

基于 FLUS_InVEST 模型的大庆市碳储量及热点区域分析

李雪¹ 李文^{1*}

(1. 东北林业大学 园林学院 哈尔滨 150040)

摘 要:【目的】以资源枯竭型城市大庆市域为研究区,探讨未来不同情景下土地覆盖变化对碳储量的影响并识别固碳能力热点区域,为未来城市转型提供政策建议。【方法】以 2010、2020 年大庆市土地覆盖数据为基础,运用 FLUS 模型模拟 2030 年自然演替情景、生态保护情景和城市发展情景土地覆盖格局,分析不同情景土地覆盖变化特征,结合 InVEST 模型中碳储模块估算 2010、2020 和 2030 年 3 种情景碳储量及其分布,最后通过 ArcGIS 中热点分析工具,以 500 设为阈值,根据 Z 值进行冷热区划分,识别固碳能力冷热点区域。【结果】2010-2020 年,大庆市耕地、水体和人造地表面积增加,其余土地覆盖类型面积均减少,碳储量分别为 $566.10 \times 10^6 \text{t}$ 和 $565.24 \times 10^6 \text{t}$,10a 间总碳储量减少了 $0.86 \times 10^6 \text{t}$,草地碳储量减少最多,占碳储总损失量的 79.03%;2030 年自然演替情景和城市发展情景土地覆盖变化与 2010-2020 年间相似,碳储量分别为 $564.08 \times 10^6 \text{t}$ 、 $564.04 \times 10^6 \text{t}$,相比 2020 年分别减少了 $1.16 \times 10^6 \text{t}$ 、 $1.20 \times 10^6 \text{t}$,均是草地减少的最多,分别占总损失量的 74.47% 和 77.69%;生态保护情景下水体和人造地表处于减少状态,其余土地覆盖类型面积增加,总碳储量为 $567.77 \times 10^6 \text{t}$,10a 间增加了 $2.53 \times 10^6 \text{t}$;草地和湿地向耕地面积转化,是导致碳储量损失的主要原因,生态保护情景碳储量主要贡献者是湿地,占总贡献量的 74.26%;自然演替情景二级热点区域主要分布在市域西北边界处,冷点区域分布面积是生态保护情景和城市发展情景的 2.93 倍和 3.79 倍,城市发展情景固碳能力热点区域与自然演替情景相似,但是冷点区域极少,生态保护情景一级热点区域主要分布在杜尔伯特蒙古族自治县,冷点区域主要分布在大庆市主城区中心部分。【结论】大庆市在生态保护情景下碳储量最高,固碳能力热点区域主要位于湿地分布地区,冷点区域主要分布在大庆市主城区中心部分,耕地的固碳能力不显著。实现大庆市城市转型应坚持退耕还林还草,加大还湿力度,具体可在杜尔伯特蒙古族自治县的连环湖地区开展湿地营建和保护工作,在主城区各分区交汇处增加绿色基础设施,并减少城市用地扩张。

关键词: 情景模拟;碳储量;FLUS 模型;大庆市;热点分析

Analysis of carbon storage and hot spots in Daqing City based on the FLUS_InVEST model

Abstract: 【Objective】 This study is aimed to explore the impact of land cover change on carbon storage and the hot spots of carbon sequestration capacity under different scenarios in the future, and provide policy recommendations for future urban transformation, taking Daqing City, a resource-depleted city, as the research area. 【Method】 Based on the land cover data of Daqing in 2010 and 2020, the FLUS model was used to simulate the land cover pattern of natural succession scenario, ecological protection scenario, and urban development scenario in 2030, and the characteristics of land cover change in different scenarios were analyzed. In combination with the carbon storage module in InVEST model, carbon storage and its distribution in 2010, 2020, and three scenarios in 2030 were estimated. Finally, the hot spot analysis tool in ArcGIS was used to set 500 as the threshold, and the cold and hot spots were divided according to the Z value to identify the cold and hot spots of carbon sequencing capacity. 【Result】 From 2010 to 2020, the area of cultivated land, water, and artificial surface increased, while the area of other land cover types decreased, carbon storage was $566.10 \times 10^6 \text{t}$ and $565.24 \times 10^6 \text{t}$ respectively. The total carbon storage decreased by $0.86 \times 10^6 \text{t}$ during the 10a period, and the carbon storage of grassland decreased the most, accounting for 79.03% of the total carbon storage loss. The land cover change of the natural succession scenario and urban development scenario in 2030 was similar to that of 2010-2020, and the carbon storage was $564.08 \times 10^6 \text{t}$ and $564.04 \times 10^6 \text{t}$, respectively, which were reduced by $1.16 \times 10^6 \text{t}$ and $1.20 \times 10^6 \text{t}$ compared with 2020. Both of these were the largest reductions in grassland, accounting for 74.47% and 77.69% of the total loss, respectively. In the ecological protection scenario, the water and artificial land surface decreased, the area of other land cover types increased, and the total carbon storage was $567.77 \times 10^6 \text{t}$,

with an increase of $2.53 \times 10^6 \text{ t}$ in the 10a period. The conversion of grassland and wetland to cultivated land was the main cause of carbon storage loss, and the main contributor of carbon storage in the ecological protection scenario was wetland, accounting for 74.26% of the total contribution. The second-level hot spots in the natural succession scenario were mainly distributed in the northwestern border of the city area, and the distribution area of the cold spots was 2.93 times and 3.79 times that of the ecological protection scenario and urban development scenario. The hot spots of carbon sequestration capacity in urban development scenario were similar to those in natural succession scenario, but there were very few cold spots. The hot spots of the ecological protection scenario were mainly distributed in Durbert Mongolian Autonomous County, and the cold spots were mainly distributed in the central part of Daqing City.

【Conclusion】Daqing City has the highest carbon storage under the ecological protection scenario, the hot spots of carbon sequestration capacity are mainly located in the wetland distribution area, the cold spots are mainly distributed in the central part of Daqing City, and the carbon sequestration capacity of cultivated land is not significant. To achieve the urban transformation of Daqing City, it should insist on returning farmland to forest and grass, and increase the efforts to restore moisture. Specifically, wetland construction and protection can be carried out in the Lianyuan Lake area of Durbert Mongolian Autonomous County, green infrastructure should be added at the interchanges of various districts in the main urban area, and urban land expansion should be reduced.

