

# 基于 PLUS 和 InVEST 模型的邯郸市碳储量 空间分布特征研究

张 鹏<sup>1</sup>, 李良涛<sup>1</sup>, 苏玉姣<sup>1</sup>, 王清涛<sup>1</sup>, 韩红英<sup>2</sup>, 韩宏伟<sup>3</sup>, 李晓婧<sup>2</sup>

(1.河北工程大学 园林与生态工程学院, 河北 邯郸 056000;

2.邯郸市林业和草原科研中心, 河北 邯郸 056000; 3.邯郸市园林局, 河北 邯郸 056000)

**摘 要:** [目的] 分析河北省邯郸市近 20 a 土地利用格局及碳储量分布,并探讨生态保护政策下未来 10 a 的土地利用变化趋势,为增加城市碳汇和实现城市可持续发展提供参考依据。[方法] 使用 PLUS 模型,选取自然、社会驱动因素及生态规划限制因子,分析邯郸市在 2000—2020 年及自然发展情景和生态保护情景下 2030 年的土地利用变化规律,并结合 InVEST 模型,评估邯郸市 2000—2030 年 3 期碳储量。[结果] ①邯郸土地利用类型的分布呈现“西部林地,东中部耕地”的总体空间分布特征,耕地和人造地表之间的土地利用转移占总土地利用变化的 96.58%; ②邯郸市碳密度空间分布呈现西部高东部低的特点,碳储量总体呈下降趋势,碳损失在 2010 年突增,耕地的过度侵占是导致邯郸市碳损失的最主要原因; ③与自然发展情景相比,生态保护情景下土地利用变化趋于克制,虽然生态用地的提升潜力一般,但由于人类活动受到限制,避免了生态资源的消耗; ④2020—2030 年自然发展情景和生态保护情景下邯郸市碳储量变化分别为减少  $4.23 \times 10^6$  t 和增加  $2.16 \times 10^4$  t。各区县碳损失风险显著降低,不同区县碳汇潜力差异明显。[结论] 人造地表侵占耕地是导致碳损失的主要原因。生态保护政策干预下,各区县碳损失风险显著降低,不同区县也存在明显差异,碳损失更易发生于东中部平原地区,西南部的太行山东麓区县则具有较强的碳汇潜力,需针对差异化表现灵活布局。

**关键词:** 碳密度; 土地利用; 情景模拟; 空间分布; 河北省邯郸市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)03-0338-11

**中图分类号:** X87, F124.5

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20230111.001; 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.

## Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Carbon Storage in Handan City Based on PLUS and InVEST Models

Zhang Peng<sup>1</sup>, Li Liangtao<sup>1</sup>, Su Yujiao<sup>1</sup>, Wang Qingtao<sup>1</sup>, Han Hongying<sup>2</sup>, Han Hongwei<sup>3</sup>, Li Xiaojing<sup>2</sup>

(1.School of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of

Technology, Handan, Hebei 056000, China; 2.Handan Forestry and Grassland Research

Center, Handan, Hebei 056000, China; 3.Handan City Landscape Bureau, Handan, Hebei 056000, China)

**Abstract:** [Objective] The land use patterns and carbon storage distribution in Handan City, Hebei Province during the recent 20 years were analyzed, and the trends in land use changes under an ecological protection policy during the next 10 years were determined, in order to provide evidence for both increasing urban carbon sinks and realizing sustainable urban development. [Methods] Based on the PLUS model, natural and social driving factors were selected to analyze land use change patterns in Handan City in 2030 under the scenarios of natural development and ecological protection from 2000 to 2020. Carbon storage was also

收稿日期: 2022-06-19

修回日期: 2022-10-14

资助项目: 河北省林草厅科研课题“区域森林碳汇监测评价技术研究”(2119061); 河北省峰峰矿区 4 个一科技示范基地项目(202206); 河北省自然基金面上项目“模拟增温和干旱对太行山退化生境中人工林更新的影响研究”(C2020402022)

第一作者: 张鹏(1996—), 男(汉族), 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化及生态服务功能评估。Email: zhangpeng0626@qq.com。

通信作者: 李良涛(1978—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态规划与生物多样性研究。Email: lilangtao@hebeu.edu.cn。

evaluated by the InVEST model in Handan City from 2000 to 2030. [Results] ① The spatial distribution of land use types in Handan City showed the characteristics of “woodland in the west and cultivated land in the east”. The land use transfer between cultivated land and artificial habitats accounted for 96.58 % of the total land use change. ② The spatial distribution of carbon density was characterized as “high in the west and low in the east” in Handan City. Carbon storage decreased over time. Excessive encroachment of cultivated land led to a dramatic increase in carbon loss in Handan City in 2010. Excessive encroachment of cultivated land was the main cause of carbon loss in Handan City. ③ Compared with the natural development scenario, land use change under an ecological protection scenario tended to be restrained. Although the potential for ecological land improvement was average, consumption of ecological resources was avoided due to limited human activities. ④ Under both the natural development and ecological protection scenarios, carbon storage from 2020 to 2030 in Handan City was simulated to decrease by  $4.23 \times 10^6$  t and increase by  $2.16 \times 10^4$  t, respectively. The risk of carbon loss was significantly reduced across the city, and the potential of carbon sinks in different areas of the city appeared to differ significantly. [Conclusion] The encroachment of cultivated land was the main cause of carbon loss over time. Implementation of ecological protection policies significantly reduced the risk of carbon loss in each district and county, and there are obvious differences among different districts and counties. Carbon loss was more likely to occur in the east-central plain region, while the districts and counties at the eastern foot of the Taihang Mountain in the southwest had strong carbon sink potential, therefore a flexible plan should be made according to location differences.

**Keywords:** carbon density; land use; scenario simulation; spatial distribution; Handan City, Hebei Province

随着世界经济快速发展,土地利用开发规模急剧扩张,由此导致了超过全球 30% 的碳排放<sup>[1]</sup>。城市扩张导致大量生态土地转向城市建设用地转化<sup>[2]</sup>,这个过程更是直接造成高碳密度土地的流失<sup>[3]</sup>。已有研究结合斑块生成土地利用模拟模型(path-generating land use simulation, PLUS)和生态系统服务和权衡综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)碳储存模块来定量评估和预测土地利用变化及碳储存<sup>[3-4]</sup>。InVEST 模型因其能有效揭示多目标、多情景下土地利用/覆被类型变化与碳储量变化之间的关系而得到广泛应用<sup>[5]</sup>。PLUS 模型通过多目标耦合算法也可以更好地模拟不同政策情景并探索土地利用变化背后的潜在驱动因素,从而使模拟结果的形态更真实可信<sup>[6]</sup>。多项研究表明,PLUS 模型可以为研究区国土空间规划及用地限制政策的出台提供科学建议<sup>[6-9]</sup>。已有部分学者结合 PLUS 模型与 InVEST 模型模拟未来不同土地利用情景下的生态系统服务空间格局<sup>[10-13]</sup>。如对伊犁河流域的研究着眼于未来不同情景生态系统服务之间的权衡/协同关系<sup>[8]</sup>,对博尔塔拉蒙古自治州的研究<sup>[9]</sup>和对广东省的研究<sup>[10]</sup>,通过构建 SSP-RCP 情景预测未来土地利用和碳储量变化,然而现有研究仍然较少将 PLUS 模型用于区县级辖区碳储量时空格局预测以及土地利用格局并分析其潜在驱动因子,难以衡量生态保护政策约束下土地利用变化路径及其驱动因素从而为区域尺度的碳

