此,从 4 个碳库的角度上看,哈尔滨市域绿色空间 10 a 间的碳储量的主要贡献者是土壤碳库和地下生物量碳库,影响最小的是死亡有机碳库。

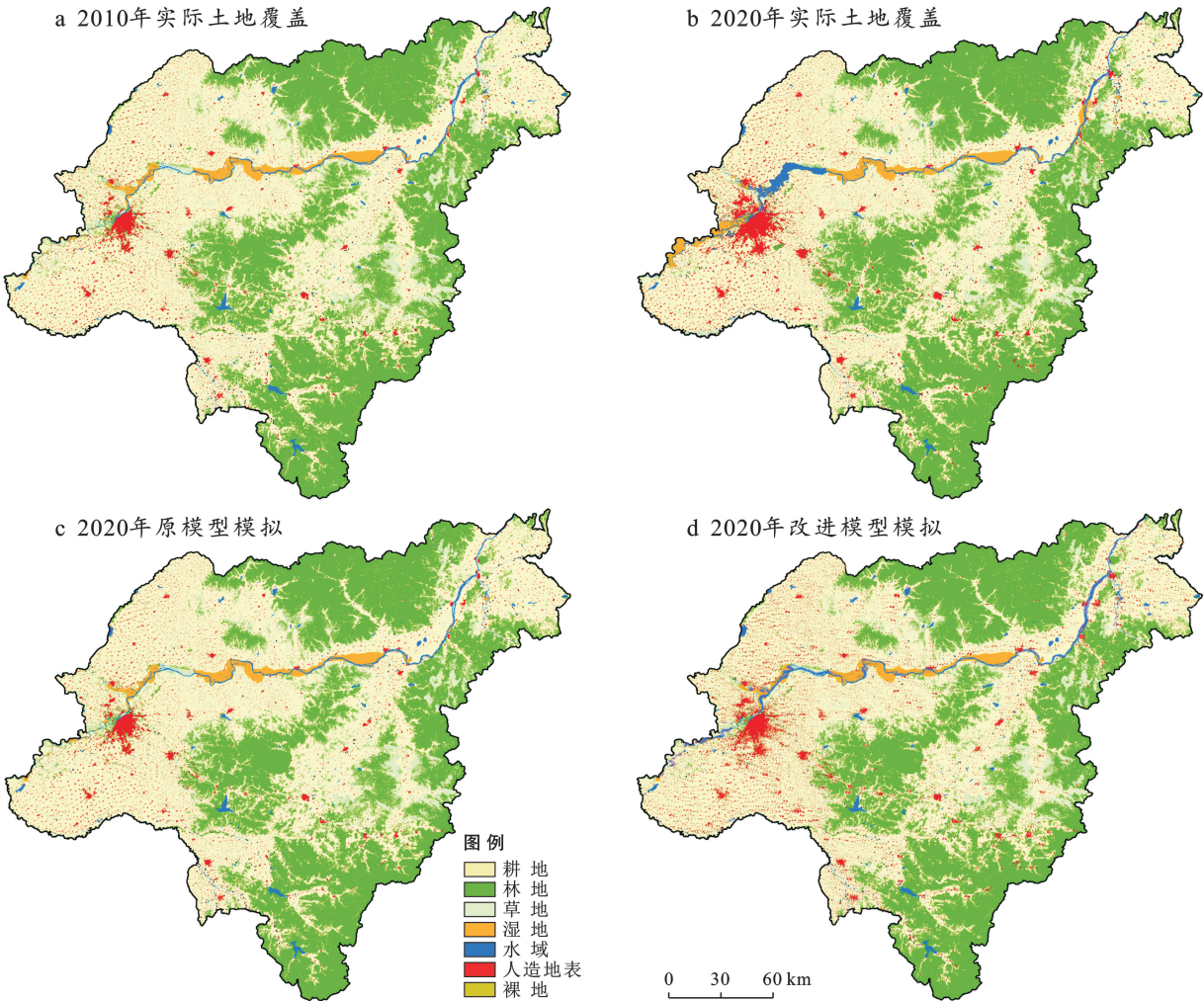


图 2 哈尔滨市改进模型与原模型对比

Fig.2 Comparison of improved model and original model in Harbin City

表 4 2010—2020 年哈尔滨市域绿色空间碳储量及变化

Table 4 Carbon stock and change in green space in Harbin City from 2010 to 2020						10 <sup>6</sup> t
项目	耕地	林地	草地	湿地	水域	总量
2010 年碳储量	1 353.26	940.05	222.72	37.45	34.70	2 588.18
2020 年碳储量	1 309.69	967.43	213.22	45.96	46.74	2 583.04
碳储量变化	−43.57	27.38	−9.50	8.51	12.04	−5.14

表 5 2010—2020 年哈尔滨市域绿色空间碳库及变化

Table 5 Carbon pools and changes in green space in Harbin City from 2010 to 2020						10 <sup>6</sup> t
项 目	地上生物量碳库	地下生物量碳库	土壤碳库	死亡有机碳库	总 量	
