

DOI: 10.20103/j.stxb.202405211159

范强,孙虎虎,孙爽,张津宁.生态-耕地保护下的山东省碳储量估算与演变.生态学报,2025,45(4):1588-1598.

Fan Q, Sun H H, Sun S, Zhang J N. Estimation and evolutionary analysis of carbon stocks in Shandong Province under the ecological-cultivated land protection scenario. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1588-1598.

生态-耕地保护下的山东省碳储量估算与演变

范 强¹, 孙虎虎^{1,*}, 孙 爽¹, 张津宁²

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000

2 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要:“双碳”战略规划下,研究山东省碳储量发展趋势及演变特征,对山东省可持续发展具有重要参考意义。基于山东省 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用数据,运用 PLUS 模型和 InVEST 模型估算得到山东省多期碳储量数据。结果表明:2000—2020 年山东省碳储量在 20 年间减少了 2.15×10^7 t,且呈现持续减少态势。山东省 2030 年碳储量在自然发展情景和生态-耕地保护情景下,相较于 2020 年分别减少 8.93×10^6 t 和增加 5.81×10^6 t。生态-耕地保护情景下山东省耕地减少速度放缓,建设用地扩张速度得到抑制,林地等高碳密度土地类型得到保护并有所增加,山东省碳储能力增强。研究结果可为山东省可持续发展和“双碳”战略规划的实施提供科学参考。

关键词:生态-耕地保护情景;PLUS 模型;InVEST 模型;碳储量;山东省

Estimation and evolutionary analysis of carbon stocks in Shandong Province under the ecological-cultivated land protection scenario

FAN Qiang¹, SUN Huhu^{1,*}, SUN Shuang¹, ZHANG Jinning²

1 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Under the “Dual Carbon” strategic planning, studying the development trends and evolutionary characteristics of carbon storage in Shandong Province is of significant reference value for the province’s sustainable development. Based on the land use data of Shandong Province in 2000, 2010 and 2020, this paper estimates the multi-period carbon storage data of Shandong Province using the PLUS model and the InVEST model. The results show that the carbon storage in Shandong Province decreased by 2.15×10^7 t in 20 years from 2000 to 2020, exhibiting a continuous downward trend. Compared with 2020, carbon storage in Shandong Province is projected to decrease by 8.93×10^6 t in 2030 under the Natural Development scenario and increase by 5.81×10^6 t under the Ecological-Cultivated land Protection scenario, respectively. Furthermore, under the Ecological-Cultivated Land Protection scenario, the rate of reduction for cultivated land in Shandong Province slowed, the expansion of construction land was curbed, and carbon-dense land types like forests were protected and expanded, thereby enhancing the province’s carbon storage capacity. The research results can provide a scientific reference for the implementation of the sustainable development and “Dual Carbon” strategic planning of Shandong Province.

Key Words: ecological-cultivated land protection scenario; PLUS model; InVEST model; carbon storage; Shandong Province

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(42204031);中国博士后科学基金面上“地区专项支持计划”项目(2022MD723791)

收稿日期:2024-05-21; **网络出版日期:**2024-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 472220854@stu.lntu.edu.cn

全球变暖问题已成为全世界密切关注的问题^[1]。中国政府在 2020 年 9 月的联合国大会上提出了“双碳”规划,即 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和^[2-3]。碳排放问题是当前气候变化研究的热点问题^[4-5],人类活动对其影响最为显著^[6]。人类活动与城市发展密不可分,随着人口增长和社会发展,城市作为人类居住和生活的中心也在发展^[7]。但这种发展也伴随着资源的消耗、能源的需求以及环境的变化,导致土地的改变和用途的变革,对生态系统造成了冲击,使生态环境逐渐恶化^[8]。而碳储量作为一个衡量生态环境的关键指标,与土地利用密切相关,合理的土地利用可以增加碳储量^[9]。

土地利用类型的变化会导致碳储量的变化^[10],以往的研究基于多年土地利用数据,通过 InVEST 模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)估算碳储量并分析演变趋势^[11-12]。但随着土地利用预测技术的不断进步,诸多预测模型相继提出,例如 CLUE-S 模型^[13]、FLUS 模型^[14]和 PLUS 模型(Patch-generating Land Use Simulation Model)^[15],预测精度也越来越高。而 PLUS 模型应用新的分析策略和新的多类种子生长机制,结合多目标优化方法动态模拟多种土地利用类型的斑块级变化,弥补了已有的 CA 模型,如 CLUE-S 模型、FLUS 模型等在转化规则挖掘策略和景观动态变化模拟策略两个方面的不足,且已有一些研究证实,PLUS 模型模拟精度优于传统模型^[16-17]。目前,诸多学者基于已有的多年土地利用数据结合 PLUS 模型预测未来的土地利用状况^[18-19],同时部分研究根据预测的未来土地利用状况,再结合 InVEST 模型预测未来碳储量并分析其演变趋势^[20-21]。其中众多研究通过构建不同情景预测未来的土地利用发展状况,一般在生态保护情景下,其研究区域内的发展是较好的,城市建设和生态保护两者共同发展^[16,22]。但大多研究仅通过 PLUS 模型的土地利用类型转移矩阵构建生态保护情景^[23],或者通过提高或降低土地类型转移概率调整未来土地需求^[24],方法并没有考虑研究区域内的实际生态状况。而遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI)自提出以来,其作为一个可以描述区域内生态环境状况的因子^[25],许多学者基于 RSEI 对其研究区域内的生态环境状况以及发展趋势做出分析^[26-27],是一个较好的评价区域生态状况的方法^[28-29]。山东省是中国重要的农业省份,耕地面积大,农业生产总值高,同时面临着生态环境保护的巨大压力。与全国其他地区类似,面临的耕地保护和生态保护任务十分严峻。山东省具有独特的地理位置,其位于太行山以东,是黄河的入海口地区,拥有黄河下游的冲积平原地区,土地肥沃,适宜耕作,同时山东省拥有黄河三角洲等重要的生态保护区。因此,研究结合基于 RSEI 的生态保护情景构建生态-耕地保护情景,对山东省的耕地保护和生态环境保护具有重要的现实意义^[30]。