损失风险预测和低碳发展政策提供有效指导。

邯郸市位于太行山山脉南段与华北平原的过渡带,太行山是京津地区重要的生态安全屏障,东中部平原城市群的经济生态协调发展同样是中部地区崛起战略的关键<sup>[14]</sup>,如何兼顾经济发展与生态安全,平衡快速增长的人类用地需求和巨大的能源消耗之间的矛盾一直是山地—平原过渡带研究区发展的重要问题<sup>[15]</sup>。近年来,邯郸市土地利用格局剧烈变化<sup>[16]</sup>,对于政策制定者来说,相关生态保护政策和国土空间规划的实施路径也亟待明确。

鉴于此,文章以 2000—2020 年邯郸市土地利用数据为基础,结合 PLUS 模型与 InVEST 模型,选取自然、社会驱动因素,模拟邯郸市在自然发展与生态保护两种情境下 2030 年的土地利用和碳储量时空变化格局,并探讨了造成这些变化的潜在驱动因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

邯郸市为河北省南部地级市,总面积 12 066 km<sup>2</sup>,跨东经 114°03′—40′,北纬 36°20′—44′之间西依太行山脉,为中、低山丘陵地貌,东接华北平原,海拔 24~1 885 m,地势呈自西向东阶梯状下降趋势,高差悬殊,最高与最低处相差约 1 800 m,是晋冀鲁豫 4 省要冲和华中地区重要的交通枢纽。邯郸属暖温带大陆性季风气候,年均气温 13.5 ℃,四季分明。截至

2021 年年末,邯郸市下辖 6 个区,11 个县和 1 个县级市,常住人口  $9.37 \times 10^6$  人,人口位居河北省全省第 2 位,全市生产总值  $4.11 \times 10^{11}$  元,比上年增长 6.9%,位居全省第 4。

自 2000 年起邯郸市人口规模迅速扩大,人类活动导致土地利用格局飞速变化,尤其是 2010 年后邯郸市城镇化进度加快。由此带来生态系统服务下降,碳储量功能脆弱等问题严重影响了邯郸市的可持续发展,土地利用变化格局及碳储存空间分布特征亟待明确。

### 1.2 数据来源及预处理

研究所用 2000,2010,2020 年邯郸市土地利用数据来源于全球 30 m 地表覆盖(GlobeLand30)数据集(<http://www.globallandcover.com/>),在 ArcMap 10.2 中经过镶嵌、裁剪后得到邯郸市土地利用现状,土地利用类型分为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体和人造地表 7 类,最后在 ArcMap10.2 统一栅格行列数及投影坐标系至与其他驱动因素数据一致。其中人造地表是指由人工建造活动形成的地表,包括城镇及各类居民地、工矿、交通设施等,不包括耕地及建设用地内部连片绿地和水体。

由于 PLUS 模型采用随机森林算法,可以很好处理驱动因子间的空间自相关和多重共线性<sup>[6]</sup>,因此在参考前人研究<sup>[6,10]</sup>的基础上综合考虑研究区现状,共引入 13 种自然、社会驱动因素(表 1)。其中 2000—2015 年平均年均降水,2000—2015 年平均年均温,陆地生态系统服务价值空间分布,夜间灯光数据,农田生产潜力数据集均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/DOI>),铁路、高速、省道、国道、县道、城市建成区、河流等矢量数据来自 OpenStreetMap 数据(<http://www.openstreetmap.org/>),高程、坡度数据来自 SRTM 90 m 分辨率高程、坡度数据产品(<http://www.gscloud.cn/>),人口数量栅格数据集来自 Worldpop 人口数量数据集(<https://www.worldpop.org/>)。在 ArcGIS 10.2 中借助栅格计算器计算 2000—2015 年年均温和年均降水,借助 QGIS 3.0 提取 OpenStreetMap 矢量数据导入 ArcMap 10.2 进行“欧氏距离分析”,使用“按掩膜提取”工具对数据集数进行提取分析后,统一所有驱动因素投影坐标系为 WGS1 984 UTM 49 N,分辨率重采样至 30 m,对于如 DEM 值、坡度、温度、降水等连续型分布数据优先采用双线性内插法重采样,对夜间灯光数据、人口密度等基于遥感影像制作的数据集优先考虑三次卷积法重采样以获得更好的细节表现。

表 1 2000—2020 年邯郸市土地利用变化驱动因素

Table 1 Driving factors of land use change in Handan City during 2000—2020

自然驱动因素				社会驱动因素			
1 年均温	4 年均降水			1 人口数量	5 农田生产指数		
2 高程	5 生态系统服务价值			2 夜间灯光指数	6 至铁路距离		
3 坡度	6 至河流水系距离			3 至高速路距离	7 至主要道路距离		
				4 至建成区距离			

### 1.3 研究方法

1.3.1 基于 InVEST 模型的碳储量评估 本文利用 InVEST 3.9.2 的 carbon storage and sequestration 模块进行碳储量的评估。该模型的估算包括常见的 4 种基本碳库:地上生物量、地下生物量、土壤有机质和死亡凋落物有机质,但是由于死亡凋落物碳库实测数据难以获取,本文主要参考三大基本碳库。

(1) 地上生物量碳库包括地表土壤以上所有存活植物材料中的碳。

(2) 地下生物量碳库主要指地下植物根系中的碳。

(3) 土壤有机质碳库主要指土壤中的有机碳,其原理为:

$$C_i = C_{i\_above} + C_{i\_below} + C_{i\_soil} \tag{1}$$

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

式中: $i$  为第  $i$  种土地利用类型; $C_{i\_above}$  为第  $i$  类土地利用类型的地上生物量碳密度( $t/hm^2$ ); $C_{i\_below}$  为第  $i$  类土地利用类型的地下生物量碳密度( $t/hm^2$ ); $C_{i\_soil}$  为第  $i$  类土地利用类型的土壤有机质碳密度( $t/hm^2$ ); $C_{total}$  为总碳储量( $t$ ); $S_i$  为第  $i$  类土地利用类型的总面积( $hm^2$ ); $n$  为土地利用类型的数量,本文取值为 7。

碳密度数据的选取和未来土地利用变化模拟方案的准确性很大程度上决定了最终碳储量结果的准确性<sup>[17]</sup>。碳密度的确定方法参考前人研究<sup>[17-18]</sup>,结合邻近研究区碳密度实测研究,分析其合理性并筛选异常值后获得。主要参考中科院地理所整理的 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集<sup>[19]</sup>,该数据集总结了 2004—2014 年公开发表的历史文献数据资料以及相关试验监测碳密度数据,并对相关研究的坐标进行了整理,这为区域碳密度的测定提供了便利。样点选择优先参考邻近研究区、相同气候带样点实测碳密度数据(根据地理范围优先选取邯郸市辖区内或者纬度相近样点的研究),根据样本点经纬度导入 ArcMap10.2,并根据地理范围选取样本点,取各样本点碳密度平均值获得碳库数据。对于缺少样本点的碳密度类型(如草地、耕地、湿地等),补充 2014 年