2010 年碳储量	275.57	1 073.29	1 220.95	18.37	2 588.18	
2020 年碳储量	275.02	1 071.16	1 218.53	18.33	2 583.04	
碳储量变化	−0.55	−2.13	−2.42	−0.04	−5.14	



2.2.2 绿色空间碳储量空间变化特征 从空间分布上看(图 3),2010—2020 年哈尔滨市域绿色空间北部沿松花江流域两侧湿地碳密度最高。高碳储量区域主要位于哈尔滨市域的木兰县和通河县以及哈尔滨市、尚志市和宾县的交界处,还有五常市和尚志市的东南部,其共同特点是均含有大量森林覆盖,其碳密度最高的还属松花江流域周围的湿地。低碳密度区域则主要是草地和耕地覆盖区,以哈尔滨市、尚

志市、宾县和延寿的交界处为中心向四周散布。根据 2010—2020 年的碳储量变化可知(图 4),哈尔滨市域绿色空间大部分地区变化不明显,比例为 91.74%,呼兰和宾县交界处的湿地碳储量明显减少,碳储量减少区域面积占总绿色空间的 4.16%,双城区西北部的松花江流域周围湿地及通河、方正和依兰县交界处的湿地碳储量明显增多,碳储量减少区域占总绿色空间总面积的 4.09%,整体上呈现小聚集和零星分布的特点。

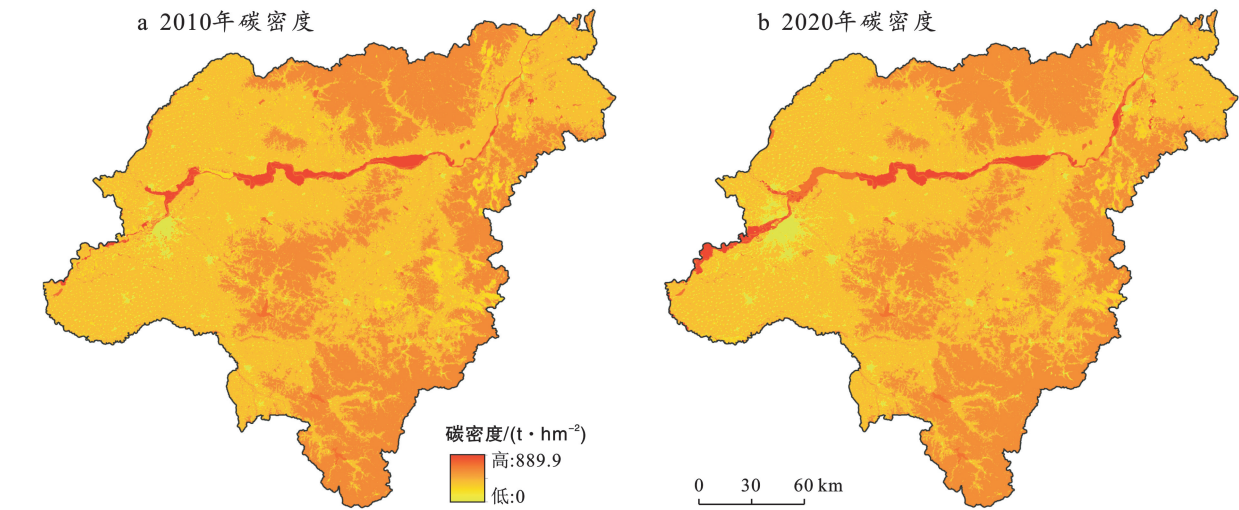


图 3 哈尔滨市 2010、2020 年碳密度分布  
Fig. 3 Carbon density distribution in Harbin City in 2010 and 2020

