

河北省生态系统碳储量和生境质量的 时空演变特征及驱动因素

牛晓耕^{1,2,3}, 朱雪莲¹, 刘美玉⁴, 车佳楠¹

〔1.河北地质大学 经济学院, 河北 石家庄 050031; 2.科技创新与区域经济可持续发展研究基地, 河北 石家庄 050031;
3.河北地质大学 自然资源资产资本研究中心, 河北 石家庄 050031; 4.中国地质大学(北京) 经济管理学院, 北京 100083〕

摘要: [目的] 探究河北省生态系统碳储量和生境质量时空演化特征及空间分异的主要驱动力, 以期为区域固碳能力提升和生态环境治理提供更可靠的参考依据。[方法] 基于土地利用转移矩阵分析河北省2000—2020年土地利用变化现状, 选用 PLUS-InVEST-Geodector 模型估测 2000—2030年河北省生态系统碳储量和生境质量并分析其时空变化规律及驱动因素。[结果] ①2000—2020年河北省碳储量共下降13.45 Tg(以C计), 碳储量变化减少的区域多集中于坝上高原地区及华北平原和东南部丘陵地区。②2030年自然发展情景下碳储量较2020年减少6.37 Tg, 经济发展情景下碳储量减少21.73 Tg, 可持续发展情景下碳储量增加3.65 Tg。③2000—2020年河北省生境质量指数随着时间变化呈逐渐下降趋势。低及较低等级生境质量主要地类为建设用地、耕地, 较高及高等级生境质量主要地类为草地、林地。④2030年河北省生境质量指数在不同情景下有所差异, 可持续发展情景(0.463 9) > 自然发展情景(0.454 2) > 经济发展情景(0.450 0)。⑤碳储量和生境质量空间分异解释力最强的因子分别是坡度和高程。[结论] 碳储量和生境质量同时受到自然地理因素以及社会经济因素的共同作用。可持续发展情景下的土地利用格局有助于提升河北省生态系统的碳储量和生境质量。

关键词: 土地利用; PLUS-InVEST-Geodector 模型; 碳储量; 生境质量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0353-13

中图分类号: X171.1, X321

文献参数: 牛晓耕, 朱雪莲, 刘美玉, 等. 河北省生态系统碳储量和生境质量的时空演变特征及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 353-365. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.036; Niu Xiaogeng, Zhu Xuelian, Liu Meiyu, et al. Characteristics and driving factors of spatial and temporal evolution of ecosystem carbon stocks and habitat quality in Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 353-365.

Characteristics and Driving Factors of Spatial and Temporal Evolution of Ecosystem Carbon Stocks and Habitat Quality in Hebei Province

Niu Xiaogeng^{1,2,3}, Zhu Xuelian¹, Liu Meiyu⁴, Che Jianan¹

〔1.School of Economics, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei

050031, China; 2.Research Base for Science and Technology Innovation and

Sustainable Development of Regional Economy, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

3.Natural Resources Asset Capital Research Center, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031,

China; 4.School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China〕

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics of ecosystem carbon storage and habitat quality and the main driving factors of spatial differentiation in Hebei Province were explored to provide a more reliable reference basis for improving regional carbon sequestration capacity and ecological environment

收稿日期: 2024-07-28

修回日期: 2024-09-04

资助项目: 河北省教育厅人文社会科学重大课题攻关项目“河北省林业碳汇生态产品价值实现机制与路径研究”(ZD202311); 河北地质大学自然资源资产资本研究中心项目“河北省自然资源精细化管理的降碳增汇效应评价及提升对策研究”(NRACRC2022A02)

第一作者: 牛晓耕(1977—), 女(汉族), 河北省衡水市人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事能源与环境约束下的区域经济增长方面的研究工作。Email: xgniu9996@126.com。

通信作者: 朱雪莲(1999—), 女(汉族), 山东省淄博市人, 硕士研究生, 研究方向为区域经济增长与环境评价。Email: xuelian2023@foxmail.com。

governance. [Methods] Based on the land-use transfer matrix, the status of land-use change in Hebei Province from 2000 to 2020 was analyzed. The PLUS-InVEST-Geodector model was used to estimate the carbon storage and habitat quality of the ecosystem in Hebei Province from 2000 to 2030, and the spatio-temporal changes and driving factors were also analyzed. The change pattern of its spatial and temporal changes and driving factors were analyzed. [Results] ① The carbon stock in Hebei province decreased by 13.45 Tg (calculated by carbon) from 2000 to 2020, and the areas with decreasing carbon stock were mostly concentrated in the Bashang Plateau area, the North China Plain, and the southeastern hilly areas. ② In 2030, the carbon stock under the natural development scenario will decrease by 6.37 Tg compared with that in 2020. The carbon stock under the economic development scenario will decrease by 21.73 Tg, and that under the sustainable development scenario will increase by 3.65 Tg. ③ The habitat quality index showed a gradual downward trend over time from 2000 to 2020. The main land categories of lowest and lower grade habitat quality were construction land and cropland, while that of higher and highest grade habitat quality were grassland and forest land. ④ The habitat quality index of Hebei Province in 2030 varies under different scenarios, with sustainable development (0.463 9) > natural development (0.454 2) > economic development (0.450 0). ⑤ The strongest explanatory factors for the spatial variations in carbon stock and habitat quality were slope and elevation. [Conclusion] Carbon stock and habitat quality were affected by both natural geographic factors and socioeconomic factors. The land use pattern under the sustainable development scenario can help to improve the carbon stock and habitat quality of the ecosystem in Hebei Province.

Keywords: land use; PLUS-InVEST-Geodector model; carbon stocks; habitat quality

陆地生态系统的碳储量作为全球碳储存的重要组成部分,在全球碳循环和气候变化中起着重要作用。生境质量是生态系统为个体或种群持续提供适应性条件及生存条件的能力,在一定程度上反映出当地生物多样性水平及生态系统健康水平^[1]。碳储量和生境质量分别从碳源汇和生物供养方面衡量生态系统水平,常作为评价服务能力强弱的重要指标,由于其数据获取可靠、输出结果稳定、参考价值较高,已成为生态系统服务功能评价的最重要和应用最广泛的模块^[2]。区域碳储量和生境质量受人类活动的直接影响,人们追求土地经济效益的同时忽略了生态环境,导致区域生物多样性锐减、生态系统服务能力和健康状态遭受巨大冲击。中国共产党第二十届三中全会指出,要聚焦建设美丽中国,加快经济社会发展全面绿色转型,健全生态环境治理体系,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展,促进人与自然和谐共生。基于此,厘清地区碳储量和生境质量的时空演变特征和驱动因素,能够为政府部门科学量化当地生态环境状况,对保护生物多样性、维持生态系统的稳定发展及相关部门精准施策具有重要意义。

目前,有关生态系统碳储量和生境质量问题的研究受到国内外学者高度重视,研究对象从草地、林地等单一地类逐步延伸到区域内综合多元化的生态系统。早期评价生态系统碳储量和生境质量的方法主要是实地调查法,通过对研究区采样点进行实际监测