本文研究通过 PLUS 模型预测 2030 年的山东省土地利用状况,再通过 InVEST 模型获得山东省 2000—2030 年碳储量的情况,并分析碳储量的演变趋势,为山东省城市建设发展、生态与耕地保护提出建设性意见。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

山东省处于中国东部地区,北纬 34°23'—38°24'、东经 114°47'—122°42'之间,与渤海、黄海相邻(图 1)。山东省作为农业大省,气候是暖温带季风气候,日照时间充足,为山东省的农作物生长提供了良好条件。根据 2022 年山东省统计局统计数据显示,山东省农用地面积为 117000km²,占全省的土地总面积的 74.05%,广袤的耕地面积蕴含着丰富的碳储量;山东省 20 多年以来城市发展迅速,2022 年山东省城镇化率达到 64.54%;同时随着山东省生态保护政策的出台,近年来山东省生态环境质量在持续改善。

1.2 数据来源

本研究土地利用数据来源于武汉大学学者制作的分辨率为 30m 的中国土地覆盖数据集(CLCD),根据国土资源部土地使用状况分类标准(GB/T 21010—2017),本研究将土地利用数据分为:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型,经提取得到山东省 6 种类型的土地利用数据。驱动因子为 DEM、坡度、人口密度、到道路的距离、到市政府驻地的距离、年平均降水量、年平均气温。将所有数据经预处理到统一的坐标系和分辨率;数据信息及来源如表 1 所示。

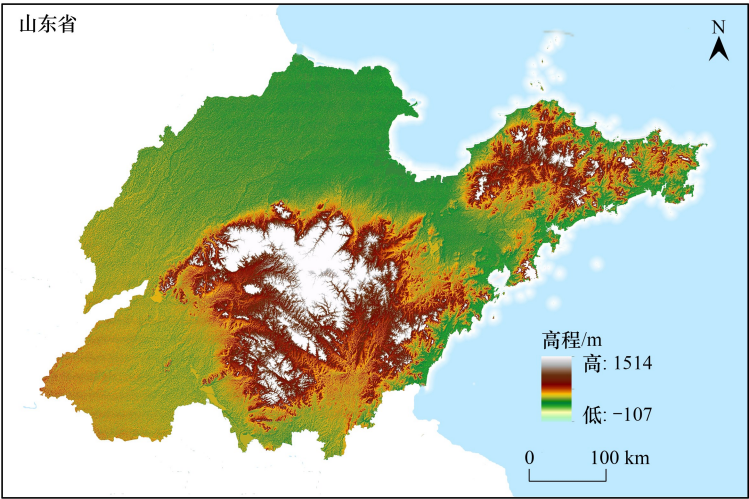


图 1 研究区概况
Fig.1 Map showing the location of the study area

表 1 数据信息及来源

Table 1 Data information and sources

数据类型 Data type	分辨率 Resolution	来源 Source
土地利用数据 Land use data	30m	https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810
高程 DEM	90m	https://www.gscloud.cn
坡度 Slope	90m	由高程计算得到
人口密度 Population density	1 km	https://hub.worldpop.org
到一级道路距离 Distance to primary roads	30m	https://www.webmap.cn
到二级道路距离 Distance to secondary roads	30m	计算欧式距离得到
到三级道路距离 Distance to tertiary roads	30m	
到高速公路距离 Distance to motorways	30m	
到铁路距离 Distance to railway	30m	
到市政府驻地距离 Distance to the municipal governmental residences	30m	
年平均降水 The mean annual precipitation	1km	http://www.resdc.cn
年平均温度 The mean annual temperature	1km	

DEM: Digital elevation model

2 研究方法

2.1 遥感生态指数

遥感生态指数(RSEI)是由徐学者提出的一个基于遥感信息技术的新型遥感生态指数。RSEI 耦合了绿

度、湿度、热度和干度四个关于自然生态的重要指标^[25]。

其定义为:

$$RSEI=f(L_{NDVI},S_{WET},R_{LST},G_{NDBSI}) \tag{1}$$

其中, L_{NDVI} 为绿度指标,研究采用归一化植被指数(NDVI)作为绿度指标; S_{WET} 为湿度指标,研究采用缨帽变换的湿度分量(WET)作为湿度指标; R_{LST} 为热度指标,研究采用地表温度(LST)作为热度指标; G_{NDBSI} 为干度指标,研究采用归一化建筑和土壤指数(NDBSI)作为干度指标。

本研究采用 Google Earth Engine 云计算平台进行 RSEI 的计算,基于 MODIS 数据,计算 2000 年、2010 年

和 2020 年 7—8 月的 RSEI。在计算 RSEI 的过程中,研究采用徐等学者的改进的归一化差异水体指数 MNDWI(Modified NDWI) 建立水体掩膜^[31],同时运用大津算法 OTSU 自动提取水体和非水体的分割阈值^[32—33]。

2.2 PLUS 模型

PLUS 模型是由国家高性能空间计算智能实验室(HPSCIL) 和中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院联合开发的。PLUS 模型包含两个重要模块:用地扩张分析策略(LEAS) 和基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS)。运用两个模块结合各种驱动因子,通过线性回归或马尔科夫链模拟未来不同情景下的土地利用变化^[15]。

