

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.012

段炼, 卢明深, 蔡耀君, 等. 海上丝绸之路经济带中国沿线省市生态系统碳储量演化分析与预测[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 242-254.

DUAN Lian, LU Mingshen, CAI Yaojun, et al. Analysis and prediction of ecosystem carbon storage evolution in Chinese provinces and cities along the Maritime Silk Road Economic Belt [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 242-254.

海上丝绸之路经济带中国沿线省市生态系统 碳储量演化分析与预测

段炼¹, 卢明深¹, 蔡耀君³, 凌玉荣², 樊童生¹, 李震⁴

(1. 南宁师范大学自然资源与测绘学院, 南宁 530100; 2. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530100;
3. 广西壮族自治区信息中心, 南宁 530000; 4. 广西森林资源与生态环境监测中心, 南宁 530000)

摘要: [目的] 丝绸之路经济带促进沿线各个国家和地区城市经济的快速发展, 引起土地利用的深刻变化, 研究该区域土地利用所引起的碳储量变化, 对优化土地利用格局、实现双碳目标具有重要意义。[方法] 通过耦合 PLUS-InVEST 模型评估与预测 21 世纪海上丝绸之路中国沿线 5 个省市 1980—2030 年的土地利用碳储量情况, 模拟多情景下土地利用碳储量时空特征, 探究土地利用对碳储量影响。[结果] 50 年间区域的耕地显著减少, 建设用地显著增加, 林地能够实现基本的动态平衡; 50 年间该区域的碳储量流失量巨大且流失速度不断加剧, 碳储量减少区域主要位于南部粤港澳大湾区、北部上海、杭州地区和沿海岸线; 通过现状与多情景分析, 未来碳储量减少主要受耕地流失、建设用地激增的影响; 在生态保护情景碳储量有所增加、维持建设用地水平的耕地保护情境下, 碳储量大量减少。自然变化情景同经济加速发展情景碳储量流失相当。[结论] 通过研究碳储量与情景模拟相结合, 可知研究区现处于经济加速发展状态, 碳储量流失加剧是由于耕地流失与城市化的进程加速, 减缓碳储量流失的关键因素是林地总量动态平衡; 基于区域现状与发展地位, 应在现有经济发展现状下, 严格保障耕地和林地保有量, 集约利用现有建设用地, 对草地等生态用地提质, 以维护区域生态碳储量水平。通过研究为实现海上丝绸之路经济与生态发展协调提供参考。

关键词: 海上丝绸之路; 生态碳储量; PLUS-InVEST; 多情景模拟; 土地利用

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)01-0242-13

Analysis and Prediction of Ecosystem Carbon Storage Evolution in Chinese Provinces and Cities Along the Maritime Silk Road Economic Belt

DUAN Lian¹, LU Mingshen¹, CAI Yaojun³, LING Yurong², FAN Tongsheng¹, LI Zhen⁴

(1. College of Natural Resources and Geodesy, Nanning Normal University, Nanning 530100, China; 2. School of Geographic Science and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530100, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Information Center, Nanning 530000, China; 4. Guangxi Forest Resources and Ecological Environment Monitoring Center, Nanning 530000, China)

Abstract: [Objective] The Silk Road Economic Belt facilitated rapid economic development in cities along its route, resulting in significant changes in land use. Investigating the carbon stock variations caused by land use in this region was crucial for optimizing land use patterns and achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals. [Methods] The PLUS-InVEST model was employed to assess and predict the carbon stock situation in five provinces and cities along China's Maritime Silk Road between 1980 and 2030. The model simulated the spatiotemporal characteristics of carbon stock changes under multiple scenarios of land use, aiming to explore the impact of land use on carbon storage. [Results] The research findings indicate that over a span of 50 years, there has been a significant reduction in arable land and a substantial increase in construction land in the region. Forest land has managed to maintain a basic dynamic equilibrium during this

收稿日期: 2023-05-24

修回日期: 2023-06-07

录用日期: 2023-07-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41961062); 广西重点研发计划项目(2019AB16010); 广西新工科研究与实践项目(XGK2022016); 广西中国—东盟(华为)人工智能创新中心补贴项目(2022—A157)

第一作者: 段炼(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事时空数据挖掘与测绘地理信息研究。E-mail: lianduan@nnnu.edu.cn

通信作者: 段炼(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事时空数据挖掘与测绘地理信息研究。E-mail: lianduan@nnnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

period. However, there has been a considerable loss of carbon storage with an accelerating rate, primarily in the southern Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, northern Shanghai, Hangzhou, and along the coastal areas. **[Conclusion]** Through current status and multi-scenario analysis, it is projected that future carbon storage reduction will be primarily influenced by the loss of arable land and the rapid expansion of construction land. In scenarios focused on ecological preservation, there is some increase in carbon storage, while scenarios that maintain the current level of construction land result in a substantial decrease in carbon storage. It is evident that the region is currently experiencing accelerated economic development, with the exacerbation of carbon storage loss attributed to the loss of arable land and the acceleration of urbanization. The key factor in mitigating carbon storage loss lies in maintaining a dynamic balance in the total forest land area. Considering the current economic development status and regional position, it is advisable to rigorously safeguard the quantity of arable and forest land while intensively utilizing existing construction land. Furthermore, enhancing the quality of ecological land, such as grasslands, is recommended to preserve the regional ecological carbon storage level. This research provides valuable insights for achieving a harmonious balance between economic and ecological development in the context of the Maritime Silk Road initiative.

Keywords: The Maritime Silk Road; ecological carbon storage; PLUS-InVEST; multi-scenario simulation; land use

Received: 2023-05-24

Revised: 2023-06-07

Accepted: 2023-07-18

Online(www.cnki.net): 2023-10-26

2020 年 9 月中国明确提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”的目标与愿景,我国自 2006 年起成为全球碳排放量最大的国家,2015 年的《巴黎气候协定》中我国承诺中国将于 2030 年前确保的温室气体排放达到峰值,然而考虑当前实际和发展需求考量下,我国减排压力巨大^[1-3]。陆地生态系统储存了比大气更多的碳,在区域气候调节^[4]和减缓温室效应进程中都起到了重要的作用^[5-6],而土地利用的变化影响全球碳排放、温室气体浓度等多个方面^[7-9],1 t 碳封存的社会价值等于不将 1 t 碳释放到大气中所避免的社会损害。通过管理土地利用方式,如森林恢复和农业替代等植被提质^[10],可将大气中大量二氧化碳进行储存,土地管理者必须在保护、使用或转换用地进行抉择。因此,研究碳储存和储量分布是支持影响这些生态系统服务决策的理想选择^[11],将有助于政府有效地将激励措施用于土地使用者,对区域碳储量进行研究分析,监测区域碳储量的情况,了解土地利用的哪些部分储存的碳最多,政府可以利用它们来确定获得减少森林砍伐和减少碳排放的信用额度的机会,建立和完善碳货币化价值交易市场^[12],通过政策调节,对区域保障碳库发挥调节作用^[13]、平衡生态与经济发展政策和城市规划具有积极意义^[14-15]。

评估碳储量研究方法较多,传统的评估方法有抽样调查方法^[16-17]、生物量法、蓄积量法^[18]等,但这些方法对大尺度上碳储量评估以及多时空变化研究存在较大难度^[19],相关研究不断注重采用模型估算^[20]和模型反演^[21]的方法来评估碳储量,而土地利用的变化通过改变该生态系统的功能与组分,对植被、土