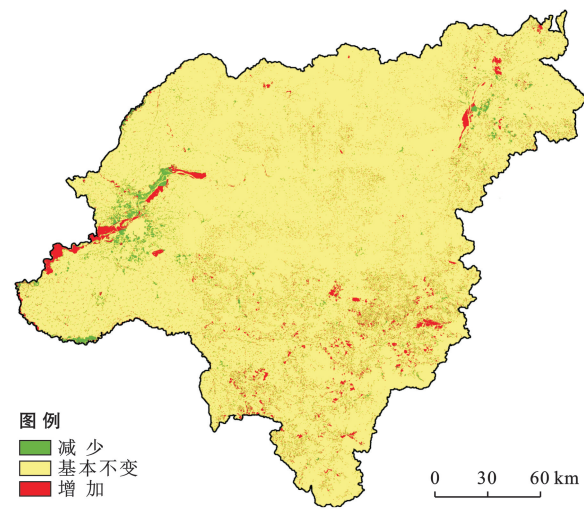


图 4 哈尔滨市 2010—2020 年碳密度变化  
Fig. 4 Change in carbon intensity in Harbin City between 2010 and 2020

2.2.3 不同绿色空间类型变化及其对碳储量的影响 分析 2010、2020 年哈尔滨市绿色空间土地覆盖,主要的覆盖类型是耕地和林地,其中耕地比例均超过 50%,林地比例均超 35%,比重其次是草地,均超 8%,其中湿地和水域的则覆盖面积较小,均仅占不到 2%。

根据哈尔滨市域 2010—2020 年土地覆盖转移矩阵(表 6)可知,2010 至 2020 年期间,其中绿色空间向非绿色空间转化了 808.25 km<sup>2</sup>,绿色空间中的耕地和草地面积总体呈现下降的趋势,两者分别减少了 1 169.51 km<sup>2</sup>和 239.20 km<sup>2</sup>,林地、湿地和水域面积均呈上升趋势。10 a 间绿色空间覆盖类型共转出了 4 321.01 km<sup>2</sup>,进而引起的碳储量降低了 1.95 × 10<sup>8</sup> t。耕地转出的面积最多达 1 837.70 km<sup>2</sup>,由此损失的碳储量也最多达 7.77 × 10<sup>7</sup> t。其次,林地和草地分别转出的面积 1 023.98 km<sup>2</sup>和 1 225.72 km<sup>2</sup>,因而导致碳储量分别损失了 6.30 × 10<sup>7</sup> t 和 3.87 × 10<sup>7</sup> t。主要转入的也是耕地、林地和草地,其中转化为林地的最多达到了 1 366.25 km<sup>2</sup>,相应的碳储量提升了 8.40 × 10<sup>7</sup> t,其余转化成草地和耕地的面积分别是 986.52 km<sup>2</sup>和 668.19 km<sup>2</sup>,进而碳储量相应增加了 3.11 × 10<sup>7</sup> t 和 2.82 × 10<sup>7</sup> t。

2.3 2030 年多情景下碳储量时空变化特征及对比  
2.3.1 不同情景土地覆盖变化 利用 FLUS 模型对 2020 年土地覆盖数据进行相应的情景模拟,得到 3 种不同情景 2030 年土地覆盖数据。自然情景下,不受相关政策的影响,耕地和林地分别增加了 175 km<sup>2</sup>和



