

冀新慧, 曹永强, 么嘉棋, 等. 海河流域土地利用与生态系统碳储量变化及预测[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 985-995. JI X H, CAO Y Q, YAO J Q, et al. Land use and ecosystem carbon storage change and prediction in the Haihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 985-995. (in Chinese)

海河流域土地利用与生态系统碳储量变化及预测

冀新慧¹, 曹永强^{1,4}, 么嘉棋¹, 翟浩然², 范军³

(1. 天津师范大学 京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387; 2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 4. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:以海河流域为研究区域, 通过 InVEST 模型对 1990—2020 年碳储量状况进行分阶段定量反演, 并结合 Markov-PLUS 模型从数量与空间角度进行未来模拟, 最终明确流域碳储量发展趋势及关键驱动因素。结果表明: 1990—2020 年海河流域碳储量共减少 1.30 亿 t, 耕地碳储量损失最大; 碳储量高值主要集中在西部与北部山地地区, 低值分布于东南部平原地区。人口密度在各阶段解释力占比均超过 20%, 且呈现增加趋势; 年均降水对碳储量空间分异影响最小, 最低占 0.21%。各因子相互作用对碳储量空间分异解释力显著提高, 人口密度与其他因子交互作用对碳储量变化的解释力最强。Markov-PLUS-InVEST 预测结果显示, 在城市快速发展情景下, 2030 年碳储量与 2020 年基本持平, 但生态保护情景增加 0.88 亿 t。相关结论可为海河流域进行土地类型间的生态调控及未来规划发展提供理论支撑。

关键词: 碳储量; InVEST 模型; Markov-PLUS 模型; 土地利用; 海河流域

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0094

全球变暖形势日益严峻引起各国对碳减排的重视, 中国明确提出“碳达峰”和“碳中和”目标^[1]。陆地生态系统在碳循环和气候变化中起着重要作用, 完善并提升生态系统功能是实现可持续发展的重要途径^[2]。土地利用变化是人类活动对生态系统影响最直接的体现, 它通过影响生态系统植被和土壤的碳储量使整个区域的碳储量发生变化^[3-4]。开展土地利用变化与碳储量之间作用关系的相关研究, 对区域可持续发展和碳储量提升具有重要意义。

目前国内外学者均已开展对陆地生态系统碳储量估算及预测相关研究。在碳储量估算方面, 传统的生物量法、采样法估测精度高, 但难以反映长时间序列和大尺度的变化^[5]。生态系统服务与循环交互综合评估(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)中的碳模块以土地利用数据

和用地类型对应碳密度作为基础数据, 适合长期、大规模的碳储量估算, 且其适用性与准确性较高, 成为学者^[6-7]进行各类型生态系统碳储量估算的主要模型。然而大多数学者^[8-9]均采用单一碳密度模型对碳储量进行测算, 但实际上, 碳密度值受到环境等因素影响。因此, 需要采用更加精细的碳密度模型来增加碳储量估算的准确性。碳储量的预测与土地利用预测结果密切相关, 后者主要从数量和空间两方面展开。Markov 模型通过不同发展情境下土地的转移概率实现土地利用类型数量预测^[10]。CA^[11]、FLUS^[12]、PLUS^[13]等预测模型能够解决土地利用空间布局问题。其中, PLUS 模型能够准确模拟多土地利用类型变化的非线性关系, 相较于传统的 FLUS 模型, PLUS 有着更高的 FOM 值^[14]。因此, 通过结合 Markov 与 PLUS 模型能够实现土地利用

收稿日期: 2023-06-01 修回日期: 2023-09-15 网络出版时间: 2023-10-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231007.1607.014>

基金项目: 长江水利委员会长江科学院 2016 年对外开放研究基金资助项目 (CKWV2016392/KY); “一带一路”水与可持续发展科技重点基金 (2021nkzd02); 国家自然科学基金项目 (52379021; 52079060)

作者简介: 冀新慧(1998—), 女, 河北石家庄人, 主要从事生态环境评价研究。E-mail: xinhui_ji@163.com

通信作者: 曹永强(1972—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源优化利用与管理研究。E-mail: caoyongqiang@tjnu.edu.cn

数量与空间分布双重模拟,为未来碳储量的估算提供更加准确的输入数据。以往有关海河流域植被变化^[15]的研究较为丰富,但并未将其与碳储量联系;且碳有关研究成果多以省市为主,缺乏对流域完整性研究,存在对流域生态系统固碳能力研究不明确的情况。因此,有必要通过合适的模型来确定海河流域的碳储量。

针对单一碳密度模型受环境因素影响而难以精确估算生态系统碳储量的现状,结合温度、降水数据对已有碳密度数据进行修正,并以 5 年为步长推算各时期碳密度数据。首先,对于单一预测模型的局限性,利用 Markov 与 PLUS 模型分别在数量与空间上对 2030 年不同情境下土地利用变化进行模拟。最后,结合 InVEST 模型估算 1990—2020 年及未来不同情景下的碳储量,并基于地理探测器探究碳储量驱动因素。本文相关结论可为海河流域优化土地利用格局、生态与经济协同发展提供参考。

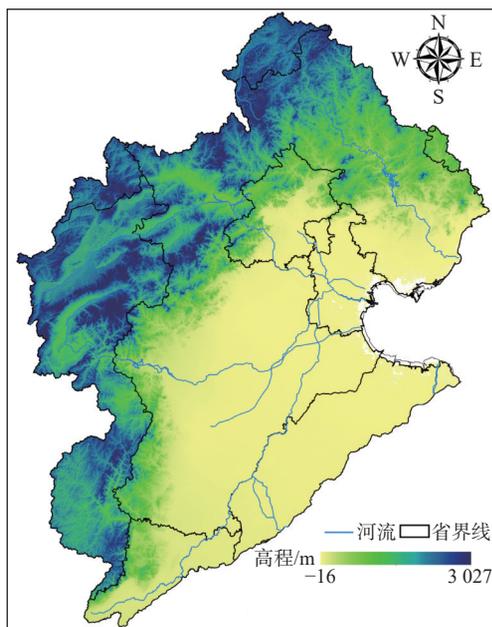
1 研究区概况

海河流域包含北京、天津两市,河北省大部分地区,以及山西、山东、河南、辽宁省和内蒙古自治区部分地区(图 1),由海河、滦河和徒骇马颊河 3 个水系组成,流域面积达 32 万 km²。流域多年平均气温 10.36 ℃,多年平均降水量 539 mm^[16]。海河流域内的地形以山地和平原为主,地势西北高东南低。平原地区的人口增长和城市化发展,是造成流域内土地利用变化及碳排放增加的主要原因^[17]。西部及北部山区的林地与草地是流域内主要的碳汇结构,是保障华北地区低碳安全发展的重要屏障。1999 年以来,退耕还林、三北防护林工程、天然林保护工程等国家政策的实施为恢复海河流域植被发挥了重要作用,为其碳汇能力的提升提供了有力支撑^[18]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

