

基于 PLUS-InVEST 模型的珠三角 碳储量时空演变与预测

廖超明¹, 韦媛媛¹, 云子恒¹, 谭绵方¹, 唐丹²

(1. 南宁师范大学自然资源与测绘学院, 广西南宁 530001; 2. 广西自然资源职业技术学院, 广西崇左 532100)

摘要: [目的] 探究珠三角地区 2005—2020 年土地利用变化及其对碳储量的影响, 并对 2035 年珠三角的土地利用格局和碳储量进行模拟预测, 以期对珠三角地区“双碳”目标下的国土空间规划和生态决策提供科学依据。[方法] 基于 2005—2020 年 4 期土地利用数据, 以珠三角城市群为研究区域, 采用 PLUS 模型和 InVEST 模型对该区的土地利用变化和碳储量演变进行分析, 并预测其 2035 年土地利用空间格局和碳储量变化趋势。[结果] ① 2005—2020 年, 珠三角地区碳储量先增加后减少, 林地、建设用地和未利用地增多促进碳储量增长了 4.82×10^7 t, 耕地、草地和水域减少导致碳储量减少了 5.10×10^7 t。② 预计 2035 年, 随着建设用地和林地的增加, 该区碳储量较 2020 年增长 5.75×10^7 t, 生态环境向好发展。③ 该区碳储量表现出“四周高, 中部低”的空间分布格局, 与土地利用空间分布具有显著一致性, 即碳储量高值区集中在林地、耕地和草地, 碳储量低值区集聚在建设用地。[结论] 随着未来城市发展需要, 政府部门应进行土地综合开发利用, 采取生物、工程技术等生态修复措施, 提升区域固碳能力, 助力实现碳中和目标。

关键词: 土地利用变化; PLUS 模型; InVEST 模型; 碳储量; 珠三角

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0410-11

中图分类号: X87, F301.2

文献参数: 廖超明, 韦媛媛, 云子恒, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的珠三角碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 410-420. DOI: 10.13961/j.cnki.stbetb.2024.01.040; Liao Chaoming, Wei Yuanyuan, Yun Ziheng, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Pearl River delta based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 410-420.

Spatiotemporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Pearl River Delta Based on PLUS and InVEST Models

Liao Chaoming¹, Wei Yuanyuan¹, Yun Ziheng¹, Tan Mianfang¹, Tang Dan²

(1. College of Natural Resources and Surveying and Mapping, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. Guangxi College of Natural Resources, Chongzuo, Guangxi 532100, China)

Abstract: [Objective] The land use change and its impact on carbon storage was studied from 2005 to 2020, and the land use pattern and carbon storage in the Pearl River Delta in 2035 were simulated and predicted, in order to provide a scientific basis for the territorial spatial planning and ecological decision-making under the dual carbon goal in the Pearl River delta region. [Methods] Based on land use data for four periods from 2005 to 2020, land use change and carbon storage evolution in the Pearl River delta urban agglomeration were analyzed by using the PLUS model and the InVEST model. The spatial pattern of land use and the carbon storage change trend in 2035 were predicted. [Results] ① From 2005 to 2020, carbon stocks initially increased and then decreased. The increased area of forest land, construction land, and unused land increased carbon stocks by 4.82×10^7 t, and the decreased area of cultivated land, grassland and water area decreased

收稿日期: 2023-07-06

修回日期: 2023-09-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于卫星对地观测技术的广西‘山’字型构造时空演变特征研究”(42164001); 广西 2022 年自治区级职业教育专业教学资源库建设项目(GZ202220); 广西 2022 年本科教育教学重点项目建设经费(602030389173301)

第一作者: 廖超明(1975—), 男(汉族), 广西壮族自治区平南县人, 博士, 教授级高级工程师。主要从事 3S 技术在土地资源管理中的应用研究。Email: liaochaoming@nnnu.edu.cn。

通信作者: 唐丹(1976—), 男(壮族), 广西壮族自治区都安县人, 硕士, 高级工程师。主要从事卫星定位系统和土地信息技术应用研究。Email: 237618956@qq.com。

carbon stocks by 5.10×10^7 t. ② In 2035, with an expected increase of construction land and forest land, carbon storage will increase by 5.75×10^7 t compared with 2020, and the ecological environment will improve. ③ Carbon storage showed a spatial distribution pattern of “higher in the surrounding areas and lower in the middle” that was significantly consistent with the spatial distribution of land use, i.e., the high-value carbon storage areas were concentrated in forest land, cultivated land, and grassland, and the low-value carbon storage areas were concentrated in construction land. [Conclusion] With the needs of future urban development, government departments should carry out comprehensive land development and utilization, adopt ecological restoration measures based on biological and engineering technology, and improve regional carbon sequestration capacity so as to achieve carbon neutrality.

Keywords: land use change; PLUS model; InVEST model; carbon storage; Pearl River delta

陆地生态系统是碳循环中的关键碳库,具有调节区域气候和促进碳循环的重要作用^[1]。土地利用通过改变陆地生态系统的结构与功能来影响碳循环过程。“十四五”规划明确指出,以城市群为主体协调推进区域经济发展和新型城镇化,促进中国城市绿色低碳可持续发展^[2]。因此,开展城市群土地利用变化与碳储量变化耦合关系研究,对于未来城市土地可持续利用与低碳发展具有重要的参考价值和借鉴意义。

近年来,各国经济快速发展,导致碳排放量急剧增长,研究如何通过调整土地利用方式、促进陆地生态系统固碳减排受到高度关注。目前,碳储量的测算方法主要有实地调查法和基于模型估算法。实地调查法虽能获得较为真实的碳储量数据,但对于调研设备要求高,数据获取难度大且处理时间长,只能满足局部地区要求需求。基于模型估算方法主要有 CASA (carnegie-ames-stanford approach)模型^[3]、植被固碳模型^[4]、簿记模型^[5]、FORCCHN (forest ecosystem carbon budget model for China)^[6]、InVEST 模型 (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)等^[7-8]。其中,InVEST 模型数据处理操作简单、评估精度较高,满足长时间序列和大尺度区域研究需求,在生态系统碳储量研究中得到广泛的应用^[9]。