55.59 km<sup>2</sup>,草地减少了 147.89 km<sup>2</sup>,水域和湿地变化不大。生态保护情景下,市域的生态环境得到了很好的保护,耕地和林地有所增加,分别增加了 93.79 km<sup>2</sup>和 133.63 km<sup>2</sup>,草地则相应减少了 145.25 km<sup>2</sup>,人造地表在自然情景下处于缩减态势,生态保护情景促使呈缩减趋势,减少了 75.35 km<sup>2</sup>。

经济发展情景下,为保证经济快速提升,耕地处于扩张趋势,增加了 279.44 km<sup>2</sup>,建设用地面积也比前两种情景下减小的少,共减少了 50.83 km<sup>2</sup>,为此导致生态环境受到了一定破坏,林地和草地面积各减少了 10.81 km<sup>2</sup> 和 210.48 km<sup>2</sup>,水域也减少了 9.63 km<sup>2</sup>。

表 6 2010—2020 年哈尔滨市域各类土地覆盖转移矩阵										
Table 6 Transfer matrix of various types of land cover in Harbin City during 2010—2020										km <sup>2</sup>
土地覆盖类型	2020 年面积								转出总计	
	耕地	林地	草地	湿地	水域	人造地表	裸地	总计		
2010 年面积	耕地	25 566.96	619.33	333.83	160.65	79.06	632.88	11.95	27 404.66	1 837.70
	林地	263.00	18 012.85	632.39	31.78	36.91	59.08	0.82	19 036.83	1 023.98
	草地	222.73	725.17	3 284.48	95.89	84.57	93.55	3.81	4 510.20	1 225.72
	湿地	12.18	0.06	5.57	615.14	121.35	4.04	0	758.34	143.20
	水域	47.46	17.66	6.44	16.73	612.30	2.10	0.02	702.71	90.41
	人造地表	122.80	4.03	8.24	0.55	2.07	1 438.97	0.66	1 577.32	138.35
	裸地	0.02	0	0.05	0	0	0	0.05	0.12	0.07
	总计	26 235.15	19 379.10	4 271.00	920.74	936.26	2 230.62	17.31	53 990.18	—
转入总计		668.19	1 366.25	986.52	305.6	323.96	791.65	17.26	—	4 459.43

2.3.2 多情景下碳储量数量变化特征及对比 结合 FLUS 和 In VEST 模型,预算出 2030 年 3 种未来不同情景的碳储量(表 7)。这 3 种情景下的碳储量均低于 2020 年的结果,自然发展情景、生态保护情景和经济发展情景下的碳储量分别降低了 1.65×10<sup>6</sup>,1.90×10<sup>5</sup>,3.30×10<sup>6</sup> t。

自然发展情景下哈尔滨市域 2030 年绿色空间碳储量为 2.58×10<sup>9</sup> t,平均碳密度 498.19 t/hm<sup>2</sup>。耕地碳储量最大为 1.32×10<sup>9</sup> t,占总绿色空间碳储量的 50.97%,其次是林地草地碳储量分别占总碳储量的 37.51%和 7.96%。最少的是湿地碳储量为 4.59×10<sup>7</sup> t,仅占总量的 1.78%。

表 7 2030 年哈尔滨市域不同情景绿色空间碳储量						
Table 7 Green space carbon reserves of different scenarios in Harbin City in 2030						10 <sup>6</sup> t
情景设置	耕地	林地	草地	湿地	水域	总量
自然发展情景	1 315.72	968.22	205.41	45.88	46.16	2 581.39
生态保护情景	1 312.42	972.65	205.66	45.91	46.21	2 582.85
经济发展情景	1 320.70	964.74	202.26	45.88	46.16	2 579.74

生态保护情景下碳储量为 2.58×10<sup>9</sup> t,平均碳密度 498.47 t/hm<sup>2</sup>。该情景下的耕地碳储量是 3 种情境中最小的有 1.31×10<sup>9</sup> t,林地碳储量则是 3 种情景下最大的为 9.73×10<sup>8</sup> t。耕地和林地分别占生态保护情景总碳储量的 50.81%和 37.66%。