壤等固碳能力产生作用,从而对区域碳储量水平产生影响^[20]。已有研究^[22]指出,分析土地利用对碳储量变化造成的影响,对推动区域可持续发展、提高资源高效利用有积极意义。InVEST 模型在空间规划、生态环境管理研究和决策中得到广泛认可与应用^[23],InVEST 的碳储量评估模型具有使用简单、参数灵活、运行速度快等特点,以土地利用空间变化为依据,计算土地利用碳储量。PLUS 模型作为一种新开发的模型,能够精确模拟土地利用变化,还可以实现多目标、多情景下的土地利用变化,在已有研究^[24]中 PLUS 模型的质量系数 FoM 和 Kappa 系数优于 FLUS 模型^[25]和 CLUE-S 模型^[26],PLUS 模型在空间拟合效果更优。目前利用 InVEST 和 PLUS 评估和预测大尺度范围碳储量机器时空变化已有丰富成果,包括国家边界带^[27-28]、流域^[19,26]、城市群^[25]、省市^[29-30]等区域的相关研究,能够在在大尺度下的估算碳储量时空分布。

目前针对丝绸之路经济带,特别是海上丝绸之路建设所造成的碳储量变化研究还较少,21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市隶属中国沿海地区,由于政策和经济交流活动,人类活动对土地利用和碳储量格局产生了巨大的影响,生态系统碳储功能水平影响重大。研究以中国沿海地区 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市为研究区,采用 1980—2020 年土地利用数据和相关驱动因素数据,分析 50 年的土地利用情况。利用 PLUS-InVEST 模型预测 2030 年土地利用空间分布,估算区域碳储量,并进行多情景模拟,探究该区域碳储量的变化及其发展的趋势,为优化土地利用

格局、提高生态系统固碳服务能力,为实现“双碳”目标和可持续发展提供参考。

1 研究区域与数据概况

1.1 研究区域

丝绸之路经济带自开通以来便成为互通东西方经济贸易和实现文化交流的重要渠道,带动沿线诸多国家和地区城市和经济快速发展的速度。本研究以 21 世纪海上丝绸之路中国的沿线省市为研究区,包括上海、福建、浙江、海南和广东 5 个省市(图 1)。开展土地利用碳储量研究。21 世纪海上丝绸之路是习近平总书记于 2013 年访问东盟时提出的战略构想,旨在促进海上丝绸之路沿线各个国家经济战略交流合作、构建各国优势互补的重要平台,21 世纪海上丝绸之路途经中国上海、福州、天津、宁波等城市,境外途径河内、吉隆坡、雅加达等相关沿海国家和城市,在区域经济、土地利用和生态环境具有广泛而深远的影响。其中由香港、澳门、广东省广州、深圳、珠海、佛山、肇庆、惠州、东莞、中山、江门等 9 个城市组成的粤港澳大湾区是目前中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一。

1.2 数据概况

本研究中所采用的数据包含土地利用基础数据和自然条件、社会经济因素和交通因素等驱动因素数据,其中土地利用数据由分辨率为 30 m 的 Landsat 卫星遥感影像解译,采用 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期间隔为 10 年的土地利用现状数据,其他数据和相关描述参见表 1。根据研究区域和模型对数据要求,保证所有数据的行列数保持一致,以最低分

辨率数据为基准,进行坐标统一和分辨率一致^[19]。碳密度数据集参考 ZHU 等^[27]的研究和 2010 年中国陆地生态系统碳密度数据^[31]。2010 年中国陆地生态系统碳密度数据从国家生态系统科学数据中心(<https://www.cern.ac.cn>)获取,并结合 ZHU 等^[27]的研究数据修正,得到 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市碳密度(表 2)。

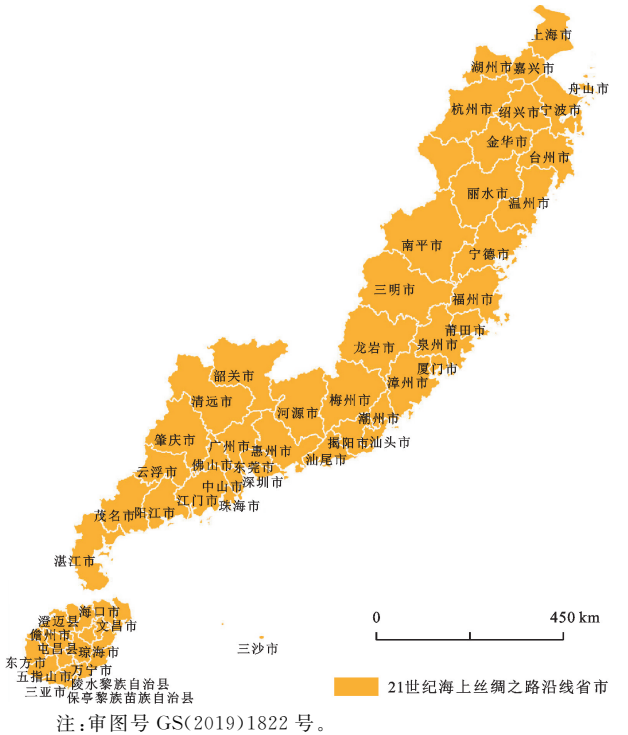


图 1 21 世纪海上丝绸之路沿线地理区位
Fig. 1 Geographical location along the 21st century Maritime Silk Road

表 1 土地利用驱动数据及数据来源

Table 1 Land use driving data and data sources

数据类型	数据名称	分辨率/m	描述	数据来源
基础数据	土地利用数据	30	根据数据源的用地类别将地类分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 大类用地	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	土壤类型	1 000	世界土壤数据库	HWSD 世界土壤数据库(http://westdc.westgis.ac.cn/)
自然条件	年平均气温	1 000	站点测量数据普通克里金插值计算	中国气象数据网(http://www.nmic.cn)
	年降水量	1 000	站点测量数据普通克里金插值计算	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	DEM	30	ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	坡度	30	基于 DEM 提取	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	土地利用限制区域	30	土地利用限制区域、采用欧式距离计算距离限制区域的距离	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
社会经济因素	人口	1 000	人口密度分布	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	GDP	1 000	GDP 数据分布	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn)
交通因素	邻近城市驻地距离	30	采用欧式距离计算距离城市驻地距离	OpenstreetMap(http://www.openstreetmap.org/)
	道路数据	30	采用欧式距离计算距离高速公路距离、距离主干道距离、距离次要道路距离、距离三级道路距离,距离铁路距离	高德地图 POI (https://lbs.amap.com/)
	交通站点数据	30	采用欧式距离计算距离高铁站距离、距离地铁站距离	

表 2 21 世纪海上丝绸沿线省市各土地利用类型碳密度
Table 2 Carbon density of land use types in provinces and cities
along the 21st Century Maritime Silk Road t/km²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度
耕地	15.370	3.075	86.060
林地	47.085	10.840	108.345
草地	3.960	20.530	134.900
水域	7.605	9.350	0
建设用地	6.075	3.965	0
未利用地	1.055	0	0

2 研究方法

2.1 PLUS 模型

PLUS 模型是一个基于栅格数据可用于斑块尺度挖掘土地利用变化模拟的元胞自动机(CA)模型,具有高模拟精度和真实度量景观格局的土地利用模拟模型^[32]。PLUS 模型主要用地扩张分析策略 LEAS(land expansion analysis strategy)的转换规则挖掘模块和基于多类随机斑块种子机制的 CARS(CA based on multi-type random patch seeds)生成土地利用斑块模块组成,同时可借助线性回归方法和 Markov 模型预测出未来土地利用需求。LEAS 模块采用随机森林分类算法(RFC)挖掘土地利用类型的变化概率和惯性概率,分析驱动力与土地利用之间的关系,从而计算出土地利用初期向末期扩张的部分;CARS 模块基于多类随机斑块种子的 CA 模型,通过一个自适应系数影响局部土地利用竞争和驱动土地利用数量变化来达到未来土地利用需求,模拟复杂情景的空间变化^[32]。