来临近研究区相关研究实测碳密度数据<sup>[20-25]</sup>。对于只提供生物量的研究,根据 InVEST 模型使用手册建议,采用转换系数 0.45 将生物量换算为碳密度。对于地下生物量碳密度,根据使用手册参考《IPCC 国家温室气体清单指南》确定根茎比获得地下碳密度值。最后用得到的碳库数据与研究区附近基于 InVEST 模型的碳储量研究采用的碳库数据进行对比<sup>[13]</sup>,剔除异常值并分析合理性,最终得到碳库数据(表 2)。对比邻近研究区使用 InVEST 模型模拟碳储量的研究,经过模型计算,2010 年邯郸市平均碳密度为 71.68 t/hm<sup>2</sup>,与赫晓慧等对中原城市群的研究结果相一致<sup>[14]</sup>。西部高东部低的碳储量分布特征与李瑾璞对河北省碳储量分布的研究一致<sup>[18]</sup>,故碳库数据具有合理性。

表 2 邯郸市各土地利用类型碳密度值

Table 2 Carbon intensity values of different land use type in Handan City			
	t/hm <sup>2</sup>		
土地利用类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤有机质碳密度
耕地	4.12	0.41	62.86
林地	34.67	12.58	125.50
草地	0.92	8.89	70.61
灌木	1.91	3.37	50.94
湿地	4.35	1.92	29.83
水域	0.00	0.00	0.00
人造地表	0.50	0.76	16.98

1.3.2 基于 PLUS 模型的未来土地利用变化预测  
PLUS 模型是一种面向栅格数据的土地利用变化模拟模型,它与传统 CA 模型存在区别。首先,它结合了一种新的土地扩张分析策略,并集成为 LEAS 模块,够更好地挖掘土地利用变化的潜在驱动机制。其次,它包含一种新的多类随机斑块种子生长机制,能更好得模拟土地利用斑块级的变化。最后,它耦合多目标优化算法,能更好模拟具体的开发和约束情景,并将两者集成为 CARS 模块。研究根据《PLUS 模型 V1.0 用户手册》首先以土地利用数据为基础,选取包括年均降水、年均温等在内的 13 项驱动因素作为预测变量输入 LEAS 模块中,获得 13 项驱动因素对各类用地扩张的贡献度,用于挖掘土地利用扩张的潜在规律,并将计算得到各类用地的扩张概率输入 CARS 模块中,输入空间约束数据以模拟不同政策约束下的强限制(如开放水域和自然保护区),最后调试包括土地利用需求、转换矩阵和邻域权重在内的 3 项模型模拟参数,以及邻域效应斑块衰减阈值等传统 CA 模型参数,调整模型运行强度。

总体使用分为 3 个部分:数据准备及模拟精度验证,未来土地利用情景设置和模型模拟参数调试。  
(1) 数据准备及模拟精度验证。基于 2010 年土地利用数据,将 13 项驱动因素,输入 2020 年土地利用需求,基于 2000—2010 年 Markov 转移概率设置转移矩阵,根据各用地类型变化占比设置邻域权重,模拟 2020 年土地利用需求,将模拟得到的土地利用现状与实际 2020 年土地利用对比,验证模型模拟精度。kappa 系数总体精度为 89.32%,kappa 系数为 0.78,代表 PLUS 模型结果具有较高的可信度。  
(2) 未来情景建模。在模拟精度满足要求的前提下模拟与未来政策更契合的土地利用情景,根据专家建议文章设立两种情景,包括自然发展情景(natural development scenario, ND)和生态保护情景(ecological protection scenario, EP)。ND 情景下,尊重过往 10 a 的土地利用变化趋势。2020—2030 年的土地利用需求依据 2010—2020 年的马尔科夫链转换概率计算得到,邻域权重参数也基于 2030 年土地利用类型像元预测数量计算得到;EP 情景下,假设政府加强生态保护,严格控制建设用地增长、鼓励退耕还林还草等政策。首先,在生态保护红线的基础上合并湖泊和湿地等生态涵养区,设置为约束发展区域。其次,参考前人研究<sup>[4,11]</sup>,结合《邯郸市国土空间总体规划(2021—2035 年)》及《邯郸市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标》相关指标描述,严格控制具有生态功能的耕地、草地、林地和湿地向人造地表的转化。然后参考前人研究<sup>[26-28]</sup>,通过修改 2010—2020 年的马尔科夫转换概率矩阵,将耕地向建设用地的转移概率降低 30%,并将降低的概率添加到耕地向林地的转换概率中;草地和林地向建设用地的转移概率降低 40%,分别增加到草地和林地;湿地向建设用地的转移概率降低 30%,转为增加林地,最终得到 EP 情景下 2030 年土地利用需求(表 3)。  
(3) 模型参数调试。模型涉及参数除 CARS 模块中的土地利用需求、转换矩阵和邻域权重外,均参考用户手册以及 Liang Xun 等的研究进行设置<sup>[6]</sup>。未来土地利用需求根据前一步的未来情景建模得到,转换矩阵的设置遵循以下原则:森林在被保护的情况下不容易发生转换;水体不易转换为除湿地外的其他地类;限制人造地表侵占耕地、湿地和水域。邻域权重通过各类用地扩张强度求得,具体以 2010、2020 年两期土地利用数据为基础,通过计算各类用地变化面积占总面积比重确定。



表 3 邯郸市 2030 年未来情景土地利用需求像元数

Table 3 Future scenarios for 2030 land use demand in Handan City

土地利用情景	像元数/个						
	耕地	林地	草地	灌木	湿地	水域	人造地表
2020 年实际需求	9 003 629	1 139 234	917 117	5 577	9 403	81 402	2 258 493
2030 年自然发展情景	8 272 638	1 140 844	932 407	5 512	10 802	121 378	2 931 274
2030 年生态保护情景	9 262 990	1 141 027	923 706	5 580	9 606	82 925	1 989 021

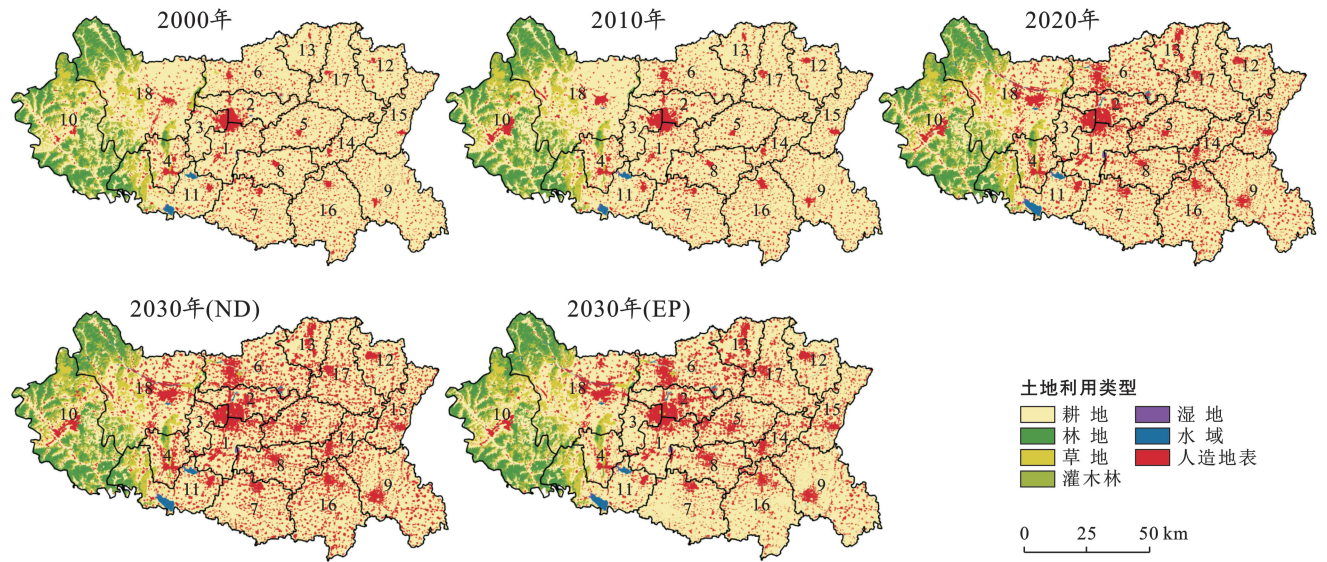
## 2 结果与分析

### 2.1 邯郸市土地利用变化空间格局

2000—2020 年邯郸市各土地利用类型的分布呈现强烈的空间分异(图 1),耕地用地类型主要分布在东部平原区,林地、草地等生态用地主要分布在西部太行山区及丘陵区。人类活动也呈现明显的空间分异,人造地表多分布于中东部平原区,县域尺度上