本研究基于 2010 年的山东省的土地利用数据,模拟 2020 年的土地利用数据,与 2020 年真实土地利用数据对比并进行精度分析。最终模拟得到的 2020 年的土地利用数据的 Kappa 系数为 0.797,总体精度为 0.901, FoM 值为 0.118,说明 PLUS 模型模拟的山东省的土地利用数据的结果可靠性高,可以通过 PLUS 模型模拟未来 2030 年的山东省的土地利用数据。

本研究基于山东省 2020 年土地利用数据、2010—2020 年的各种土地利用类型的发展概率和通过马尔科夫链获得的 2030 年的土地需求,利用 CARS 模块预测山东省 2030 年不同情景下的土地利用状况。其中,邻域权重(阈值范围 0—1,越接近于 0,扩张能力越弱) 的设置基于 2000—2020 年的土地利用变化情况得到^[34],依据历史情境设置,根据无量纲化,最终得到各个土地类型的邻域权重见表 2。同时根据不同的情景设置不同的转移成本矩阵(数值 0 或 1,0 代表不可转移,1 代表能够转移,见表 3),本研究设置两个情景:自然发展情景、生态-耕地保护情景。

表 2 不同土地利用类型的邻域权重
Table 2 Neighborhood weights of different land use types

土地利用类型 Landuse type	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
邻域权重 Neighborhood weight	0	0.544	0.432	0.588	1	0.424

表 3 不同情景的转移成本矩阵
Table 3 Matrix of transfer costs for different scenarios

土地利用类型 Landuse type	自然发展情景 Natural development scenario						生态-耕地保护情景 Ecological-cultivated land protection scenario					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地 Cultivated land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
林地 Forest	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
草地 Grassland	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
水域 Water	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
建设用地 Construction land	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
未利用地 Unutilized land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(1) 自然发展情景:继续延续 2010—2020 年的各个土地类型的发展趋势,各个土地类型之间可以互相转移,不受任何限制,邻域权重根据表 2 设置。

(2) 生态-耕地保护情景:首先将 RSEI 为优的区域(0.8—1) 设置为生态约束区,区域内土地不可转移为其他地类;以国务院发布的《山东省国土空间规划(2021—2035 年) 》为基础,来进行生态-耕地保护情景的设置,符合山东省的发展状况,落实耕地保护制度,继续统筹山水林田湖草系统治理,通过保护耕地及生态环境减缓碳储量减少的速度。文件显示,2030 年山东省耕地保有量不低于 63300km²;陆域生态保护面积不低于 11100km²,以此作为山东省生态-耕地保护情景的约束条件。最终选定的生态约束区面积为 37477.62km²;同

时经过 PLUS 模型的计算,山东省 2030 年生态-耕地保护情景下耕地面积为 105485.62km²,以上数据符合约束条件。在生态-耕地保护情景下,耕地、林地与草地可以相互转化,但不向其他地类发生转移,设置为 0,其他设置保持不变^[35]。

2.3 Invest 模型

本研究采用 InVEST 模型的碳储量模块,该模块可以根据区域的土地利用数据和碳密度数据估算该区域的碳储量^[36—37],计算碳储量的四个基本碳密度数据分别是地上生物碳密度,地下生物碳密度,土壤碳密度和死亡碳密度^[38]。

InVEST 模型中估算碳储量的公式如下所示:

$$C = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \tag{2}$$

式中: C 为研究区的总碳储量; C_{above} 为研究区的地上部分碳储量; C_{below} 为研究区的地下部分碳储量; C_{soil} 为研究区的土壤碳储量; C_{dead} 为研究区的死亡碳库的碳储量。

本研究主要参考研究区域实测数据的诸多文献及实际情况,优先选择研究区域内实测的碳密度数据,部分缺少参考文献的数据,选择研究区域相邻的碳密度数据。地下生物量碳密度的计算采用部分文献中提出的地上生物量碳密度与地下生物量碳密度的比值得到,依据 Delaney 等的研究,设定死亡碳密度与地上生物量碳密度之比约为 1:10,以此来计算死亡碳密度,最终得到山东省的碳密度数据^[39—44],如表 4 所示。

表 4 山东省不同土地类型碳密度/(t/hm²)

Table 4 Carbon density of different land types in Shandong Province

土地利用类型 Landuse type	地上生物碳密度 Aboveground biocarbon density	地下生物碳密度 Belowground biocarbon density	土壤碳密度 Soil carbon density	死亡碳密度 Dead carbon density
耕地 Cultivated land	3.25	0.62	92.9	0.325
林地 Forest	28.11	7.45	127.3	2.811
草地 Grassland	1.24	6.488	99.7	0.124
水域 Water	0.67	0.134	81.1	0.067
建设用地 Construction land	0	0	73	0
未利用地 Unutilized land	0.67	0.134	74.6	0.067

3 结果与分析

3.1 山东省遥感生态指数

2000 年、2010 年和 2020 年,山东省 RSEI 均值从 0.666 先上升到 0.741,再下降到 0.717,说明山东省生态环境先变好再变差。对 RSEI 四个指标进行主成分分析,主成分分析统计值如表 5 所示。2000 年、2010 年和 2020 年的 3 期 RSEI 数据的第一主成分的贡献率均大于 68%,说明第一主成分已经集中了四个指标的大部分特征信息,可表征研究区域内的生态环境状况。其中,第一主成分中,绿度指标和湿度指标均为正值,干度指标和热度指标均为负值,说明绿度指标和湿度指标对生态环境起正向作用,干度指标和热度指标对生态环境起负向作用,符合研究区域生态环境的实际情况。