所用土地利用数据来自武汉大学杨杰等开发的中国 30 m 土地覆被数据集^[19],利用海河流域矢量边界对其进行裁剪,得到 1990—2020 年各年份的土地利用数据。该数据集土地利用类型包含耕地、林地、灌丛、草地、水域、冰雪、裸地、不透水面和湿地,但由于研究区内冰雪与湿地所占面积极少,故考虑将其剔除。



审图号: GS(2022)1873

图 1 海河流域范围

Fig. 1 Scope of the Haihe River basin

综合考虑海河流域土地利用变化特征及数据的时空可用性及可获取性,参考已有研究^[8,11],选取年均温度、年均降水量、NDVI、GDP、人口密度、高程(DEM)、坡度、夜间灯光 8 种驱动因子,见表 1。其中:碳储量驱动因子为前 6 项,在进行影响因素分析时,首先以 1 km×1 km 为单位对海河流域进行格网化处理,将碳储量及相应的因子值提取到采样点,其次将各因子按照等间隔法和自然断点法分为 4~8 类。

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型与碳密度系数及修正

InVEST 模型能够根据区域碳密度来量化区域碳储量,主要用于评估生态系统中多要素对人类生活的影响^[7]。该模型中的陆地碳汇估算模块主要依赖于土地利用类型以及基本碳库,基本碳库包括 4 种类型^[6-7]:①地上生物碳,指树干、树叶等土壤以上处于存活状态植物中的碳;②地下生物碳,指土壤以下存在于植物根系系统中的碳;③土壤碳,指土壤中分布的有机物、矿物质所含的碳;④死亡有机物碳,指弃置垃圾、植被凋零叶片、枯萎树木等物质中的碳。因此,陆地生态系统中的总碳量可以表示为

$$C_t = C_a + C_b + C_s + C_d \quad (1)$$

式中: C_t 、 C_a 、 C_b 、 C_s 、 C_d 分别代表总碳量、地上生物碳、地下生物碳、土壤碳、死亡有机物碳。

表 1 碳储量驱动因子

Tab. 1 The factors of carbon storage

类型	因子	来源
自然要素	X_1 : 年均温度/K	哥白尼气候数据(https://cds.climate.copernicus.eu)
	X_2 : 年均降水量/m	
	X_3 : 归一化植被指数	美国海洋和大气管理局(https://www.noaa.gov)
	X_4 : 高程/m	NASA通用元数据存储库(https://cmr.earthdata.nasa.gov)
社会经济要素	X_5 : GDP/(万元·km ⁻²)	资源环境科学数据注册与出版系统 ^[20] (http://www.resdc.cn/DOI)
	X_6 : 人口密度/(人·km ⁻²)	全球人口栅格数据(https://www.worldpop.org/)
	X_7 : 夜间灯光	地球观测组织(https://eogdata.mines.edu/products/vnl/)
共享社会经济路径	X_8 : 人口预测	SSP Database(https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/)
	X_9 : GDP预测	

土地利用变化通过影响生态系统,进而改变碳储量,故需要建立土地利用类型与4个基本碳库之间的关系。由于死亡有机物碳密度较难获取,本文仅估算地上、地下生物碳储量和土壤碳储量。根据中国陆地生态系统碳密度数据集^[21]中的坐标和碳库,获得2009—2012年海河流域初步碳密度数据;通过查阅同地区、同纬度区域的研究结果^[22-25]进行补充后,将各碳库收集结果进行平均,得到2009—2012年海河流域最终碳密度数据见表2。但由于年份欠缺且并非实际测量所得,故每5年时段的碳密度数据还需要结合气温、降水等气候数据进行推算。利用Alam等^[26]研究中年均降水量与碳密度的关系计算土壤与生物量碳密度[(公式2)和(3)],利用Giardina等^[27]、陈光水等^[28]研究中温度与碳密度的关系计算生物量碳密度(公式4)。

表 2 海河流域 2009—2012 年碳密度表

Tab. 2 Carbon density of the Haihe River basin from 2009 to 2012 单位: t/hm²

土地类型	地上生物碳密度	地下生物碳密度	土壤碳密度
耕地	26.01	8.35	32.19
林地	37.24	9.14	39.40
灌木	11.53	3.25	34.61
草地	9.52	6.49	47.35
水域	33.37	8.33	14.99
裸地	12.45	2.20	23.96
不透水面	31.56	12.34	26.34

$$S_p = 3.3968P + 3996.1 \quad (R^2 = 0.11) \quad (2)$$

$$B_p = 6.79e^{0.005P} \quad (R^2 = 0.70) \quad (3)$$

$$B_T = 28T + 398 \quad (R^2 = 0.47, \text{Pearson} < 0.01) \quad (4)$$

式中: S_p 代表由降水量计算得到的土壤碳值; B_p 代

表由降水量计算得到的生物量碳值; B_T 代表由温度计算得到的生物量碳值; P 表示年平均降水量; T 表示年平均温度。

在以上公式的基础上,通过海河流域2009—2012年、5年间隔的年平均降水量以及温度对参考碳密度模型进行修正,修正因子计算如式(5)、(6)所示:

$$F_B = \frac{B'_p}{B''_p} \times \frac{B'_T}{B''_T} \quad (5)$$

$$F_S = \frac{S'_p}{S''_p} \quad (6)$$

式中: F_B 、 F_S 分别代表生物量与土壤碳密度修正因子, S'_p 和 S''_p 分别代表海河流域2009—2012年和5年间隔由年降水量得到的土壤碳密度数据; B'_p (B'_T) 和 B''_p (B''_T) 分别代表海河流域2009—2012年和5年间隔由年均降水(年均温)得到的生物量碳密度数据。

2.2.2 PLUS 模型与情景设置

PLUS 模型^[14]是一种基于栅格数据的土地利用变化模拟模型,耦合了一种新的土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy, LEAS)和基于多类型随机斑块种子的CA模型(cellular automata based on multi-type random patch seeds, CARS),可以模拟多类任意土地利用类型斑块的产生和演化。此外,模型在模拟过程中输出各类用地驱动因素的影响权重,用于挖掘土地利用变化的机理。本文基于海河流域1990—2020年7期土地利用数据和驱动因素数据,在LEAS模块下对各类土地利用扩张和驱动力进行挖掘,获取各类用地的发展概率,以及驱动因素对该时段各类用地扩张的贡献。在CARS模块下,利用LEAS模块得到的土地利用发展概率