为了得出 2035 年碳储量变化趋势,则需要模拟出 2035 年土地利用空间分布。土地利用模拟模型主要有 SD (system dynamics)^[10]、ANN-CA (artificial neural network-cellular automata)^[11]、CA-Markov^[12]、FLUS (future land use simulation model software)等^[13],但是以上模型不能深入挖掘土地利用变化的驱动机制,对于多种地类的模拟精度不高。PLUS (patch-generating land use simulation)模型综合考虑自然环境、交通区位和社会经济因素对土地利用变化的影响,时空动态模拟区域斑块级地类的相互作用,并计算出较高精度的未来土地利用的分布^[14-16]。丁

岳等基于 InVEST—PLUS 模型测算环杭州湾碳储量,发现建设用地的快速扩张导致碳储量降低^[17];孙欣欣等^[18]以南京市为例,得出碳储量空间分布与土地利用分布保持一致;孙方虎等^[19]则发现安徽省林地、草地等高含碳量地类得到保护,碳储能力提升。耦合 PLUS—InVEST 模型能够基于土地利用数据得出研究区域碳储量的变化情况,能较好地探讨区域土地利用变化与碳储量的相互影响机制。

珠三角城市群是中国最具发展潜力城市群之一,是“特色金融+现代物流+先进制造”产业集群。它作为南方地区对外开放的门户,辐射带动华南、华中和西南的发展,也是建设国家级森林城市群和海洋强省的重要基地。珠三角城市群人口吸纳度高,常住人口高达 7.80×10^7 人,对各类用地需求极大。因此,本文选定珠三角城市群作为研究区域,探究 2005—2020 年土地利用变化及其对碳储量的影响,并对 2035 年珠三角的土地利用格局和碳储量进行模拟预测,以期对珠三角地区“双碳”目标下的国土空间规划和生态决策提供科学依据,加快实现珠三角新时代高质量发展,同时为中国其他城市提供引领和示范作用。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况 珠三角位于广东省中南部,在 $112^{\circ}45'—113^{\circ}50'E$, $21^{\circ}31'—23^{\circ}10'N$ 之间,总面积约为 $54\ 000\ km^2$,其中丘陵、山地和岛屿约占总面积 30%。下辖广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山、江门 9 个城市,毗邻港澳,与东南亚地区隔海相望。珠三角属于亚热带季风气候,光照充足,四季多雨,终年温暖湿润,年平均气温为 $20\sim 23\ ^{\circ}C$ 。中部是平原,北部、东部和西部分布着丘陵、山地和岛屿,河口向南海延伸,形成相对闭合的“三面环山,一面临海”的三角区独特地形地貌。研究区概况如图 1 所示。

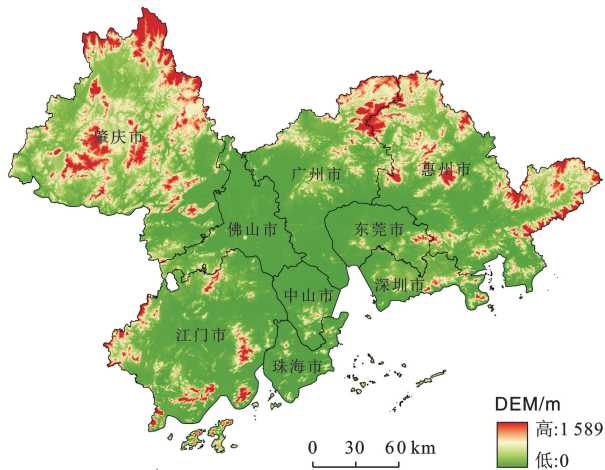


图 1 珠三角城市群及其地形概况

Fig.1 Overview and topography of urban agglomeration in Pearl River delta

1.1.2 数据来源

(1) 土地利用数据。本文所需珠三角土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 30 m, 并依据土地利用分类国标将地类划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。

(2) 土地利用变化驱动因子。结合已有研究和数据的可获得性, 土地利用扩张主要是受到自然环境、交通路线发展情况和社会经济发展的综合影响。因此, 本文从自然环境、社会经济和交通区位 3 方面来确定 13 个土地利用驱动因子。自然环境包括 DEM、坡向、坡度、年均降水、年均气温。DEM 来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>), 坡度和坡向数据经 DEM 提取而得, 年均降水和年均气温来源于中国气象数据网 (<http://www.data.cam.cn/>)。社会经济数据的人口和 GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>); 交通区位数据包括到水域、高速、铁路、国道、省道、县道距离, 数据来源于 openstreetmap (<http://www.openstreetmap.org>); 选取的到河流、高速、铁路等距离通过 ArcGIS10.8 的欧氏距离分析计算而得。根据模型需要, 将土地利用驱动因子栅格化后统一成与土地利用数据相同的投影坐标、行列号和空间分辨率。

1.2 研究方法

1.2.1 PLUS 模型 PLUS 模型是基于 FLUS, SD 和 CA 等模拟模型发展起来的未来土地利用模拟模型, 能够动态地模拟多类土地斑块的生成和时空演化, 深入挖掘各类土地利用变化的潜在机理^[20]。模型包括土地扩张分析策略 (land expansion analysis strategy, LEAS) 和基于多类随机斑块种子机制的 CA 模型 (CA based on multiple random patch

seeds, CARS)^[21], 它较以往的模型具有更高的模拟精度和更真实土地景观格局。

模型通过提取两期土地利用数据之间的扩张部分作为样本进行训练, 采用随机森林算法对土地扩张部分和土地利用驱动因子进行计算, 得到各土地利用类型的发展概率以及驱动因子在该时段内对各类用地扩张的贡献度。基于 Markov 得到未来各类用地需求, 进而结合随机斑块的生成和转移矩阵的设置来确定未来土地利用空间分布格局。

(1) 土地扩张分析策略。土地扩张分析策略融合已有转化分析策略 (transformation analysis strategy, TAS) 和格局分析策略 (pattern analysis strategy, PAS) 的优势, 克服了随着用地类型的增加而导致模型复杂性增加、灵活度降低等问题, 使模型更深入挖掘未来诱发土地利用变化的因素, 具有更好的解释性^[22]。该策略提取两期土地利用数据间各类用地的扩张部分, 采用随机森林算法得到不同用地类型的增长概率和各驱动因子对未来不同用地类型扩张的贡献度。其表达式为^[23]:

$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{i=1}^n I[h_n(x) = d]}{M} \quad (1)$$

式中: $P_{i,k}^d(x)$ 为空间单元 i 处 k 类土地利用类型增长概率; x 为由驱动因子组成的向量; M 为随机森林决策树数量; d 取值 1 或 0, 1 表示地类 i 可以转至地类 k , 0 表示地类 i 不可转为地类 k ; $h_n(x)$ 为计算得到的土地利用预测类型; $I[h_n(x) = d]$ 为决策树的函数。

(2) 基于多类随机斑块种子机制的 CA 模型。基于多类随机斑块种子的机制的 CA 模型包含了基于多重土地利用的随机种子的斑块生成机制。在模拟过程中, 土地利用需求将会通过自适应惯性机制去影响土地用地竞争, 驱使土地利用的数量达到未来需求^[24]。为预测多类用地, CARS 模块在传统的 CA 模型的基础上, 结合随机种子生成和阈值递减机制来执行未来用地模拟的操作^[25]。其表达式为^[23]:

$$OP_{i,k}^{d=1-t} = P_{i,k}^{d=1} \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t \quad (2)$$

式中: $OP_{i,k}^{d=1-t}$ 为用地类型 k 在空间单元 i 上生成的随机种子; $P_{i,k}^{d=1}$ 为用地类型 k 在空间单元 i 上的增长概率; $\Omega_{i,k}^t$ 为空间单元 i 的领域效应; D_k^t 为未来用地类型 k 需求的影响。

1.2.2 InVEST 模型与碳密度数据 InVEST 模型中碳储量模块基于各时期土地利用数据和各地类的碳密度数据, 测算各时期的碳储量。碳储量模块将陆地生态系统的碳储量划分为地上、地下、土壤有机质和死亡有机质碳密度 4 个基本碳库, 并且各地类的碳

密度是一个常量^[26]。其表达式为:

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-dead}} + C_{i\text{-soil}} \quad (3)$$

$$C_{i\text{-total}} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \quad (4)$$

式中: C_i 为地类*i*的碳储量; $C_{i\text{-above}}$ 为地类*i*的地上碳密度; $C_{i\text{-below}}$ 为地类*i*的地下碳密度; $C_{i\text{-dead}}$ 为地类*i*的死亡有机质碳密度; $C_{i\text{-soil}}$ 为地类*i*的土壤有机质碳密度; $C_{i\text{-total}}$ 为地类*i*的总碳储量; A_i 为地类*i*的面积。因为死亡有机质碳储量含量极低且数据难以获取,此处不予考虑^[27]。

基于已有研究结果可知,处于同一气候带的土地类型碳密度差异较小^[28]。因此,使用相似气候区土地类型碳密度进行碳汇情况分析,通过年均气温和年均降水对碳密度进行修正,经检验最终参照刘萍等^[29]、朱志强等^[30]测定的碳密度,以表 1 作为碳密度标准。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

2005—2020 年珠三角各时期土地利用类型面积

表 2 2005—2020 年珠三角各时期土地利用类型面积

Table 2 Land use area by type in Pearl River delta during 2005—2020

土地利用类型	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年		2005—2020 年变化面积/km ²
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
耕地	16 371.19	30.21	14 719.08	27.16	14 326.31	26.44	14 967.28	27.62	-1 403.90
林地	29 218.96	53.92	29 858.94	55.10	30 088.39	55.52	29 386.78	54.23	167.83
草地	123.54	0.23	101.44	0.19	59.71	0.11	39.51	0.07	-84.03
水域	3 893.09	7.18	3 912.54	7.22	3 512.44	6.48	2 976.15	5.49	-916.93
未利用地	6.20	0.01	15.39	0.03	17.17	0.03	17.69	0.03	11.48
建设用地	4 576.77	8.45	5 582.34	10.30	6 185.73	11.41	6 802.33	12.55	2 225.56

2005 年以来,珠三角土地利用类型转移较为明显(表 3)。研究期间,耕地的转出量最多,转出面积为 3 838.53 km²,其中有 45.99% 转化为建设用地和 45.15% 转化为林地。林地主要转移为耕地和建设用地,表现出耕地和林地的双向转化和建设用地扩张逐渐侵占城镇周边林地的现象。建设用地转入量大,转出量小,转入量为 2 258.88 km²。15 a 内,新增建设用地中有 78.16% 的面积由耕地转化而来,可见其侵占耕地严重。建设用地侵占耕地的能力逐年减弱,侵占的速度也逐年放缓,说明城镇化进程中限制耕地转化为建设用地初见成效。水域的转出量位居第三,主要有 919.76 km² 转化为耕地和 321.12 km² 转化为建设用地。草地和未利用地的面积较小,转移为其他用地较少,变化不明显。

2005—2020 年珠三角土地利用空间分布特征明显,空间变化显著,主要表现为耕地空间范围缩减和

及变化见表 2。研究期间,耕地、草地和水域分别减少 1 403.90, 84.03, 916.93 km², 建设用地、林地和未利用地分别增加 2 225.56, 167.83, 11.48 km²。其中,耕地面积减少最多,所占比例从 2005 年的 30.21% 下降至 2020 年的 27.62%; 建设用地增加最多,从 2005 年的 8.45% 增加至 2020 年的 12.55%, 15 a 间面积增长明显。

表 1 珠三角各土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon density of land use types in

Pearl River delta

t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤有机质碳密度
耕地	13.50	2.70	17.34
林地	58.30	14.58	19.73
草地	3.01	13.53	16.00
水域	0.21	0.00	0.00
未利用地	2.10	0.00	11.36
建设用地	1.20	0.93	12.48

建设用地向外扩张(图 2)。研究期间,建设用地主要集聚在佛山的禅城区和顺德区,广州的越秀区、荔湾区、海珠区,东莞市的东城、南城,深圳的宝安、龙华、龙岗、福田区等。2005 年,这 4 个市的建设用地在空间上分布较为零散,到了 2020 年趋于片块分布,空间扩张较为明显,另外其余地区的建设用地也有不同程度的增长。说明随着珠三角经济建设的发展和社会人口的增长,城市间的交流联系加强,建设用地激增。耕地则主要分布在惠州市、江门市以及广州、佛山建设用地外围区域,耕地因城市建设的需要受到了明显的侵占。