从空间上看(图 2),2000 年生态质量较差的区域大多集中在山东省北部地区和中部地区,优质区域则集中在山东省西部地区和南部地区;2010 年山东省北部地区的生态质量开始变好,山东省东部地区和南部地区的生态质量开始变差;2020 年山东省生态质量较差的区域集中在山东省中部、南部和东部地区,山东省西北部地区大部分为优质区域。20 年间,山东省北部相当一部分生态质量较差的区域得到了较好地改善,生态质量优质区域大部分集中在山东省中部山区和耕地地区,而山东省大部分地区因城市发展,整体生态质量而变得恶化。

表 5 主成分分析统计值
Table 5 Principal component analysis statistics

年份 Year	2000		2010		2020	
	PCA1	PCA2	PCA1	PCA2	PCA1	PCA2
绿度指标 NDVI	0.872	-0.273	0.922	-0.241	0.801	-0.133
湿度指标 WET	0.142	0.935	0.019	0.144	0.184	0.637
干度指标 NDBSI	-0.002	-0.002	-0.338	-0.116	-0.492	-0.364
热度指标 LST	-0.468	-0.225	-0.190	-0.953	-0.29	0.666
特征值 Eigenvalue	0.018	0.006	0.013	0.003	0.018	0.004
贡献率 Contribution rate	68.53%	22.47%	70.49%	17.15%	70.85%	13.99%

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index;WET:湿度 Wet;NDBSI:归一化建筑和土壤指数 Normalized difference built-up and soil index;LST:地表温度 Land surface temperature;PCA:主成分分析 Principal component analysis;PCA1:第一主成分 First principal component;PCA2:第二主成分 Second principal component

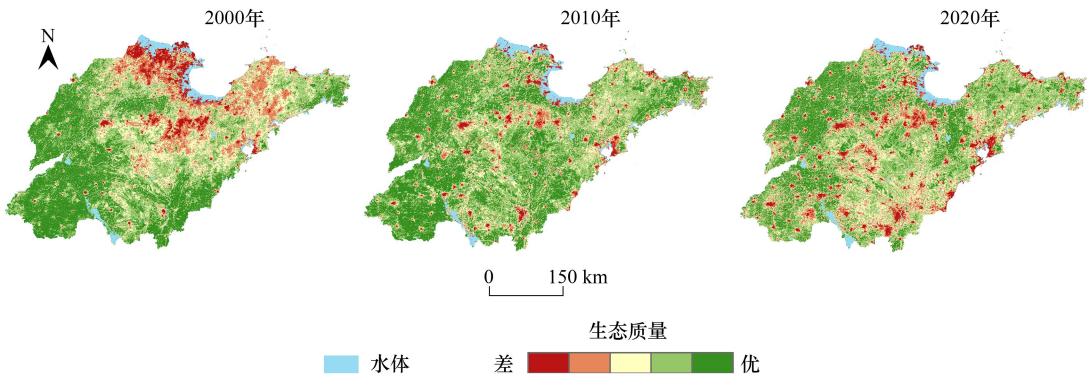


图 2 山东省 RSEI 空间分布
Fig.2 Spatial distribution of RSEI in Shandong Province
RSEI:遥感生态指数 Remote sensing ecological index

3.2 山东省 2000—2020 年演变特征

3.2.1 土地利用时空演变特征

山东省 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用以耕地和建设用地为主(图 3),林地和草地集中在山东省中部和东部地区。2020 年耕地占比约为 68.11%,建设用地占比约为 22.02%。20 年来,山东省各土地利用类型均发生不同程度的变化,其中山东省耕地减少的最多,减少 11468.13km²,占 2000 年耕地总面积的 9.75%;草地和未利用地也在减少,相较于 2000 年,分别减少 41.51%和 80.97%。而建设用地、林地和水域在增加,建设用地增加 11563.09km²,相较于 2000 年增加了 50.8%,其中有 10849.28km²的耕地和 703.33km²的未利用地转化为建设用地;林地和水域分别增加 15.84%和 69.26%,林地的增加主要来源于耕地和草地转入,1244.16km²耕地和 607.18km²草地转化为林地。说明山东省 20 年间城市发展迅速,建设用地不断扩张,不断侵占以耕地为主的其他土地;但以林地为主的生态优质区域在增加,山东省重点退耕还林工作和生态保护政策卓有成效。山东省政府公报文件也显示,多年来山东省政府大力推进生态环境保护,实行严格的生态红线制度和耕地保护制度,约束性指标全面超额完成,山东省生态环境质量持续改善,耕地减少速度放缓,国家下达山东省的耕地保有量和永久基本农田保护任务圆满完成。

3.2.2 碳储量时空演变特征

2000 年、2010 年和 2020 年的碳储量分别为 15×10⁸t、14.84×10⁸t 和 14.78×10⁸t,20 年间山东省的碳储量不断在减少(图 4)。山东省 2010—2020 年的碳储量减少 5.77×10⁶t,而 2000—2010 年的减少幅度是最大的,减少 1.58×10⁷t,约是 2010—2020 年的碳储量减少量的 2.7 倍。2000—2010 年山东省城市发展得到飞速发