Key words: Multi-Scenario simulation; Carbon storage; FLUS model; Daqing City; Hotspot analysis

全球气候变暖已经给全球自然和经济造成巨大影响(向书江等, 2022)。生态系统的碳储量能够直观反映生态系统固碳功能(Cabral et al., 2016), 提升陆地生态系统碳库碳储量有利于促进地球系统碳循环向固碳方向演变, 提升固碳潜力, 早日实现“双碳”目标, 从而缓解气候变暖(孙健等, 2023)。土地利用/覆盖变化对维持陆地生态系统碳储服务起着关键作用, 是目前缓解全球气候变化研究的重要方向(李月等, 2023; 陈新云, 2021; Baumann et al., 2017)。

近年来, 诸多国内外学者已经对土地利用/覆盖变化对碳储量的影响开展了大量研究。孙健等(2023)探究台州市 2000—2020 年土地利用及陆地生态系统碳储量的变化特征, 发现耕地转为建设用地是导致这一时期碳储量下降速度加快的主要原因; 卢雅焱等(2022)利用 InVEST 模型的碳储模块探讨新疆天山土地利用变化对碳储量时空变化的驱动机制, 发现研究区碳储量时空演变的主要贡献者是草地、永久冰川积雪和未利用地的转化; 孙欣欣等(2023)利用 PLUS 模型预测 2040 年南京市不同发展情景下碳储量分布, 发现加强对耕地和生态保护, 以此控制碳储量减少更加有效; 国外学者 Rajbanshi 等(2021)分析了总碳储量的过去时空变化并预测了 2030 年的碳储量并以货币形式进行估值, 但是没有对未来情景进行设置与研究。冷热点分析是一种展示研究指标的高低值的空间聚集分布规律的聚类方法, 可以用来分析生态系统服务价值空间异质性, 林一诚等(2023)利用热点分析工具识别了围场县小滦河流域的生态系统固碳功能的热点区域, 但是缺少对未来的预测研究。

现有研究大多数以中国南方城市为研究对象进行探讨, 然而不同气候带碳密度差异较大, 此外大多研究只考虑了单一情景土地利用变化对碳储量的影响机制, 对未来不同情景的预测及固碳能力热点区域识别甚少。对未来情景预测主要通过 CA 模型(Darvishi et al., 2020)、CLUE 模型(Aydin et al., 2022)、PLUS 模型(Li et al., 2021)和 FLUS 模型(Liu et al., 2017)等模型, 有研究表明 FLUS 模型(周京春等, 2022), 同时考虑了数量和时空对 LULC 间相互转化的影响, 具有更高的可信度。因此, 有必要对北方城市进行多情景预测探讨土地利用变化对碳储量的影响及固碳能力热点区域识别。此外, 大庆市是中国典型的石油资源枯竭型城市(杨秀丽等, 2022), 由于石油开采导致土地利用/覆盖发生了巨大变化, 现如今面临资源转型问题, 亟需科学政策指引。实现碳减排目标的首要任务是改造所谓的“资源枯竭型城市”, 资源枯竭型城市转型发展成为低碳生态型城市已是大势所趋(Li et al., 2022)。鉴于此, 本研究以大庆市为

研究区，基于 2010、2020 年土地覆盖数据，运用 FLUS 模型预测 2030 年自然演替情景、生态保护情景和城市发情景土地覆盖变化，结合 InVEST 模型 Carbon 模块估算其碳储量，最后运用热点分析工具，识别固碳能力热点区域，以期为大庆市未来城市转型提供决策参考。

1 研究区概况

大庆市 ($45^{\circ} 46' \sim 46^{\circ} 55' N$, $124^{\circ} 19' \sim 125^{\circ} 12' E$) 地处于黑龙江省西部 (图 1)，松辽盆地北部，是哈长城市群区域中心城市，市域总面积 21 219 km^2 ，市区面积 5 105 km^2 ，常住人口 278 万，常住人口城镇化率 72.5%。大庆位于北温带，呈现温带大陆性季风气候，四季分明，春季多风，夏季炎热，秋季凉爽，冬季寒冷漫长。全年平均气温 4.2 $^{\circ}C$ ，年均降水量 644mm。作为世界著名的石油城市，拥有 60 多年的油田开发史，已探明石油地质储量 64 亿吨，具有“绿色油化之都、天然百湖之城、北国温泉之乡”等美誉。随着石油的开发，占用了大面积地表，土地覆被因此发生了巨大变化。现大庆市开启资源转型创新城市建设，重点在于降碳，促进经济社会发展全面绿色转型。

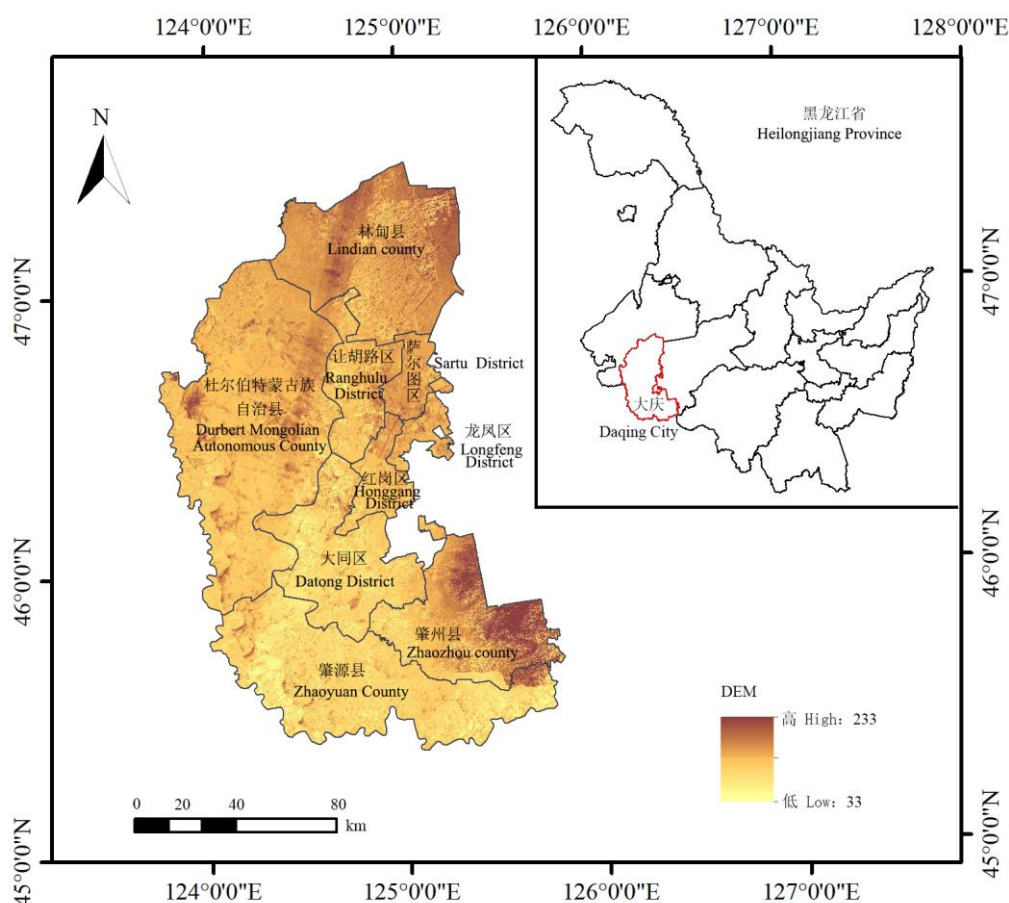


图 1 大庆市地理位置图

• Fig.1 The elevation and location map of Daqing City

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究所用的数据主要包括 (表 1): 高程数据 (DEM)，来源于地理空间数据云 (www.gscloud.cn)，在 ArcGIS 中进行合并、按掩膜提取。坡度、坡向数据，由 DEM 数据经过坡度、坡向计算得到。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/>), 通过反距离权重法进行处理。人口密度数据, 来源于 World Pop (<https://www.worldpop.org/>), 人均 GDP 公里格网数据, 来源于地理空间数据云 (www.gscloud.cn)。距离水系、国道、高速、省道、铁路距离等数据, 均来源于全球地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>), 运用欧式距离算取。大庆市域自然保护区数据, 来源于资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 进行栅格化处理。碳密度数据, 主要参考同一作者的相同区域或者相邻地区研究数据结果, 并通过修正公式进行精确。土地覆被数据, 来源于 Globe Land30 全球地表覆盖数据 (<http://www.globallandcover.com/>), 根据 Globe Land30 分类系统, 将土地覆盖数据分为耕地、林地、草地、湿地、水体、人造地表和裸地, 在 ArcGIS 中对土地覆盖数据进行去黑边、合并和裁剪。运用 ArcMap10.2 将所有数据重采样为 90m×90m 分辨率, 并统一坐标系为 (WGS_1984_UTM_Zone_51N)。