经济发展情景下碳储量为 2.58×10<sup>9</sup> t,平均碳密度 498.10 t/hm<sup>2</sup>。经济发展情景下耕地碳储量高于其余两种情景,林地碳储量则是 3 种情境中最小的,同 2020 年相比损失了 2.69×10<sup>6</sup> t。该情景碳储量下降速率最快,是自然发展情景的 2.01 倍,是生态保护情景的 17.22 倍。

从碳库的角度分析,3 种情景的 4 种碳库皆低于 2020 年的值(图 5)。自然情景下土壤碳库碳储量最

大,共 1.22×10<sup>9</sup> t,比 2020 年减少了 7.80×10<sup>5</sup> t,其中死亡有机物碳储量变化最小,仅减少了 1.00×10<sup>4</sup> t,比例 0.6%。生态保护情景下 4 种碳库均处于下降状态,碳储量下降速率是自然发展情景的 0.12 倍。该情景下的 4 种碳库碳储量均大于其余两种情景下的碳储量,其土壤碳库碳储量最大为 1.22×10<sup>9</sup> t,同 2020 年相比只减小了 9.00×10<sup>4</sup> t。可见进行生态保护,减少对生态环境的破坏,有利于碳储量的提升,更好的应对气候问题,缓解气候压力。经济发展情景下的 4 种碳库的碳储量均低于其余两种情景,土壤碳库和地下生物量碳库碳储量分别为 1.22×10<sup>9</sup> t 和 1.07×10<sup>9</sup> t,比 2020 年的碳储量分别减少了 1.56×10<sup>6</sup> t 和 1.37×10<sup>6</sup> t,占总损失量的 88.79%。注重经

济发展忽略生态保护,进而引起生态系统固碳能力下降,未来气候将面临巨大威胁。

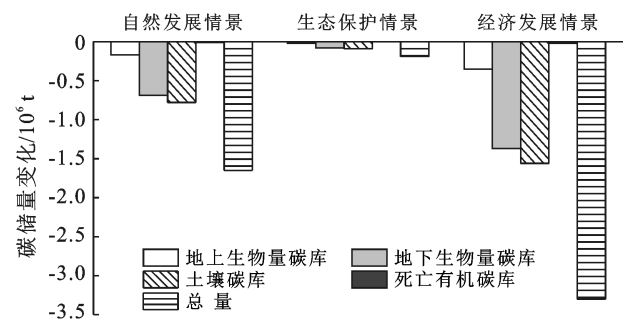


图 5 哈尔滨市不同情景下碳库碳储量变化  
Fig. 5 Change of carbon stock in carbon pool under different scenarios in Harbin City

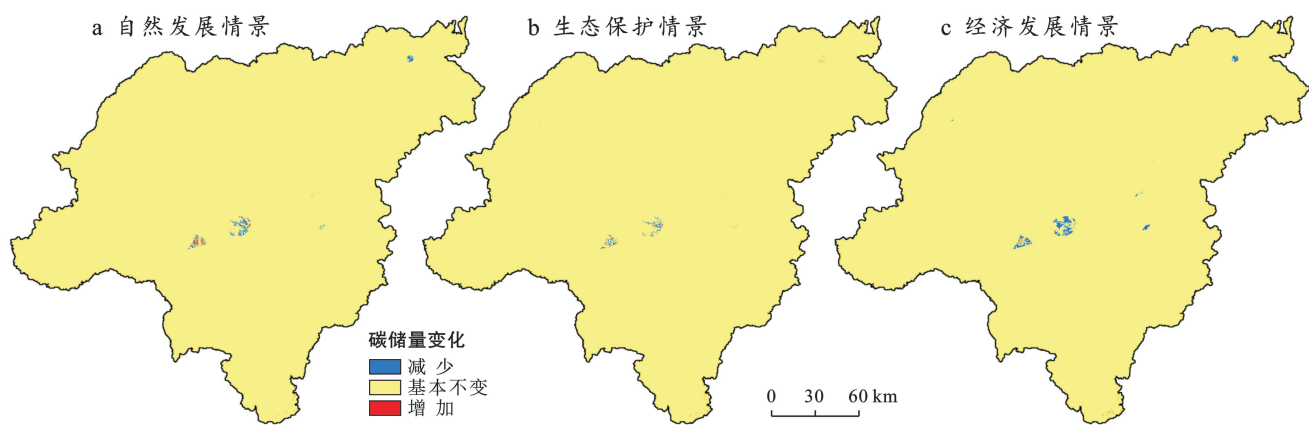


图 6 2020—2030 年不同情景下哈尔滨市碳储量变化预测  
Fig.6 Prediction of carbon storage change in Harbin City under different scenarios from 2020 to 2030