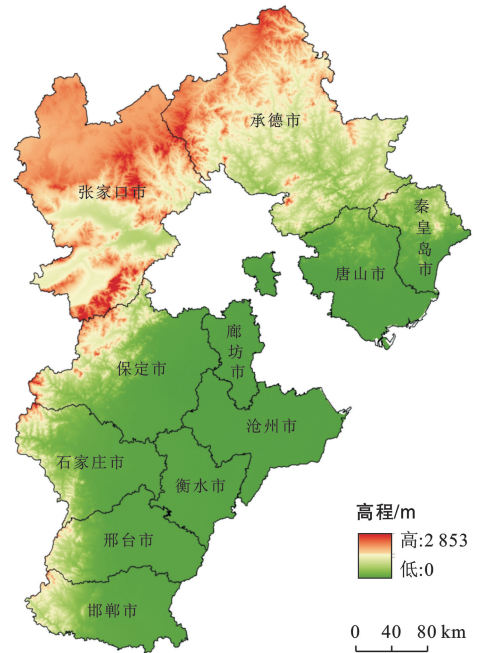
获取数据,但由于研究范围广,采样周期长导致该方法适用程度较低,不适用于较长时间和较大空间尺度上的碳储量和生境质量的估算。随着科学技术的发展,学者们探索出了一些更适合空间范围大且较易实现的估算模型。在模型选取上,Century 模型^[3], Biome-BGC^[4] 模型, RothC 模型^[5-6], LPJ-GUESS^[7] 模型, DNDC 模型^[8] 和 InVEST 模型^[9] 等常被用于进行区域碳储量估算。生境适宜性 HSI 模型^[10], 生态系统服务社会价值 SolVES 模型^[11], RSEI 模型^[12], InVEST 模型^[9] 等常被用于评价区域生境质量。同时, CA-Markov^[13], FLUS^[14], GeoSOS^[15] 和 PLUS 模型^[9] 等土地利用模拟模型是应用较为广泛的多情景预测模型。相较于其他模型, InVEST 模型和 PLUS 土地利用模拟模型因其具有数据易获取、模型精度高、结果空间可视化强等优点^[16], 已广泛应用于测算土地利用变化引起的碳储量和生境质量变化。但部分研究的时间尺度较短,多集中于流域及城市等小尺度区域,且较少针对未来发展情景进行模拟,特别是未对碳储量及生境质量驱动因素进行深入研究。总体而言,利用地理空间数据和土地利用数据估测河北省省域层面碳储量和生境质量研究相对不足。

随着经济的发展及频繁的人类活动,经济开发对自然环境基底的负面影响较大,河北省内部分区域人类过度开发活动导致碳排放量加剧并产生生态系统

退化、生物多样性下降和景观格局破碎化等问题^[17-20],给生态环境带来了巨大的压力。本研究以河北省为研究区,充分考虑区域内生态系统失衡、经济发展与生态保护矛盾突出的实际^[20],基于 2000—2020 年土地转移矩阵选用 PLUS 模型预测该地区 2030 年的土地利用类型,利用 InVEST 模型研究该地区 2000—2030 年碳储量和生境质量时空演化特征,同时采用地理探测器模型探究空间分异特征的主要驱动力,科学评价河北省的碳储量及生境质量,预测未来不同情景下碳储量和生境质量的变化趋势,以便根据研究结果分区进行规划和治理,以期为区域固碳能力提升,生态环境治理提供更可靠的参考依据。

1 研究区概况

河北省地理位置为 $36^{\circ}03'—42^{\circ}40'N, 113^{\circ}27'—119^{\circ}50'E$,东临渤海,内环京津,西靠太行山山区,北部为燕山和坝上高原。河北省面积 $1.89 \times 10^5 \text{ km}^2$,涵盖 11 个地市(如图 1 所示)。地形复杂多样,山地、丘陵、高原、盆地、平原、湖泊和海滨类型齐全,从西北向东南依次为坝上高原、燕山和太行山地、河北平原三大地貌单元,是全国地貌类型最为全面的省份。年均降水量 505.06 mm,年均气温约 12.71°C ,属温带大陆性季风气候,是京津冀地区的生态环境支撑区^[21]。河北省是工业大省,重工业化特征仍较突出,能源消耗总量和能源消费强度相对较高,致使碳排放量总量高、生物多样性下降、生态系统服务功能下降等一系列生态环境问题^[20]。



注:本图基于审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图 1 河北省行政分区及地形图

Fig.1 Administrative division and topographic map of Hebei Province

2 研究方法

2.1 数据来源

涉及数据主要包括河北省 2000, 2010, 2020 年 3 期土地利用数据、自然因素数据、社会经济数据、可达性数据(见表 1)。将以上数据重新投影为 WGS_1984_UTM_Zone_50N 坐标系并重采样至输出像元大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。

表 1 研究数据主要信息与来源

Table 1 Key information and sources of study data

数据类型	数据名称	年份	数据来源
土地利用数据	2000, 2010, 2020 年 3 期土地利用数据	2000/2010/2020	Google Earth Engine (GEE)
	高程(DEM)	2020	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	2020	
自然环境数据	年均降水量	2020	中国科学院资源与环境数据中心(http://www.resdc.cn)
	年均气温	2020	
	土壤类型	1995	
	归一化植被指数	2019	
社会经济数据	经济生产总值(GDP)	2019	中国科学院资源与环境数据中心(http://www.resdc.cn)
	人口密度(POP)	2019	
	夜间灯光指数	2020	
	距高速公路距离	2019	
可达性数据	距一级道路距离	2019	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn)
	距水域距离	2019	自然资源部标准地图服务系统(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/)
	距县政府距离	2020	

2.2 Invest 模型

2.2.1 碳储量模块 InVEST 模型碳储量模块估算主要由 4 个基础碳库(地上生物、地下生物、土壤、死亡有机物)组成^[22]。研究区总碳储量估算是由不同地类的四大碳库数据乘以对应的地类面积计算得出,公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i S_i$$

式中: C_{total} 为碳储总量; S_i 为该土地利用类型*i*的总面积; C_i 为不同土地利用方式*i*的 4 大碳库总碳储量; n 为土地利用类型分类数量,为 6 种土地利用类型,由于死亡有机物中碳含量较低,本研究中不予考虑, n 设为 0。

碳库数据优先参考已有文献^[23-26]及 2010s 中国陆地生态系统碳密度实测数据集^[27],其包含了地上生物量碳密度、地下生物量碳密度和不同深度(0—20 和 0—100 cm)土壤有机碳密度。通过对研究区年均降水和年均气温进行修正,得到河北省的碳密度数据,采用的碳密度值如表 2 所示。对比邻近地区研究结果,河北省碳储量高的区域集中在西北部海拔相对较高的山地林区,碳储量低的区域集中在南部平原区,这与李瑾璞等^[23]、张鹏等^[24]的研究结果一致。因此,碳库数据具有较强的合理性。

表 2 河北省土地覆盖类型修正后碳密度
Table 2 Corrected carbon density of land cover types in Hebei Province

地类	t/hm ²			合计
	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度	
耕地	2.85	0.27	111.78	114.90
林地	34.67	12.58	125.50	172.75
草地	0.92	8.89	70.61	80.42
水域	3.03	10.80	8.55	22.38
建设用地	0.36	6.16	28.52	35.04
未利用地	8.15	1.62	33.74	43.51

2.2.2 生境质量模块 选用 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块对河北省生境质量进行评价。生境质量模块主要包括生境退化度和生境质量评价 2 个部分。其中生境质量计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right]$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型*j*中栅格*x*的生境质量, $Q_{xj} \in [0, 1]$,其值越大代表生境质量越好; H_j 为土地利用类型*j*的生境适宜度; z 和 k 为模型中的默认参数,一般为 2.5 和 0.5。生境退化度的计算公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left[\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right] r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \quad (\text{线性衰退})$$

$$i_{rxy} = \exp \left(\frac{-2.99 d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \quad (\text{指数衰退})$$

式中: D_{xj} 为土地利用类型*j*中栅格*x*的生境退化程度; R 为威胁因子个数; r 为生境的威胁因子; Y_r 为威胁因子*r*图层上的栅格数; W_r 为威胁因子的权重; r_y 为威胁因子对生境*y*的影响程度; i_{rxy} 为威胁因子*r*在栅格*x*的生境对栅格*y*的影响; β_x 为栅格*x*可达性水平; S_{jr} 为生境类型*j*对威胁因子*r*的敏感程度; d_{xy} 为栅格*x*与*y*之间的线性距离; $d_{r\max}$ 为威胁因子*r*的最大影响距离。