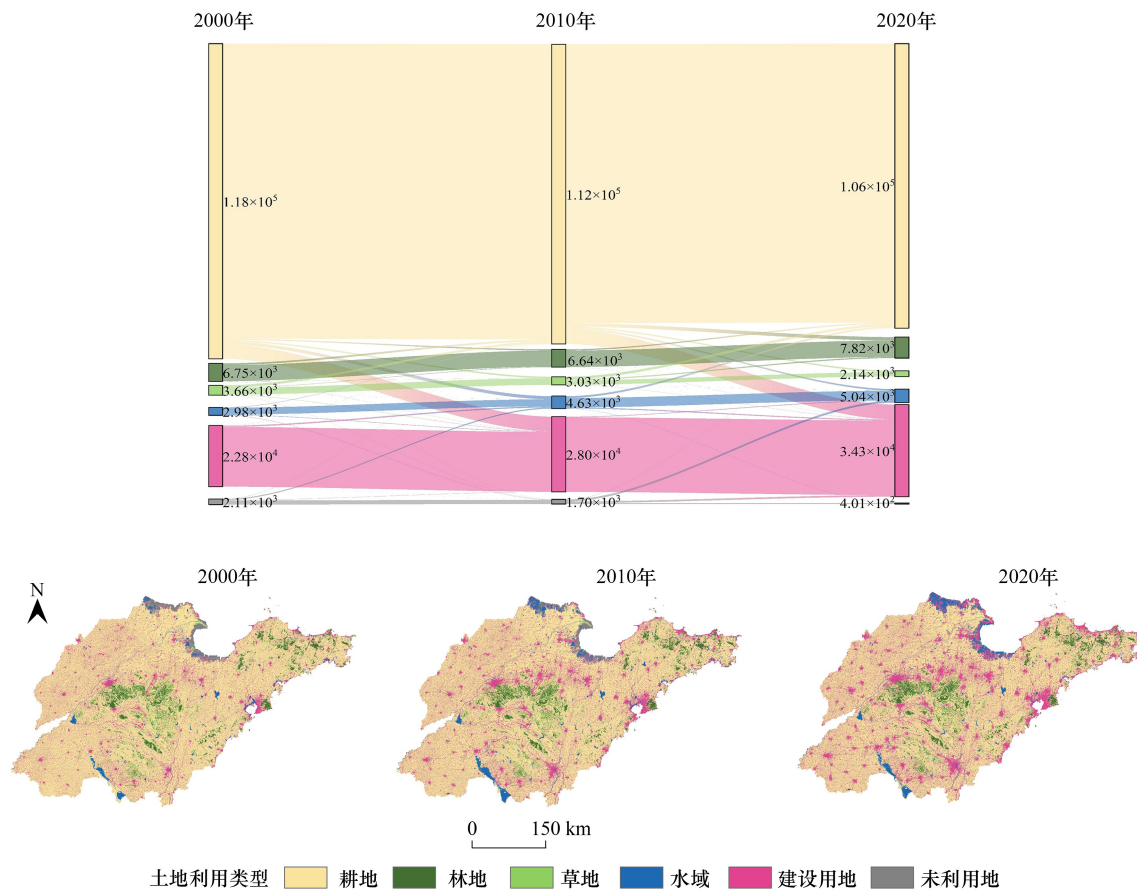


图 3 2000 年、2010 年和 2020 年山东省土地利用现状/km²

Fig.3 Status of land use in Shandong Province in 2000, 2010 and 2020

展,不断侵占其他类型用地,使山东省碳储量不断流失。山东省土地利用类型变化导致碳储量发生变化,其中耕地占比是最大的,其变化极大的影响着山东省碳储量的变化。2000 年耕地碳储量为 $11.42 \times 10^8 \text{ t}$, 2020 年耕地碳储量为 $10.31 \times 10^8 \text{ t}$, 20 年间因耕地的减少,就导致碳储量减少 $1.11 \times 10^8 \text{ t}$; 草地和未利用地的碳储量在 20 年间共减少 $2.92 \times 10^7 \text{ t}$ 。而建设用地不断扩张,侵占其他土地,但建设用地作为低碳密度土地类型,其扩张导致山东省碳储量的减少,20 年间建设用地碳储量从 $1.66 \times 10^8 \text{ t}$ 增加到 $2.51 \times 10^8 \text{ t}$, 2010—2020 年增加幅度是最大的; 林地的碳储量从 2000 年 $1.12 \times 10^8 \text{ t}$ 增加到 2020 年的 $1.3 \times 10^8 \text{ t}$, 增加 $1.77 \times 10^7 \text{ t}$ 。

从空间上看(图 4), 2000—2020 年碳储量的空间变化不大, 碳储量较高的区域集中在山东中部、南部及东部地区, 具体分布来说, 碳储量较高区域分布于济南市和淄博市南部、潍坊市和威海市西部、临沂市和烟台市北部, 结合土地利用状况来看, 这些区域以林地和草地为主, 碳密度高; 而碳密度较低的区域, 大多为建设用地, 植被覆盖率低, 碳储能力较差, 分布在山东省各市。

3.3 多情景下山东省碳储量模拟结果

研究通过应用 PLUS 模型, 设置自然发展情景和生态-耕地保护情景两个情景, 预测山东省 2030 年的土地利用状况, 再结合 InVEST 模型估算山东省 2030 年两种不同情景下的碳储量并分析其变化情况。

在自然发展情景和生态-耕地保护情景下, 2030 年的碳储量分别是 $14.69 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $14.84 \times 10^8 \text{ t}$, 自然发展情景下的 2030 年碳储量相较于 2020 年的碳储量是减少的, 较 2020 年减少 $8.93 \times 10^6 \text{ t}$; 而在生态-耕地保护情景下, 山东省的碳储量相较于 2020 年的碳储量有所增加的, 增加 $5.81 \times 10^6 \text{ t}$, 而相较于自然发展情景下的 2030 年碳储量, 增加 $1.47 \times 10^7 \text{ t}$, 说明生态-耕地保护情景下山东省碳储量增长显著, 碳储量呈现回升态势, 生态-耕地