作为基础数据,模拟各类土地利用类型的斑块演化。

情景设置分为以下几种:

自然发展情景:沿用历史(1990—2020 年)发展速率,不限制转化。

城市快速发展情景:设定人口与经济处于快速增长阶段,城市化速度加快。将共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSP)中的人口(SSP3)与 GDP(SSP2)预测作为该情景下的未来规划输入数据。考虑京津冀城市群正处于快速发展的重大战略时期,津冀的非首都功能进一步推进,势必会带来建设用地的快速增长。并且,根据相关研究^[9,11],城镇用地、耕地与经济、人口变化密切相关。因此,该情景将耕地、林地、草地、灌木丛向不透水面的转移概率增加 20%,不透水面向林地、草地的转换概率降低 30%。

生态保护情景:根据《京津冀协同发展规划纲要》中高质量发展循环经济、绿色低碳发展的要求,以及《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出的将全国新增建设用地比上一阶段缩减 300 万亩,且此后每 5 年递减,以及重点保护耕地目标,综合考虑生态、耕作、建设等用地结构,将耕地、林地、草地向不透水面的转换概率降低 30%,裸地向林地、灌木、草地的转换概率增加 40%,不透水面向草地、林地的转换概率增加 10%,并禁止水域向其他地类转换。

2.2.3 地理探测器

地理探测器可以解释地理现象的空间分异性,并揭示分异背后的驱动机制^[29]。地理探测器认为若自变量对因变量有影响,那么自变量和因变量应该具有相似的空间分布^[29]。利用地理探测器定量解释海河流域碳储量的驱动因素,包括因子探测和交互作用探测。因子探测显示单因子对碳储量的解释力,交互作用探测评估因子共同作用时对碳储量的解释力。

3 结果与分析

3.1 碳储量时空变化

3.1.1 碳储量时间变化

1990—2020 年海河流域总碳储量减少 4.98% (图 2),变化较为明显。其中:2003 年之前碳储量年际变化幅度大,呈波动下降趋势,共减少 4.3 亿 t;2003 年之后波动幅度减小,碳储量在 20.5 亿 t 上下浮动,到 2020 年增加到 24.8 亿 t。从各时期来看,1995—2000 年减少趋势最为明显,碳储量共减少 7 亿 t。这一时期虽然可持续发展战略得到国家重视,但由于我国正处在重工业化时期,城市化进程的加快以及工业的逐渐发展造成生态环境破坏不断加剧。2005—2010 年增加趋势最为显著,碳储量共增加 5.1 亿 t。20 世纪末国家开始控制污染排放,尤其是 2005 年之后提出了众多环境保护策略,使得生态质量有所提升。

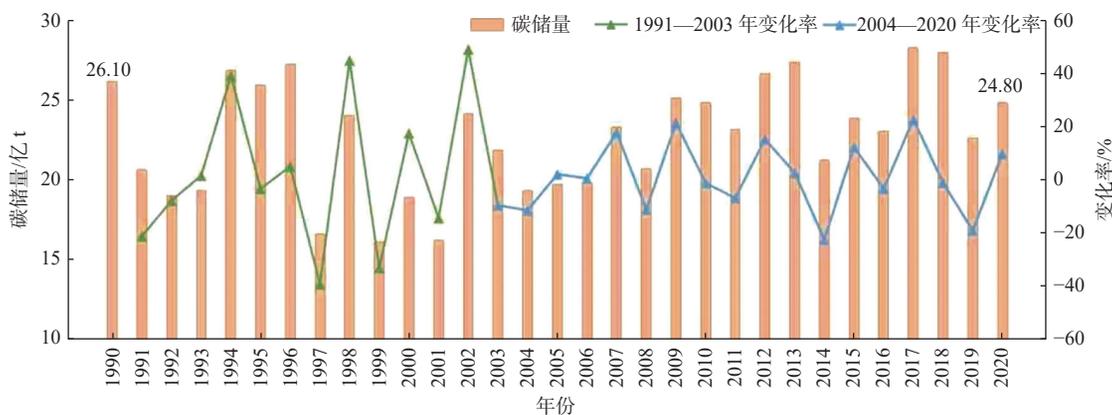


图 2 1990—2020 年海河流域碳储量

Fig. 2 The carbon storage of Haihe River basin from 1990 to 2020

3.1.2 碳储量空间变化

海河流域碳储量分布具有明显的空间异质性 [图 3(a)~(g)]:碳密度最高值出现在 2020 年,为 $108.75 \text{ t}/\text{hm}^2$;碳密度最低值出现在 2000 年,为 $7.62 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。碳储量较高区域主要位于太行山山脉及燕山山脉地区,该区域土地利用类型主要为林地

和草地,植被覆盖度高,是重要的碳汇区。碳密度较低区域主要位于渤海湾地区,该区域用地类型主要为水域和建设用地,固碳能力较低。并且,由于渤海湾区域围填海现象加剧,该区域碳源面积不断增加,碳储量逐渐降低,见图 3(i)。