本研究参考相关文献^[28-29],InVEST 模型的生境质量模块采用的威胁因子数据和敏感度数据如表 3—4 所示。

表 3 河北省生境质量威胁因子的数据

Table 3 Date of habitat quality threat factor in Hebei Province

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减线性相关性
耕地	6	0.6	线性
建设用地	9	0.9	指数
未利用地	4	0.4	线性

表 4 土地利用类型生境适宜性对不同威胁源的敏感度

Table 4 Sensitivity of land use type habitat suitability to different threat sources

地类	生境适宜度	耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.5	0.0	0.7	0.4
林地	1.0	0.6	0.7	0.2
草地	1.0	0.5	0.6	0.6
水域	0.9	0.4	0.7	0.4
建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0
未利用地	0.6	0.4	0.5	0.0

2.3 PLUS 模拟未来多情景土地利用方式

先以 2010 年为初始年份通过 PLUS 模型模拟出 2020 年河北省地类分布数据,与 2020 年河北省实际土地利用进行对比,模拟结果显示 kappa 值为 84.98%,总精度为 89.50%,说明模型精度较高,可以用来模拟河北省 2030 年土地利用变化情况。

研究以河北省 2000 年和 2020 年土地利用为初始数据,选取自然因素、社会经济因素和可达性因素等 13 个驱动因子(见表 1),结合土地利用需求和邻域权重等相关参数(见表 5),参考王博等^[30]的研究模拟河北省 2030 年自然发展、经济发展和可持续发展 3 种情景下不同地类分布情况。①自然发展情景:将

延续 2000—2020 年河北省土地利用变化趋势,保持模型参数与 2000—2020 年一致。②经济发展情景:该情景在自然发展情景的基础上,降低建设用地向耕地、水域、林地、草地、未利用地转移的可能性 40%,耕地、林地、草地、水域、未利用地转移到建设用地的概率增加了 40%,10%,20%,10%,50%^[30]。③可持

续发展情景:控制林地、草地向建设用地转化的概率减少 20%,水域向建设用地转化的概率减少 40%,向耕地转移概率增加 30%,另外耕地向建设用地转化的概率减少 30%,未利用地向建设用地转移概率增加 40%。建设用地转为草地的概率增加 10%,此情景模拟在注重生态保护的同时也兼顾了经济发展^[30]。

表 5 2020—2030 年河北省不同情境下土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix under different scenarios in Hebei Province from 2020 to 2030

地类	自然发展情景						经济发展情景						可持续发展情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a,b,c,d,e,f 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 种地类。

2.4 Geodector 碳储量空间分异驱动机制分析

地理探测器中包括单因子探测和交互探测,其结果 q 值越大,说明该驱动因子对碳储量空间分异性的驱动力解释强度更大^[31]。同时其识别单因子探测结果也能够识别不同因素之间交互作用影响力^[32]。参考文献[33],本研究选取因变量 y_1 (碳储量), y_2 (生境质量),自变量为 x_1 (人口密度), x_2 (年均气温), x_3 (土壤类型), x_4 (夜间灯光指数), x_5 (坡度), x_6 (归一化植被指数), x_7 (年均降水量), x_8 (经济生产总值), x_9 (高程)。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化分析

土地利用转移桑基图(见图 2)显示,2000—2020 年河北省耕地面积逐步减少,部分转变为草地和建设用地,这一现象出现的原因可能与退耕还林还草等工程的实施密不可分,另一方面随着经济的快速发展,城市化和城市扩张持续推进,扩张过程中建设用地占地面积以挤占耕地为主。

河北省土地利用类型空间分布呈现不同的格局。图 3 显示,2000—2020 年及模拟的 2030 年不同情景下河北省地类分布情况。可见,河北省耕地占地面积近全省总面积的 1/2,主要分布在平原地区和坝上地区,是主要的土地利用类型。依据行政区划分区来看,张家口市、沧州市、保定市 3 个城市耕地面积较大,其总和占省内耕地面积的 40%。其次所占比例较高的是林地,主要分布在河北省西北部海拔相对较高的山地林区,集中在承德市、张家口市、保定市 3 个城

市,这 3 个城市总和占全省林地面积近 80%。仅次于河北省林地占地面积的是草地,集中在张家口市、承德市、保定市 3 个城市。其余地类占地面积从大到小依次是建设用地、水域和未利用地。建筑用地近年来面积逐年增加,增加区域主要分布河北省南部和东南部,零散分布于河北省西北部和东北部。

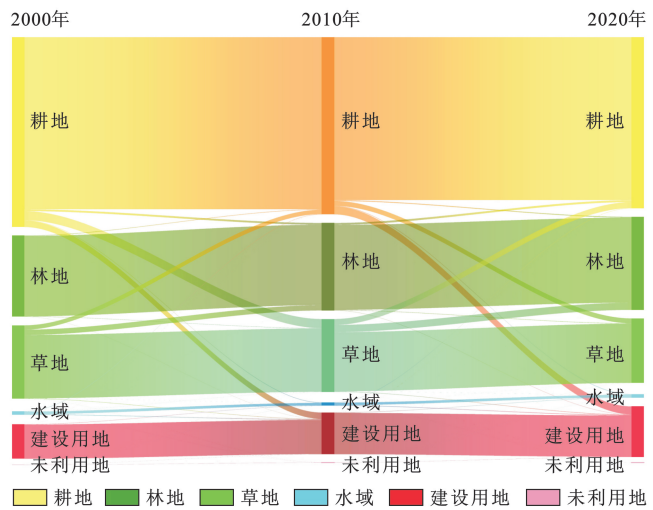


图 2 河北省 2000—2020 年土地利用类型转移桑基图
Fig.2 Sankey map of area transfer of land use types in Hebei Province from 2000 to 2020

3.2 碳储量时空变化及归因分析

3.2.1 碳储量时空变化 时间维度来看(见表 6),2000—2010 年间,河北省碳储量从 2 110.18 Tg,下降到 2 102.36 Tg,下降幅度为 0.37%。2010—2020 年间,河北省碳储量从 2 102.36 Tg 下降到 2 096.73 Tg,下降幅度为 0.27%,20 a 间碳储量呈下降趋势,共下降 13.45 Tg。