呈现以邯山区、丛台区、复兴区为中心的多极化发展趋势。

邯郸市各土地利用类型面积及变化见图 2。比例最多的土地利用类型以耕地为主,20 a 间比例均超过 67%,2000—2020 年耕地面积由 74.11% 降为 67.12%,缩减了 844.73 km<sup>2</sup>;其次为人造地表,20 a 间占比均超过 10%,2000—2020 年人造地表面积由 10.21% 增加为 16.84%,增加了 800.20 km<sup>2</sup>。



注:①1 邯山区,2 丛台区,3 复兴区,4 峰峰矿区,5 肥乡区,6 永年区,7 临漳县,8 成安县,9 大名县,10 涉县,11 磁县,12 邱县,13 鸡泽县,14 广平县,15 馆陶县,16 魏县,17 曲周县,18 武安市。②ND 为自然发展情景;EP 为生态保护情景。③底图源于 GlobeLand 30 V2000 V2010 V2020,邯郸市边界来源于全国 1:100 万公众版基础地理信息数据(2021),并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2020)4617 号标准地图校准制作,下同。

图 1 2000—2030 年邯郸市土地利用格局

Fig.1 Land use pattern in Handan City during 2000—2030

2000—2020 年土地利用转移主要发生在耕地、林地、草地和人造地表之间(表 4)。耕地和人造地表之间的土地利用转移占主要贡献,20 a 间两类土地利用类型的面积变化之和为 1 644.93 km<sup>2</sup>,占总变化面积的 96.58%。总转出面积中耕地的贡献率最高,为 69.77%,总转出 1 032.60 km<sup>2</sup>,远高于转入面积,直接表现为耕地面积的净减少,主要转出方向为人造地表、草地和水域,这与近 20 a 来邯郸市高速城镇化发展一致。总转入面积中人造地表类型的贡献率最高占 61.41%,总转入 908.80 km<sup>2</sup> 远高于人造地表的

转出面积,表现为正的净增加,主要转入来源为耕地和草地,人类活动侵占了大量耕地和草地,直接造成了耕地和草地的减少。

草地和林地的转出面积和转入面积相当,林地和草地总变化面积不大,分析草地和林地的土地利用转移路径发现,林地和草地之间多为相互转移,总草地转入面积中林地占 58.74%,而总林地转入面积中,草地占 89.86%。耕地是林地与草地的主要转入源,分别占林地和草地总转入面积的 9.86% 和 39.29%,与退耕还林还草政策的实施相呼应。