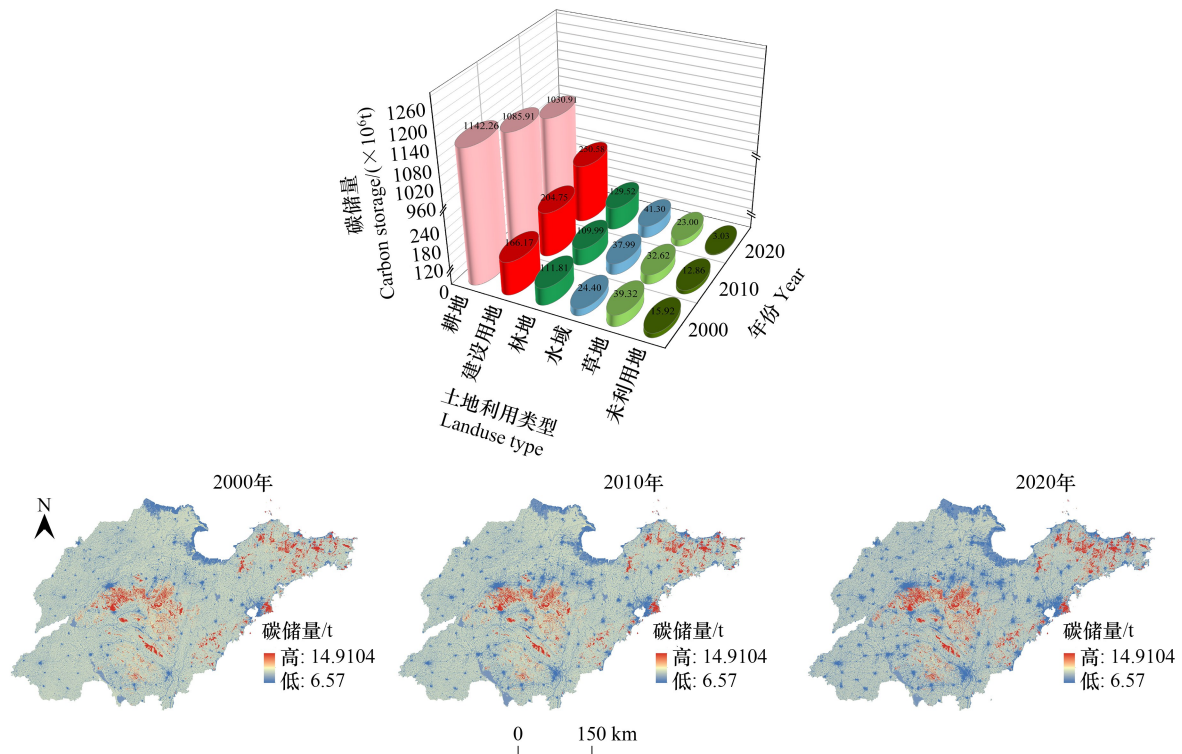


图4 2000年、2010年和2020年山东省碳储量情况

Fig.4 Carbon storage in Shandong Province in 2000, 2010 and 2020

保护情景下的2030年碳储量甚至已经恢复到2010年的碳储量水平。

结合土地利用状况来看(图5),在自然发展情景下,2030年山东省耕地相较于2020年大幅减少,从 106175.63km^2 减少到 100731.71km^2 ,由于耕地的减少,山东省碳储量减少 $5.29 \times 10^7\text{t}$ 。而建设用地大幅增加,较2020年增加 5500.33km^2 。林地也有较大增长,从2020年的 7818.18km^2 增长到2030年的 8478.16km^2 ,相应碳储量增加了 $1.09 \times 10^7\text{t}$ 。在生态-耕地保护情景下,耕地从 106175.63km^2 减少到 105485.62km^2 ,山东省耕地减少速度减缓,相较于2020年,碳储量仅减少 $6.7 \times 10^6\text{t}$ 。而相同面积下的林地的碳储量是最多的,提升山东省的林地面积,对于优化山东省的生态环境和提升山东省的总碳储量有极大贡献。林地相较于2020年增幅较大,面积增加 906.27km^2 ,林地的碳储量增加到 $1.45 \times 10^8\text{t}$,相较于2020年,其碳储量增加 $1.5 \times 10^7\text{t}$;与自然发展情景下的2030年相比,林地的碳储量增加 $4.08 \times 10^6\text{t}$ 。山东省的建设用地面积有所增加,但仅增加 249.37km^2 。但相较于自然发展情景,耕地减少幅度和建设用地增长幅度都是比较小的,说明采取生态约束及耕地保护手段,能有效控制耕地减少速度、建设用地的扩张及保护生态优质区域。

在基于遥感生态指数建立的生态-耕地保护情景下,山东省耕地减少的速度得到减缓,城市发展得到抑制,林地面积开始增长,山东省碳储量不断增加,山东省的生态环境正在明显好转;但山东省是一个农业大省,随着城市发展,耕地减少的趋势是不可逆的,今后应重点提高林地和草地高碳密度的地类面积,低质量耕地退耕还林还草,严格保护高质量耕地,加强生态环境的保护与修复。

本文研究结果能够清晰的反映山东省2000—2030年的碳储量时空变化和不同土地利用类型之间的转变,揭示山东省的土地利用和碳储量的变化趋势,为山东省耕地及生态环境保护 and 城市建设发展提供科学参考。

4 结论

(1) 2000—2020年,山东省碳储量不断在下降,20年间,从 $15 \times 10^8\text{t}$ 下降到 $14.78 \times 10^8\text{t}$,主要原因是城市