2.2 InVEST 模型

InVEST 模型是由美国自然资本项目开发用于评估多种生态系统服务功能的模型,被广泛用于生态服务功能和风险评估^[33]。通过 InVEST 模型的 Carbon Storage and Sequestration 模块对碳储量评估,该模型将陆地生态系统划分为地上碳储量(C_a , t/hm²)、地下碳储量(C_b , t/hm²)、土壤碳储量(C_s , t/hm²)、死亡有机碳储量(C_d , t/hm²) 4 个碳库,并碳库的平均碳密度结合土地利用类型数据计算出区域总碳储量 C (t/hm²)^[29]。

$$C = C_a + C_b + C_s + C_d \tag{1}$$

2.3 多情景变化分析

自然变化情景,在现有趋势下,只考虑自然状态与人为因素下所导致的土地利用变化,忽略政策等可

能因素的作用。

耕地保护情景,该情景考虑保障粮食来源的耕地,减少和限制耕地向其他地类转移。以自然发展情景为基础,生态保护情景的建设用地增长减缓,并保障林地、草地和水域的生态用地面积。

经济加速发展情景,依据城市发展需求的建成区面积扩张速度加快,增加各地类向建设用地和耕地转换的概率。根据情景需求构建 2030 年 4 种情景下土地利用转换成本矩阵,该转换成本矩阵由 1 和 0 表征待转变的土地利用类型是否被限制转为其他地类(表 3)。

3 结果与分析

3.1 模型验证与预测

验证对预测的可靠性基于广泛用于验证过土地利用预测的一致性指数 Kappa 系数,当系数取值在 0.8 以上时,满足该研究对准确性的要求。

本研究以 2010 年 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市地区的土地利用数据和驱动因素数据,基于 2010 年土地利用和驱动数据,利用 PLUS 模型预测出 2020 年土地利用,采用线性回归与 Markov 混淆矩阵将预测出 2020 年土地利用与实际 2020 年土地利用进行验证,验证结果 Kappa 系数为 0.886,模型总体精度 93.48%,精度满足研究要求。基于已有模型验证精度,利用 PLUS 模型 CARS 模块,设定限制转换因素与转移概率矩阵参数。

通过 2020 年实际土地利用数据预测得到 2030 土地利用情况,并经 Invest 的 Carbon Storage and Sequestration 模块通过设定碳密度参数计算出 2030 年区域的碳储量。

3.2 土地利用变化分析

21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市的土地利用各类型分布的特性具有显著不同(图 2)。

建设用地主要分布在海岸沿线地区并向内陆呈扩散性分布,在内陆呈零星的点状分布,建设用地主要集中在沿海一侧;农田的分布具有规则,围绕建设用地向外扩散,与建设用用地面积呈正相关关系,即建设用地越大,周边农用地越多,建设用地呈带状分布的相对建设用地呈中心分布的耕地面积更大,可以看出城市的发展模式在农耕经济和市场经济上存在的偏重;林地主要集中与北部的浙江,南部的广东、海南,中部的福建地区林地与草地等其他用地交错聚集不明显,研究区最北部的林地和草地面积最少、耕地类型面积居主导。

表 3 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市多情景模拟下土地利用转换成本矩阵

Table 3 Land use conversion cost matrix under multiple scenarios simulation of provinces and cities along the 21st century maritime silk road in China

情景	用地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然增长情景	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	1	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
耕地保护情景	耕地	1	0	0	0	0	0
	林地	1	1	1	0	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	0	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
生态保护情景	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	0	1	0	0	0	0
	草地	0	1	1	1	0	0
	水域	0	0	0	1	0	0
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
经济加速发展情景	耕地	1	0	0	0	1	0
	林地	1	1	1	0	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	0	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	0	1	1

1980—2030 年 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市各土地利用类型占比、变化趋势和情况见表 4 和图 3。由图 3 可知,林地和耕地是该区域最主要的土地利用类型,约占总用面积的 81%,其中耕地约占 20%,未利用地占比最小;建设用地总量占比增加显著,由 2.74%增加到 8.26%,耕地总量占比减少显著,耕地从 26.07%下降到 20.92%,林地下降 0.27%,但林地总量占比基本保持不变,保持在 60.00%,草地、未利用占比分别下降 1.10%和 0.01%,水域占比增加 0.46%。从表 4 土地利用情况分析,50 年间,耕地减少 22 846 km²,建设用地增加 25 118 km²,林地增加 2 461 km²,草地减少 41 801 km²,水域增加 2 174 km²,未利用地减少 58 km²。由图 3 可知,耕地总量减少和建设用地总量增加的趋势在加剧,林地和草地的总量自 2000 年以后趋于平稳、未利用地总量呈减

少的趋势、水域面积总量呈增加的趋势。可以看出,21 世纪海上丝绸之路对林地总量的维持保护效果较好,但建设用地的快速扩张和耕地的快速流失,是这一地区的显著特点。

1980—2030 年各用地类型间发生相互转换(表 5),在 50 年间各期间内,耕地在各研究期间均为净减少,年均减少的净变化率高于 170%,总体呈现加剧流失的趋势,建设用地为净增加的土地利用类型,平均增加的净变化率高于 150%,总体呈现快速增加的趋势,但耕地减少和建设用地增加的净变化率趋势在 2010 年后下降。各年的土地利用转出中,耕地的转出和净转出面积最大,均大于 1 700 km²,建设用地的转入和净转入面积最多,均大于 1 500 km²;林地和草地净变化率呈现大幅度变化,其他地类净变化率变化相对来说并不大。