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

不同地区的碳储量不同,主要是因其碳密度不同。研究区面积较大,无法进行全面的实地测量,本研究选用的碳密度皆参考前人的研究数据,主要是来自奚小环团队所测量的 2010 年代黑龙江省的碳密度数,及周边省份辽宁省死亡有机物碳密度数据。考虑气温、降水等影响因素,进行碳密度数据修正。为进一步验证碳密度数据准确性,选择与实测得到相近区域的碳密度进行比较,于兵等<sup>[28]</sup>的研究测得大庆市的草地的土壤碳密度( $14.30 \pm 5.77$ )  $\text{kg}/\text{m}^2$ ,本研究的使用数据为  $14.59 \text{ kg}/\text{m}^2$ ,刚好在其范围内。其团队测得耕地的土壤碳密度( $14.80 \pm 4.33$ )  $\text{kg}/\text{m}^2$  和本研究数据  $20.87 \text{ kg}/\text{m}^2$  较为接近。赵俊芳等<sup>[29]</sup>研究的森林地上碳密度为  $6.22 \text{ kg}/\text{m}^2$ ,与本研究使用的林地地上碳密度  $6.08 \text{ kg}/\text{m}^2$  较为相似。证明本研究使用的碳密度数据较为准确。

2.3.3 多情景下碳储量空间分布特征及对比 2030 年哈尔滨市域 3 种情景下北部沿松花江流域两侧湿地碳密度最高,同 2020 年碳储量空间分布差异不大。3 种情景碳储量变化大部分处于基本不变的状态(图 6),所占比例均高于 91.74%。自然情景下,碳储量明显减少的区域比例 0.17%,主要分布在阿城区东南部、尚志市西北部、延寿县东南部和依兰县西北部,明显增加的区域比例为 0.04%,主要在阿城区东南部。生态保护情景下,碳储量明显减少的地区缩减为两个点,包括阿城区东南部、尚志市西北部,仅占 0.09%。经济发展情景下,明显减少区域依旧为自然发展情景下 4 个区域,但是要以自然发展情景的区域为核心向四周扩大,达到 4.16%。

虽然已经考虑众多因素,并对碳密度进行了修正,但是近 10 a 仍存在诸多不确定因素。目前,处于“双碳”战略大背景下,对全国各地的碳密度进行实地测算是今后主要研究方向之一。

#### 3.2 结论

- (1) 改进后的模型比原模型的均方根误差小了 0.21%,模拟出来的结果均比原模型更加接近实际值,且改进后模型 kappa 系数为 0.876 42,表明改进后的模型具有较高的可行性。
- (2) 2010 年碳储量为  $2.59 \times 10^9 \text{ t}$ ,2020 年碳储量为  $2.58 \times 10^9 \text{ t}$ ,10 a 间碳储量呈下降趋势,共减少了  $5.140 \times 10^6 \text{ t}$ ,耕地面积大量较少是导致这 10 a 间碳储量降低的主要因素。从碳库的角度上看,碳库主要损失量是在于土壤碳库和地上生物量碳库。
- (3) 2030 年 3 种情景下的哈尔滨市绿色空间碳储量空间分布与 2020 年的分布相似,其碳储量分别为  $2.58 \times 10^9$ , $2.58 \times 10^9$ , $2.58 \times 10^9 \text{ t}$ 。与 2020 年相比,3 种情景下的碳储量分别降低了  $1.65 \times 10^6$ ,

$1.90\times10^5,3.30\times10^6$  t。生态保护情景下的绿色空间的碳储量下降速度最慢,而经济发展情景下降速相对是最快的,分别是自然发展的 0.12 倍和 2.01 倍。

[参 考 文 献]

[1] 徐冠华,刘琦岩,罗晖,等.后疫情时代全球气候变化的应对与抉择[J].遥感学报,2021,25(5):1037-1042.