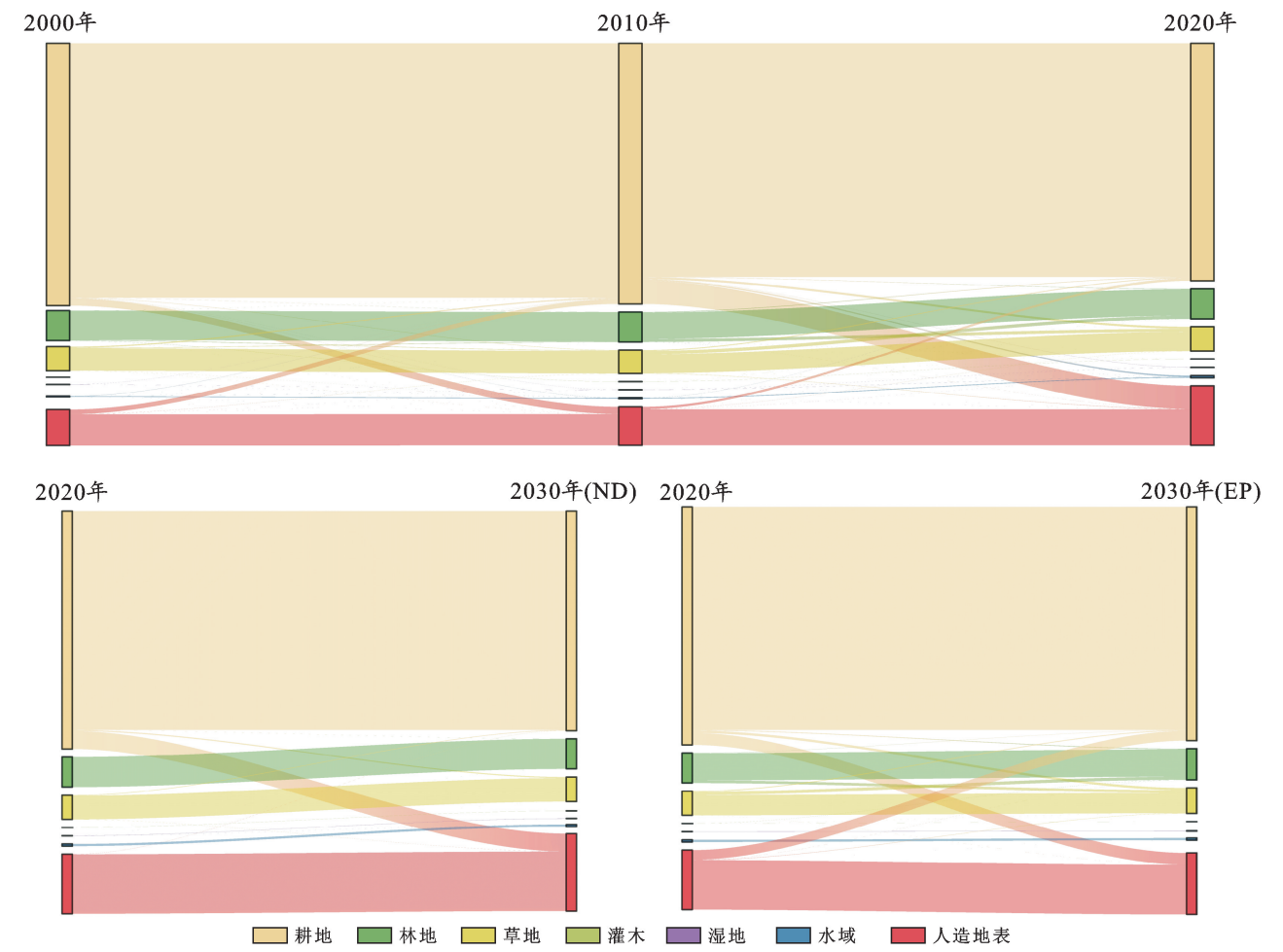


图 2 2000—2030 年邯郸市土地利用面积转移特征

Fig.2 Characteristics of land use area transfer in Handan City during 2000—2030

表 4 2000—2020 年邯郸市土地利用转移矩阵									
Table 4 Land use transfer matrix for Handan City during 2000—2020									km <sup>2</sup>
土地利用类型	耕 地	林 地	草 地	灌 木	湿 地	水 域	人造地表	总 计	转出面积
耕 地	7 915.39	13.15	74.52	0.03	5.57	45.02	894.33	8 948.00	1 032.60
林 地	19.00	891.92	111.41	4.86	0.00	0.33	1.66	1 029.18	137.26
草 地	59.39	119.87	635.73	0.14	0.03	1.68	11.60	828.42	192.69
灌 木	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
湿 地	0.59	0.00	0.01	0.00	2.16	1.44	0.01	4.21	2.06
水 域	4.92	0.17	0.26	0.00	0.23	24.32	1.19	31.08	6.76
人造地表	103.97	0.19	3.47	0.00	0.49	0.48	1 123.84	1 232.44	108.60
总 计	8 103.27	1 025.31	825.41	5.02	8.46	73.26	2 032.64	12 073.37	1 480.01
转入面积	187.88	133.39	189.68	5.02	6.3	48.95	908.8	1 480.01	—

模型计算结果表明,生态保护政策对土地开发模式的干预主要体现在抑制人造地表扩张和鼓励退耕还林还草方面,相比于自然发展情景,生态保护情景下 2030 年邯郸土地利用结构更趋于克制,而非对生态资源的加剧消耗。两种情景下主要转出类型为耕地(图 2),ND 情景下耕地流失 629.07 km<sup>2</sup>,主要用于人类活动建设人造地表;EP 情景下土地利用面积变化趋于平衡,土地利用转换侧重于各类用地的相互整合,耕地流失 152.73 km<sup>2</sup>,主要转换为人造地表、草地和林地,人造地表扩张呈现集约化发展趋势。两种情景下主要转入方向为人造地表、林地和草地,其中人造地表最多,分别为 604.49 km<sup>2</sup>(ND)和 64.99 km<sup>2</sup>(EP)。模型模拟显示,两种情景下邯郸市土地利用结构均未出现较大改变,不同情景下各用地类型的空

间分析规律与 2020 年保持一致,东中部平原区少有林地、草地等生态用地,仅有少部分分布于城区内的绿化及湿地周围的生态用地。

基于 PLUS 模型 LEAS 模块,得到不同驱动因素对于各类用地扩张的贡献度见图 3。

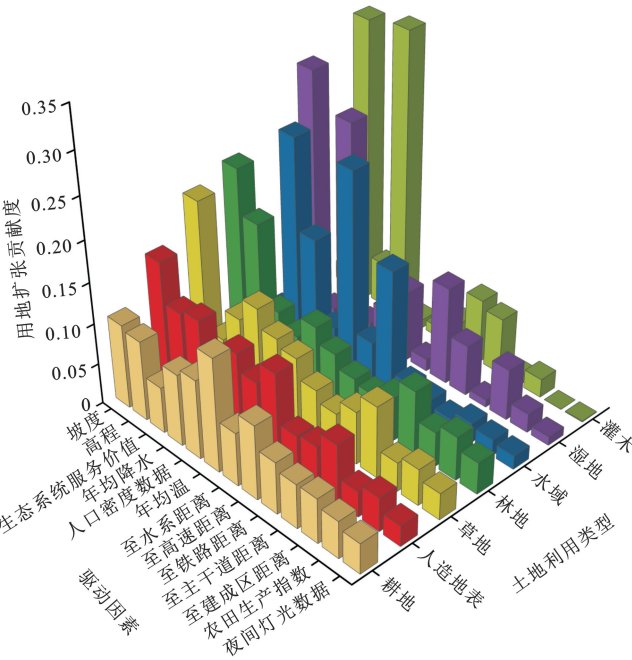


图 3 2000—2020 年邯郸市驱动因素对土地利用扩张的贡献度  
Fig.3 Contribution of drivers to land use expansion in Handan City during 2000—2020

耕地是邯郸市比例最多的用地类型,分析耕地的扩张可以帮助挖掘邯郸市土地利用格局变化的潜在驱动因素,模型模拟结果显示耕地地类的扩张主要受年均温、坡度、海拔和人口密度 4 种因子的驱动。如图 3 所示,引起耕地扩张的主要驱动因素是年均温,占总贡献度的 13.99%,其次是坡度、海拔和人口密度;人造地表扩张的主要驱动因素为坡度,占总贡献度的 15.40%,海拔、至水系距离、人口密度数据和生态系统服务价值次之,贡献度分别为 11.19%,10.88%,10.58%,10.24%;草地和林地的扩张主要受自然驱动因素的影响,坡度是影响草地扩张的主要驱动因素,贡献度高达 20.25%,年均降水以 11.49%的贡献度次之,这表明研究区草地的扩张更多受到自然驱动因素的影响;林地扩张的主要驱动因素为坡度和海拔,贡献度分别为 21.80%和 16.44%。对于灌木、湿地和水域用地类型等分布较少的土地利用类型,各驱动因素对其扩张潜力的影响有较大差异。对灌木用地,扩张影响程度最高的驱动因素为生态系统服务价值和人口密度数据,贡献度分别为 34.64%和 33.73%,这很可能是由于灌木所在生境往往是生态

系统维持较好且人烟稀少的地区;对于湿地类型的扩张影响程度最高的驱动因素为坡度和生态系统服务价值,贡献度分别为 28.96%和 25.17%,对应湿地的高生态价值属性;影响水域扩张的最高驱动因素为高程、人口密度和至水系距离,分别为 24.47%,24.27%和 15.12%,对应一般水域的低海拔和低人口密度性。

2.2 碳储存服务空间格局

邯郸市 2000—2020 年碳储量总体呈下降趋势。如图 4 所示,2000,2010,2020 年该区碳储量分别为  $8.70 \times 10^7$ ,  $8.65 \times 10^7$ ,  $8.27 \times 10^7$  t, 平均陆地生态系统碳密度分别为 72.06, 71.68, 68.52 t/hm<sup>2</sup>, 20 a 来碳储量降低  $4.28 \times 10^6$  t, 平均降幅 4.92%。整体碳密度分布与土地利用类型有着共性的分布特征(图 5), 总体呈现西部高东部低的特点, 高值区分布集中, 主要分布于西部山区, 与林地分布规律一致, 低值区分布与草地与人造地表的分布规律一致, 主要分布于西部山区缓坡及东中部人类活动密集的城镇。

不同土地利用类型碳储量的变化存在明显差异(图 4), 耕地、林地是邯郸市最重要的碳库, 耕地被过度侵占是导致 2000—2020 年碳储量下降的主要原因。这两种土地利用类型的碳储量占总碳储量的 66%以上, 其中 2000 年碳储量最高( $6.03 \times 10^7$  t), 占 2000 年总碳储量的 69.31%。2000—2020 年 20 a 间, 耕地、林地和草地的碳储量呈下降趋势, 其中 2010—2020 年耕地碳储量消耗最多( $5.31 \times 10^6$  t), 占 20 a 间总碳损失量的 93.35%。草地碳储量呈现先减少后增加的趋势, 2000—2010 年草地碳储量减少  $2.06 \times 10^5$  t, 2010—2020 增加  $1.81 \times 10^5$  t; 灌木碳储量呈现先增加后减少的趋势, 2000—2010 年灌木碳储量增加  $12.84 \times 10^4$  t, 2010—2020 下降 409.84 t。