林地空间分布广,主要分布在肇庆、惠州、江门等地,随着封山育林、退化林生态修复以及山水林田湖一体化治理等工程项目的实施,林地面积有所增加,东南部的林地增长最为明显。水域主要由珠江、西江、北江等水系和零散分布的坑塘水面构成。到

2020 年,佛山、中山以及西江、珠江沿岸的水域空间分布减少。一方面,受到围湖造田的影响,部分水域整理复垦为耕地;另一方面,由于城市建设和产业发展

的需要,部分的坑塘水面和近海沿岸的水面转换为工业园区和港口码头等建设用地,以缓解建设用地占用耕地的紧张局面。

表 3 2005—2020 年珠三角土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix in Pearl River delta from 2005 to 2020

km²

项目	2020 年面积							转出总和
	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	总和	
耕地	12 532.66	1 733.10	19.25	316.58	4.12	1 765.48	1 6371.19	3 838.53
林地	1 468.72	27 630.04	7.36	5.49	0.20	107.16	29 218.97	1 588.93
草地	38.25	4.78	8.20	6.31	3.16	62.85	123.55	115.35
水域	919.76	18.59	4.49	2621.03	8.09	321.12	3 893.08	1 272.05
未利用地	0.44	0.02	0.19	1.18	2.10	2.27	6.20	4.10
建设用地	7.47	0.24	0.03	25.56	0.02	4 543.46	4 576.78	33.32
总和	14 967.30	29 386.77	39.52	2 976.15	17.69	6 802.34	54 189.77	—
转入总和	2 434.64	1 756.73	31.32	355.12	15.59	2 258.88	—	6 852.28

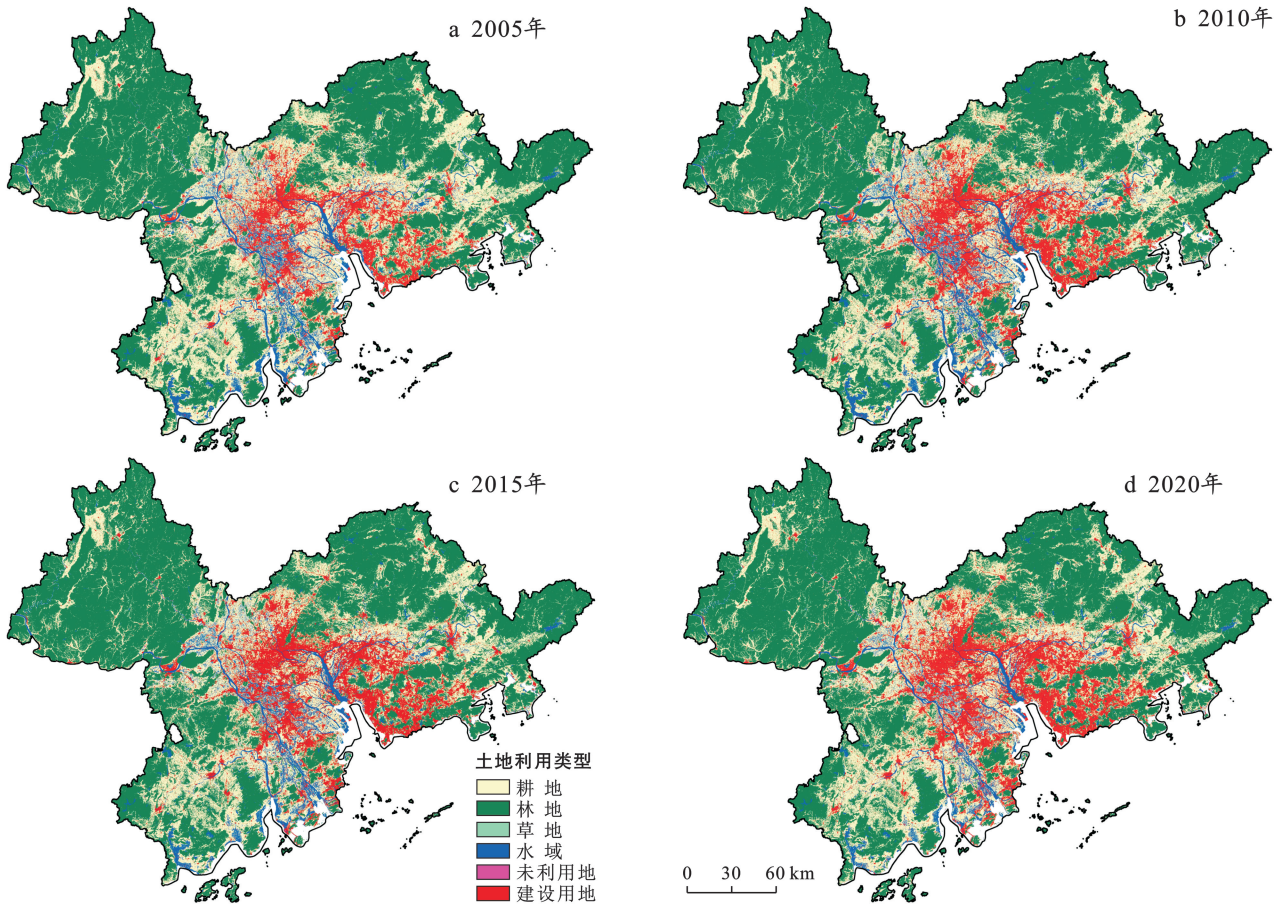


图 2 2005—2020 年珠三角各时期土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Pearl River delta from 2005 to 2020

2.2 碳储量时空变化特征分析

基于 InVEST 模型的碳储量模块得出珠三角 2005, 2010, 2015 年和 2020 年的碳储量分别为 3.32×10^8 , 3.34×10^8 , 3.36×10^8 , 3.32×10^8 t。2005—2015 年, 碳储量呈缓慢增长趋势, 到了 2020 年, 碳储量由前期的缓慢增长转变为下降趋势。在 6 类地类中, 林地、