[2] 陈云.全球气候变化背景下“双碳”战略与经济发展对立论的批判及其重构[J].当代经济管理,2023,45(2):17-24.

[3] 卿苗,赵军,冯超,等.1980—2030 年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应[J].生态学报,2022,42(23):9525-9536.

[4] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for Middle Korea [J]. Journal of Environmental Management, 2002,64(2):115-126.

[5] Zhang Chunhua, Ju Weimin, Chen J M, et al. Disturbance-induced reduction of biomass carbon sinks of China's forests in recent years [J]. Environmental Research Letters, 2015,10(11):114021.

[6] 李宁.辽宁省乔木林的碳储量和碳密度研究[J].中国农学通报,2022,38(16):27-31.

[7] 侯瑞萍,夏朝宗,陈健,等.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J].生态学报,2022,42(23):9483-9498.

[8] Sohl T L, Sleeter B M, Zhu Zhiliang, et al. A land-use and land-cover modeling strategy to support a national assessment of carbon stocks and fluxes [J]. Applied Geography, 2012,34:111-124.

[9] 邓喆,丁文广,蒲晓婷,等.基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].水土保持通报,2022,42(3):324-334.

[10] 夏安全,王艳芬,郝彦宾,等.复杂地形草地植被碳储量遥感估算研究进展[J].生态学报,2020,40(18):6338-6350.

[11] 杨鑫,高雯雯,李莎,等.基于遥感影像估算的北京中心城区碳储量与气候环境关联性研究[J].风景园林,2022,29(5):31-37.

[12] 张桂莲.基于遥感估算的上海城市森林碳储量空间分布特征[J].生态环境学报,2021,30(9):1777-1786.

[13] 杨清可,段学军,金志丰,等.南通市建设用地扩张情景模拟与景观生态效应[J].地理科学,2017,37(4):528-536.

[14] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple

land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.

[15] 庄子薛,谢梦晴,张文萍,等.基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测:以成德眉资地区为例[J].风景园林,2022,29(5):38-44.

[16] 孙定钊,梁友嘉.基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J].地球信息科学学报,2021,23(5):825-836.

[17] 王博娅.生态系统服务导向下北京市中心城区绿色空间的现状及优化研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[18] 支林蛟,王锦,刘敏,等.滇中城市群绿色空间格局动态变化多尺度研究[J].西南林业大学学报(自然科学版),2021,41(5):88-97.

[19] 李晨.郑州绿色空间格局时空演变及预测研究[J].绿色科技,2022,24(7):180-184.

[20] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. Economic Geography, 1970,46(S1):234-240.

[21] Ponds R, van Oort F, Frenken K. The geographical and institutional proximity of research collaboration [J]. Papers in Regional Science, 2007,86(3):423-443

[22] 朱恬恬,卢雅华,张跃军.两阶段视角下中国高校科技创新效率的溢出效应研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2021,21(2):130-142.

[23] 韩晋榕.基于 InVEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析[D].吉林 长春:东北师范大学,2013.

[24] 奚小环,杨忠芳,崔玉军,等.东北平原土壤有机碳分布与变化趋势研究[J].地学前缘,2010,17(3):213-221.

[25] 朱丽亚,胡克,孙爽,等.基于 InVEST 模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J].现代地质,2022,36(1):96-104.

[26] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.

[27] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. Nature, 2000,404(6780):858-861.

[28] 于兵,邸雪颖,臧淑英.大庆地区植被和土壤碳氮储量动态变化的预测[J].江苏农业科学,2011,39(4):417-422.

[29] 赵俊芳,延晓冬,贾根锁.1981—2002 年中国东北地区森林生态系统碳储量的模拟[J].应用生态学报,2009,20(2):241-249.