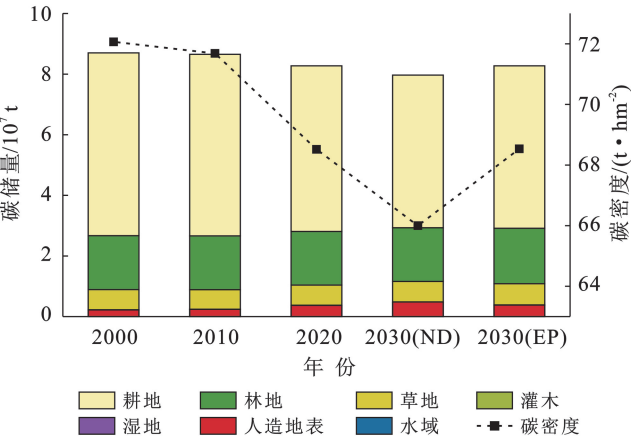


图 4 2000—2020 年邯郸市碳储量及碳密度变化趋势  
Fig.4 Trends in carbon stocks and carbon intensity in Handan City from 2000 to 2020



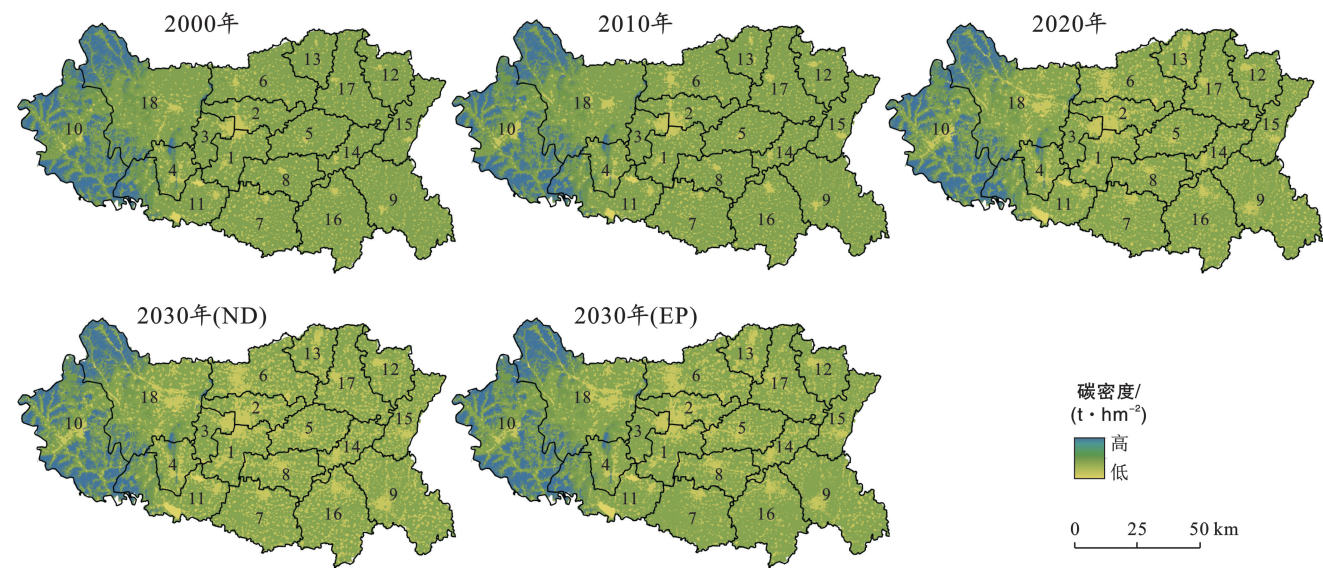


图 5 2000—2020 年邯郸市碳储量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of carbon stocks in Handan City from 2000 to 2020

邯郸市各区县的碳储量变化及碳损失风险均存在明显的时空差异。邯郸市总体碳储量在 2010 年后出现明显的加速消耗现象,20 a 间,碳损失由 2010 年的  $4.58 \times 10^5$  t 突增至 2020 年的  $3.82 \times 10^6$  t,增幅为 8.35 倍,2010—2020 年碳损失占 20 a 间总碳损失的 89.31%。如图 6 所示,不同区县碳储量消耗速度存在明显差异,2000—2010 年,碳储量的降低最初出现在涉县,约为  $1.24 \times 10^5$  t,在武安市东部的碳固持是导致这 10 a 碳储量未发生较多损失的主要原因;2010—2020 年,邯郸市碳储量以过去 20 a 来最快的速度减少,碳损失迅速累积,各区县均呈现明显下降趋势,武安市和永年区降幅最多,约为  $6.09 \times 10^5$  t 和  $4.21 \times 10^5$  t,占总损失的 15.96%和 11.02%。模型计算结果表明,如果维持现有土地开发模式,到 2030 年各区县碳储量将会继续减少。如图 6 所示,ND 情景下,碳损失易发生于东中部平原地区,如大名县、永年县、魏县等平原县需重点关注。如果加以干预,各区县的碳损失风险将显著减少,EP 情景下,到 2030 年各区县碳损失量均显著降低,其中模型预测,到 2030 年涉县、临漳县、武安市等区县可固持大量碳,其中涉县最多可固持碳  $3.24 \times 10^5$  t,可优先布局优化碳储量存量以抵抗碳损失风险,而由于研究区东部生态用地的扩张潜力受限,东部平原县仍有较高的碳损失风险。

模型计算结果表明,在不同的规划和开发方案下,未来邯郸市碳储量存在显著差异,如果维持现有开发模式,未来邯郸市碳储量将持续减少。生态保护政策约束下,2030 年邯郸市陆地生态系统 EP 情景固碳能力相比于 ND 情景较高。EP 情景下碳储量为

$8.27 \times 10^7$  t,平均碳密度为  $68.54 \text{ t/hm}^2$ ,固碳能力较强,林地和草地面积的增加解释了生态系统碳的固持,林地和草地带来了碳汇为  $1.07 \times 10^6$  t,占总碳汇的 88.93%。无生态保护政策约束下,ND 情景下碳储量为  $7.97 \times 10^7$  t,平均碳密度为  $66.00 \text{ t/hm}^2$ ,固碳能力较弱。模型预测 2030 年 ND 情景下邯郸市碳储量减少  $4.23 \times 10^6$  t,下降率 4.57%,EP 情景碳储量维持在  $8.27 \times 10^7$  t,与 2020 年一致,可见生态保护政策对内陆城市碳储量的重要性。人造地表侵占耕地是导致碳损失的主要原因,两种情景下,由于耕地面积减少造成的碳损失分别为  $4.24 \times 10^6$  t(ND)和  $1.03 \times 10^5$  t(EP),分别占总碳损失的 99.86%和 98.09%,可见人类活动对邯郸市土地的无节制开发已经导致了邯郸市生态资源的快速消耗。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

通过挖掘土地利用变化的潜在驱动因素,研究发现坡度、年均温等自然驱动因素对邯郸市各类用地的扩张存在明显的驱动作用。比如引起人造地表扩张的前四大驱动因素分别为坡度、海拔、至水系距离和人口密度,引起林地、草地、湿地和水域等生态用地扩张的前四大驱动因素仍多为坡度、海拔、年均降水等自然驱动因素。然而这在大部分研究中并不常见,多数研究结果显示,影响城市草地、林地等生态用地扩张的主要驱动因素为到各级道路和铁路距离等表征人类活动强度的驱动因素<sup>[6,29]</sup>。