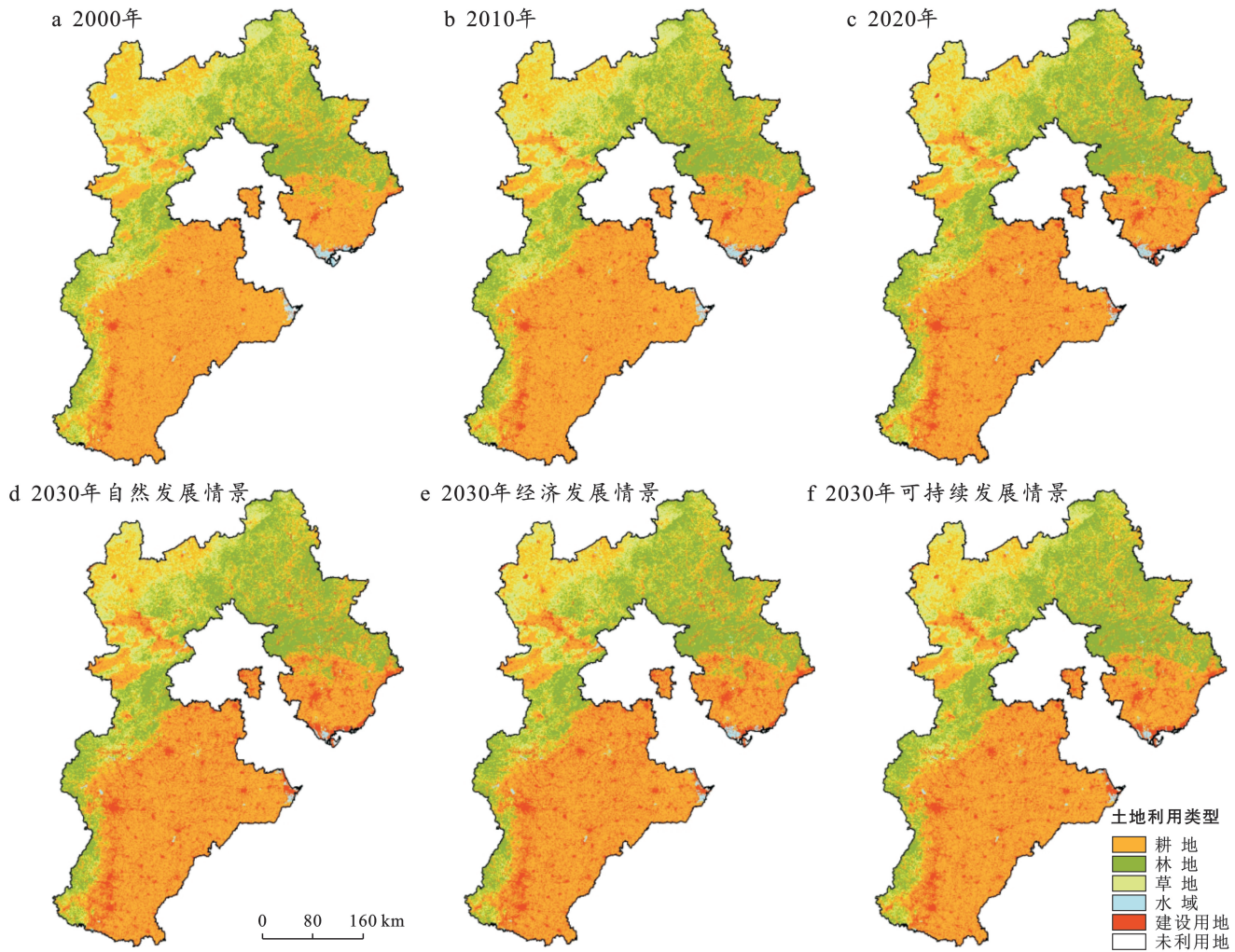


图 3 2000—2030 年河北省土地利用类型空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use types in Hebei Province from 2000 to 2030

表 6 2000—2030 年河北省不同土地利用类型碳储量

Table 6 Carbon stocks in different land use types in Hebei Province from 2000 to 2030

年份	碳储量/Tg						总和
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000 年	1 069.31	687.45	289.54	3.89	59.29	0.72	2 110.18
2010 年	998.11	741.34	287.09	3.69	71.58	0.55	2 102.36
2020 年	963.96	787.37	254.40	3.82	86.97	0.21	2 096.73
2030 年 自然发展情景	929.44	824.93	231.52	2.74	101.60	0.13	2 090.36
2030 年 经济发展情景	912.60	824.55	226.55	3.70	107.49	0.11	2 075.00
2030 年 可持续发展情景	942.38	825.47	232.58	2.76	97.07	0.12	2 100.38

从空间维度来看(见图 4),2000—2020 年碳储量变化减少的区域多集中于坝上高原地区及华北平原和东南部丘陵地区,分析原因可能是由于随着城镇化、工业化的不断深入,农村建房、城市扩张、基础设施等建设用地需求不断增大,以及农业生产结构调整等因素,占用耕地面积不断扩大,导致耕地资源缩减加速,部分耕地转化为草地、建设用地导致了碳储量的减少。碳储量增加的区域多集中于太行山脉和燕山山脉区域,这与该区域植树造林面积的增加密不可

分。然而,虽然林地面积增加且林地碳密度较大,碳储量增加,但耕地转化为草地、建设用地等导致了碳储量的减少,使得 20 a 间林地增加的碳储总量小于地类转化流失的碳储量,碳储总量持续下降。

碳储量高的地方多集中在林地,草地等碳密度高的区域(见图 5)。由预测结果可知,2030 年可持续发展情景下河北省碳储量最高,碳储量达到 2 100.38 Tg。2030 年不同情景下模拟结果显示,自然发展情景下,河北省碳储量将延续 2000—2020 年下降的趋势,相较

于 2020 年碳储总量下降了 6.37 Tg, 模拟出的下降幅度大于 2010—2020 年, 这表明若不加以控制, 碳储总量并不会保持既定速度下降, 而呈加速下降趋势。经济发展情景下, 2030 年碳储量相较于 2020 年碳储总量

下降了 21.73 Tg, 耕地、草地面积减少幅度最大, 使得此情景下碳储总量最低。可持续发展情景下, 河北省碳储总量较 2020 年比有所增加, 增加了 3.65 Tg, 主要由于林地面积的增加使得碳储总量增加。