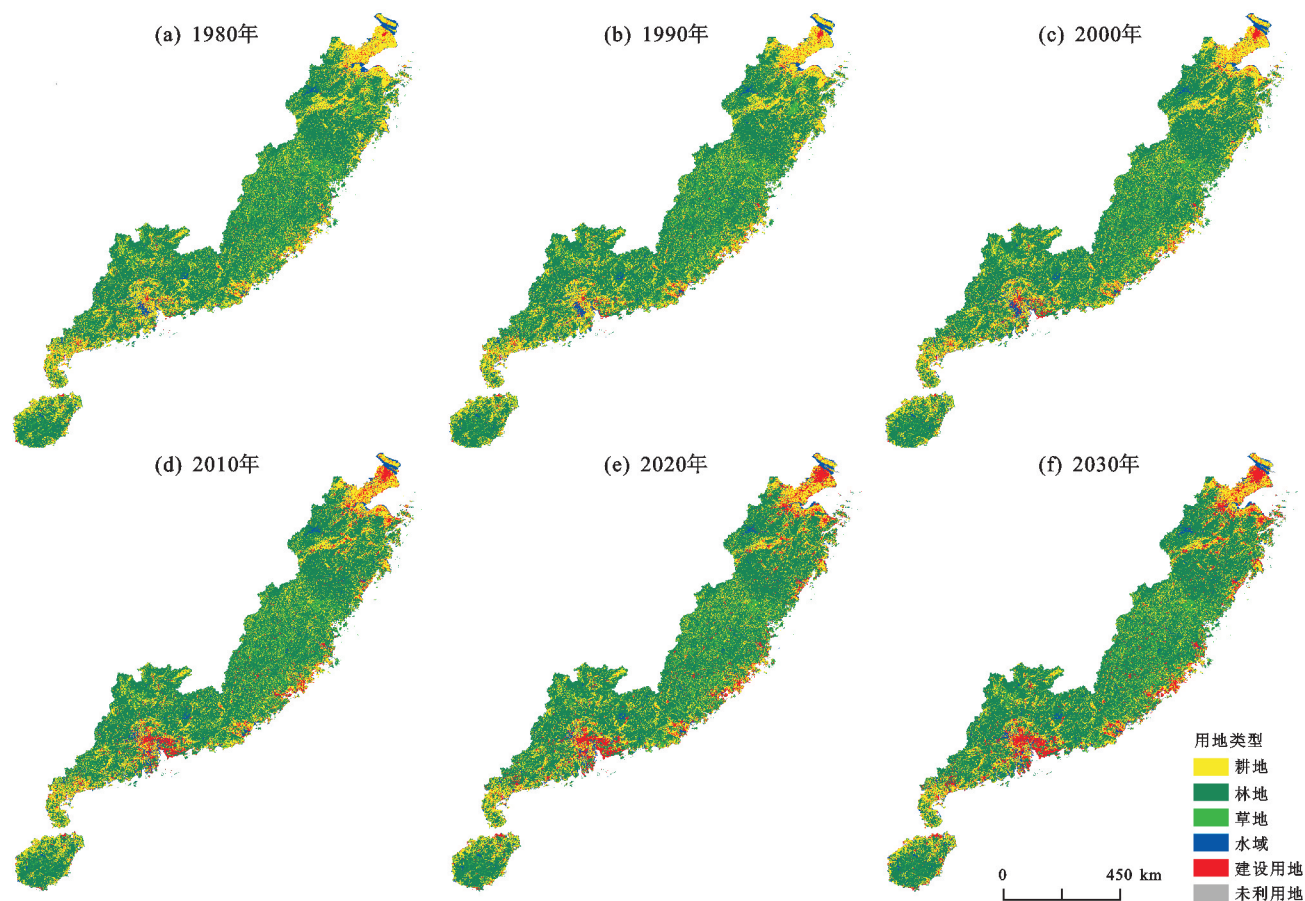


图 2 1980—2050 年沿海地区土地利用类型的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use types in coastal areas between 1980 and 2050

表 4 1980—2030 年 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市土地利用情况

Table 4 Land use status of provinces and cities along the 21st Century Maritime Silk Road in China from 1980 to 2030

年份	10 ³ km ²					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980	117.826	271.284	35.414	14.596	12.404	0.461
1990	116.097	271.335	35.808	14.697	13.982	0.442
2000	111.824	276.975	31.116	15.286	16.776	0.423
2010	104.520	275.356	30.117	15.824	26.337	0.358
2020	99.454	274.724	30.534	15.767	33.038	0.515
2030	94.980	273.745	30.613	16.769	37.522	0.403

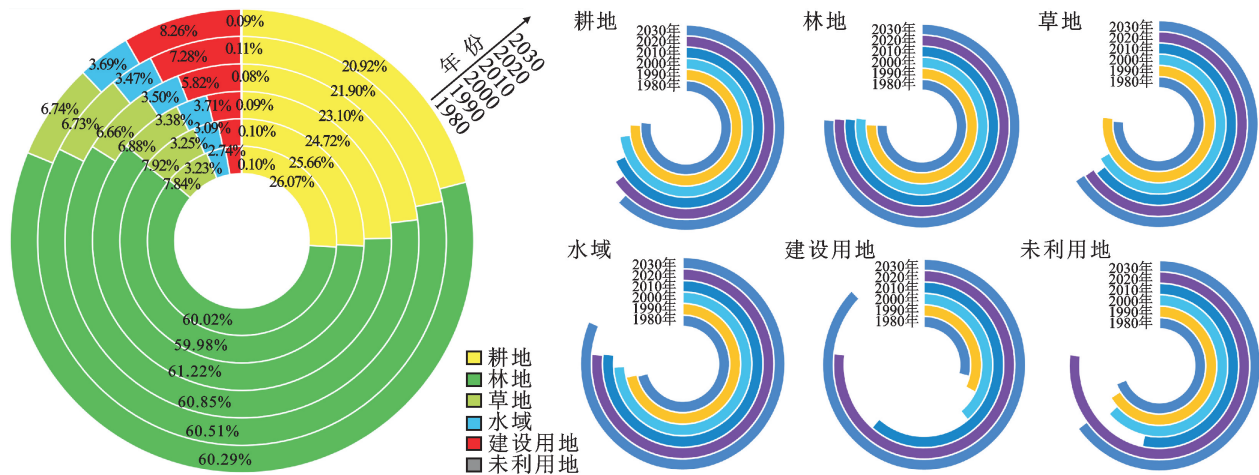


图 3 1980—2020 年 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市土地利用结构及变化

Fig. 3 Land use structure and changes in provinces and cities along the 21st Century Maritime Silk Road in China from 1980 to 2020

表 5 1980—2020 年海上丝绸之路中国沿线省市用地面积转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of land area of provinces and cities along the Maritime Silk Road in China from 1980 to 2020

年份	土地类型	耕地/ km ²	林地/ km ²	草地/ km ²	水域/ km ²	建设用地/ km ²	其他用地/ km ²	转出/ km ²	转入/ km ²	净变化/ km ²	年均净变化率/ %
1980	耕地	115 426	514	23	627	1 234	2	2 400	624	−177 6	−177.6
	林地	108	270 556	506	41	60	12	727	774	47	4.7
	草地	5	156	35 243	1	9	0	171	565	394	39.4
1990	水域	502	72	33	13 699	284	4	895	679	−216	−21.6
	建设用地	6	3	0	8	12 387	0	17	1 587	1 570	157
	未利用地	3	29	3	2	0	424	37	18	−19	−1.9
1990	耕地	111 190	1 708	60	872	2 266	1	4 907	634	−4273	−427.3
	林地	368	268 708	1 832	28	372	27	2 627	8 266	5 639	563.9
	草地	71	6 414	29 193	54	59	17	6 615	1 923	−4 692	−469.2
2000	水域	168	35	17	14 317	159	0	379	959	580	58
	建设用地	26	59	2	5	13 890	0	92	2 857	2 765	276.5
	未利用地	1	50	12	0	1	378	64	45	−19	−1.9
2000	耕地	102 030	1 244	98	1 359	7 090	1	9 792	2 479	−7 313	−731.3
	林地	1 074	272 507	744	384	2 240	22	4 464	2 840	−1 624	−162.4
	草地	164	1 263	29 211	88	387	3	1 905	900	−1 005	−100.5
2010	水域	857	130	39	13 477	758	1	1 785	2 291	506	50.6
	建设用地	355	190	11	441	15 779	0	997	10 498	9 501	950.1
	未利用地	29	13	8	19	23	331	92	27	−65	−6.5
2010	耕地	94 135	3 828	613	711	5 224	5	10 381	5 211	−5 170	−517
	林地	2 780	268 772	1 152	527	2 076	15	6 550	5 789	−761	−76.1
	草地	342	1 092	28 251	96	323	4	1 857	2 112	255	25.5
2020	水域	716	358	139	13 553	903	138	2 254	1 692	−562	−56.2
	建设用地	1 369	495	185	345	23 920	16	2 410	8 548	6 138	613.8
	未利用地	4	16	23	13	22	280	78	178	100	10.0
2020	耕地	93 763	4 379	30	45	1 236	1	5 691	1217	−4 474	−447.4
	林地	1 214	269 278	49	942	3 226	15	5 446	4 467	−979	−97.9
	草地	0	0	30 534	0	0	0	0	79	79	7.90
2030	水域	0	0	0	15 767	0	0	0	1 002	1 002	100.2
	建设用地	0	0	0	0	33 038	0	0	4 484	4 484	448.4
	未利用地	3	88	0	15	22	387	128	16	−112	−11.2