首先,分析研究结果的合理性。对于人造地表,

城市扩张通常受到坡度、海拔等地形要素的影响较多,复杂的地形因素带来较高的城市建设成本<sup>[9,30]</sup>;城市及农村的人造地表扩张通常通过侵占耕地和草地的形式来避免或者围绕水域建设城市,表现为水域对城市扩张起阻碍作用,由此同样带来了生态资源和生态系统服务的消耗;人口数量的压力促使城市扩张以适应更多人生存<sup>[10]</sup>,因此不难理解人口密度对人造地表扩张的驱动,综上所述,文章结果具有合理性。引起耕地扩张的前四大驱动因素分别为年均温、

坡度、海拔和人口密度,这点与 Tian Lei 等<sup>[10]</sup>、Liang Xun 等<sup>[6]</sup>和罗芳等<sup>[31]</sup>的研究有相似的结论。分析其原因,对于耕地来说,一方面作物对温度、坡度、海拔等自然驱动因素更加敏感,适宜的自然要素为作物生长提供了支持环境;另一方面,粮食生产为人口增长提供了条件<sup>[10]</sup>,在一定的粮食产量下,需要更多的土地来供应粮食生长,人口数量的增加和社会经济发展很大程度上决定了农业生产系统的进一步完善<sup>[28]</sup>从而影响了耕地的扩张。

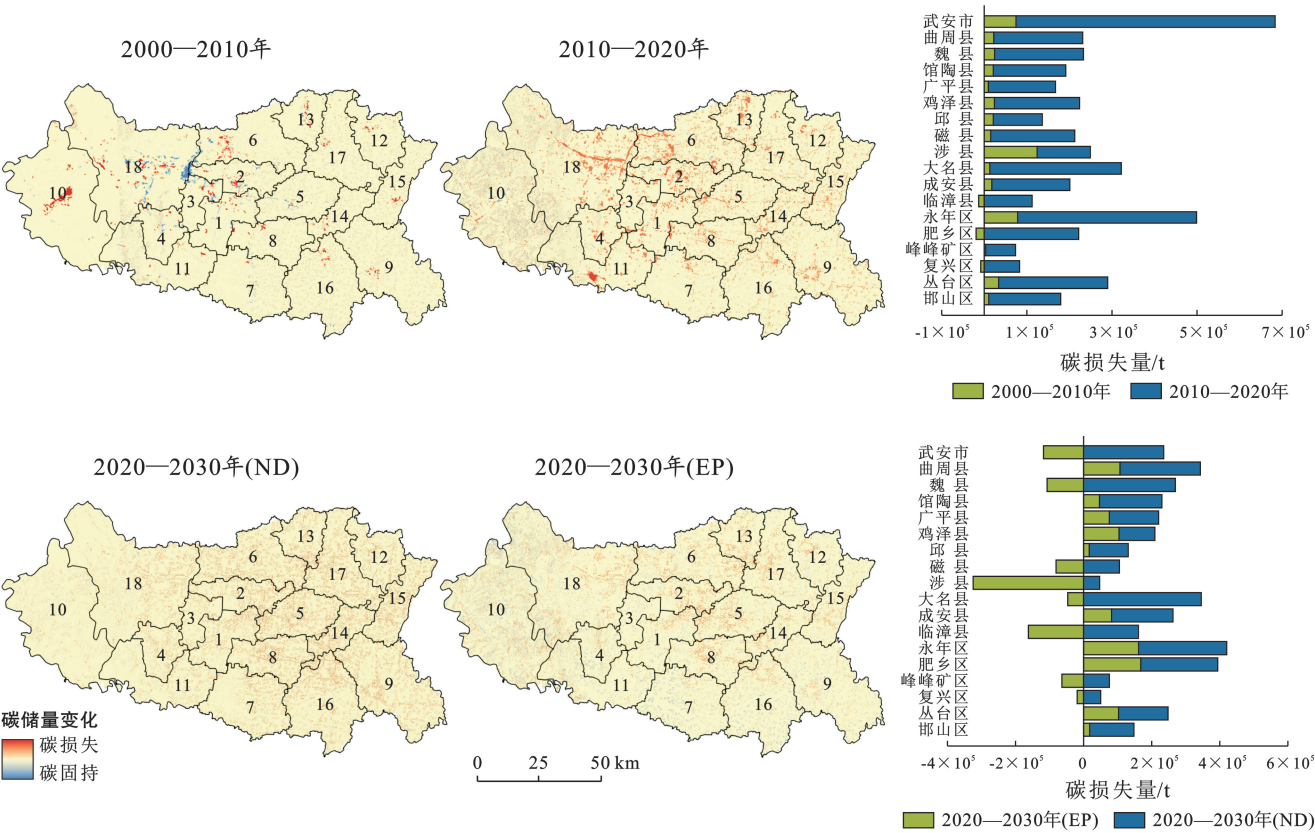


图 6 邯郸市各区县碳储量变化空间分布  
Fig.6 Spatial distribution of carbon stock changes in Handan City at district county scale

其次,邯郸市独特的自然要素空间分布可以解释出现如此差异性结果的原因。邯郸市西接太行山,总体坡度相差最高  $64^{\circ}$ ,海拔相差最高 1 800 m,林地草地等生态用地主要分布在较高海拔的太行山东麓山区县。由于在西部山区人类活动受限,人造地表难以通过侵占草地和林地进行扩张,而东部平原县人造地表则更容易通过侵占耕地、草地等实现扩张,最终导致人造地表扩张概率西低东高的结果。东部平原较少分布有林地和草地,林地和草地的扩张主要出现在西部山区,而林草地受海拔和坡度驱动作用较为明显,这导致东部平原林地难以得到大规模扩张,解释了研究结果与其他研究的差异。这种明显的空间差

异在各区县的碳损失风险上也有表征,通过对比自然发展情景与生态保护情景下未来邯郸市各区县的碳储量变化,对碳损失风险进行识别发现,武安、涉县等太行山东麓山区县具备良好的碳储备与碳固持能力,而东中部平原县则缺乏足够的碳储备与碳固持潜力,需要政策制定者的格外关注。

本文在模拟区域土地利用变化和碳储量时,其精度受到诸多因素的限制。首先,InVEST 模型的碳储量模块为便于计算简化了陆地碳循环过程,假设造成碳储量变化的原因只有土地利用方式的变化<sup>[31-32]</sup>。其次,研究所用的碳密度数据尽可能参考相似研究区的实测数据,然而研究证明无论是自然演替还是土地



利用模式的改变都会对景观单元的碳密度产生影响<sup>[33]</sup>,且相同的土地利用类型的碳密度同样存在差异<sup>[34]</sup>,缺乏对研究区的连续性碳密度监测,势必会导致最终结果与实际碳储量存在一定差异。

3.2 结 论

本文基于 PLUS 模型,选取不同社会经济、环境因素和生态保护政策设置了两种情景模拟了邯郸市 2030 年自然发展情景和生态保护情景下的土地利用变化,并从时空角度分析了 2000—2020 年和不同情景下 2030 年的邯郸市土地利用和碳储量空间分布格局,并对土地利用变化潜在驱动因素及碳损失风险进行分析。