从 1990—2020 年总体碳储量空间变化 [图

3(h)]来看,碳储量增加区域在研究区内呈大面积分布,减少与基本不变区域零星分布于研究区内。受三北防护林工程、退耕还林还草工程以及相关政

策的影响,研究区内耕地、林地、灌木、草地所在区域碳储量增加。碳储量减少区域主要分布在各城市周边,主要是由于城市扩张致使建设用地增加造成。

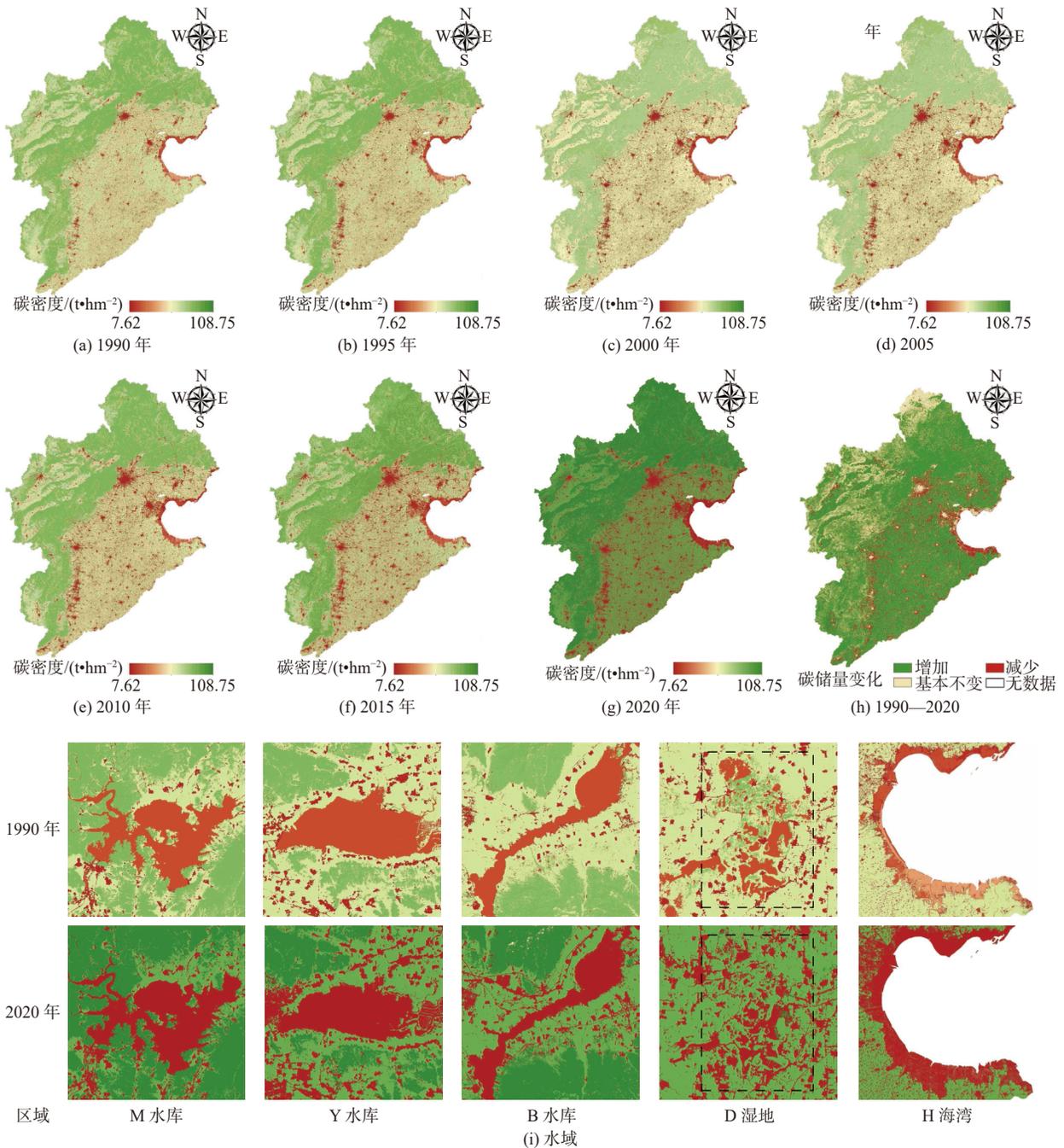


图3 1990—2020年海河流域碳储量分布与总体空间变化

Fig. 3 The carbon storage distribution and overall spatial change in the Haihe River basin from 1990 to 2020

除建设用地外,水域也是流域内典型的低碳储量区域。如图3(i),1990—2020年海河流域内3座典型大型水库碳储量均降低,其中,M水库和B水库的扩张导致周边区域从相对较高的碳储量下降为碳储量低值区域。作为流域内重要的生态功能区,D湿地植被覆盖区域碳储量升高,但水体部分碳

储量降低,说明有必要通过加强水体治理措施,进一步改善该区域水生态环境。

3.2 碳储量影响因素

3.2.1 因子探测

因子探测结果(图4)显示,2000年各因子对碳储量解释力的大小排序为人口密度(X_6)>高程(X_4)>

GDP(X_5)>年均温度(X_1)>NDVI(X_3)>年均降水(X_2), 人口密度与高程解释力占比均在 22% 以上, 说明人类活动对海河流域的生态环境有一定的干扰, 而年均降水仅占 6.55%, 对碳储量空间分异驱动力较小。2005 年各因子对碳储量变化解释力的大小排序为 $X_4>X_1>X_6>X_5>X_3>X_2$, 其中高程、年均温度的解释力占比均超过 25%, 较 2000 年有所提升, 但 GDP 解释力下降 44.17%。2010 年各因子解释力排序为 $X_6>X_4>X_2>X_1>X_3>X_5$, 各因子解释力都有明显上升, 其中年均降水提升 0.4, 成为影响碳储量空间分异的主要因素。2015 年各因子解释力排序和 2020 年相同, 为 $X_6>X_4>X_1>X_5>X_3>X_2$ 。2015 年各因子解释力回落, 年均降水、NDVI、GDP、高程下降至 2005 年水平, 年均降水下降最大, 为 0.37。2015—2020 年各因子解释力仍处于下降状态, 年均降水解释力持续下降为 0.002 5, 对碳储量空间分异基本无影响。整体来看, 人口密度在 2000—2020 年解释力均较高, 说明人口密度是研究区碳储量空间分异的主导因素。根据前一节, 海河流域碳储量空间分布西北高东南低, 这与流域内人口密度分布相反, 人口密度高的区域植被较少, 碳储量低。

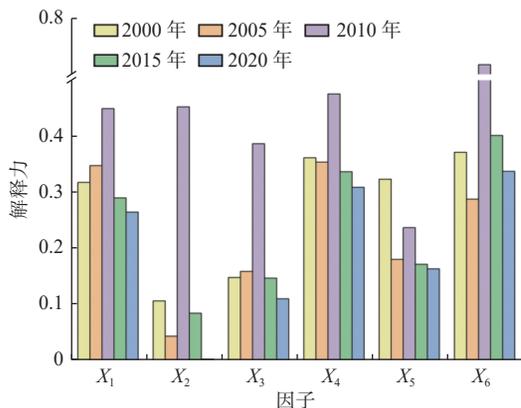


图 4 碳储量因子探测结果

Fig. 4 Factor detection results of carbon storage

3.2.2 交互作用探测

各年份交互探测结果均表现为双因子增强或非线性增强(图 5), 即任意两个因子的交互解释力大于单因子解释力, 说明碳储量变化是多因子交互作用的结果。2000 年 DEM、人口密度与其他因子交互解释力均在 0.37 之上, 大于其单因子解释力, 其中人口与 DEM 交互解释力最强, 为 0.449, 说明碳密度变化主要由人口密度、地形及其他因子共同驱动。2000—2010 年年均温度与 GDP、人口密度和 NDVI 对碳储量空间分异的影响持续上升, 2010 年

GDP 与人口密度因子交互作用达到 0.79。研究时段内, 人口密度、DEM 与其他自然因子交互作用始终较大, 且强于社会因素和自然因素内部交互, 说明两者与其他自然因素关联作用对碳储量空间分异有很大影响。