为了清晰地描述土地利用变化的流向和多样性,用桑基图定量地表达 1980—2030 年各个时期间土地利用类型之间的流向转化转变过程和总量分布(图 4)。耕地快速减少,其中以流向建设用地和林地为主;而林地大量也流向耕地,耕地和林地之间、林地和草地之间有着明显的相互流向关系;耕地、林地大量流向建设用地,使得建设用地面积快速增加。

结果表明,研究区土地流向过程主要为耕地、林地流向建设用地;耕地和林地存在明显的相互转化关系,说明耕地的土地利用方式存在不合理性,存在耕地在短期内用于种植林木的可能;耕地大量减少,建设用地增加显著,而其他用地变化并不明显,说明建设用地的增加是通过耕地流向建设用地和耕地流向其他用地并最终流向建设用地,使得建设用地面积得到的增加。

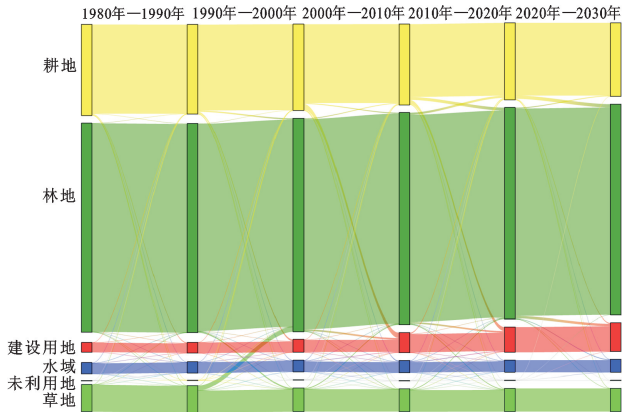


图 4 1980—2030 年海上丝绸之路地区土地利用转移

Fig. 4 Land use transfer in the Maritime Silk Road region from 1980 to 2030

3.3 碳储量变化分析

利用 InVEST 模型计算模拟出 1980—2030 年中国 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市地区的碳储量

(图 5)。结合土地利用情况分析,碳储量低的地区主要分布在沿海城市及其周边,集中在建设用地和耕地的土地利用类型上;1980—2030 年,碳储量在整体空间上变化并不大,碳储存损失的主要变化都集中在沿海岸线地区的大城市群,主要转变是从高碳密度的土地向低碳密度的土地转变。2000—2020 年,碳储量的变化在整个研究期间最为明显,主要集中在北部上海杭州地区和南部粤港澳大湾区范围内(图 5)。

1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年、2030 年 21 世纪海上丝绸之路沿线地区的总碳储量

分别为 63.44×10^8 , 63.34×10^8 , 63.13×10^8 , 62.04×10^8 , 61.54×10^8 , 60.98×10^8 t。在过去的 40 年里,该地区的碳储量明显减少,累计损失 2.46×10^8 t。碳储量大范围减少的区域主要位于南部粤港澳大湾区、北部上海杭州区域和沿海岸线区域,其他区域也有较小范围的变化,集中体现于耕地和建设用地扩张的区域。在不同时期,碳储量的变化区域的趋势不尽相同,1990—2010 年、2020—2030 年碳储量的减少区域数量及范围显著增多,1980—1990 年和 2010—2020 年碳储量的减少区域数量及范围相对减少(图 6)。

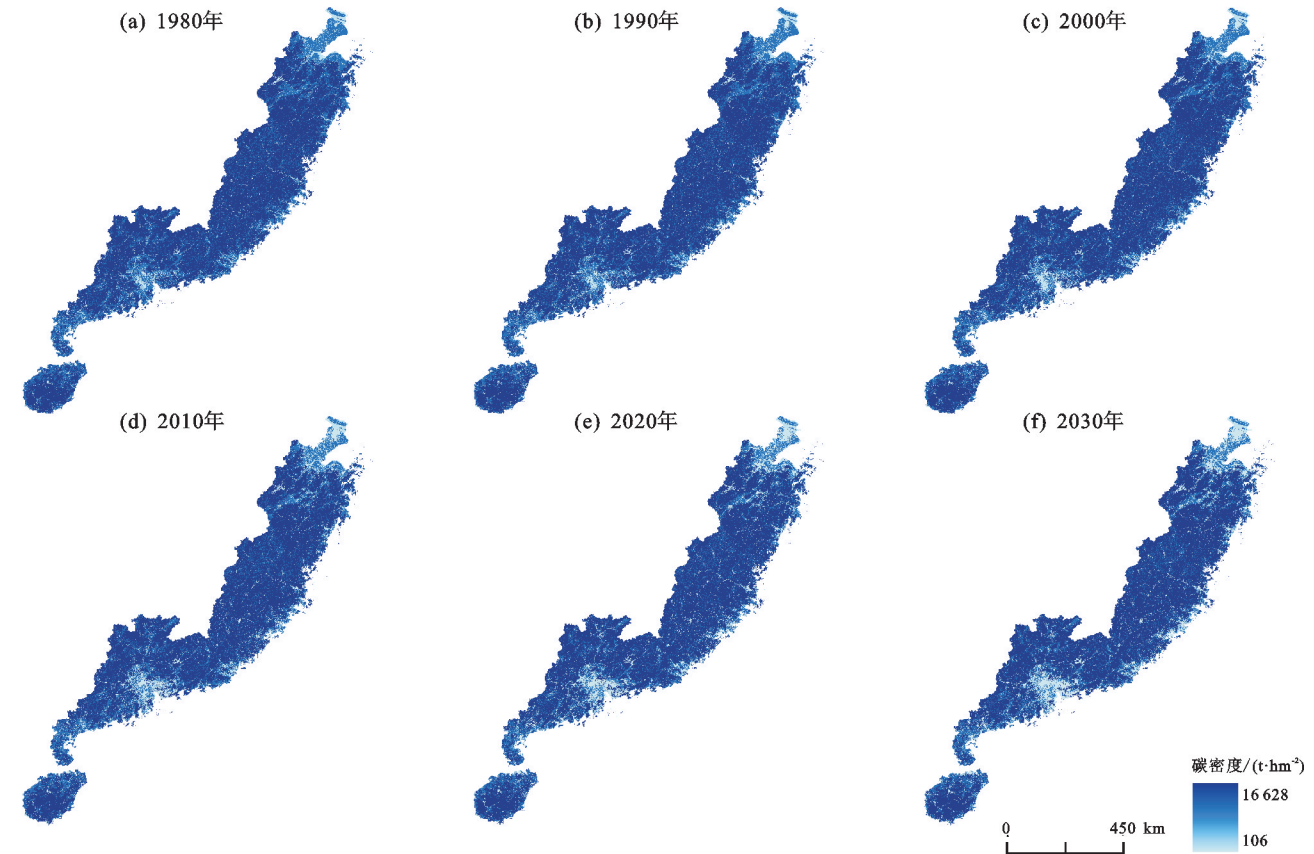


图 5 1980—2030 年 21 世纪海上丝绸之路地区碳储量总量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of total carbon storage in the 21st century Maritime Silk Road region from 1980 to 2030