(1) 邯郸土地利用类型的分布呈现强烈的空间分异,邯郸土地利用类型的分布呈现“西部林地,东中部耕地”的总体空间分布特征。耕地用地类型主要分布在东部平原区,林地、草地等生态用地主要分布在西部太行山区及丘陵区。土地利用转移主要发生在耕地和人造地表之间,二者的变化占总土地利用变化的 96.58%。对耕地扩张影响最大的驱动因素为年均温,对人造地表的扩张影响较大的驱动因素为坡度。

(2) 邯郸市碳储量总体呈下降趋势,碳密度分布呈现西部高东部低的特点。20 a 来碳储量降低  $4.28 \times 10^6$  t,平均降幅 4.92%,碳损失在 2010 年突增,增幅为 8.35 倍。武安市和永年区的碳损失最严重,占总碳损失的 15.96%和 11.02%。耕地和林地碳储量超过总碳储量的 66%,是邯郸市最重要的碳库,耕地被过度侵占是导致碳损失的主要原因。

(3) 2020—2030 年自然发展情景下,耕地是主要流出用地类型,主要用于人类活动建设人造地表;在生态保护政策干预下土地利用变化趋于克制,生态用地面积的提升潜力一般,土地利用转换侧重于各类用地的相互整合。

(4) 2020—2030 年自然发展情景和生态保护情景下邯郸市碳储量变化分别减少  $4.23 \times 10^6$  t 和增加  $2.16 \times 10^4$  t,人造地表侵占耕地是导致碳损失的主要原因。生态保护政策干预下,各区县碳损失风险显著降低,不同区县也存在明显差异,碳损失更易发生于东中部平原地区,西南部的太行山东麓县区则具有较强的碳汇潜力,需针对差异化表现灵活布局。

[参 考 文 献]

[1] Li Wei, Ciais P, Peng Shushi, et al. Land-use and land-cover change carbon emissions between 1901 and 2012 constrained by biomass observations [J]. *Biogeosciences*, 2017,14(22):5053-5067.  
[2] Feng Yongjiu. Modeling changes in China's 2000—2030

carbon stock caused by land use change [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,252:119659.  
[3] Willcock S, Phillips O L, Platts P J, et al. Land cover change and carbon emissions over 100 years in an African biodiversity hotspot [J]. *Global Change Biology*, 2016,22(8):2787-2800.  
[4] Wang Zhuo, Zeng Jie, Chen Wanxu. Impact of urban expansion on carbon storage under multi-scenario simulations in Wuhan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022,29(30):45507-45526.  
[5] Yang Jianxin, Gong Jian, Tang Wenwu, et al. Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: Integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2020,79:101402.  
[6] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke C K, 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.  
[7] Bai Yang, Zheng Hua, Ouyang Zhiyun, et al. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: A case study in Baiyangdian watershed, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,70(2):709-718.  
[8] Shi Mingjie, Wu Hongqi, Fan Xin, et al. Trade-offs and synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili River valley, China [J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1577.  
[9] Wang Ziyao, Li Xin, Mao Yueting, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,134:108499.  
[10] Tian Lei, Tao Yu, Fu Wenxue, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(10):2330.  
[11] Zhang Xiaomian, Wang Jun, Yue Chunlei, et al. Exploring the spatiotemporal changes in carbon storage under different development scenarios in Jiangsu Province, China [J]. *PeerJ*, 2022,10:e13411.  
[12] Xie Ling, Wang Hongwei, Liu Suhong. The ecosystem service values simulation and driving force analysis based on land use/land cover: A case study in inland rivers in arid areas of the Aksu River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,138:108828.  
[13] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].地



- 理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [14] 赫晓慧, 徐雅婷, 范学峰, 等. 中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2965-2976.
- [15] 彭建, 汪安, 刘焱序, 等. 城市生态用地需求测算研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(2): 333-346.
- [16] 刘青柳. 基于遥感的邯郸市土地利用/覆被变化及驱动力分析[D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2011.
- [17] Liu Qing, Yang Dongdong, Cao Lei, et al. Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the tropics: A case study of Hainan Island, China [J]. Land, 2022, 11(2): 244.
- [18] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 854-861.
- [19] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(1): 90-96.
- [20] 邢鹏飞, 李刚, 赵祥, 等. 山西暖性草地碳密度分布特征及其区域差异[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1667-1676.
- [21] 岑宇, 王成栋, 张震, 等. 河北省天然草地生物量和碳密度空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3): 265-276.
- [22] 张妍, 谷志云, 裴瑞亮, 等. 河南商丘地区土壤有机碳密度及其空间分布特征[J]. 矿产勘查, 2021, 12(10): 2153-2160.
- [23] 张滨, 张丽娜, 刘秀萍, 等. 河北省北部森林植被碳储量和固碳速率研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 392-402.
- [24] 李豪杰. 基于高密度剖面的河南省土壤有机碳储量精确估算[D]. 河南 郑州: 郑州大学, 2016.
- [25] 王海稳. 太行山区不同土地利用方式下生态系统碳储量研究[D]. 河北 保定: 河北农业大学, 2007.
- [26] Li Jingye, Gong Jian, Guldman J M, et al. Carbon dynamics in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau from 1990 to 2030 using landsat land use/cover change data [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 528.
- [27] 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 等. 基于 CLUE-S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究: 以江苏省环太湖地区为例[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 577-581.
- [28] Popp A, Calvin K, Fujimori S, et al. Land-use futures in the shared socio-economic pathways [J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 331-345.
- [29] 吕笑飞. 石家庄市城镇建设用地扩张模拟研究[D]. 河北 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- [30] Zhai Han, Lv Chaoqun, Liu Wanzeng, et al. Understanding spatio-temporal patterns of land use/land cover change under urbanization in Wuhan, China, 2000-2019 [J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3331.
- [31] 罗芳, 潘安, 陈忠升, 等. 四川省宜宾市 1980—2018 年耕地时空格局变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 336-344.
- [32] Zhou Junju, Zhao Yaru, Huang Peng, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106803.
- [33] Liu Xiaoping, Wang Shaojian, Wu Peijun, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6834-6844.
- [34] Rimal B, Sharma R, Kunwar R, et al. Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, Eastern Nepal [J]. Ecosystem Services, 2019, 38: 100963.

(上接第 337 页)

- [37] 王云英, 裴薇薇, 辛莹, 等. 2008—2015 年高寒草甸土壤有机碳变化特征及影响因素解析[J]. 中国草地学报, 2021, 43(12): 47-54.
- [38] Kang Shichang, Xu Yanwei, You Qinglong, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 015101.
- [39] Teng Yanmin, Zhan Jinyan, Liu Wei, et al. Spatio-temporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 107340.
- [40] 凌小方. 气候变化情景下青藏高原植被物候期时空变化研究[D]. 四川 成都: 电子科技大学, 2022.
- [41] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, et al. Global desertification: Drivers and feedbacks [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 326-344.
- [42] Zhang Naili, Liu Weixing, Yang Haijun, et al. Soil microbial responses to warming and increased precipitation and their implications for ecosystem C cycling [J]. Oecologia, 2013, 173(3): 1125-1142.
- [43] Cao G M, Du Y G, Lang D Y, et al. The characteristics and its mechanism of passive and active degradation of alpine kobresia meadow [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 6: 641-648.
- [44] Gao Qingzhu, Wan Yunfan, Xu Hongmei, et al. Alpine grassland degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China [J]. Quaternary International, 2010, 226(1/2): 143-150.