表 1 数据信息与来源

Tab. 1 Data information and sources

类别	数据名称	数据来源	数据类型
Category	Name of data	Source of data	Type of data
基础数据	土地覆盖数据	Globe Land30 全球地表覆盖数据	栅格
	高程	地理空间数据云 (www.gscloud.cn)	栅格
	坡度	基于 DEM 数据计算得到	栅格
自然因子	坡向		栅格
驱动因子	年均气温	高分辨率网格化数据集	栅格
	年均降水	(https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/)	栅格
	人口密度	WorldPop (https://www.worldpop.org/)	栅格
经济因子	人均 GDP	地理国情监测云平台 (http://www.dsac.cn/)	栅格
	距离水系距离	基于 DEM 数据计算得到	矢量
	距离国道距离		矢量
交通因子	距离高速距离		矢量
	距离省道距离		矢量
	距离铁路距离		矢量
限制因子	自然保护区	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)	矢量
碳密度数据	地上碳密度	《基于 In VEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析》	数值
	地下碳密度		数值
	土壤碳密度		数值

2.2 情景设置

在 2010-2020 年大庆市土地覆盖变化规律和大庆市规划政策基础上,本研究设置了自然演替情景、生态保护情景、城市发展情景 3 种情景进行土地覆盖模拟。

(1) 自然演替情景:遵循自然发展规律,保持自身演变进程,延续 2010-2020 年的人口、经济和环境变化趋势。该情景下依据 2010-2020 年的土地覆盖转移矩阵,设置邻域因子和转移成本矩阵,不设置任何限制因素。

(2) 生态保护情景:把生态效益在首位,坚持生态环境的保护与发展。依据大庆市“十四五”生态环境保护规划,推进碳达峰碳中和,以降碳为重点战略方向,强调推动减污降碳协同增效,全面贯彻落实新发展理念。根据国务院颁布的《2030 年前碳达峰行动方案》,该情景下严控生态空间占用,统筹推进山水林田湖草沙冰一体化保护和修复,实行退耕还林还草还湿,控制城市建设用地的发展。

(3) 城市发展情景:优先发展市域的经济,以经济效益作为首要。根据大庆市 2023 年国民经济和社会发展计划草案的报告,要求推动工业加速增长,发展现代服务业,全力服务油田产能建设,抓好招商引资。该情景下,在自然演替的基础上,城市建设用地进一步发展,其他用地则相应的受到限制。

2.3 土地利用预测模型

2.3.1 FLUS 模型 本研究使用 FLUS 模型对大庆市土地覆盖进行不同情景模拟。第一步,需要用软件中的神经网络算法(ANN)模块进行适宜性概率图集获取,该过程中需要将驱动因子进行归一化处理,并确保数据具有相同的行列号,本研究采用随机取样策略,采样参数设置为 20,神经网络的隐藏层数设为 12;第二步,利用元胞自动机(CA)模块,加入限制因子,提高适用性;第三步,使用马尔可夫链(Markov chain)模块,计算未来土地利用需求;最后,根据情景设置邻域因子和转移成本矩阵,获取不同情景下的土地覆盖数据。邻域因子越接近 1 则该土地覆盖类型越容易转化,成本矩阵中 0 代表不能够发生转化,1 则代表可以发生转化。

2.3.2 模型精度验证 Kappa 指数是衡量分类精度的指标,即用来检验模型预测结果和实际分类结果是否一致,取值范围为[0,1]。如果 Kappa 指数大于 0.70,则认为代表该模型具有较高的可信度,Kappa 指数越大精度越高,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。

本研究的 Kappa 指数为 0.751219,大于 0.70,因此本研究的 FLUS 模型可用,且具有较好的模拟效果。

2.4 碳储量计算模型

InVEST 模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)中的碳储存模块可以计算陆地生态系统中的碳储量。InVEST 模型中碳储模块将生态系统碳储量划分成 4 个基本碳库:地上生物碳库(位于土壤以上存活的植物中的碳)、地下生物碳库(位于地下的植物根系中的碳)、土壤碳库(土壤中的有机碳)、死亡有机碳库(凋落物和已死亡的植物中的碳)。本研究利用该模型对研究区域土地覆盖碳储量进行计算,计算公式为:

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

$$C_t = C_{ai} + C_{bi} + C_{si} + C_{di} \quad (3)$$

式中: C_t 表示总体碳储量(t), i 代表土地覆盖类型, C_i 是土地类型 i 的碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), n 代表土地覆盖类型的数量, C_{ai} 、 C_{bi} 、 C_{si} 、 C_{di} 分别表示植被的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度、死亡

有机质碳密度($t \cdot hm^{-2}$)。

本研究的生物量碳密度来源于奚小环团队(韩晋榕, 2013)的研究数据, 土壤碳密度使用于兵团队(于兵等, 2011)和郭树平团队(郭树平, 2011)的研究结果。因为死亡有机质碳密度数据获取难度加大, 且所占比重和影响都较小(张燕等, 2021; 揣小伟等, 2011), 本研究不考虑死亡有机质碳库。由于参考的生物量碳密度是黑龙江省范围数据, 为减少误差, 采用 Alam 等(2013)和陈光水等人(2007)研究的降水因素和年均气温因素的修正公式对生物量碳密度数据进行修正。

$$C_{BP}=6.7981e^{0.00541P}(R^2=0.70) \tag{4}$$

$$C_{BT} = 28 \times T + 398 \ (R^2 = 0.47, P < 0.01) \tag{5}$$

$$K_{BP}=C_{BP1}/C_{BP2} \tag{6}$$

$$K_{BT}=C_{BT1}/C_{BT2} \tag{7}$$

$$K_B=K_{BT} \times K_{BP} \tag{8}$$

式中: P 代表年均降水量(mm), T 代表年均气温($^{\circ}C$), C_{BP} 、 C_{BT} 分别代表通过年降水量和年均气温得到的生物量碳密度($t \cdot hm^{-2}$), C_{BP1} 和 C_{BT1} 分别为大庆市域根据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, K_{BP} 生物量碳密度的降水因子修正系数, K_{BT} 分别为生物量碳密度气温因子修正系数, K_B 代表生物量碳密度修正系数。所参考的碳密度和修正的数据如下(表 2)。

表 2 大庆市土地覆盖类型修正后碳密度数据
Tab. 2 Carbon density data after land cover type modification in Daqing City