耕地的碳储量所占比例较高, 2020 年林地碳储量所占比例高达 81.85%; 建设用地及其他地类碳储量较低。

由表 4 可知, 土地利用面积变化与碳储量变化表现出显著一致性。2005—2020 年, 耕地、草地、水域减少导致碳储量减少 5.10×10^7 t, 林地、建设用地、未利

用地的增多促使碳储量增长了 4.82×10^7 t。碳储量减少的主要原因是高含碳量的耕地面积减少,而碳储量增加的主要原因则是高含碳量的林地和较低含碳量的建设用地面积增长。水域面积减少相对较多,但碳储量变化不大,主要是因为水域的碳密度较低,水体固碳能力较弱。土地利用与碳储量耦合变化表明土地利用的结构变化对碳储量的含量与分布具有明显的影响。

表 4 2005—2020 年珠三角土地利用面积与碳储量变化
Table 4 Land use area and carbon storage changes in Pearl River delta from 2005 to 2020

土地利用	面积/km ²	碳储量/10 ⁴ t
耕地	-1 403.90	-470.55
林地	167.83	155.54
草地	-84.03	-27.32
水域	-916.93	-1.92
未利用地	11.48	1.54
建设用地	2 225.56	324.88

由图 3 可知,2005—2020 年,碳储量的空间分布表现出一定的聚集性,呈现出“四周高中部低”的空

间分布格局。碳储量高值区主要分布在珠三角东北部、西北部以及东南部,这些区域以高海拔高覆盖度的山区林地为主,集中了珠三角主要的林业资源,地形环境复杂,建设用地的扩张受到了限制。珠三角中部地区地势较为平坦,以建设用地为主,城市化程度高,人口密度大,水系丰富,交通发达,有利于人们进行社会生产活动,因而固碳能力相对较弱。因此,碳储量高值区和低值区的空间分布与土地利用类型在空间上的结构和布局具有较为明显的相关性。

2005—2020 年期间,珠三角碳储量空间变化主要表现为市镇周围碳储量减少,郊区地带碳储量增加(图 4)。碳储量增加的区域主要集聚在佛山与广州交界处、广州与珠海交界处以及中山、惠州、江门等郊区,境内分布着大稠顶、北岭山、南昆山、北峰山国家森林公园和象头山国家级自然保护区等山林,是珠三角主要的林业资源。在退耕还林、封山育林等生态保护政策的驱动下,人们环境保护意识也随之增强,使得高碳密度的林地得到保护与增长,这是珠三角碳储量增加的主要原因。

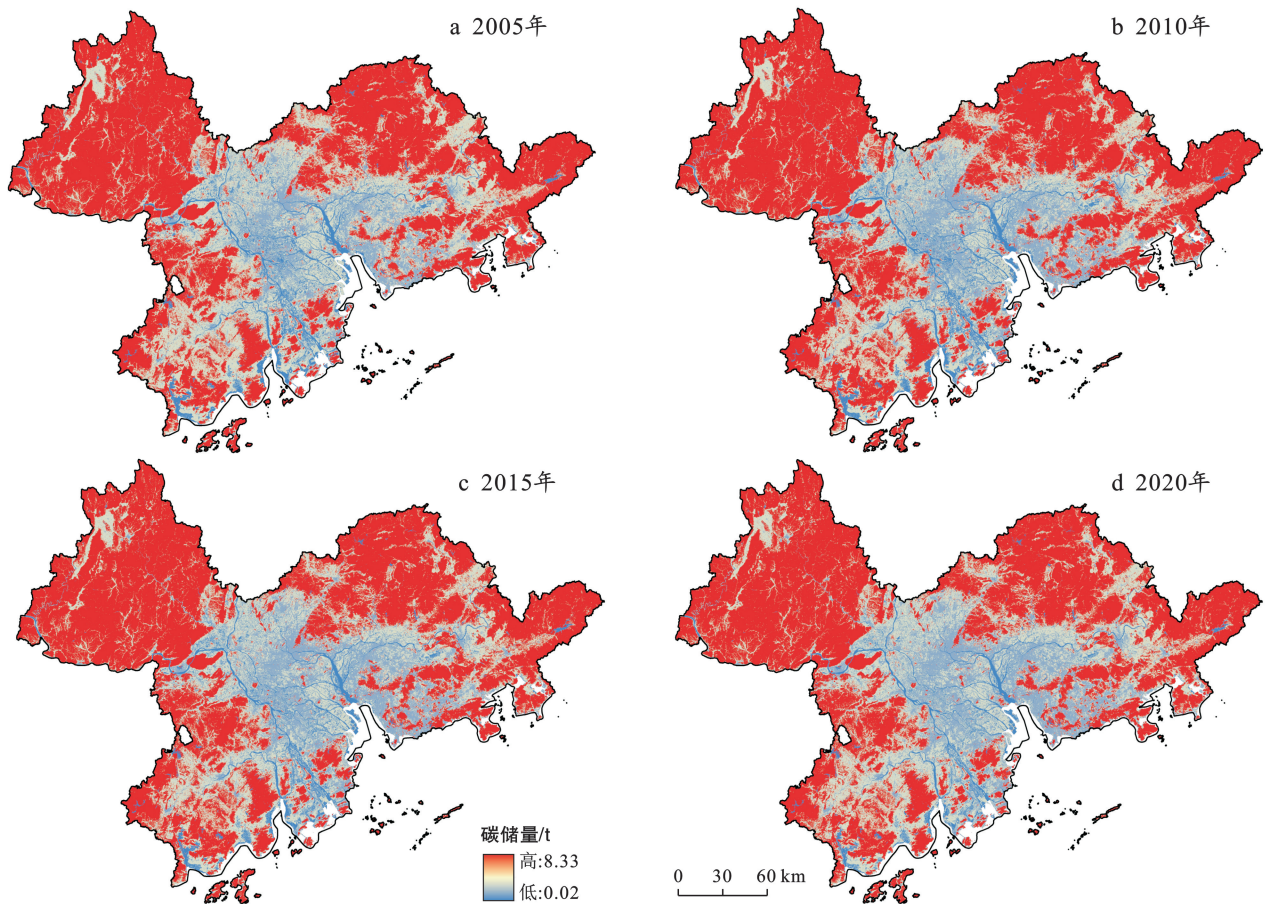


图 3 2005—2020 年珠三角各时期碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in Pearl River delta during 2005—2020