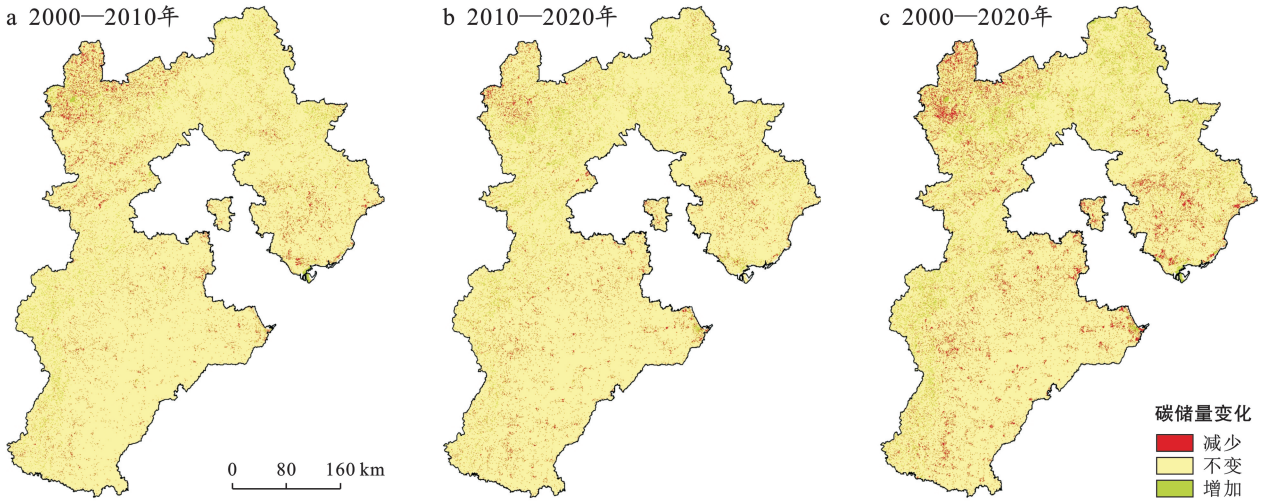


图 4 2000—2020 年河北省碳储量空间变化

Fig.4 Spatial change of carbon stock in Hebei Province from 2000 to 2020

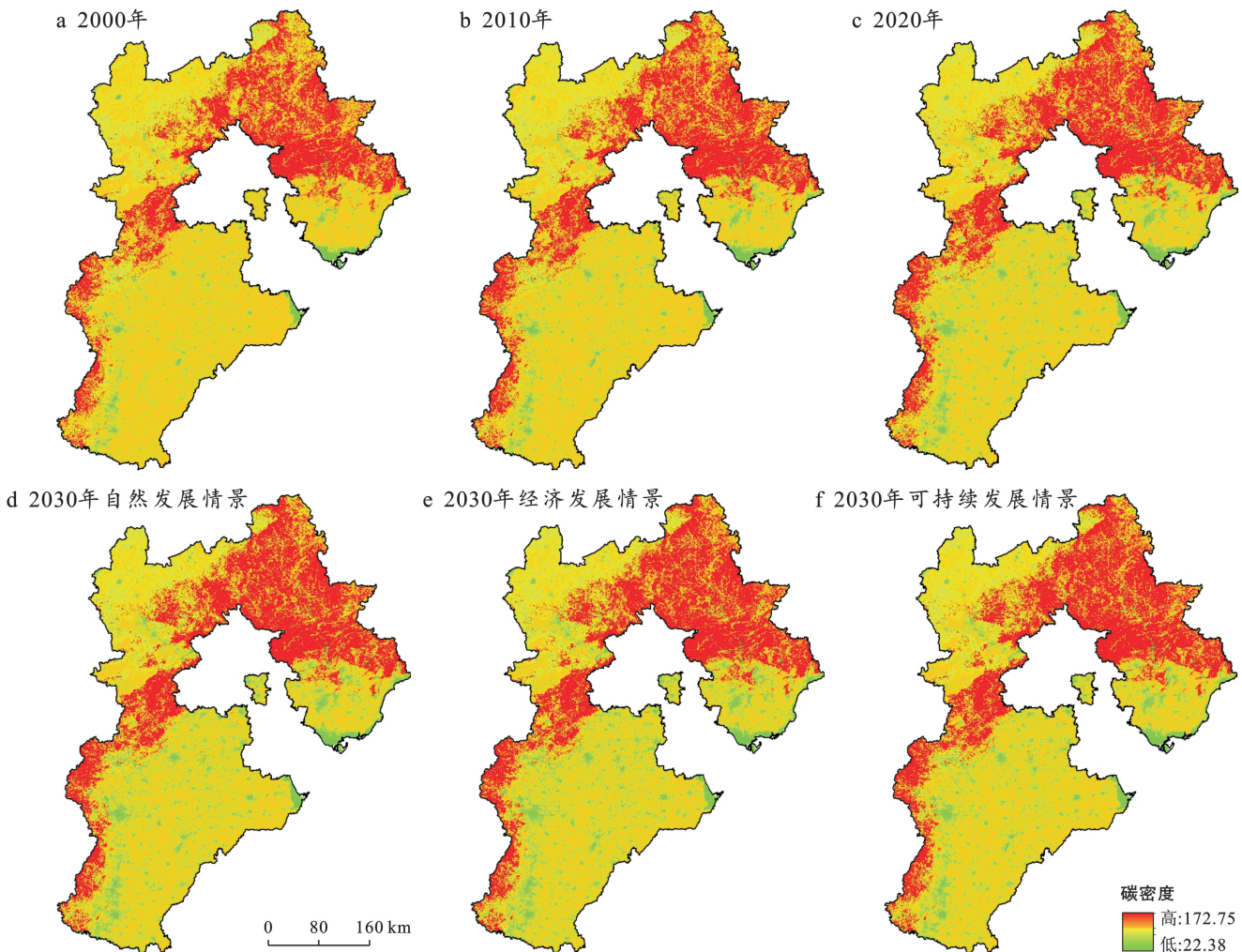


图 5 2000—2030 年河北省碳储量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon stocks in Hebei Province from 2000 to 2030

3.2.2 碳储量时空分异定量归因分析 河北省不同年份单因子探测结果(见表 7)可知,不同驱动因子对不同年份碳储量空间分异的解释力均显著,整体来看主要解释因子基本一致,坡度、归一化植被指数、高程

解释力较强,其中坡度在各年份碳储量空间分异中解释强度最高,2000—2020 年间均值为 0.217 0。夜间灯光指数、经济生产总值、土壤类型解释强度相较于其他变量较低。

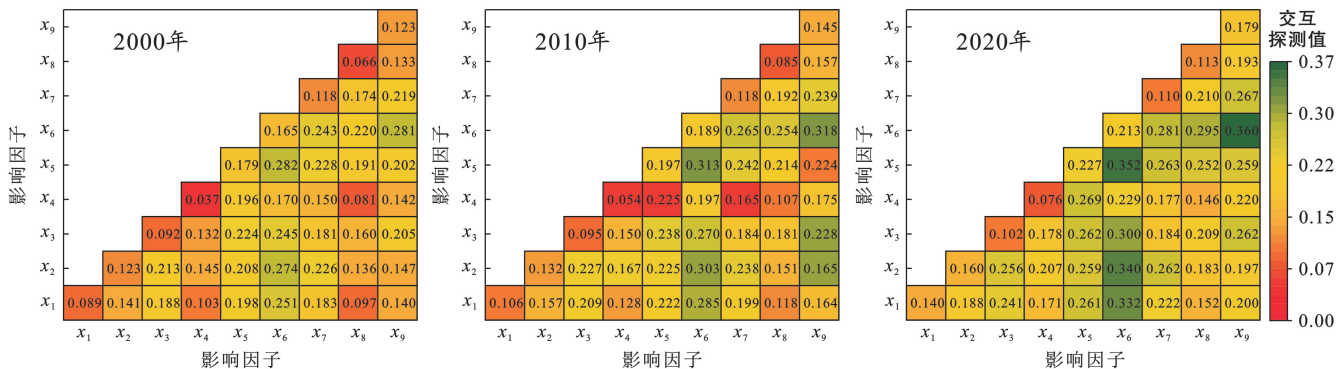
表 7 河北省不同年份碳储量单因子探测结果

Table 7 Results of single-factor detection of carbon stocks in Hebei Province in different years

控制因子	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2020 年	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
人口密度	0.089 1	7	0.106 3	6	0.139 8	5	0.120 4	6
年均气温	0.122 5	4	0.132 0	4	0.159 6	4	0.148 8	4
土壤类型	0.091 6	6	0.095 3	7	0.101 7	8	0.105 6	7
夜间灯光指数	0.037 2	9	0.053 5	9	0.076 3	9	0.059 3	9
坡度	0.178 6	1	0.196 7	1	0.226 8	1	0.217 0	1
归一化植被指数	0.164 7	2	0.189 1	2	0.213 5	2	0.204 3	2
年均降水量	0.117 8	5	0.117 9	5	0.110 0	7	0.126 5	5
经济生产总值	0.066 0	8	0.084 6	8	0.113 1	6	0.093 9	8
高程(DEM)	0.123 4	3	0.145 5	3	0.179 1	3	0.161 7	3

地理探测器交互因子结果(见图 6)与单因子探测结果相比,河北省碳储量变化对任意双因子交互作用的响应更强烈,所有交互探测结果均属于双因子和非线性增强两类。其中土壤类型与人口密度、夜间灯

光指数交互均呈明显非线性增强,表明其在特定组合条件下会极大地增强各因子对碳储量空间分布的影响,交互作用能够对碳储量空间分布产生较大的影响。



注:① x_1 表示人口密度; x_2 表示年均气温; x_3 表示土壤类型; x_4 表示夜间灯光指数; x_5 表示坡度; x_6 表示归一化植被指数; x_7 表示年均降水量; x_8 表示经济生产总值; x_9 表示高程。②色柱由红色至绿色表示交互作用对碳储量的驱动力逐渐加强。

图 6 河北省不同年份碳储量交互探测结果

Fig.6 Results of carbon stock interactions in Hebei Province in different years

3.3 生境质量时空变化分析及归因分析

3.3.1 生境质量时空变化 本文将生境质量划分为 5 个等级,低 $[0,0.2]$,较低 $(0.2,0.4]$,一般 $(0.4,0.6]$,较高 $(0.6,0.8]$,高 $(0.8,1]$ ^[28],各等级面积所占比例如表 8 所示。从时间尺度来看,2000—2020 年低等级生境质量和较低等级生境质量面积所占比例持续上升。较高等级生境质量面积有所增长,高等级生境质量面积却逐年下降。整体来说,河北省 2000—2020 年生境质量水平处于中等水平上,但其发展水平呈不断下降趋势,有生境退化风险,在城镇化发展过程中需引起重视。