土地覆盖类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度
Land cover types	Aboveground biomass carbon	Underground biomass carbon	Soil carbon density/($t \cdot hm^{-2}$)
	density/($t \cdot hm^{-2}$)	density/($t \cdot hm^{-2}$)	
耕地 Cultivated land	29.03	111.75	148.00
林地 Forest	39.98	164.25	147.60
草地 Grassland	21.98	79.35	143.00
湿地 Wetland	66.75	245.85	149.60
水域 Water	15.89	70.27	23.01
人造地表 Artificial surface	2.48	20.63	27.78
裸地 Bare land	66.75	245.85	44.79

2.5 固碳能力冷热点区域识别

研究区域的碳密度可以用来量化固碳能力, 冷热点分析可以展现一定空间范围研究指标的聚集度高值和低值分布规律(林一诚等, 2023)。本研究利用 Arc GIS 10.2 的 Hot Spot Analysis 工具对大庆市域 2030 年 3 种不同情景的固碳能力冷热点进行识别, 阈值设为 500, 在进行热点分析过程中会生成 Z 值用来表示统计学意义。根据 Z 值进行冷热区划分(常晓敏等, 2023), 具体划分为: $Z < -2.58$, 99%置信区间, 为一级冷点区; $-2.58 < Z < -1.96$, 95%置信区间, 为二级冷点区; $-1.96 < Z < -1.65$, 90%置信区间, 为三级冷点区; $-1.65 < Z < 1.65$, 为不显著区; $Z > 2.58$, 99%置信区间, 为一级热点区; $1.96 < Z < 2.58$, 95%置信区

间，为二级热点区； $1.65 < Z < 1.96$ ，90% 置信区间，为三级热点区。具体计算方法如下：

$$x = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (9)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (x)^2} \quad (10)$$

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (11)$$

$$Z = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{VAR}(G_i^*)}} = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - x \sum_{j=1}^n W_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n W_{ij})^2}{n-1}}} \quad (12)$$

式中， n 是总斑块数； x_j 是斑块 j 的属性值； W_{ij} 是斑块 i 和 j 间的空间权重； G_i^* 代表 Getis-Ord 局部统计； Z 代表区域内要素的 G_i^* 进行标准化 Z 值。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

2010-2020 年间(图 2)，耕地、水体和人造地表面积有所增加，其中耕地增加最多，增加了 1121.70 km^2 ，水体和人造地表分别增加了 75.55 和 83.28 km^2 。其余土地覆盖类型均处于减少状态，草地减少了 1115.83 km^2 ，占总减少量的 87.14% ，位列第一。林地减少的最少，仅减少了 12.20 km^2 ，占比 0.95% 。

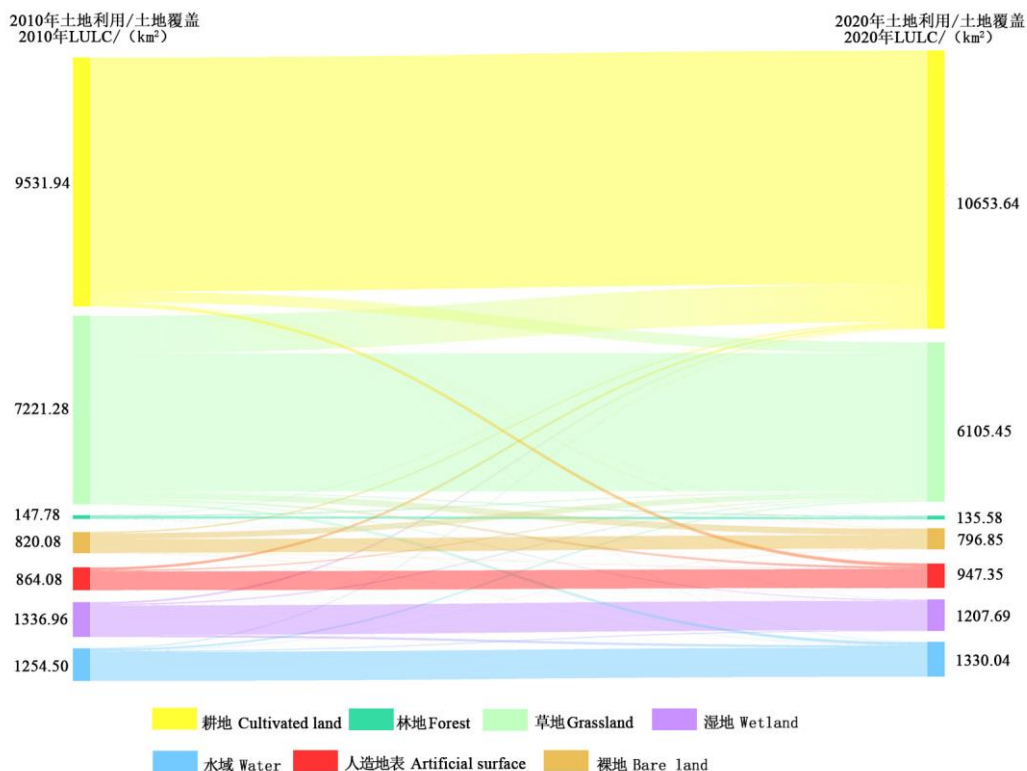


图 2 大庆市 2010-2020 年土地覆盖转移桑基图

Fig. 2 The Sankey map of land cover transfer in Daqing City from 2010 to 2020

在 2020-2030 年自然演替情景，因遵循之前的土地变化趋势，所以土地覆盖变化同 2010—2020 年的变化相同（表 3）。耕地面积增加也是最多的，达到 932.13 km²，占总增加量的 86.67%。草地减少最多，林地减少最少，分别占总损失量的 86.03%、1.05%。在 2030 年生态保护情景下，耕地、水体和人造地表则处于减少状态，其余土地覆盖类型面积增加。其中湿地面积增加最多为 57.88 km²，占比 67.64%，草地面积增加相对较少，只增加了 4.84 km²。水体面积减少最多，占比 81.95%。在 2020-2030 年城市发展情景，土地覆盖变化趋势同自然演替情景相同，与生态保护情景相反（图 3）。但是耕地和人造地表面积增加量比自然演替情景更多，其余土地覆盖类型减少量相对于自然演替情景较少。该情景下，耕地面积增加最多为 943.21 km²，比自然演替情景多了 11.08 km²，草地减少最多为 940.06 km²。