碳储量减少区域零散分布在珠三角境内。随着珠三角工业化城镇化加快推进,城市规模不断扩大,城

镇人口不断增加,各地建设用地均有不同程度的增加,占用耕地和水域的趋势增强,使得高碳密度地类

减少,低碳密度增加,导致研究区碳密度总体上稍有下降。

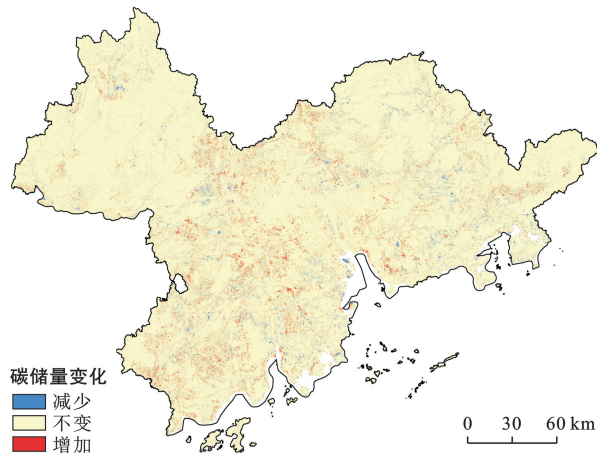


图 4 2005—2020 年珠三角碳储量变化空间分布

Fig.4 Spatial distribution of carbon storage changes in Pearl River delta during 2005—2020

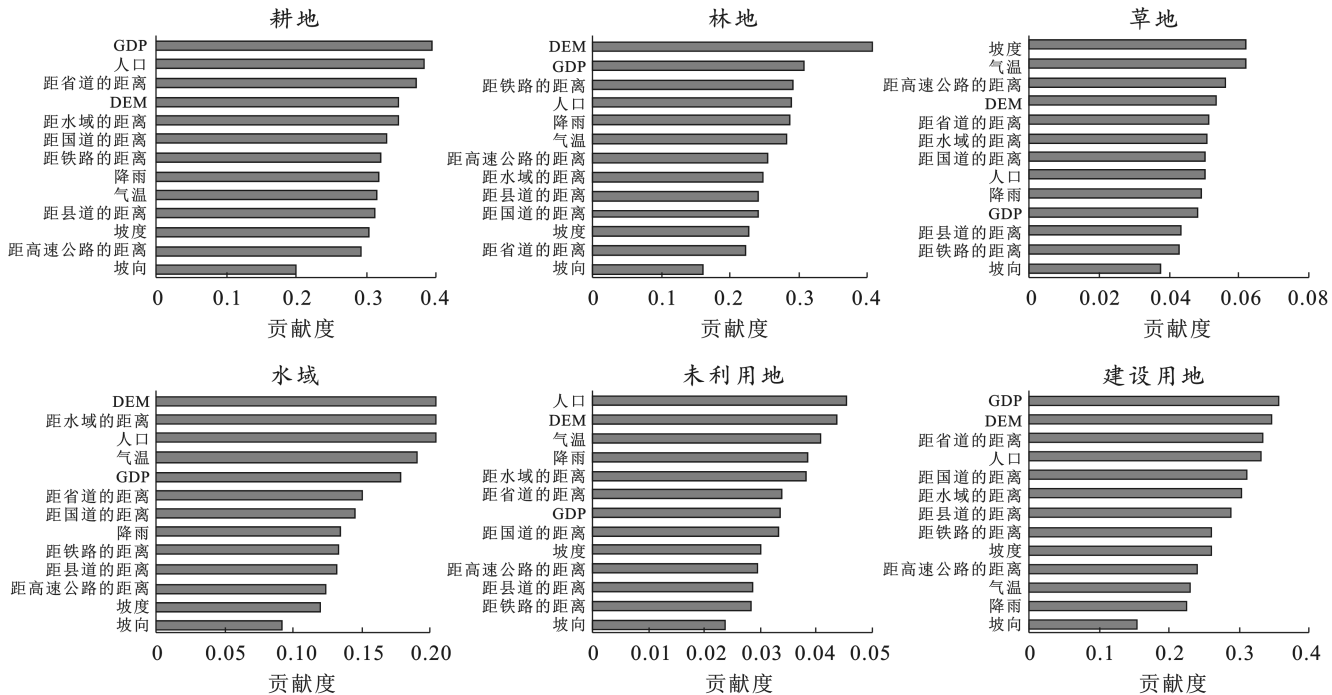


图 5 珠三角各用地类型扩张的驱动因子贡献度

Fig.5 Contribution degree of driving factors for expansion of different land types in Pearl River delta

2.3.3 2035 年土地利用模拟 土地利用变化受到人类活动的干扰,同时也受到自身自然资源条件以及地理空间位置的限制。基于土地利用扩张驱动因子贡献度,模拟得到珠三角 2035 年土地利用空间分布,通过 ArcGIS10.8 的栅格计算器分析得到未来 15 a 的用地扩张情况(图 6)。

未来 15 a,珠三角还是以建设用地和林地的增长以及耕地的减少为主。到 2035 年,建设用地面积较 2020 年预计增加 1 493.23 km²,增幅为 18.68%,相比 2005—2020 年的扩张强度有所减缓。建设用地以佛

2.3 土地利用变化模拟与碳储量预测

2.3.1 精度验证 本文以 2010 年土地利用数据作为训练样本,预测 2020 年土地空间分布。将实际的 2020 年土地利用数据和模拟而得的 2020 年土地利用数据一同输入模型精度验证模块,得出模拟的总体精度为 0.87,kappa 系数为 0.80,表明构建的预测模型模拟精度较高,满足本文研究需求,可以用于模拟预测 2035 年珠三角土地利用。

2.3.2 驱动因子分析 通过 PLUS 模型的用地扩张分析模块得出各用地类型的驱动因子贡献度(图 5)。未来各地类的变化受到自然环境因素、社会经济因素和交通区位因素的综合影响,但影响程度各有不同。耕地、林地和建设用地主要受到 GDP、人口、距离省道的距离和 DEM 等的影响;草地和未利用地主要受到 DEM、坡度、气温降水等的影响;水域则受 DEM、距水体的距离,人口以及气温的影响。