ArcGIS 中统计显示 2000 年,2010 年和 2020 年河北省的平均生境质量指数分别为 0.500 1,0.491 4

和 0.467 3,平均生境质量指数呈加速下降趋势,同时本文基于 PLUS 模型模拟出 2030 年不同情景下地类分布结果,发现可持续发展情景 $(0.463 9) >$ 自然发展情景 $(0.454 2) >$ 经济发展情景 $(0.450 0)$ 。其不同情景下生境质量等级面积的比例如表 9 所示。

从空间尺度(见图 7)来看,河北省生境质量空间分布特征显著,低等级生境质量区域分布在河北省南部和东南部地区,地类以建设用地为主,受人为活动干扰较大;较低等级生境质量地类以耕地为主,分布在华北平原和东部丘陵地区;中等等级生境质量区域较为分散,分散分布于河北省全省;较高等级生境质量和高生境质量区域分布于河北省太行山脉和北部燕山山脉,地类以林地、草地为主,生态环境质量较好。

表 8 2000—2020 年河北省生境质量等级面积的比例

Table 8 Area percentage of habitat quality class in Hebei Province from 2000 to 2020

生境质量等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低	16 919.34	9.01	20 426.71	10.88	24 820.32	13.22
较低	59 506.36	31.71	59 605.08	31.76	61 220.7	32.62
中等	45 853.96	24.43	41 814.54	22.28	40 703.45	21.69
较高	40 968.88	21.83	43 159.2	23.00	45 281.1	24.13
高	24 434.64	13.02	22 677.65	12.08	15 657.61	8.34

表 9 不同情境下河北省生境质量等级面积的比例

Table 9 Area percentage of habitat quality classes under different scenarios in Hebei Province

生境质量等级	自然发展		经济发展		可持续发展	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低	28 996.04	15.45	30 676.63	16.34	27 701.25	14.76
较低	61 792.11	32.92	61 422.97	32.73	60 717.81	32.35
中等	37 608.38	20.04	36 514.4	19.46	38 950.76	20.75
较高	44 945.39	23.95	44 977.32	23.96	41 548.78	22.14
高	14 341.26	7.64	14 091.86	7.51	18 764.58	10.00

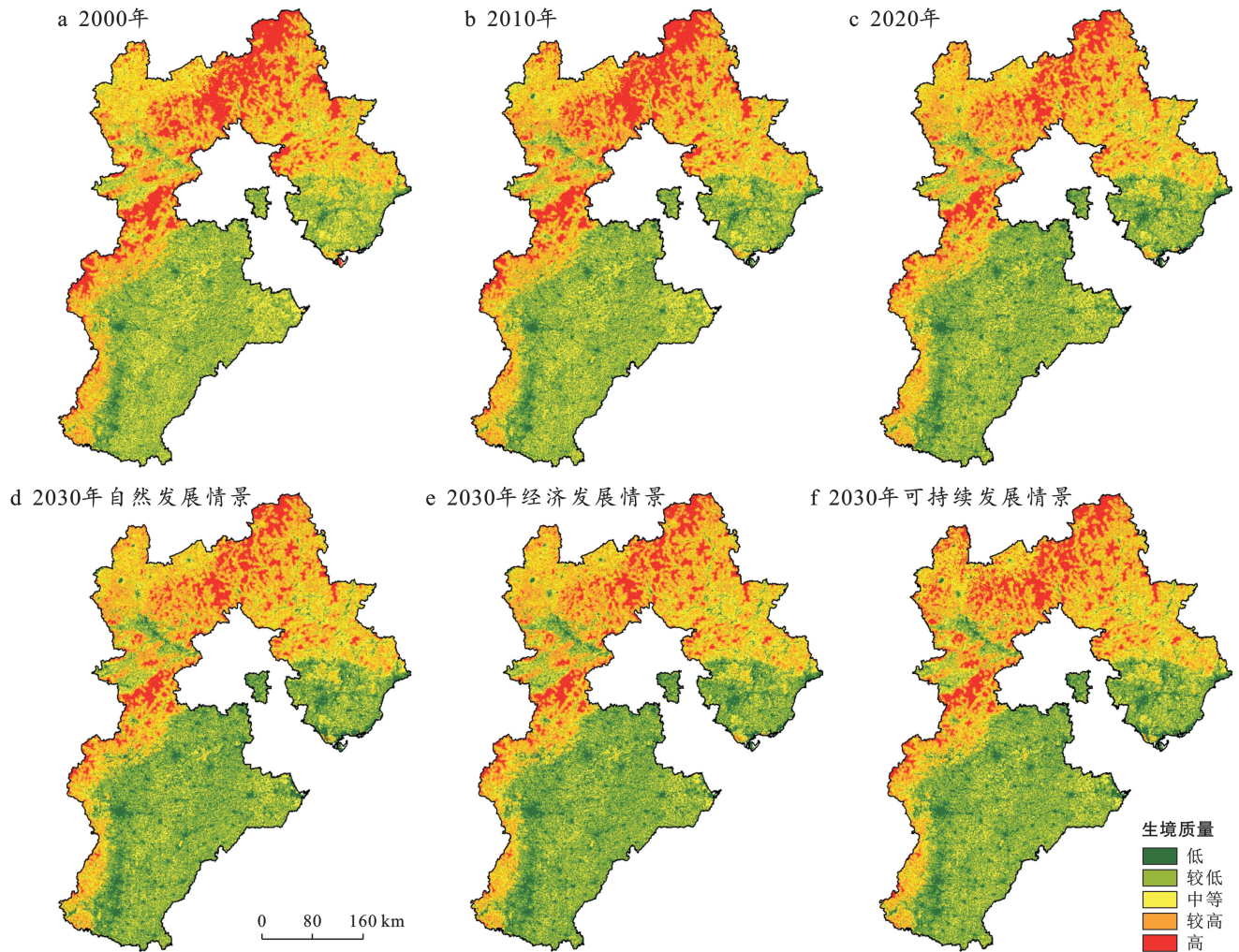


图 7 2000—2030 年河北省生境质量的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of habitat quality in Hebei Province from 2000 to 2030

2030 年模拟分布结果来看,低等级生境质量区域分布与建设用地分布在空间上具有高度一致性,进一步表明建设用地扩张会影响低等级生境质量区域的空间分布。此外,在不同情景下,耕地作为威胁因子大部分处于较低或中等等级生境质量区域,草地大部分地处较高等级生境质量区域,而集中连片的林地处于高等级生境质量区域。从等级分布来看(见表 9),在可持续发展情景下,低等级生境质量面积的比例最小,比例降至 14.76%,高等级区域面积增幅最大,比例增加 2.36%。主要是由于设置此情景时将林地、草地、水域向建设用地的转移概率降低,同时提高

了建设用地向草地的转移概率,使得草地、林地面积增加,且林地和草地具有高生态适宜性,因此,此情景下生境质量较高。

3.3.2 生境质量时空分异定量归因分析 不同年份单因子探测结果(见表 10)可知,不同驱动因子对不同年份生境质量空间分异的解释力均显著。高程、年均气温、坡度、人口密度解释力较强,其中高程在各年份碳储量空间分异中解释强度最高,2000—2020 年间均值达到最高,为 0.561 0。夜间灯光指数、年均降水量、归一化植被指数解释强度相较于其他变量较低。