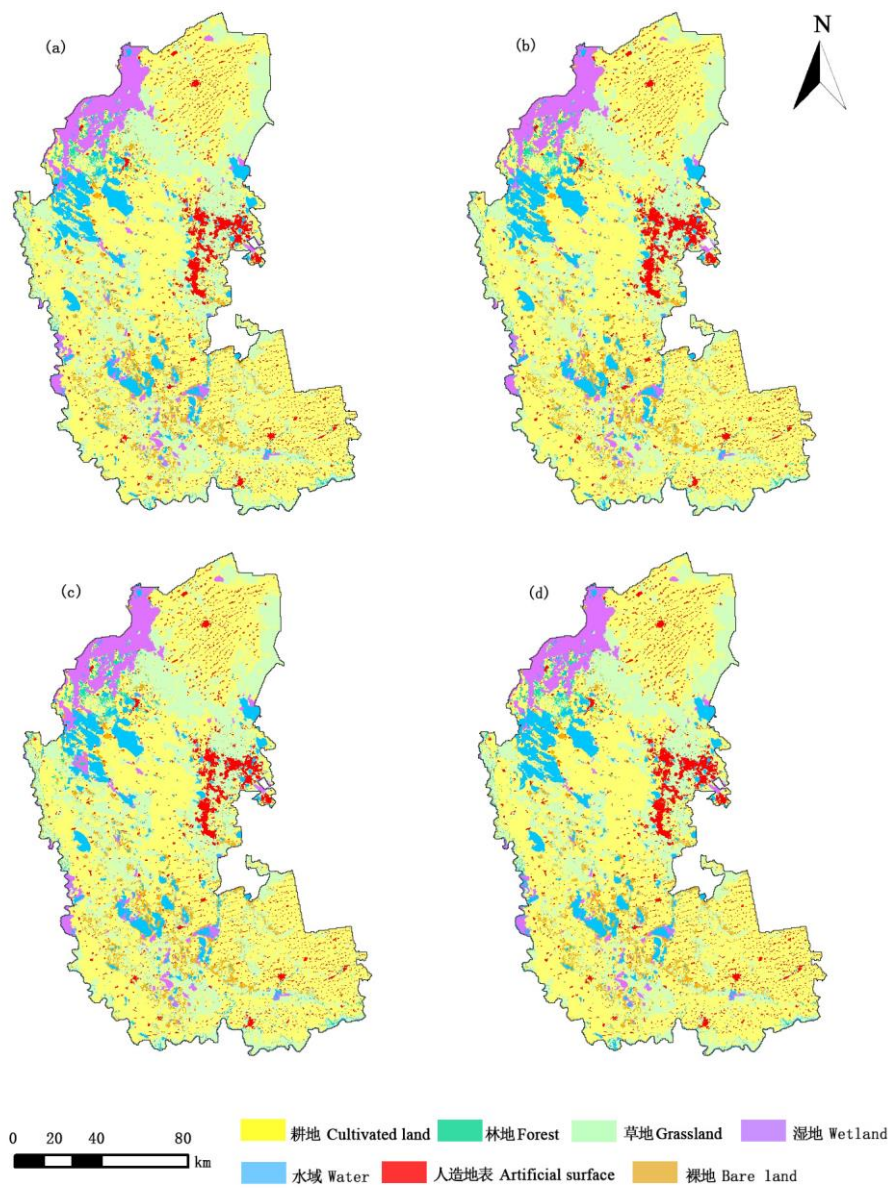


图 3 大庆市 2020-2030 年 3 种情景土地覆盖分布

Fig.3 Land cover distribution in three scenarios during 2020-2030 in Daqing City

(a):2020 年场景 Scenario of 2020;(b):自然演替情景 Natural succession scenario;(c):生态保护情景 Ecological protection scenario;(d):城市发展情景 Urban development scenario.

表 3 大庆市 2020-2030 年 3 种情景下土地覆盖变化^①

Tab. 3 Land cover change in three scenarios in Daqing City during 2020-2030

土地覆盖类型 land cover types	面积 Area /km ²				变化 Change /km ²		
	2020/年	情景 A	情景 B	情景 C	2020-情景 A	2020-情景 B	2020-情景 C
		Scenario A	Scenario B	Scenario C	2020-Scenario A	2020-Scenario B	2020-Scenario C
耕地 Cultivated land	10653.64	11585.77	10644.23	11596.85	932.13	-9.41	943.21
林地 Forest	135.58	124.28	149.02	124.38	-11.30	13.45	-11.19
草地 Grassland	6105.45	5180.28	6110.29	5165.39	-925.17	4.84	-940.06
湿地 Wetland	1207.69	1091.30	1265.58	1090.96	-116.40	57.88	-116.74
水体 Water	1330.04	1396.43	1259.92	1394.56	66.39	-70.12	64.52
人造地表 Artificial surface	947.35	1024.28	941.32	1030.19	76.93	-6.03	82.84
裸地 Bare land	796.85	774.27	806.25	774.28	-22.58	9.40	-22.57

①情景 A Scenario A: 自然演替情景 Natural succession scenario; 情景 B Scenario B: 生态保护情景 Ecological protection scenario; 情景 C Scenario C: 城市发展情景 Urban development scenario. 下同。The same below.

3.2 碳储量时空变化特征

3.2.1 碳储量数量变化特征 大庆市域总碳储量在这 10a 间呈下降趋势，2010 年、2020 年的碳储量分别为 $566.10 \times 10^6 \text{t}$ 和 $565.24 \times 10^6 \text{t}$ ，共减少了 $0.86 \times 10^6 \text{t}$ （表 4）。耕地、水体和人造地表分别增加了 $32.39 \times 10^6 \text{t}$ 、 $0.82 \times 10^6 \text{t}$ 和 $0.42 \times 10^6 \text{t}$ 碳储量，耕地的碳储增量占总增量的 96.29%。草地碳储量减少最多，占碳储总损失量的 79.03%。这 10a 间耕地和草地的碳储量是研究区碳储量的变化的主要驱动因素。2030 年自然演替情景、生态保护情景和城市发展情景下总碳储量分别为 $564.08 \times 10^6 \text{t}$ 、 $567.77 \times 10^6 \text{t}$ 、 $564.04 \times 10^6 \text{t}$ 。自然演替情景和城市发展情景相比与 2020 年总碳储量均有所减少，城市发展情景下碳储量减少得最多，共减少了 $1.20 \times 10^6 \text{t}$ ，其中草地碳储量减少的最多，占总碳损失量的 77.69%。生态保护情景下碳储量有所提升，比 2020 年碳储量增加了 $2.53 \times 10^6 \text{t}$ ，湿地碳储量增加的最多，占总贡献量的 74.26%。

表 4 大庆市 2010、2020、2030 年 3 种情景下的碳储量及变化

Tab.4 Carbon storage and changes in Daqing in 2010, 2020, and three scenarios in 2030 ($\times 10^6 \text{t}$)

情景 Scenario	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetland	水体 Water	人造地表 Artificial surface	裸地 Bare land	总碳储量 Total carbon storage
2010	275.26	5.20	176.44	61.79	13.70	4.40	29.31	566.10
2020	307.65	4.77	149.18	55.82	14.52	4.82	28.48	565.24
情景 A Scenario A	334.57	4.37	126.57	50.44	15.24	5.21	27.67	564.08
情景 B Scenario B	307.38	5.24	149.29	58.49	13.75	4.79	28.82	567.77

情景 C Scenario C	334.89	4.38	126.21	50.42	15.22	5.24	27.67	564.04
2010-2020	32.39	-0.43	-27.26	-5.97	0.82	0.42	-0.83	-0.86
2020-情景 A	26.92	-0.40	-22.61	-5.38	0.72	0.39	-0.81	-1.16
2020-Scenario A								
2020-情景 B	-0.27	0.47	0.11	2.68	-0.77	-0.03	0.35	2.53
2020-Scenario B								
2020-情景 C	27.24	-0.39	-22.97	-5.40	0.70	0.42	-0.81	-1.20
2020-Scenario C								