3.3 土地利用及碳储量预测

3.3.1 土地利用变化及预测

由 1990—2020 年海河流域土地利用变化(图 6)可知, 耕地为各时期变化最剧烈的地类, 并且每年转出量中均约有一半转为不透水面, 主要是由于城市化进程的推进, 人类活动的加剧, 建设用地的需求不断上涨, 而现实中这种需求往往是通过侵占耕地来实现的。耕地变化的另一部分转为了草地和林地, 这可能与退耕还林还草政策有关。各年不透水面转入水域的面积小于水域转出为不透水面的面积, 这说明了不透水面的扩张对水域造成了影响。

利用 Markov-PLUS 模型从数量与空间角度对自然发展情景、城市快速发展情景以及生态保护情景下海河流域 2030 年的土地利用情况进行预测。为检验模型的精确性与适用性, 将海河流域 2020 年的实际土地利用数据与基于 Markov-PLUS、CA-Markov 模型模拟的同期土地利用数据进行比较, 计算 Kappa 系数和总体精度(OA)。Markov-PLUS 模型与 CA-Markov 模型模拟结果计算得到的 Kappa 系数分别为 0.75 和 0.72, OA 值分别为 0.82 和 0.79, 即 Markov-PLUS 模型模拟得到的研究区 2020 年土地利用数据更接近于真实土地利用数据。

从不同情景下 2030 年土地利用空间分布(图 7)来看, 3 种情景下各地类大致空间分布区域没有较大区别。在城市快速发展情景下, 不透水面扩张较其他两种情景更为显著, 其在东部平原地区以各城镇为中心向四周大面积扩张, 在环渤海地区对水域的侵占最为明显。与其他两种情景比较, 在生态保护情景下西部太行山及北部燕山山脉区域生态质量明显更高, 不透水面扩张受到明显限制。在 3 种情景下, 生态保护情景东部平原区的不透水面分布最少, 对耕地的侵占最低。

3.3.2 碳储量预测

结合土地利用预测数据及碳密度数据, 利用 InVEST 模型得到 2030 年 3 种情景下碳储量数据。自然增长情景、城市快速发展情景和生态保护情景下未来碳储量分别为 25.00 亿 t、24.91 亿 t 和 25.68 亿 t。与 2020 年相比, 自然增长情景和生态保护情

景的碳储量呈现不同程度的增长。其中:自然增长情景碳储量介于其他两者之间,说明若想要提升生态质量,至少应维持当前发展程度;生态保护情景下碳储量增加最多,为 0.88 亿 t,说明生态的好转有利于生态系统碳储量向良好态势发展。然而,城市

快速发展情景碳储量基本不变,说明若只关注经济发展,不利于生态系统质量的改善。相较于自然发展情景,在城市快速发展情景下未来碳储量无增加的主要原因是不透水面用地的扩张及其与耕地、草地之间的转换。