3.4 碳储量对土地利用变化响应

土地利用情况是分析碳储量的基础,它通过直接影响陆地生态系统结构及分布情况,从而改变碳储量及其分布^[20],研究碳储量对土地利用变化的响应,对区域土地利用调控具有积极意义^[21]。结合前述分析,由表 6 可知,不同土地利用类型碳储量差异非常明显。1980—2030 年,耕地和草地面积减少,其碳储量分别减少 2.39×10^8 , 0.7×10^8 t,林地、水域、建设用地有所增加,其碳储量分别增加 0.49×10^8 , 0.03×10^8 , 0.25×10^8 t。结合区域土地利用结构可知,林地总量占比变化不大,而碳储量增加显著;未利用地减少,碳储

量减少;水域面积增加,碳储量有所增加;建设用地增加显著,碳储量显著减少。由此可知,耕地的大量流失才是导致研究区域碳储量大量减少的原因。

3.5 多情景模拟下碳储量变化

利用 PLUS 模型结合 Markov 模型,通过土地利用转换成本矩阵,预测得到 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市地区 2030 年自然变化增长、耕地保护、生态保护和经济加速发展 4 情景下的土地利用状况,并应用 InVEST 模型模拟了未来 2030 年的 4 种情景下碳储量空间分布(图 7),模拟得到的土地利用和碳储量情况统计见表 7。

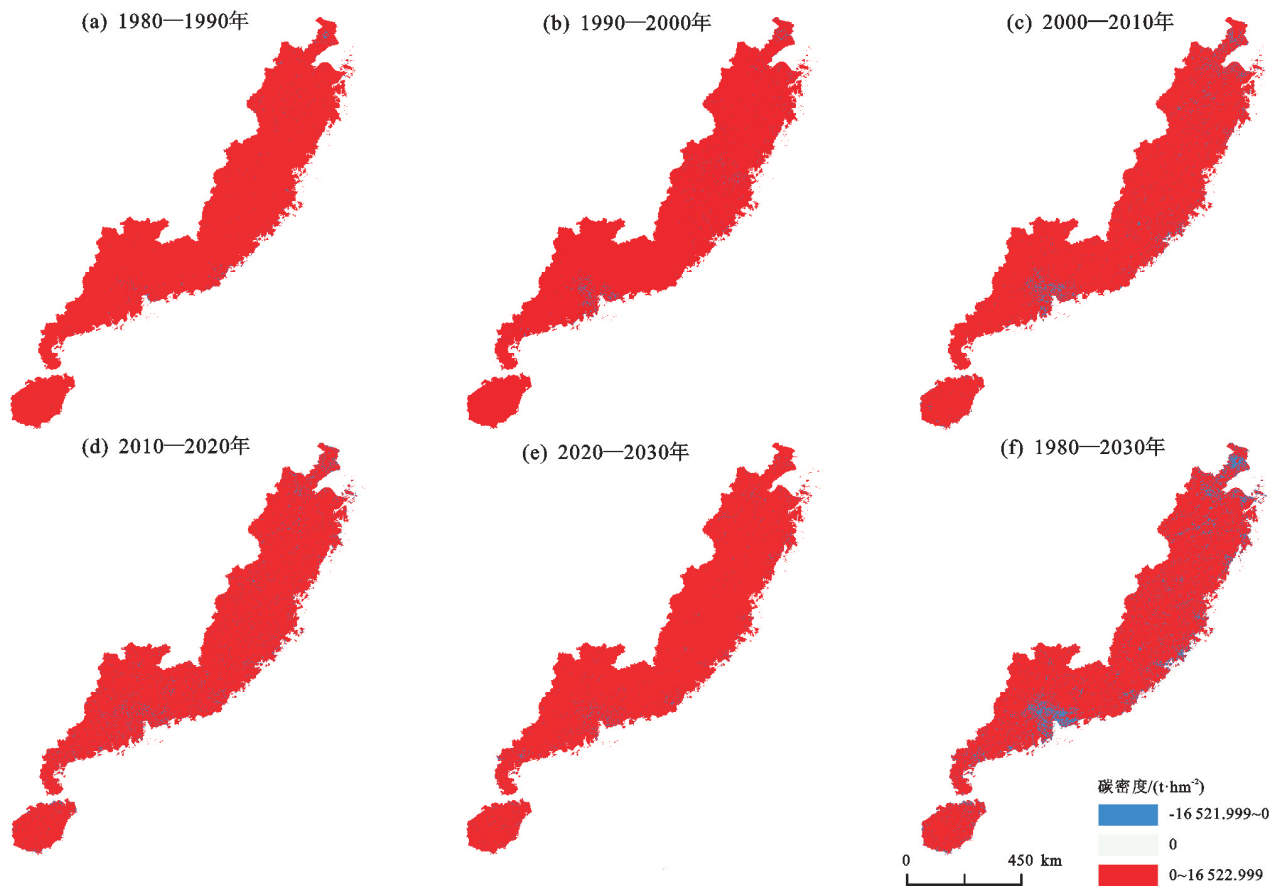


图 6 1980—2030 年 21 世纪海上丝绸之路地区碳储量变化的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of carbon storage changes in the 21st century Maritime Silk Road region from 1980 to 2030

表 6 1980—2030 年 21 世纪海上丝绸之路地区碳储量变化的空间分布 t

Table 6 Changes in carbon storage along the 21st century Maritime Silk Road region in China between 1980 and 2030

年份	土地利用类型						总碳储量 10 ⁸ t
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他用地	
1980	12.314	45.109	5.645	0.248	0.125	0	63.440
1990	12.133	45.118	5.707	0.249	0.141	0	63.349
2000	11.687	46.055	4.960	0.259	0.169	0	63.130
2010	10.923	45.786	4.800	0.268	0.265	0	62.043
2020	10.394	45.681	4.867	0.267	0.332	0.001	61.542
2030	9.926	45.518	4.879	0.284	0.377	0	60.986

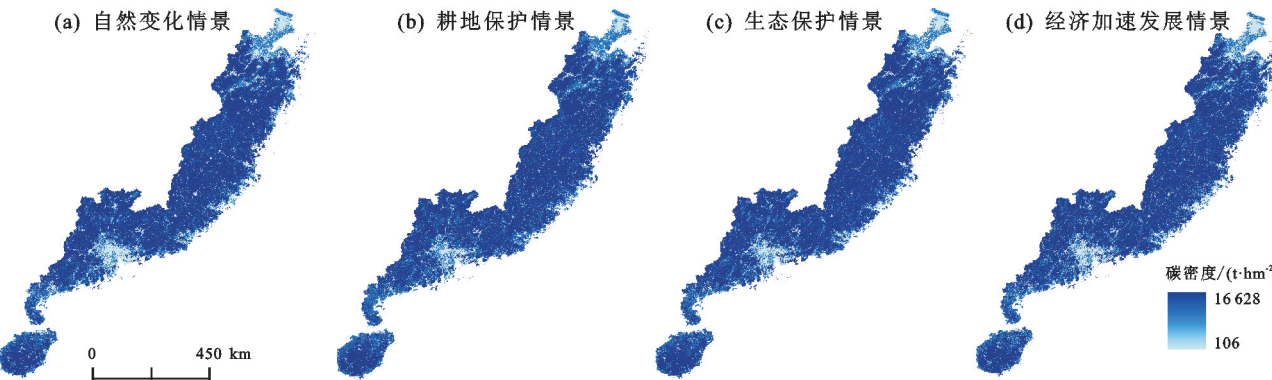


图 7 多情景模拟下的碳储量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of carbon storage under multi scenario simulation

表 7 2020—2030 年不同情景下土地利用数量及碳储量

Table 7 Land use quantity and carbon storage under different scenarios from 2020 to 2030