3.2.2 碳储量空间变化特征 从空间分布上看（图 4），2010-2020 年和 2020-2030 年 3 种情景的碳储量变化大部分区域处于基本不变的状态，基本不变的区域面积均超过总区域的 84.04%，生态保护情景下，碳储量基本不变的区域高达 99.21%。2010-2020 年期间，整体上呈现小聚集和零星分布的特点，碳储量明显增加的区域主要位于大庆市杜尔伯特蒙古族自治县、让胡路区和大同区的交界处及肇源县的北部和东部地区，这些区域均是含有湖泊和湿地的区域，总体增加区域占比 9.78%。

自然演替情景和城市发展情景呈现整体点分布，碳储量增加区域分别占比 5%和 4.54%。相比于自然演替情景，城市发展情景下位于杜尔伯特蒙古族自治县东部的碳储量减少区域向南偏移，位于大同区和肇川县交界处和大同区和肇源县交界处碳储量减少区域增多。生态保护情景下碳储量变化区域比较集中，主要位于杜尔伯特蒙古族自治县中西地区，该区域主要是连环湖温泉景区，增加区域仅占 0.68%，减少区域占比 0.11%。

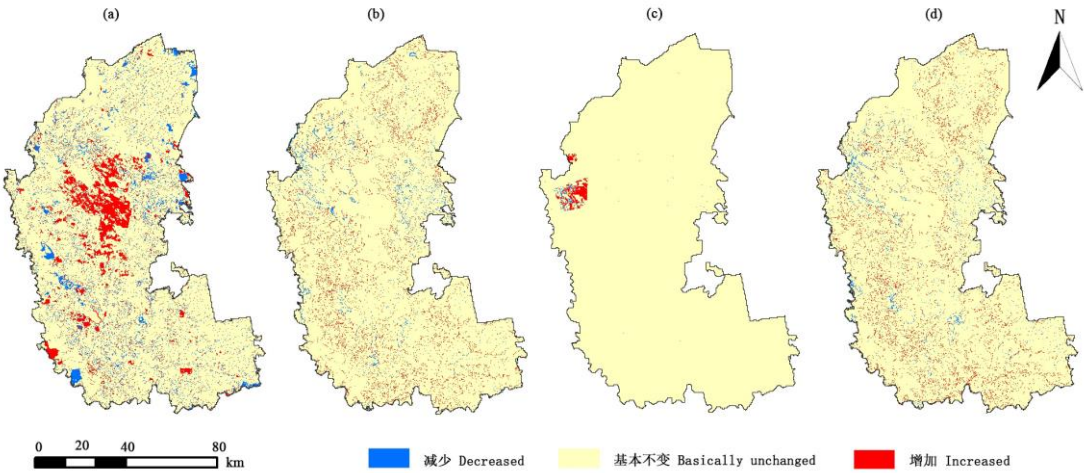


图 4 2010-2020 年，2020-2030 年 3 种情景碳密度变化分布

Fig.4 Carbon density change distribution in 2010-2020 and three scenarios during 2020-2030

(a): 2010-2020 年 Between 2010 and 2020;(b):2020 年-自然演替情景 Between 2020 and Natural succession scenario;(c): 2020 年-生态保护情景 Between 2020 and Ecological protection scenario;(d): 2020 年-城市发展情景 Between 2020 and Urban development scenario.

3. 3 土地覆盖变化对碳储量的影响

根据研究区 2010、2020 和 2030 年 3 种不同情景的土地覆盖和碳储量变化特征综合分析。2010-2020 年间及 2020-2030 年自然演替情景和城市发展情景，耕地面积增加最多，由此导致的耕地碳储量增加也是最多的，但是这些期间总体碳储量处于减少状态。草地面积减少得最多，由此导致的碳储量损失也是最多的，但是不及因耕地而产生的增加量。湿地面积减少量远低于耕地和草地的变化量，但比其他土地覆盖类型变化明显，且湿地每减少 1 km²,碳储量损失近 4.62×10⁴t。因此这些期间的主导因素是草地和湿地变化。

生态保护情景下,湿地面积增加最多,水体面积减少最多,且变化量远大于湿地面积变化量,但是因水引起的碳储量损失远小于由湿地引起的碳储量增加量,两者相差 $1.91 \times 10^6 \text{t}$,因此在该情景下的主要驱动因素是湿地。

3.4 固碳能力热点区域识别

从不同情景的固碳能力冷热点分析来看(图5),不同情景的冷热点区域有明显的差异。2030年自然演替情景、生态保护情景和城市发展情景大部分区域处于不显著区域,占比均超过80%。自然演替情景和城市发展情景的热点区分布相似,但是自然演替情景下的热点区分布范围更大一点。两者二级热点区域主要分布在市域西北边界处,包括杜尔伯特蒙古族自治县北部和林甸县西部,该区域主要分布着大量湿地——育苇场,地处扎龙湿地核心区。这两种情景下的三级热点区主要零星分布在市域南部地区,一级热点区分布较少,自然演替情景下主要分布在肇源县中部地区和龙凤区东部,仅占0.36%。此外自然演替情景下存在较大面积的冷点区域,分布在林甸县东部边界、林甸县、杜尔伯特蒙古族自治县和让胡路区的相交处以及大庆市主城区中心部分,分别是生态保护情景和城市发展情景的2.93倍和3.79倍。生态保护情景下相对于其他两个情景的二级热点区域降为三级热点区域,一级热点区域主要分布在杜尔伯特蒙古族自治县的阿木塔渔场、连环湖三分场和连环湖三分场区域,占0.34%。该情景固碳能力冷点区域主要分布在大庆市区主城区中心部分,是建设用地的主要位置。