山、广州和深圳中心城区的新增与扩展。林地面积增加 152.64 km²,耕地面积减少 1 531.29 km²。水域和未利用地减少,草地面积增加。

总体来看,未来珠三角依托《粤港澳大湾区发展规划纲要》,经济建设高质量发展,GDP 随之增长,吸引外来人口参与到城市建设中,着力构建“六纵四横”的高速铁路网和“四纵两横”的普速高铁网,建设用地势必增长,区位优势明显的耕地作为新增建设用地的主要来源,耕地则相应的减少。在地势险要区域,开发利用成本高,限制因子难以消除,林地和草地则增长。

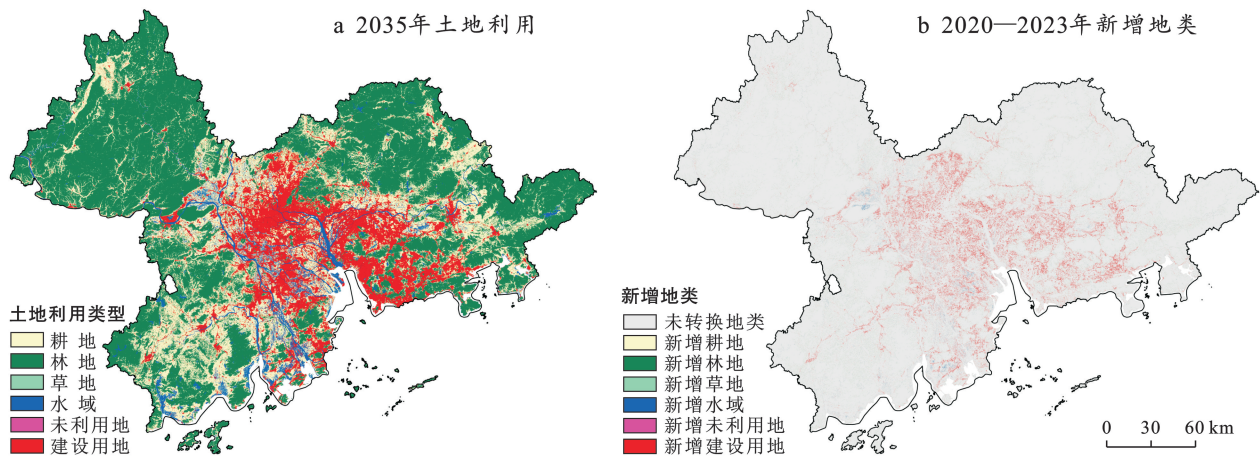


图 6 2035 年珠三角土地利用空间分布与扩张

Fig.6 Spatial distribution and expansion of land use in Pearl River delta in 2035

2.3.4 2035 年碳储量预测 基于 2035 年土地利用空间分布格局预测 2035 年碳储量分布与变化情况 (图 7)。2035 年珠三角碳储量为 3.90×10^8 t, 较 2020 年增加了 5.75×10^7 t, 增长较为明显。结合 2035 年土地利用空间格局, 碳储量空间分布与 2005 和 2020 年的分布差异不大, 碳储量低值区还是集聚在珠三角中部地区, 碳储量低值区分布在珠三角外围地带, 与当年土地利用分布相对应。碳储量减少区域主要集聚在广州、佛山、深圳、中山等地的中心城区及其外围扩展区域; 增加区域主要是珠三角边界城市, 比如惠州、江门和肇庆等城市以及水系分布区域, 与 2035 年新增地类表现出高度一致性, 即建设用地增长区、耕

地减少区为碳储量下降区, 林地和水域增长区为碳储量增加区域。

未来 15 a, 随着粤港澳大湾区建设的协同推进, 对建设用地需求持续加大, 导致低碳储量用地增加, 高含碳量用地进一步减少。但是, 就目前形势看, 珠三角积极响应国家号召, 合力推进珠三角国家森林城市群建设进程, 落实蓝色海湾战略部署, 加快建成中心主城区人工林和森林公园, 对污染退化天然林的修复保护力度加大, 促进珠三角林地资源向好发展, 增加了高含碳量的林地面积, 提高森林覆盖率, 依托生物、工程和技术等生态保护修复手段, 提高生态系统固碳能力。

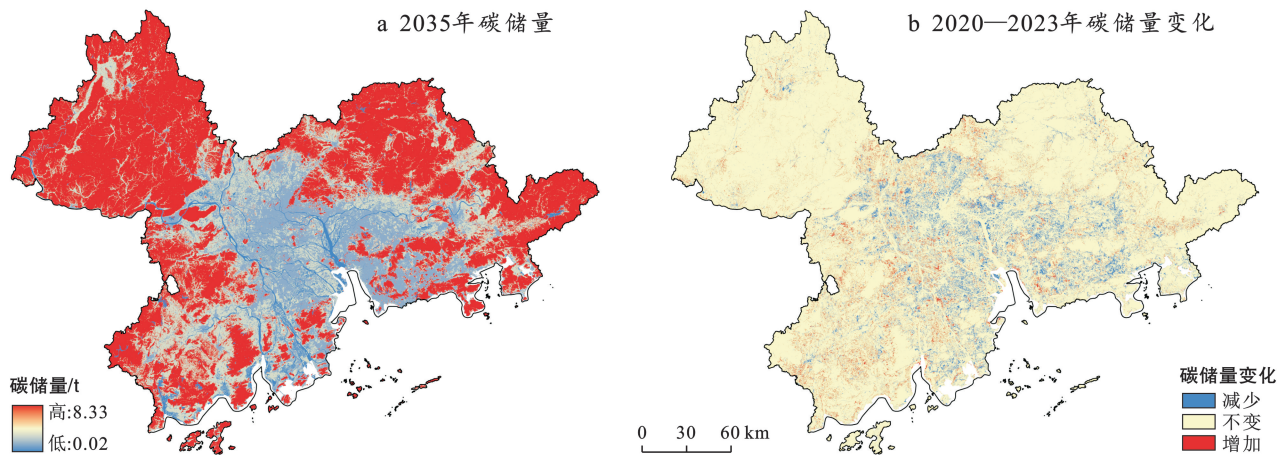


图 7 2035 年珠三角碳储量空间分布及其空间变化

Fig.7 Spatial distribution and spatial variation of carbon stocks in Pearl River delta in 2035