情景	类型	土地利用类型						碳储量 变化
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2020 年	面积/10 ³ km ²	99.454	274.724	30.534	15.767	33.038	0.515	
现状	碳储量/10 ⁸ t	10.394	45.681	4.867	0.267	0.332	0.001	
2030 年	面积/10 ³ km ²	94.980	273.745	30.613	16.769	37.522	0.403	-0.556
自然变化情景	碳储量/10 ⁸ t	9.926	45.518	4.879	0.284	0.377	0	
2030 年	面积/10 ³ km ²	100.090	273.745	30.613	15.771	33.379	0.434	-0.080
耕地保护情景	碳储量/10 ⁸ t	10.460	45.518	4.879	0.267	0.335	0	
2030 年	面积/10 ³ km ²	94.980	298.211	10.363	15.912	34.201	0.365	0.237
生态保护情景	碳储量/10 ⁸ t	9.926	49.587	1.652	0.270	0.344	0	
2030 年	面积/10 ³ km ²	95.706	273.745	30.613	15.767	37.757	0.444	-0.495
经济加速发展情景	碳储量/10 ⁸ t	10.002	45.518	4.879	0.267	0.379	0	

自然变化情景下,与 2020 年相比,2030 年各类土地利用类型面积变化情况的差异与过去 1980—2020 年各时期各土地利用类型变化的总体相似。2030 年该区域的耕地面积减少显著,草地、水域和建设用地的面积均有所增加,其中建设用地的增加更为突出,耕地流向建设用地仍将是土地流向的主要方向。在该情景下碳储量总量减少 0.55×10^8 t,耕地、林地和未利用土地的累积碳储量将分别减少 0.46×10^8 , 0.16×10^8 , 11.87×10^3 t。草地、水域和建设用地的累积碳储量将分别增加 0.01×10^8 , 6.78×10^3 , 3.42×10^5 t,耕地减少是碳储量减少的主导因素。在空间上,碳储量的空间分布格局仍将保持南北低,沿海侧低,沿建设用地呈扩散的趋势。

耕地保护情景下,与 2020 年相比,该情景下模拟出的 2030 年耕地面积减少量相对自然增长情景有所增加,耕地和草地的变化与自然变化情景相同,建设用地相对自然变化情景有所减少,耕地的增加来自于水域和未利用地的转变。由此可知,实施耕地保护限制建设用地的扩张,能减少对耕地的需求和占用,没有呈现出同自然增长情景耕地减少的剧烈状况。在该情景下,同 2020 年相比,2030 年碳储量减少 0.08×10^8 t,相对自然变化情景碳储量减少的情况有所改善,林地减少成为该情境下碳储量减少的主要因素。在空间分布上,碳储量空间分布格局同自然变化情景,但碳储量最低值的区域明显有所减少。

生态保护情景下,同自然变化情景相比,林地增加显著,水域面积有所增加,草地减少显著,而林地的大量增加主要来自耕地和草地的转移。在该情景下,同 2020 年相比碳储量总量增加 0.23×10^8 t。林地是该情景下累积碳储量增加的主要因素,可以说明实施生态保护,增加林地、水域等生态要素,将有助于碳封存在陆地生态系统,但在现有条件下,为实现生态保护情景,且保障的耕地保有量和建设用地需求,只能

通过将大量草地和未利用地提质改造成林地,同时增加水域面积。在空间分布上,与自然变化情景格局相同,但同自然变化情景相比,碳密度高值区域在自然变化情景的基础上增多。

经济加速发展情景下,与自然变化情景相比,建设用地增加更为显著,但耕地减少量却少于自然变化情景,建设用地的在增加,通过耕地以外的其他地类转换。该情景下土地利用累积碳储量减少 0.48×10^8 t,相对自然变化情景碳储量的减少量相对更少,但在总量变化差异上相差并不大。在空间分布上,与自然变化情景高度相同。通过对比分析可知,尽管设定经济高快速发展情景限制,加快建设用地扩张,但仍与自然变化情景相差不大,说明在自然变化情景下,该区域的发展已经呈现出同城市经济高速发展状态。

4 讨论

21 世纪海上丝绸之路的中国沿线省市涉及范围广,通过传统评估方法来评估如此大尺度的碳储量难度极大,而已有学者^[13,15,28-30]通过研究与土地利用预测模拟 PLUS 模型和碳储量分析模型 Invest 结合,可以较为准确模拟与预测大尺度区域碳储量的变化,研究得出的碳储量试验数据与结果整体符合同区域研究研究情况且符合实际预期。陆地生态系统碳储量的变化是一个渐进的过程,且在长时间预测中可能于出现更大的偏差,如 2020 年后受新冠疫情影响,人类活动相对减缓,土地利用变化的强度会有所减缓,而模型并没能考虑这一因素。因此,本研究仅估算到 2030 年的土地变化及其碳储量动态,所估算的 21 世纪海上丝绸之路中国沿线省市地区碳储量是一个考虑在当前发展情况下的变化趋势。

丝绸之路经济带互通东西方经济贸易和实现文化交流,带动沿线诸多国家和地区城市和经济快的速发展,21 世纪海上丝绸之路的中国沿线省市由于政

策和频繁的经济交流活动,人类活动对土地利用强度增大,使得碳库碳储量发生深刻变化。通过对土地利用和碳储量分析与模拟,研究区域内林地、耕地的碳储量总量最大,碳储量流失的原因是耕地的流失与建设用地的增加,实际流向为耕地转化为林地与建设用地,耕地和草地主要维持林地的总量,其他地类总量变化不大,可知主要是耕地的各种流出最终流向建设用地导致碳库的变化,因此保护耕地是维护区域碳储量水平的重要一环。如果维持面积总量最大的耕地和林地数量,同时满足现状建设用地的发展需求,通过林地和耕地外的其他地类补充并不实际。

研究区域作为我国海上丝绸之路开放窗口,因生态保护而废弃经济发展机遇并不可取,应根据实际情况平衡好发展与生态需求,如何通过政策等措施调节,对土地合理利用与规划,推动区域经济与碳储生态能力的可持续,保障碳库发挥调节作用。海上丝绸之路只是“一带一路”中的一个重要内容,丝绸之路经济带覆盖了世界多个国家和地区,在生态和经济发展中也会遇到同研究区类似的问题,如何结合实际协调当地生态和经济发展,是未来“一带一路经济发展”研究和实践应注重问题。

5 结 论

依据模型预测,至 2030 年研究区在土地利用的总量上,地类占比格局为耕地 20.92%、林地 60.02%、草地 6.74%、水域 3.69%、建设用地 8.26%、未利用地 0.09%;1980—2030 年,耕地减少量和建设用地增加量显著,林地总量变化不大,林地增加和减少量基本能维持平衡。

在空间上,研究区域碳储量呈现南北高与沿海低,中部与内陆高的分布格局,碳储量减少的区域主要位于南部的粤港澳大湾区、北部上海杭州地区及沿海岸线的城市,结合土地利用变化,表现于耕地和建设用地快速转化的区域。碳储量在时间上,至 2030 年碳储量总量为 $60.98 \times 10^8 \text{ t}$,较 2020 年减少 $0.55 \times 10^8 \text{ t}$,50 年间碳储量流失 $2.45 \times 10^8 \text{ t}$,研究期间该区域的碳储量流失量巨大且流失速度不断加剧,依据 2000—2030 年每 10 年的流失趋势,在 2030 年至未来很长一段时间内该区域碳储量流失速度仍将加快。

通过分析多种情景模拟下的 2030 年碳储量情况的得出,耕地保护情景下,碳储量流失相对自然情景加剧,在保持建设用地不变的情况下,为保证耕地数量,将消耗更多林地等用地为耕地,导致碳储量流失加剧;生态保护情景下,林地面积增加显著增加,建设用地扩张量较自然变化情景更少,碳储量有所增加。在经济加速发展情景下,尽管通过转换限制加速建设