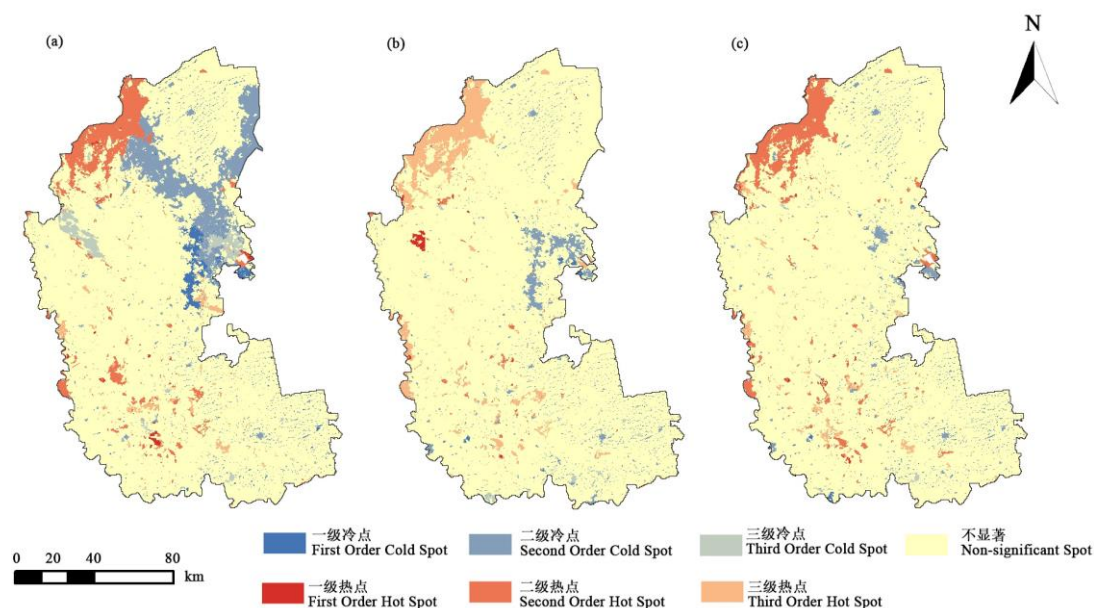


图5 大庆市2030年3种情景固碳能力冷热点区域分布

Fig.5 Distribution of hot and cold spots of carbon fixation capacity under three scenarios in Daqing City in 2030
(a):自然演替情景 Natural succession scenario;(b):生态保护情景 Ecological protection scenario;(c):城市发展情景 Urban development scenario.

4 讨论

4.1 土地利用变化对碳储量的影响

碳储量变化与各类土地覆盖变化密切相关,碳储量降低主要是由碳密度较高土地覆盖类型向碳密度较低土地覆盖类型转化引起的。本研究的大庆市碳储量降低主要表现为林地、草地和湿地转化为耕地、水体和人造地表。诸多研究已经证明林地碳密度较高,具有较强的固碳能力,根据本研究结果表明,草地和湿地在提升区域碳储量起着重要作用。草本植物的根系通常比较发达,能够很好地积累有机碳(宇万太等,

2001), 而湿地除了湿地植物通过光合作用吸收大气中的 CO_2 , 泥炭的厌氧特性还可以有效固定动植物残体中的碳(刘子刚等, 2005)。由于研究区是以石油为主的资源型城市, 林地总面积相对较少, 裸地面积较多。因此, 该区域的草地和湿地的保护是提升大庆市域碳储量的关键。城市发展情景的碳储量最少, 该情景为了发展经济, 依靠人造地表、耕地和水域分别获取工业、农业和旅游服务业等收入, 其中人造地表和水域的碳密度较低, 它们的扩张会导致草地和湿地等面积缩减(时宇等, 2014)。

4.2 固碳能力热点区域

不同情景的研究区固碳能力冷热点区域不同, 热点区级别越高固碳能力越强。从不同情景上分析, 自然演替情景固碳能力冷点区域面积较大, 主要是由于人类活动导致, 人为干扰越严重的地区, 地块的固碳能力越弱。生态保护情景的一级热点区域集中分布在杜尔伯特蒙古族自治县的连环湖地区, 该地区是由于生态保护政策指引, 发展形成了高固碳能力的湿地。城市发展情景的固碳能力热点区域相对于自然演替情景下区域极具缩小降级, 为了发展经济大力开发农业, 导致了大量草地转化为耕地, 固碳能力不显著区域因此增加。整体上综合分析, 三种情景的湿地分布区域皆属于固碳能力热点区域, 人类活动频繁的人造地表区域皆属于固碳能力冷点区域, 耕地分布区域的属于固碳能力不显著区。

4.3 局限性

本研究运用 FLUS 模型和 InVEST 模型结合 Hot Spot 分析, 为探讨不同情景土地覆盖变化对碳储量的影响及其固碳能力提供了可借鉴的方法, 本研究结论可以适用于类似的石油资源枯竭型城市, 而研究方法可以适用于任何研究区域。然而, 本研究存在一定的局限性。首先, 碳密度数据的获取, 虽然对数据进行了修正减小的误差, 但是由于不同的研究员测量会有所差异, 造成最后的结果不够准确; 其次, FLUS 模型的驱动因子的选择和参数设定存在一定的主观性, 不够客观; 此外, InVEST 模型过于依赖土地覆盖分类, 忽略了内部异质性的影响(Cabral et al., 2016)。

4.4 政策建议

经研究发现, 当大庆市按照生态保护情景来发展, 在 2030 年的碳储量会增加。结合土地覆盖对碳储量的影响和固碳能力冷热点区域结果, 提出以下几点建议: 首先, 坚持退耕还林、还草、还湿的政策, 特别加大还湿力度; 其次, 具体在杜尔伯特蒙古族自治县的连环湖地区开展湿地营建和保护工作; 最后, 在大庆市主城区让胡路区、萨尔图区、红岗区和龙凤区的交汇处, 增加绿色基础设施, 减少城市用地的扩建。

5 结论

利用 Geo SOS-FLUS 软件结合 In VEST 模型碳储模块, 模拟了 2030 年自然演替情景、生态保护情景和城市发展情景土地覆盖分布和相应的碳储量计算, 并探讨了土地覆盖变化对碳储量的影响及不同情景下的固碳能力冷热点格局。

(1) 大庆市域在自然演替情景和城市发展情景土地覆盖变化趋势同 2010-2020 年间趋势相同, 与生态保护情景下的趋势相反。相对于 2020 年, 生态保护情景湿地面积增加了 4.79%, 城市发展情景人造地表和耕地分别增加了 8.74%和 8.85%, 高于其他情景。林地在自然情景减少了 11.30km^2 , 低于其他情景。

(2) 2010 和 2020 年平均碳密度分别为 267.32t/hm^2 和 266.92t/hm^2 , 10a 间碳储量减少了 $0.86\times 10^6\text{t}$ 。2030 年自然演替情景、生态保护情景和城市发展情景碳储量分别为 $564.08\times 10^6\text{t}$ 、 $567.77\times 10^6\text{t}$ 、 $564.04\times 10^6\text{t}$ 。相对于 2020 年, 生态保护情景碳储量增加, 其他两种情景减少, 城市发展情景减少得最多。自然演替情景和城市发展情景碳储量变化呈现整体点分布, 生态保护情景下碳储量变化区域集中在杜尔伯特蒙古族自治县中西地区。

(3) 2010-2020 年间及 2020-2030 年自然演替情景和城市发展情景导致碳储量减少的主要因素是草地和湿地面积的减少, 生态保护情景下碳储量增加的主要贡献者是湿地。

(4) 不同情景的固碳能力冷热点区域有明显的差异。自然演替情景二级热点区域主要分布在市域西北边界处, 冷点区域分布是生态保护情景和城市发展情景的 2.93 倍和 3.79 倍。城市发展情景固碳能力热点区域与自然演替情景相似, 但是冷点区域极少。生态保护情景一级热点区域主要分布在杜尔伯特蒙古族自治县, 冷点区域主要分布在大庆市主城区中心部分。