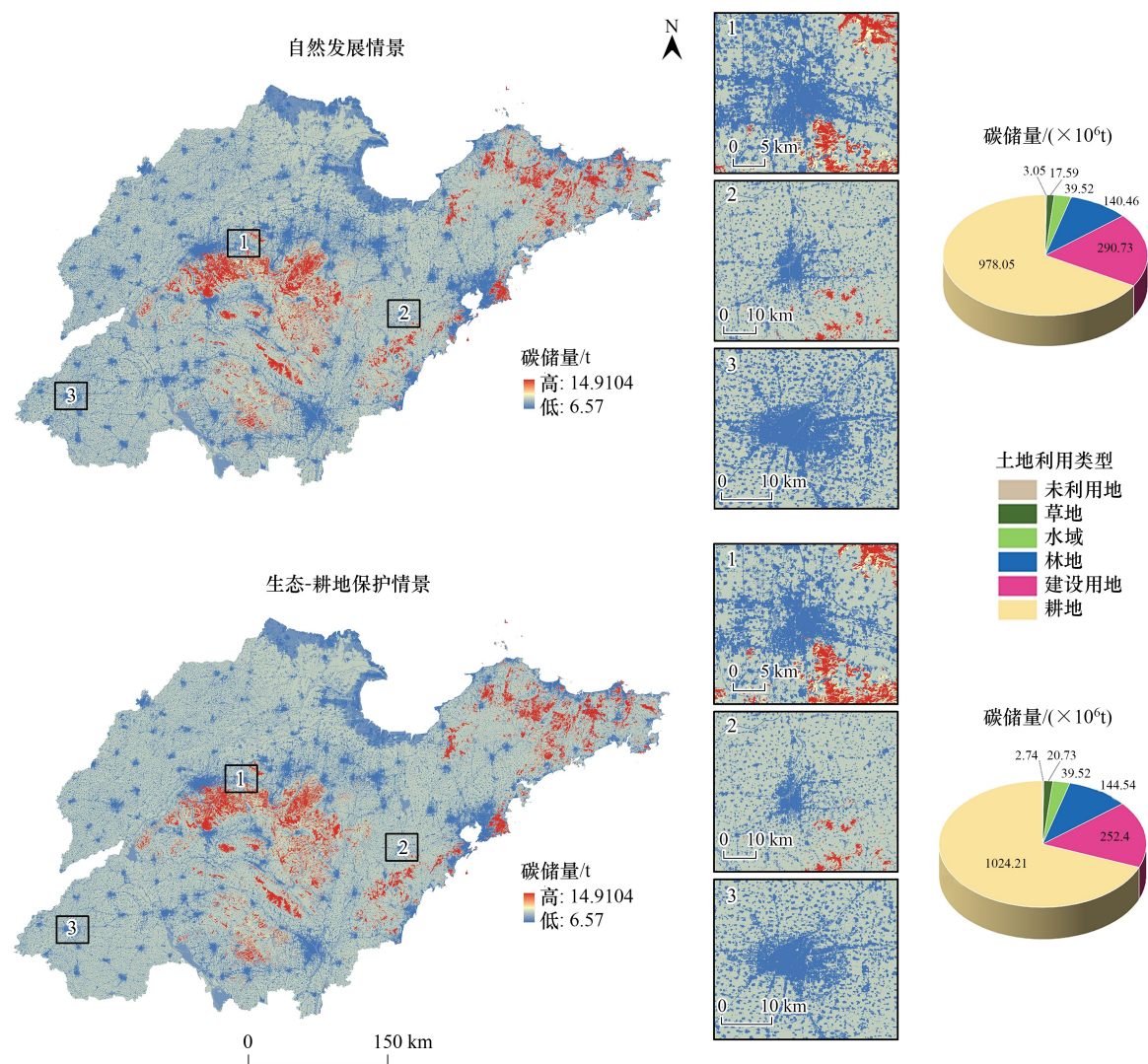


图5 山东省2030年碳储量多情景模拟结果
Fig.5 Results of multi-scenario simulation of carbon storage in Shandong Province in 2030

发展不断侵占其他土地,尤其是山东省 10849.28km²耕地转化为了建设用地,导致山东省固碳能力下降;但同时林地面积在增加,从 6748.91km²增加到 7818.18km²。未来山东省应平衡城市发展与生态环境,低质量耕地退耕还林还草,严守耕地红线,优化城市空间格局发展,提高山东省碳储能力。

(2)碳储能力与土地利用类型的变化密切相关,山东省作为一个耕地面积占全省面积 70%以上的农业大省,耕地碳储量是最高的。建设用地的增加不断侵占耕地,导致山东省碳储能力持续下降。从各土地类型来看,耕地、建设用地、林地、水域、草地和未利用地对山东省碳储量贡献度依次降低。

(3)在自然发展情景与基于遥感生态指数的生态-耕地保护情景下,2030 年的碳储量分别为 14.69×10⁸t 和 14.84×10⁸t,自然发展情景下山东省碳储量持续减少。而在生态-耕地保护情景下山东省碳储量在增加,林地及草地面积呈扩张态势,耕地减少的速度放缓,城市扩张得到抑制,山东省碳储量在增加。

参考文献 (References):

[1] Hu K, Zhang Q, Gong S, Zhang F Y, Weng L G, Jiang S S, Xia M. A review of anthropogenic ground-level carbon emissions based on satellite data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 8339-8357.