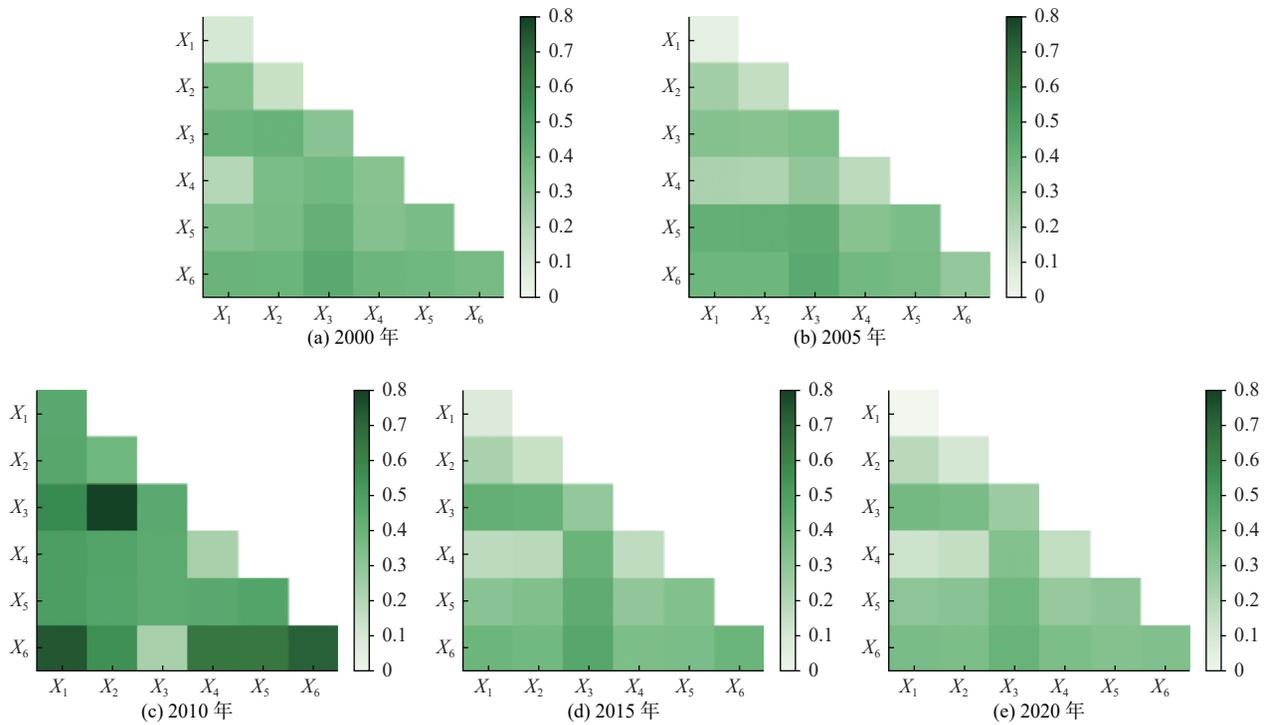


图 5 交互作用探测结果

Fig. 5 Interaction probe results of carbon storage

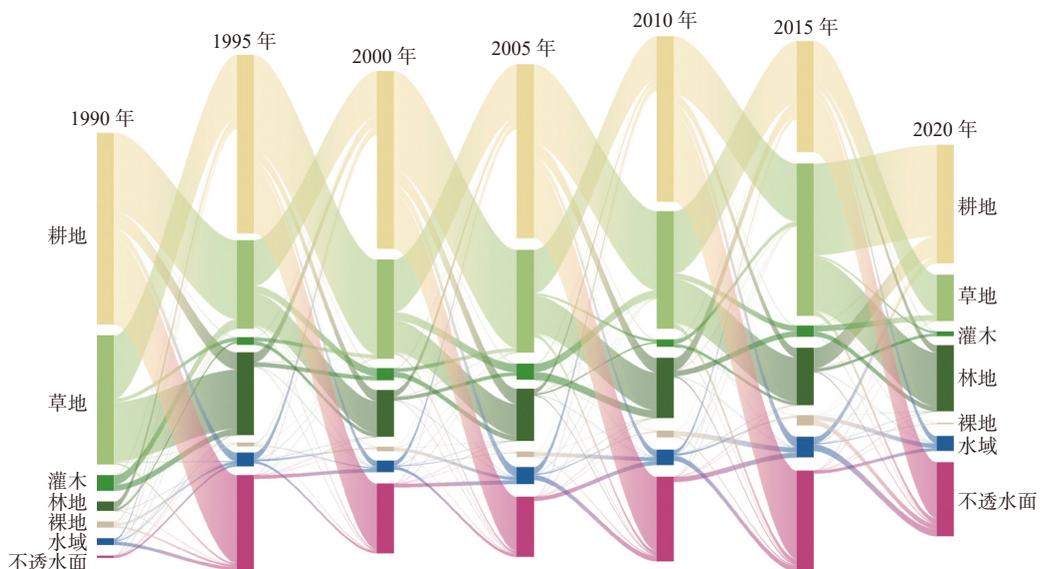


图 6 1990—2020 年海河流域土地利用变化

Fig. 6 Land use change in Haihe River basin from 1990 to 2020

从碳储量空间分布(图 8)来看,在城市快速发展情景下,东部平原地区碳储量较其他两种情景显著减少,其中,碳储量低值主要分布在北京市区、天

津市区、渤海湾及其他大中型城市;在生态保护情景下,碳储量低值主要分布区域与城市发展情景基本一致,但总体范围明显较小。从 2020—2030 年 3

种情景下碳储量变化(图 9)来看,大部分区域碳储量基本稳定,增加或减少区域散落于整个研究区内。3 种情景下碳储量减少区域主要分布于东南地区,增加区域主要为山脉地区。其中,在城市发展情景

下东南部平原地区碳储量减少情况最为显著,生态保护情景减少趋势最平缓。在渤海湾区域,城市发展情景减少最明显,生态保护情景由于限制了水域的转换,变化最平缓。

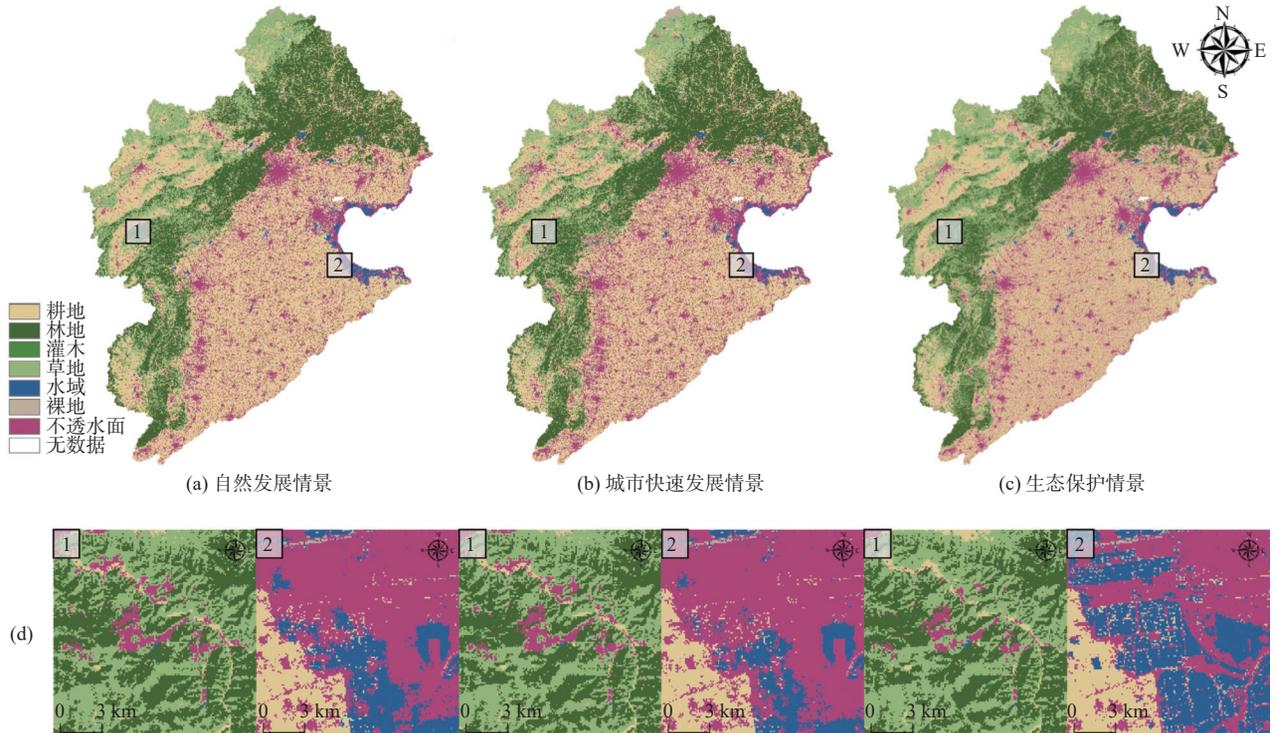


图 7 2050 年 3 种情境下海河流域土地利用分布预测

Fig. 7 The prediction of land use distribution in the Haihe River basin under three scenarios in 2050

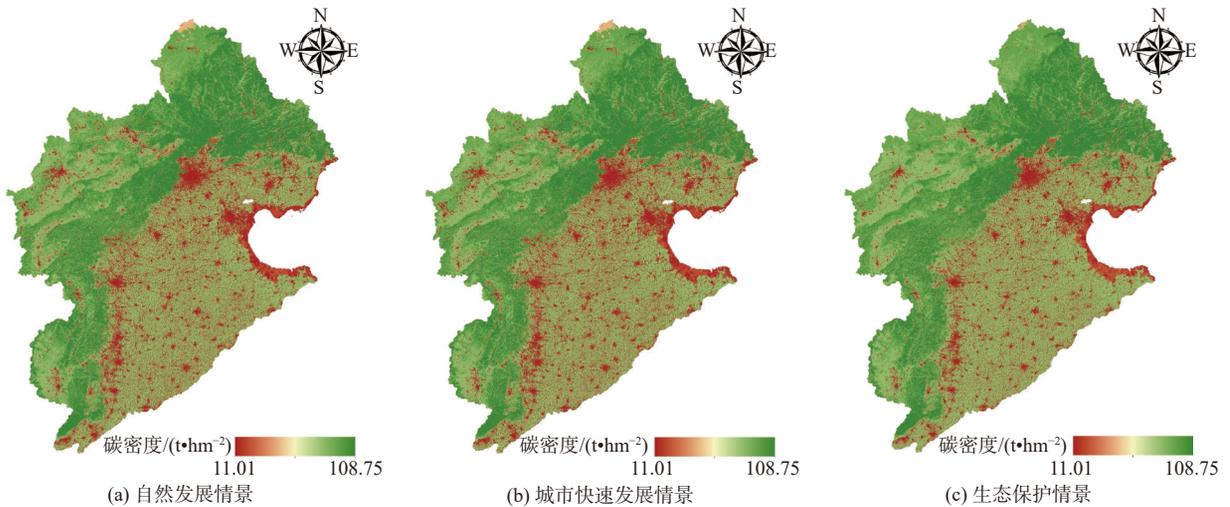


图 8 2030 年 3 种情境下海河流域碳储量分布预测

Fig. 8 The prediction of carbon storage distribution in the Haihe River basin under three scenarios in 2030