参 考 文 献

- 常晓敏, 王少丽, 管孝艳, 等. 2023. 湟水流域典型区农业面源污染特征解析及空间格局. 灌溉排水学报, 1-8.
- (Chang X M, Wang S L, Guan X Y, *et al.* 2023. Spatiotemporal distribution of nonpoint source pollution from agriculture in the Huangshui River basin. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1-8. [in Chinese])
- 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 2007. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展. 亚热带资源与环境学报, (01): 34-42.
- (Chen G S, Yang Y S, Liu L Z, *et al.* 2007. The research review on total below-ground carbon allocation in forest ecosystems. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, (01): 34-42. [in Chinese])
- 陈新云, 王甜, 李宝健. 2021. 北京市西北部生态涵养区未来土地利用及生态系统服务变化情景模拟. 西北林学院学报, 36(01): 86-95.
- (Chen X Y, Wang T, Li B J. 2021. Simulation of the future land use and ecosystem services in the ecological conservation area in northwestern Beijing. *Journal of Northwest Forestry University*, 36(01): 86-95. [in Chinese])
- 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 2011. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响. 资源科学, 33(10): 1932-1939.
- (Chuai X W, Huang X J, ZHENG Z Q, *et al.* 2011. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province. *Resources Science*, 33(10): 1932-1939. [in Chinese])
- 郭树平. 2011. 黑龙江省碳储量及碳汇潜力分析. 森林工程, 27(03): 9-11+16.
- (Guo S P. 2011. Analysis on carbon stock and potential carbon sequestration in Heilongjiang Province. *Forest Engineering*, 27(03): 9-11+16. [in Chinese])
- 韩晋榕. 2013. 基于 InVEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析. 长春: 东北师范大学.
- (Han J R. 2013. The impact of urban sprawl on carbon stocks based on the InVEST model. Changchun: Northeast Normal University. [in Chinese])
- 李月, 罗红芬. 2023. 基于 InVEST 模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究. 西北林学院学报, 1-13.
- (Li Y, Luo H F. 2023. Research on carbon storage change of construction land expansion in central Guizhou's karst region based on InVEST model. *Journal of Northwest Forestry University*, 1-13. [in Chinese])
- 林一诚, 郑景明, 周怡宁, 等. 2023. 基于 InVEST 模型的围场县小滦河流域碳储量空间分布及热点区域分析. 生态学杂志, 1-11.
- (Lin Y C, Zheng J M, ZHOU Y N, *et al.* 2023. Spatial distribution of carbon storage and hot spots in Xiaoluan River basin in Weichang County based on InVEST model. *Chinese Journal of Ecology*, 1-11. [in Chinese])
- 刘子刚, 张坤民. 2005. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化. 清华大学学报(自然科学版), (06): 788-791.
- (Liu Z G, Zhang K M. 2005. Wetland soils carbon stock in the Sanjiang plain. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, (06): 788-791. [in Chinese])
- 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 2022. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究. 干旱区研究, 39(06): 1896-1906.
- (Lu Y Y, Xu X L, Li J C, *et al.* 2022. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model. *Arid Zone Research*, 39(06): 1896-1906. [in Chinese])
- 时宇, 李明阳, 杨玉锋, 等. 2014. 基于 CLUE-S 模型的城市森林公园土地利用情景规划方法研究. 西北林学院学报, 29(05): 163-168.

- (Shi Y, Li M Y, Yang Y F, *et al.* 2014. CLUE-S Based scenario planning of land use in urban forest park. *Journal of Northwest Forestry University*, 29(05): 163-168. [in Chinese])
- 孙健, 於静, 莫晨剑, 等. 2023. 2000—2020 年台州市陆地生态系统碳储量对土地利用变化的响应研究. *中国资源综合利用*, 41(03): 185-187.
- (Sun J, Yu J, Mo C J, *et al.* 2023. Study on response of carbon storage of terrestrial ecosystem to land use change in Taizhou City from 2000 to 2020. *China Resources Comprehensive Utilization*, 41(03): 185-187. [in Chinese])
- 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 2023. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测. *生态与农村环境学报*, 39(01): 41-51.
- (Sun X X, Xue J H, Dong L N. 2023. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 39(01): 41-51. [in Chinese])
- 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析. *自然资源学报*, 2022, 37(05): 1198-1213.
- (Xiang S J, Zhang Q, Wang D, *et al.* 2022. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020. *Journal of Natural Resources*, 37(05): 1198-1213. [in Chinese])
- 杨秀丽, 江玉珍, 寇晨欢. 2022. 资源型城市构建创新生态系统的机制研究——以黑龙江省大庆市为例. *生态经济*, 38(12): 89-96.
- (Yang X L, Jiang Y Z, Dou C H. 2022. Research on the mechanism of building innovation ecosystem in resource-based cities: A case study of Daqing City, Heilongjiang Province. *Ecological Economy*, 38(12): 89-96. [in Chinese])
- 于兵, 邸雪颖, 臧淑英. 2011. 大庆地区植被和土壤碳氮储量动态变化的预测. *江苏农业科学*, 39(04): 417-422.
- (Yu B, Di X Y, Zang S Y. 2011. Prediction of dynamic changes of carbon and nitrogen storage in vegetation and soil in Daqing region. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 39(04): 417-422. [in Chinese])
- 宇万太, 于永强. 2001. 植物地下生物量研究进展. *应用生态学报*, (06): 927-932.
- (Yu W T, Yu Y Q. 2001. Advances in the research of underground biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology*, (06): 927-932. [in Chinese])
- 张燕, 师学义, 唐倩. 2021. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估. *生态学报*, 41(01): 360-373.
- (Zhang Y, Shi X Y, Tang Q. 2021. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios. *Acta Ecologica Sinica*, 41(01): 360-373. [in Chinese])
- 周京春, 耿晓晨. 2022. 基于 FLUS 模型的云南昭通市昭阳区土地利用变化及预测. *昆明大学学报*, 44(4): 86-93.
- (Zhou J C, Geng X C. 2022. Land use change and forecast for Zhaoyang Area in Zhaotong Yunnan based on FLUS Model. *Kunming Univ.* 44, 86-93. [in Chinese])
- Alam S A, Starr M, Clark B J F. 2013. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study. *Journal of Arid Environments*, 89: 67-76.
- Aydin A, Eker R. 2022. Future land use/land cover scenarios considering natural hazards using Dyna-CLUE in Uzungol Nature Conservation Area (Trabzon-NE Turkiye). *Natural Hazards*, 114(3): 2683-2707.
- Baumann M, Gasparri I, Piquer-Rodriguez M, *et al.* 2017. Carbon emissions from agricultural expansion and intensification in the Chaco. *Global Change Biology*, 23(5): 1902-1916.
- Cabral P, Feger C, Levrel H, *et al.* 2016. Assessing the impact of land-cover changes on ecosystem services: A first step toward integrative planning in Bordeaux, France. *Ecosystem Services*, 22: 318-327.
- Darvishi A, Yousefi M, Marull J. 2020. Modeling landscape ecological assessments of land use and cover change scenarios. Application to the Bojnourd Metropolitan Area (NE Iran). *Land Use Policy*, 99.
- Li C, Wu Y, Gao B, *et al.* 2021. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China. *Ecological Indicators*, 132.
- Li X, Wang D. 2022. Does Transfer payments promote the low-carbon development of resource-exhausted cities in China? *Earth's Future*, 10(1).
- Liu X, Liang X, Li X, *et al.* 2017. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168: 94-116.

Rajbanshi J, Das S. 2021.Changes in carbon stocks and its economic valuation under a changing land use pattern-A multitemporal study in Konar catchment, India. Land Degradation & Development, 32(13): 3573-3587.