用地扩张,但该情景碳流失量仍与自然变化情景碳流失相差不大。

研究区的土地利用的变化深刻影响研究区域碳储量,碳储量大量流失是因耕地大量的减少和建设用地快速增加,体现的是城市化进程的加速;林地总量变化不大,基本能维持平衡,否则碳储量减少量将更为巨大,碳储量稳定得益于该区域对于林地的保护和用地转化为林地。按照现有趋势模拟,该区域的碳储量自然变化情景与经济加速发展情景流失总量相当,流失水平基本等同于经济加速发展状态,说明区域当前的整体的发展水平已经处于高速发展态势。基于研究区域现状与发展地位,应在现有经济发展现状下,严格保障耕地和林地保有量,同时限制城市快速扩张,充分利用节约集约利用好当前建设用地,对草地等生态用地提质,减缓因土地利用粗放而导致的碳储量流失,逐步提高土地碳固能力,以维护区域生态功能的碳储量水平。

参考文献:

- [1] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程:在气候雄心峰会上的讲话[J].一带一路报道(中英文),2021(1):20-21.
XI J P. Building on past achievements and launching a new journey for global climate actions [J]. Report on the Belt and Road (Chinese and English), 2021(1):20-21.
- [2] CHEN B, CHEN F, CIAIS P, et al. Challenges to achieve carbon neutrality of China by 2060: Status and perspectives [J]. Science Bulletin, 2022, 67 (20): 2030-2035.
- [3] SUN L L, CUI H J, GE Q S. Will China achieve its 2060 carbon neutral commitment from the provincial perspective? [J]. Advances in Climate Change Research, 2022, 13(2):169-178.
- [4] LI K, CAO J, ADAMOWSKI J F, et al. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the invest model: A case study in Huining County, China [J]. Environmental Development, 2021, 39: e100641.
- [5] 段璇瑜,龚文峰,孙雨欣,等.海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J].水土保持通报, 2022, 42(5):301-311.
DUAN X Y, GONG W F, SUN Y X, et al. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 301-311.
- [6] ZHANG D N, ZHAO Y H, WU J S. Assessment of

- carbon balance attribution and carbon storage potential in China's terrestrial ecosystem[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: e106748.
- [7] 邓祥征, 蒋思坚, 李星, 等. 区域土地利用影响地表 CO₂ 浓度异质性特征的动力学机制[J]. *地理学报*, 2022, 77(4): 936-946.
- DENG X Z, JIANG S J, LI X, et al. Dynamics of regional land uses affecting spatial heterogeneity of surface CO₂ concentration[J]. *Journal of Geography*, 2022, 77(4): 936-946.
- [8] ZHU G F, QIU D D, ZHANG Z X, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: e107770.
- [9] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应: 以贵州省为例[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(11): 101-111.
- CHEN M J, WANG Q R, BAI Z K, et al. Transition of “production—living—ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: A case study of Guizhou Province [J]. *China Land Science*, 2021, 35(11): 101-111.
- [10] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- WANG T F, GONG Z W, DENG Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [11] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *生态学报*, 2022, 42(23): 1-14.
- SHAO Z, CHEN R, ZHAO J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. *Journal of Ecology*, 2022, 42(23): 1-14.
- [12] ANESEN YEE A B, SOROMESSA T, ELIAS E, et al. Expressing carbon storage in economic terms: The case of the upper Omo Gibe basin in Ethiopia [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: e152166.
- [13] ENYAN Z, DENG J S, ZHOU M M, et al. Carbon emissions induced by land—use and land—cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 930-939.
- [14] 李晨欣, 陈松林, 李晶, 等. 基于“三生”空间的土地利用冲突时空演变特征研究: 以厦门、漳州和泉州城市群为例[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 247-254, 262.
- LI C X, CHEN S L, LI J, et al. Evolution of spatio-temporal characteristics of land use conflict based on production—living—ecological space: A case study at Xiamen—Zhangzhou—Quanzhou urban agglomeration [J]. *Water and Soil Conservation Bulletin*, 2022, 42(3): 247-254, 262.
- [15] 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*, 2022, 44(8): 4666-4678.
- GU Z W, LIU J, CHEN Y, 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*, 2022, 44(8): 4666-4678.
- [16] 王文俊. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素[J]. *现代地质*, 2019, 33(6): 1295-1305.
- WANG W J. Reserve estimation, spatiotemporal distribution and its influencing factors of soil organic carbon in Fujian Province, China [J]. *Modern Geology*, 2019, 33(6): 1295-1305.
- [17] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6786-6799.
- LI M Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(17): 6786-6799.
- [18] 张春华, 居为民, 王登杰, 等. 2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1739-1749.
- ZHANG C H, JU W M, WANG D J, et al. Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013 [J]. *Journal of Ecology*, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [19] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 4052-4065.
- LIU Y, ZHANG J, ZHOU D M, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [20] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 360-373.
- ZHANG Y, SHI X Y, TANG Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(1): 360-373.
- [21] 胡莹洁, 李月, 孔祥斌, 等. 1980—2010 年北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4625-4636.

- HU Y J, LI Y, KONG X B, et al. Response of agricultural land carbon storage to land use change in Beijing from 1980 to 2010[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 38(13):4625-4636.
- [22] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于 Markov-flus 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(10):3947-3958.
- CHEN L T, CAI H S, ZHANG T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-flus model[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 42(10):3947-3958.
- [23] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-plus 模型的碳储量空间关联性及预测: 以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10):4827-4839.
- LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-plus model: A case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42 (10): 4827-4839.
- [24] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于 PLUS-sd 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4):1246-1258.
- JIANG X F, DUAN H C, LIAO J, et al. Land use in the Gan-Lin-Gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS-sd coupling model[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(4):1246-1258.
- [25] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于 FLUS-In VEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响: 以呼包鄂榆城市群为例 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31 (8): 1667-1679.
- WANG C Y, GUO X H, GUO L, et al. Land use change and its impact on carbon storage in northwest China, based on FLUS-Invest: A case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2022, 31(8):1667-1679.
- [26] 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.
- ZHU W B, ZHANG J J, CUI Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin [J]. *Journal of Geography*, 2019, 74(3):446-459.
- [27] ZHU L Y, SONG R X, 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(10):e109178.
- [28] 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*, 2023, 44 (8): 4655-4665.
- CHEN N, XIN C L, TANG D B, et al. Multi-scenario land use optimization and carbon storage assessment in northwest China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (8):4655-4665.
- [29] 杨激威, 赵娟, 朱家田, 等. 基于 PLUS 和 In VEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(4):175-182.
- YANG L W, ZHAO J, ZHU J T, et al. Spatial and temporal variation and prediction of ecosystem carbon storage in Xi'an based on PLUS and InVEST model[J]. *Remote Sensing of Natural Resources*, 2022, 34(4):175-182.
- [30] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合 PLUS-In VEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2):300-314.
- LUO S Q, HU X M, SUN Y, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled Plus-Invest model[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture (Chinese and English)*, 2023, 31 (2):300-314.
- [31] 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.
- XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *Chinese Science Data (Chinese and English online version)*, 2019, 4(1):90-96.
- [32] 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:e101569.
- [33] 隋玉正, 孙大鹏, 李淑娟, 等. 碳储存变化背景下东营市海岸带生态系统保护修复[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8112-8123.
- SUI Y Z, SUN D P, LI S J, et al. Study of coastal zone ecosystem restoration in the context of carbon storage change: A case of Dongying City[J]. *Acta Ecologica Science*, 2021, 41(20):8112-8123.