4 讨论与结论

4.1 讨论

1990—2020 年海河流域陆地生态系统碳储量减少 1.3 亿 t, 主要原因为耕地向不透水面的转变, 这与 Wang 等^[17]、He 等^[18]学者对于京津冀尺度陆地

生态系统碳储量研究结果一致, 表明仍须继续关注流域内植被恢复与土地调控^[15]。李瑾璞等^[30]的研究结果表明河北省山地林区生态系统碳储量高于平原城镇区域, Wang 等的研究表明京津冀地区碳储量由西北向东南递减, 这与本文的结果分布

一致。城市快速发展情景忽视了生态系统的可持续发展性,致使城市扩张特征明显。尤其是北京、天津、石家庄等大中型城市经济的快速发展,引起不透水面用地需求量的增加,导致了碳储量一定程度上的减少。相比之下,生态保护情景在保证现有经济发展的基础上,加大了对生态环境的保护力度,

有利于区域碳储量向良好态势发展。因此,若要实现海河流域低碳发展,一方面要限制碳源用地的增长,并减少对自然生态系统的开发,另一方面海河流域耕地和林草面积比例分别为 45.87% 和 38.18%,且其碳密度值较大,故应加强对碳汇区域的保护,限制开发。

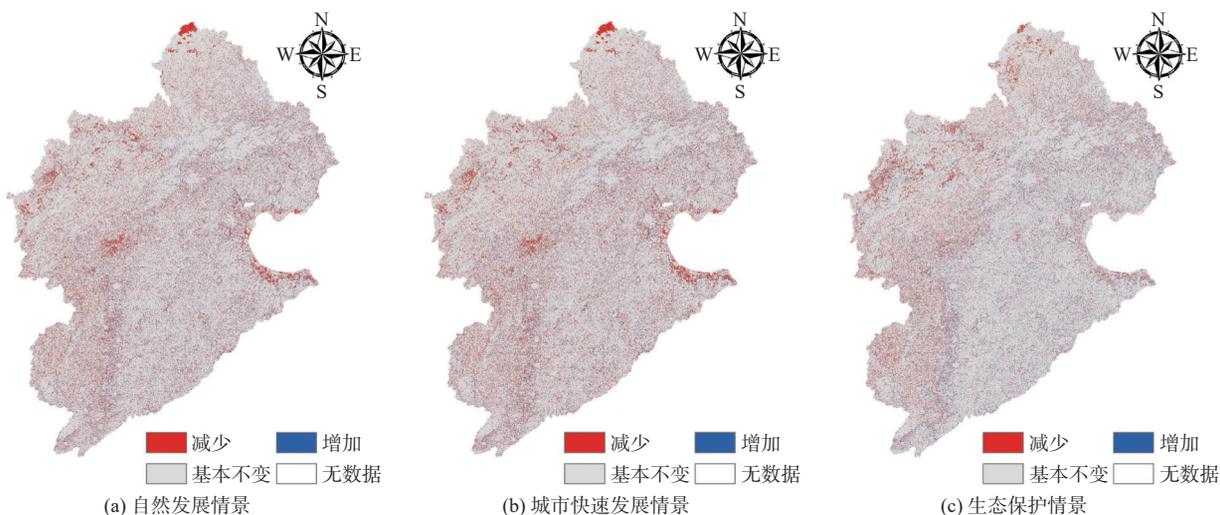


图9 2020—2030年3种情境下海河流域碳储量变化

Fig. 9 Carbon storage changes in the Haihe basin under three scenarios from 2020 to 2030

4.2 结论

本文利用 InVEST 模型估算了 1990—2020 年海河流域的碳储量,并结合 PLUS 模型预测了 2030 年的土地利用和碳储量情况,为区域低碳发展提供方向。

(1) 1990—2020 年海河流域碳储量累计损失 1.3 亿 t, 1995—2000 年碳储量变化最为明显,减少 7 亿 t。空间上,碳储量高值主要分布于山脉所处地区,低值出现于不透水面区域。人口密度整体解释力占比最强,最高可达 28.40%;人口密度、DEM 与其他自然因子关联作用显著,解释力均超过 0.40。

(2) 在生态保护情景下不透水面扩张程度最低,生态用地增长情况最好。2030 年城市快速发展情景的碳储量与 2020 年基本持平,自然发展情景与生态保护情景的碳储量分别增加 0.20 亿和 0.88 亿 t,不透水面的扩张对耕地、草地的侵占是城市快速发展情景下碳储量低于其他情景的主要原因。

(3) 在 3 种情景下,未来海河流域碳储量空间分布情况具有一定的相似性,表现为西北高东南低。海河流域大部分区域碳储量基本稳定,增加或减少部分呈零星分布。城市快速发展情景碳储量减少区域主要为西北部生态用地区域,生态保护情景碳

储量增加区域主要为山脉地区及东南部人类活动地区。

参考文献:

- [1] ZHANG H, LI J, ZHANG Y, et al. Soil organic carbon stocks and its driving factors under different land-use patterns in semiarid grasslands of the Loess Plateau, China[J]. *Nature Environment & Pollution Technology*, 2021, 20(3): 997-1006. DOI: 10.46488/NEPT.2021.v20i03.007.
- [2] 王菲,曹永强,周姝含,等. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其主要气象要素分析[J]. *生态学报*, 2023(6): 1-14. DOI: 10.5846/stxb202203110591.
- [3] ARNETH A, SITCH S, PONGRATZ J, et al. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 79-84. DOI: 10.1038/ngeo2882.
- [4] 王红瑞,李晓军,张力,等. 水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 13-21. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqdk.2023.0002.
- [5] FANG J, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322. DOI: 10.1126/science.1058629.
- [6] PIYATHILAKE I, UDAYAKUMARA E,