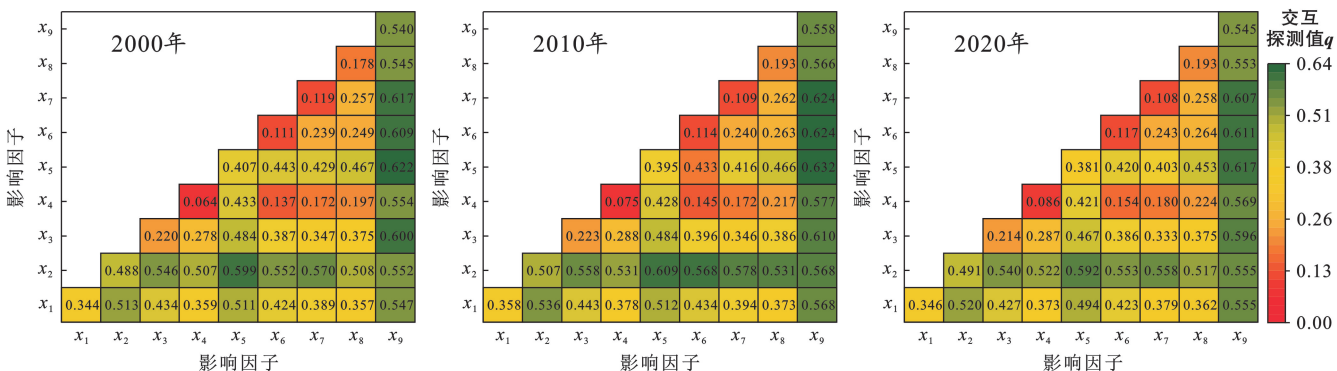
表 10 河北省生境质量不同年份单因子探测结果

Table 10 Results of single-factor detection of habitat quality in Hebei Province in different years

控制因子	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2020 年均值	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
人口密度	0.344 1	4	0.357 7	4	0.345 9	4	0.357 0	4
年均气温	0.487 6	2	0.506 6	2	0.490 6	2	0.507 0	2
土壤类型	0.220 4	5	0.223 5	5	0.214 4	5	0.223 8	5
夜间灯光指数	0.064 2	9	0.074 8	9	0.085 8	9	0.077 9	9
坡度	0.407 2	3	0.395 4	3	0.380 8	3	0.406 7	3
归一化植被指数	0.111 2	8	0.113 9	7	0.116 8	7	0.122 0	7
年均降水量	0.118 8	7	0.109 4	8	0.107 5	8	0.115 1	8
经济生产总值	0.177 9	6	0.193 2	6	0.192 7	6	0.192 5	6
高程(DEM)	0.539 8	1	0.558 2	1	0.545 2	1	0.561 0	1

地理探测器交互因子结果如图 8 所示,与单因子探测结果相比,生境质量变化对任意双因子交互作用的响应更强烈,所有交互探测结果均属于双因子和非线性增强两类。其中,高程与其他各项因子的交互作用最大,归一化植被指数与土壤类型、年均降水量交

互均呈明显非线性增强,表明这些因子在特定组合条件下会极大地增强各因子对生境质量空间分布的影响,除此之外,土壤类型与年均降水量也呈明显非线性增强,交互作用能够对生境质量空间分布产生较大的影响。



注: x_1 表示人口密度, x_2 表示年均气温, x_3 表示土壤类型, x_4 表示夜间灯光指数, x_5 表示坡度, x_6 表示归一化植被指数, x_7 表示年均降水量, x_8 表示经济生产总值, x_9 表示高程, 色柱由红色至绿色表示交互作用对生境质量的驱动力逐渐加强。

图 8 河北省不同年份生境质量交互探测结果

Fig.8 Detection results of habitat quality interaction in Hebei Province in different years

4 讨论

研究发现,2000—2020 年河北省碳储量分布呈

现西高东低,整体呈下降趋势,主要是由于耕地锐减和建设用地迅速扩张,这与李瑾璞等^[23]、巩晟萱等^[25]、彭云妮等^[26]认为导致河北省或京津冀地区碳

储量降低的主要原因是耕地转为建设用地的研究结果较为接近。同时,该区生境质量总体呈下降态势,西北部和太行山沿线地区生境质量相对较高,中南部地区城镇扩张及耕地大幅减少等使得生境质量下降,与王晓萌等^[34]研究结果较为一致。可初步判断,建设用地的增加及耕地的非农化利用是造成河北省碳储量和生境质量明显下降的主要原因之一。该区应完善建设用地规划条例,尤其是合理控制中南部地区建设用地增量,增加城市的植被覆盖,进一步优化生态用地空间布局,特别是通过严守永久基本农田、划定生态保护红线和严格管理城镇开发边界等措施,尽可能减少人为因素对耕地和林草地的干扰与侵占,同时加强太行山脉和燕山山脉区域林地的保护,促进经济系统与生态系统协调发展。

地理探测结果表明坡度、植被归一化指数、高程等对碳储量空间分异影响更显著,究其原因,可能是该区高程、坡度等通过影响水文过程和土壤形成过程对碳储量产生的影响更为显著,同时较高的植被归一化指数代表着更为茂盛的植被覆盖,有利于碳的固定和储存^[35]。此外,随着社会经济的发展,人口密度、GDP 密度对碳储量空间分异的影响在各驱动因子中排名逐步上升,未来或有可能成为首要驱动力。其次,除夜间灯光指数对该区生境质量空间分异的解释力小于 0.1 外,其余各因子对该区生境质量空间分异的解释力均较强。总体而言,碳储量和生境质量时空分异受到多种因素的影响,是自然地理环境与社会经济发展协同交互的产物。在探究国土空间生态修复路径时应考虑自然—社会因素的共同影响,采取差异化多元调控策略,提升区域碳汇能力和生境质量。

PLUS 模型预测结果表明该区在自然发展和经济发展情景下碳储量和生境质量仍呈下降趋势,而可持续发展情景设置耕地、草地转入增加及其他地类向建设用地转移概率减少的发展趋势,预测出该区碳储总量和生境质量有所提高。可持续发展情景能够为相关部门未来动态监测各类用地转移变动情况,针对性地加强土地利用的精细化管理,制定动态长效土地政策和碳减排政策提供一定的参考依据。

研究不足之处在于 InVEST 模型中的各地类碳密度值假定年际不变,这可能会忽略由于自然演替增加的碳储量以及同一地类的碳密度可能会受植被生长、环境水热状况和人类活动等因素的综合影响^[35],表现为不同时期的动态差异,从而导致计算结果可能存在误差。此外,PLUS 模型具有一定的局限性,模拟预测时难以量化相关规划和政策措施的影响。未来研究将通过遥感等持续监测或实地调研获取更为

科学的动态碳密度数据,加强对不同时期、不同碳密度参数的优化,并进一步综合考虑人为因素,以期精确评价碳储量和生境质量,为区域生态发展提供更为科学的参考依据。

5 结论

(1) 2000—2020 年河北省碳储量分别为 2 110.18, 2 102.36, 2 096.73 Tg, 整体呈下降趋势。2030 年预测河北省在自然发展情景、经济发展情景、可持续发展情景下碳储量分别为 2 090.36, 2 075.00, 2 100.38 Tg。

(2) 2000—2020 年河北省生境质量指数分别为 0.500 1, 0.491 4 和 0.467 3, 整体呈下降趋势。2030 年预测河北省在自然发展情景、经济发展情景、可持续发展情景下生境质量指数分别为 0.454 2, 0.450 0, 0.463 9。

(3) 从影响因子来看,碳储量空间分异解释力较强的因子是坡度、植被归一化指数;生境质量空间分异解释力较强的因子分别是高程、气温。各因子交互作用均对碳储量变化具有增强的解释力。

参考文献 (References)