- [2] Liu S R, Shen J W, Liu G F, Wu Y Z, Shi K F. Exploring the effect of urban spatial development pattern on carbon dioxide emissions in China: A socioeconomic density distribution approach based on remotely sensed nighttime light data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 96: 101847.
- [3] Yu H J, Zhu Q. Impact and mechanism of digital economy on China's carbon emissions: From the perspective of spatial heterogeneity. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(4): 9642-9657.
- [4] Yu W B, Yang J, Cong N, Ren J Y, Yu H S, Xiao X M, Xia J H. Attribution of urban diurnal thermal environmental change: Importance of global-local effects. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8087-8101.
- [5] Zhou K L, Yang J N, Yang T, Ding T. Spatial and temporal evolution characteristics and spillover effects of China's regional carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116423.
- [6] Zheng J L, Mi Z F, Coffman D M, Milcheva S, Shan Y L, Guan D B, Wang S Y. Regional development and carbon emissions in China. *Energy Economics*, 2019, 81: 25-36.
- [7] Deng Y W, Jiang W G, Wu Z F, Peng K F, Ling Z Y, Li Z, Wang X Y. Assessing and Characterizing Carbon Storage in Wetlands of the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area, China, During 1995—2020. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 6110-6120.
- [8] Yang Z, Gao W J, Han Q, Qi L Y, Cui Y J, Chen Y Q. Digitalization and carbon emissions: How does digital city construction affect china's carbon emission reduction? *Sustainable cities and society*, 2022, 87: 104201.
- [9] Zhang H, Feng C, Zhou X X. Going carbon-neutral in China: Does the low-carbon city pilot policy improve carbon emission efficiency? *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33: 312-329.
- [10] Zhou Y L, Xing B L, Ju W M. Assessing the impact of urban sprawl on net primary productivity of terrestrial ecosystems using a process-based model—a case study in Nanjing, China. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2015, 8(5): 2318-2331.
- [11] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, Gunatilake S K. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, 8(2): 2213-2223.
- [12] He Y L, Ma J M, Zhang C S, Yang H. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in guilin based on FLUS and InVEST models. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1445.
- [13] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura S S A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [14] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [15] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [16] Gao L N, Tao F, Liu R R, Wang Z L, Leng H J, Zhou T. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 85: 104055.
- [17] Zhang S H, Zhong Q L, Cheng D L, Xu C B, Chang Y N, Lin Y Y, Li B Y. Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108642.
- [18] Sun M, Qiu J, Wang N, Ye J H, Li M S. Predicting Land Surface Temperature and Land Cover Changes Based on multisource Remote Sensing Spatio-Temporal Fusion in Hefei, Eastern China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8764-8781.
- [19] Zhang S Q, Yang P, Xia J, Wang W Y, Cai W, Chen N C, Hu S, Luo X G, Li J, Zhan C S. Land use/land cover prediction and analysis of the middle reaches of the Yangtze River under different scenarios. *Science of The Total Environment*, 2022, 833: 155238.
- [20] Wang Z Y, Li X, Mao Y T, Li L, Wang X R, Lin Q. 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. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108499.
- [21] Rong T Q, Zhang P Y, Zhu H R, Jiang L, Li Y Y, Liu Z Y. Spatial correlation evolution and prediction scenario of land use carbon emissions in China. *Ecological Informatics*, 2022, 71: 101802.
- [22] Lin Z Q, Peng S Y. Comparison of multimodel simulations of land use and land cover change considering integrated constraints-A case study of the Fuxian Lake basin. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109254.
- [23] He N, Guo W X, Wang H X, Yu L, Cheng S Y, Huang L T, Jiao X Y, Chen W X, Zhou H T. Temporal and spatial variations in landscape habitat quality under multiple land-use/land-cover scenarios based on the PLUS-InVEST model in the Yangtze River Basin, China. *Land*, 2023, 12(7): 1338.

- [24] Fan L Y, Cai T Y, Wen Q, Han J, Wang S X, Wang J H, Yin C H. Scenario simulation of land use change and carbon storage response in Henan Province, China: 1990—2050. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110660.
- [25] Xu H Q, Wang M Y, Shi T T, Guan H D, Fang C Y, Lin Z L. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). *Ecological indicators*, 2018, 93: 730-740.
- [26] Li C L, Yang J, Zhang Y Q. Evaluation and analysis of the impact of coastal urban impervious surfaces on ecological environments. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8721-8733.
- [27] Xiong Y, Xu W H, Lu N, Huang S D, Wu C, Wang L G, Dai F, Kou W L. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107518.
- [28] Yuan B D, Fu L N, Zou Y A, Zhang S Q, Chen X S, Li F, Deng Z M, Xie Y H. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 126995.
- [29] Jiao Z J, Sun G Y, Zhang A Z, Jia X P, Huang H, Yao Y J. Water benefit-based ecological index for urban ecological environment quality assessments. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7557-7569.
- [30] 秦慧颖. 山东省土地利用情景模拟与生态系统服务预测[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [31] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [32] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [33] Yang X C, Qin Q M, Grussenmeyer P, Koehl M. Urban surface water body detection with suppressed built-up noise based on water indices from Sentinel-2 MSI imagery. *Remote sensing of environment*, 2018, 219: 259-270.
- [34] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例. *生态学报*, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [35] 田一豆, 赵先超. 基于 Markov-PLUS 模型的长株潭城市群建设用地扩张模拟及碳排放响应分析. *生态学报*, 2024, 44(1): 129-142.
- [36] Benra F, De Frutos A, Gaglio M, Álvarez-Garretón C, Felipe-Lucia M, Bonn A. Mapping water ecosystem services: Evaluating InVEST model predictions in data scarce regions. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 138: 104982.
- [37] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, Lei X, Chen Z. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. *Ecological Modelling*, 2017, 345: 30-40.
- [38] 曾庆雨, 孙才志. 黄河流域陆地生态系统碳储量测算及其影响因素. *生态学报*, 2024, 44(13): 5476-5493.
- [39] Zhu L Y, Xing H Q, Hou D Y. Analysis of carbon emissions from land cover change during 2000 to 2020 in Shandong Province, China. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 8021.
- [40] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 84-96.
- [41] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 李克让. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. *生态学报*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [42] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 张梅, 廖启林, 赖力, 卢俊宇. 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*, 2011, 33(10): 1932-1939.
- [43] Delaney M, Brown S, Lugo A E, Torres-Lezama A, Quintero N B. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela. *Biotropica*, 1998, 30(1): 2-11.
- [44] 张春华, 居为民, 王登杰, 王希群, 王昕. 2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值. *生态学报*, 2018, 38(5): 1739-1749.