- RANAWEERA L, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva Province, Sri Lanka[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, 8(2): 2213-2223. DOI: [10.1007/s40808-021-01207-3](https://doi.org/10.1007/s40808-021-01207-3).
- [7] SHARP R, TALLIS H, RICKETTS T, et al. InVEST user's guide [J]. The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA, 2014.
- [8] 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 等. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J]. *环境科学*, 2022, 44(8): 1-16. DOI: [10.13227/j.hjxk.202210083](https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202210083).
- [9] ZHU L, SONG R, SUN S, et al. Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109178. DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.109178](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109178).
- [10] 戴靓, 吴绍华. 基于Markov模型的南京土地利用时空变化研究[J]. *资源开发与市场*, 2011, 27(5): 417-420, 482. DOI: [10.3969/j.issn.1005-8141.2011.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-8141.2011.05.011).
- [11] WANG L, ZHU R, YIN Z, et al. Impacts of land-use change on the spatio-temporal patterns of terrestrial ecosystem carbon storage in the Gansu Province, Northwest China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3164. DOI: [10.3390/rs14133164](https://doi.org/10.3390/rs14133164).
- [12] LIU X, LIANG X, LI X, 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. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2017.09.019](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019).
- [13] SHI M, WU H, JIANG P, et al. Cropland expansion mitigates the supply and demand deficit for carbon sequestration service under different scenarios in the future: The case of Xinjiang[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1182. DOI: [10.3390/agriculture12081182](https://doi.org/10.3390/agriculture12081182).
- [14] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569. DOI: [10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569).
- [15] MA T, WANG T, YANG D, et al. Impacts of vegetation restoration on water resources and carbon sequestration in the mountainous area of Haihe River basin, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 869: 161724. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.161724](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161724).
- [16] 陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. CRU高分辨率格点降水资料在海河流域的适用性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 910-920. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0095](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0095).
- [17] WANG C, ZHAN J, CHU X, et al. Variation in ecosystem services with rapid urbanization: A study of carbon sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, 110: 195-202. DOI: [10.1016/j.pce.2018.09.001](https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.09.001).
- [18] HE Y, XIA C, SHAO Z, et al. The spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage: A case study of urban agglomeration in China's Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Land*, 2022, 11(6): 858. DOI: [10.3390/land11060858](https://doi.org/10.3390/land11060858).
- [19] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2021, 13(8): 1-29. DOI: [10.5194/essd-13-3907-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021).
- [20] 徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdccc.com>), 2017. DOI: [10.12078/2017121102](https://doi.org/10.12078/2017121102).
- [21] 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(中英文网络版)*, 2019, 4(1): 90-96. DOI: [10.11922/csdata.2018.0026.zh](https://doi.org/10.11922/csdata.2018.0026.zh).
- [22] FANG J, YU G, LIU L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4015-4020. DOI: [10.1073/pnas.1700304115](https://doi.org/10.1073/pnas.1700304115).
- [23] 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. DOI: [10.17521/cjpe.2015.0300](https://doi.org/10.17521/cjpe.2015.0300).
- [24] 黄从红, 杨军, 张文娟. 森林资源二类调查数据在生态系统服务评估模型InVEST中的应用[J]. *林业资源管理*, 2014(5): 126-131. DOI: [10.13466/j.cnki.lyzygl.2014.05.022](https://doi.org/10.13466/j.cnki.lyzygl.2014.05.022).
- [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. DOI: [10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.163](https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.163).
- [26] ALAM S A, STARR M, CLARK B J. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J]. *Journal of arid environments*, 2013, 89(1): 67-76. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2012.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.002).
- [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. DOI: [10.1038/35009076](https://doi.org/10.1038/35009076).
- [28] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TB-

- CA) 研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2 (1): 34-42. DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2007.01.005.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. DOI: 10.11821/dlxb201701010.
- [30] 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. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0918.

Land use and ecosystem carbon storage change and prediction in the Haihe River basin

JI Xinhui¹, CAO Yongqiang^{1,4}, YAO Jiaqi¹, ZHAI Haoran², FAN Jun³

(1. *Academy of Eco-civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China*; 2. *Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China*; 3. *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China*; 4. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The change of regional land use affects carbon emission and carbon sequestration processes, which in turn causes changes in the carbon cycle and carbon storage in terrestrial ecosystems. Based on the China land cover dataset, the carbon storage and sequestration module of the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model was used to estimate the carbon storage and changes in terrestrial ecosystems from 1990 to 2020 in the Haihe River basin. The patch-generating land use simulation model was combined to predict future land use and carbon storage. The integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model could quantify regional carbon storage based on regional carbon density. The carbon storage and sequestration module mainly depended on land cover types and a basic carbon pool model. The basic carbon pool model divided carbon storage into four types: aboveground biomass carbon, belowground biomass carbon, soil carbon, and dead organic matter carbon. The patch-generating land use simulation model is a cellular automata model based on raster data that could simulate land use changes at the patch scale. It integrated the land expansion analysis strategy and a cellular automata model based on multiple random patch seeds, which could be used to explore the driving factors of land expansion and predict the patch-level evolution of land use landscapes. Additionally, geodetector was utilized to quantitatively explain the driving mechanisms of carbon storage in the Haihe River basin. Geodetector is a method for detecting spatial variations of geographic features and revealing their driving factors. This method allows for direct correlation analysis between the dependent variable and the independent variables without considering collinearity among factors.

The results showed that: (1) the carbon storage decreased by a total of 4.98% from 1990 to 2020, with the year 2003 as the turning point. Carbon storage exhibited a fluctuating declining trend, followed by a decrease in the magnitude of fluctuations, fluctuating around 2.05 billion tons. (2) The spatial distribution of carbon density in the basin exhibited significant heterogeneity. High carbon density values were mainly concentrated in the eastern and northern forested areas of the basin, while low values were primarily distributed in cities and the Bohai Bay region. (3) In 2030, apart from the scenario of rapid urban development, other scenarios show varying degrees of carbon stock increase. The scenario with the highest increase is the ecological conservation scenario, which has a carbon stock of 0.77 million tons higher than the scenario of rapid urban development. This indicates that ecological improvement is beneficial for carbon sequestration in regional terrestrial ecosystems. In the scenario of rapid urban development, the expansion of impervious surfaces encroached upon cropland, leading to a significant reduction in carbon storage in the eastern plain area of the Haihe River basin. (4) Natural factors had a higher explanatory power than socio-economic factors, and the interaction between population density, DEM, and other climatic factors has the strongest explanatory power for changes in carbon stock. The results will provide certain theoretical support for land regulation and future low-carbon development in the Haihe River basin and also serve as a reference for better implementation of the carbon peaking and carbon neutrality goals.

Key words: carbon storage; InVEST model; Markov-PLUS model; land use; Haihe River basin