- [1] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems [J]. *Science Advances*, 2015, 1(2): e1500052.
- [2] 刘梦园. 基于 InVEST 模型的河西地区碳储量与生境质量评价[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2023.
Liu Mengyuan. Assessment of carbon storage and habitat quality in Hexi region based on InVEST model [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2023.
- [3] 王兴玉, 张美玲. 基于 CENTURY 模型的甘南高寒草甸过去 50 年的碳收支时空分布分析[J]. *生态科学*, 2023, 42(2): 211-218.
Wang Xingyu, Zhang Meiling. Spatial distribution analysis of carbon budget of Gannan alpine meadow in the past 50 years based on CENTURY model [J]. *Ecological Science*, 2023, 42(2): 211-218.
- [4] You Yongfa, Wang Siyuan, Ma Yuanxu, et al. Improved modeling of gross primary productivity of alpine grasslands on the Tibetan Plateau using the biome-BGC model [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1287.
- [5] 王金州, 卢昌艾, 张金涛, 等. RothC 模型模拟华北潮土区的土壤有机碳动态[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(6): 16-21, 49.
Wang Jinzhou, Lu Chang'ai, Zhang Jintao, et al. RothC model simulation of soil organic carbon dynamics of fluvo-aquic soil in Northern China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 16-21, 49.
- [6] Coleman K, Jenkinson D S, Crocker G J, et al. Simulating

- trends in soil organic carbon in long-term experiments using Roth C-26.3 [J]. *Geoderma*, 1997, 81(1/2):29-44.
- [7] 张博. 基于 LPJ-GUESS 模型对环北极多年冻土区碳循环过程模拟[D]. 甘肃 兰州: 兰州交通大学, 2022.
Zhang Bo. Based on the LPJ-GUESS model, the carbon cycle process in the permafrost area around the Arctic is simulated [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [8] 李长生. 生物地球化学的概念与方法: DNDC 模型的发展 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(2): 89-99.
Li Changsheng. Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(2): 89-99.
- [9] 古圳威, 刘京, 陈怡, 等. 陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 [J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4666-4678.
Gu Zhenwei, Liu Jing, Chen Yi, et al. Analysis and simulation of the spatiotemporal evolution of habitat quality and carbon storage in the Weibei dry plateau region of Shaanxi [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4666-4678.
- [10] 金龙如, 孙克萍, 贺红士, 等. 生境适宜度指数模型研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 841-846.
Jin Longru, Sun Keping, He Hongshi, et al. Research advances in habitat suitability index model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5): 841-846.
- [11] 王玉, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估: 以吴淞炮台湾湿地森林公园为例 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1767-1774.
Wang Yu, Fu Bitian, Lyu Yongpeng, et al. Assessment of the social values of ecosystem services based on SolVES model: A case study of Wusong Paotaiwan Wetland Forest Park, Shanghai, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1767-1774.
- [12] 张亚丽, 苏子浩, 王妮, 等. 基于 RSEI 和 MSPA 模型的生境质量时空动态演变分析: 以安徽金寨霍山两县为例 [J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(2): 123-132.
Zhang Yali, Su Zihao, Wang Ni, et al. Spatiotemporal dynamic evolution of ecological environment quality based on RSEI and MSPA models: A case study of Jinzhai and Huoshan Counties in Anhui Province [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(2): 123-132.
- [13] Guan Dongjie, Zhao Zulun, Tan Jing. Dynamic simulation of land use change based on logistic-CA-Markov and WLC-CA-Markov models: A case study in Three Gorges Reservoir area of Chongqing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20): 20669-20688.
- [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] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.
Zhang Kaiqi, Chen Jianjun, Hou Jiankun, et al. Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2799-2809.
- [16] Liang Youjia, Hashimoto S, Liu Lijun. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106939.
- [17] 孙砚峰, 武丽娜, 李少云, 等. 河北省滦河口湿地的生物多样性评价 [J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(7): 185-187.
Sun Yanfeng, Wu Lina, Li Shaoyun, et al. Biodiversity evaluation for luanhekou wetland in Hebei Province [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(7): 185-187.
- [18] 刘晓, 张学霞, 徐新良, 等. 河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(8): 94-104.
Liu Xiao, Zhang Xuexia, Xu Xinliang, et al. Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, Northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(8): 94-104.
- [19] 李光子. 山岳地区生态系统服务与社会福祉研究: 以河北昌黎碣石山为例 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Li Guangzi. Research on ecosystem services and social well-being of mountainous area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [20] 王振波, 梁龙武, 王新明, 等. 环京津山水林田湖草多目标跨区联动保护修复模式 [J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8798-8805.
Wang Zhenbo, Liang Longwu, Wang Xinming, et al. Multi-target and inter-area linkage protection and repair mode of mountain-river-forest-farmland-lake-grass around Beijing and Tianjin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8798-8805.
- [21] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 碳中和目标下河北省土地利用碳排放格局演变与多情景模拟 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 261-270, 293.
Wu Aibin, Zhao Yanxia, Guo Xiaoping, et al. Evolution and multi scenario simulation of land use carbon emission pattern in Hebei Province under carbon neutral target [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 261-270, 293.

- [22] Dai Liyun, Che Tao, Wang Jian, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127:14-29.
- [23] 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.
- Li Jinpu, Xia Shaoxia, Yu Xiubo, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province based on InVEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7):854-861.
- [24] 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.
- 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.
- [25] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(6):20-28.
- Gong Shengxuan, Zhang Yuhu, Li Yuhang. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region: A PLUS-InVEST model approach [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(6):20-28.
- [26] 彭云妮, 桑会勇, 翟亮, 等. 基于 InVEST 模型的京津冀土地利用变化及碳储量时空分异研究[J]. *测绘通报*, 2024(1):19-24, 31.
- Peng Yunni, Sang Huiyong, Zhai Liang, et al. Study on land use change and spatiotemporal variation of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei based on InVEST model [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(1):19-24, 31.
- [27] 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.
- Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1):90-96.
- [28] 苏敬, 芮菡艺, 朱沁园, 等. 基于 InVEST 模型的 1985—2020 年忻州市生境质量演变及地形效应[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(12):1525-1533.
- Su Jing, Rui Hanyi, Zhu Qinyuan, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in Xinzhou City based on InVEST model from 1985 to 2020 [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(12):1525-1533.
- [29] 赵晓雨, 王益明, 何旭, 等. 基于 InVEST 模型的无锡市生境质量变化研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(5):165-172.
- Zhao Xiaoyu, Wang Yiming, He Xu, et al. Changing features of habitat quality in Wuxi based on InVEST model [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 48(5):165-172.
- [30] 王博. 基于 PLUS 模型的鄱阳湖区土地利用冲突时空演变及多情景模拟[D]. 江西 南昌: 江西师范大学, 2023.
- Wang Bo. Spatial-temporal pattern evolution and multi-scenario simulation of land use conflict in Poyang Lake area based on PLUS model [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Normal University, 2023.
- [31] 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.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [32] Shi Tiezhu, Hu Zhongwen, Shi Zhou, et al. Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643:451-459.
- [33] 贾纪昂, 郭伟玲, 徐刘洋, 等. 耦合 PLUS-InVEST-Geo-Detector 模型的安徽省碳储量时空演变及驱动力分析[J/OL]. *环境科学*, 2024 (2024-06-03). <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202403132>
- Jia Jiang, Guo Weiling, Xu Liuyang, et al. Spatio-temporal Evolution and Driving Force Analysis of Carbon Storage in Anhui Province Coupled with PLUS-InVEST-GeoDectetor Model [J/OL]. *Environmental Science*, 2024(2024-06-03). <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202403132>.
- [34] 王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 等. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(1):80-88.
- Wang Xiaomeng, Pan Peipei, Wang Xiaoxu, et al. Research on ecosystem service trade-off/synergy relationship in Hebei Province based on land use [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(1):80-88.
- [35] 张舟, 刘晶晶, 张权, 等. 基于 PLUS-InVEST-Geodetector 模型的苏州市碳储量时空变化及驱动力分析[J/OL]. *环境科学*, 2024 (2024-07-30). <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405077>.
- Zhang Zhou, Liu Jingjing, Zhang Quan, et al. Analysis of spatial-temporal variation and driving forces of carbon storage in Suzhou City based on the PLUS-InVEST-Geodetector model [J/OL]. *Environmental Science*, 2024 (2024-07-30). <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405077>.