3 讨论与结论

3.1 结论

本研究通过 PLUS 和 InVEST 模型测算 2005—2020 年珠三角的土地利用变化及其碳储量空间格局

分布, 并预测分析 2035 年珠三角土地利用结构布局与碳储量变化趋势, 得出以下结论。

(1) 2005—2020 年珠三角碳储量与土地利用类型面积同增同减。15 a 间, 土地利用转移主要表现为耕地转化为建设用地和林地。耕地和水域分别减少

1 403.90, 84.03 km², 导致碳储量减少 4.71×10^7 t, 2.73×10^6 t; 建设用地和林地面积增长了 2 225.56, 167.83 km², 带动碳储量增长 3.25×10^7 , 1.56×10^7 t; 15 a 间, 珠三角碳储量呈缓慢上升后缓慢下降趋势, 其中林地、耕地等为高含碳量地类, 建设用地、水域和未利用地为低含碳量地类。

(2) 碳储量的空间分布与土地利用空间布局表现出显著一致性。2005—2020 年珠三角碳储量空间分布有明显聚集性, 呈现出“四周高中部低”的空间分布格局。碳储量高值区分布在珠三角东北部、西北部和东南部的林地和草地; 低值区主要集中在广州、佛山、深圳等以建设用地为主的中部地区。

(3) 预计 2035 年, 珠三角碳储量为 3.90×10^8 t, 比 2020 年增加了 5.75×10^7 t。碳储量增加地区主要在未来新增林地和新增耕地, 比如肇庆北部、江门西南部以及惠州东部地区; 碳储量减少区域主要以广州、佛山、深圳等地的城市周边及其扩展区域。随着珠三角逐步建成国家森林城市群以及对林地保护修复力度加大, 生态环境向好发展。

3.2 讨论

(1) PLUS 模型和 InVEST 模型的优势与不足。本文虽选取 13 个驱动因子, 但忽略了“三区三线”、国家自然保护区等政策限制因子对土地利用变化的约束, 今后为提高模型模拟精度, 应将限制性因素纳入驱动因子体系。碳密度数据主要从已有结果中来获取, 与研究区真实的碳密度数据存在一定的差异, 影响实际碳储量计算, 今后的研究应将加入实地调查数据对碳密度数据进行修正。

(2) 土地利用变化对碳储量的影响机制。各用地类型面积的增减将会带动碳储量的增减, 碳储量的空间分布与区域土地利用空间布局有显著一致性, 说明土地利用的空间布局和结构变化在很大程度上影响着区域碳储量, 可通过对土地利用类型的管控实现区域碳储量的走向。

(3) 未来的发展规划建议。在保证未来用地需求的前提下, 加大对林地草地的修复保护力度, 进一步挖掘林业资源固碳潜力。积极稳妥推进海岸线占补平衡制度, 保证未来海洋强省的建设。严格实施耕地占补平衡制度和用途管控制度, 严禁非农建设占用永久基本农田, 还可以通过与邻近省份的耕地指标交易来缓解本区域的用地问题。

of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850—2000 [J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 378-390.

- [2] 王海军, 武悦, 邓羽, 等. 基于城市流和层级性的城市群扩展模型构建[J]. *地理学报*, 2021, 76(12): 3012-3024.
Wang Haijun, Wu Yue, Deng Yu, et al. Model construction of urban agglomeration expansion simulation considering urban flow and hierarchical characteristics [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3012-3024.
- [3] 李传华, 赵军, 师银芳, 等. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究: 以石羊河流域为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 4034-4044.
Li Chuanhua, Zhao Jun, Shi Yinfang, et al. The impact of human activities on net primary productivity based on the coefficient of variation: A case study of the Shiyang River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 4034-4044.
- [4] 位盼盼, 管梅, 伊犁地区土地覆被变化及其对植被碳储量的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4): 158-166.
Wei Panpan, Zan Mei. Changes of land coverage and the impact on vegetation carbon storage in Yili region [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 158-166.
- [5] 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 等. 1975—2005 年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 397-408.
Chen Yaoliang, Luo Geping, Ye Hui, et al. Sources and sinks of carbon caused by forest land use change from 1975 to 2005 in central Asia [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(3): 397-408.
- [6] 赵俊芳, 曹云, 马建勇, 等. 基于遥感和 FORCCHN 的中国森林生态系统 NPP 及生态服务功能评估[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(9): 1585-1592.
Zhao Junfang, Cao Yun, Ma Jianyong, et al. Evaluation of NPP and ecological service function of China's forest ecosystem based on remote sensing and FORCCHN [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(9): 1585-1592.
- [7] 石晶, 石培基, 王梓洋, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 300-313.
Shi Jing, Shi Peiji, Wang Ziyang, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiuquan City based on PLUS-InVEST model [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 300-313.
- [8] 李月, 罗红芬. 基于 InVEST 模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(1): 185-192
Li Yue, Luo Hongfen. Study on the change of carbon

[参 考 文 献]

- [1] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux

- storage of construction land expansion in karst area of central Guizhou Province based on InVEST model [J/OL]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(1):185-192
- [9] 邹文涛,何友均,叶兵,等.基于 InVEST 模型的森林生态系统服务功能评估研究进展[J].*世界林业研究*,2020,33(4):19-24.
Zou Wentao, He Youjun, Ye Bing, et al. Research advances in forest ecosystem services evaluations based on the InVEST model [J]. *World Forestry Research*, 2020, 33(4):19-24.
- [10] 曹祺文,顾朝林,管卫华.基于土地利用的中国城镇化 SD 模型与模拟[J].*自然资源学报*,2021,36(4):1062-1084.
Cao Qiwen, Gu Chaolin, Guan Weihua. SD model and simulation of China's urbanization based on land use[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4):1062-1084.
- [11] Yang Xin, Chen Ren, Zheng Xuan Qi. Simulating land use change by integrating ANN-CA model and landscape pattern indices [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, 7(3):918-932.
- [12] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(6):1018-1029.
Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6):1018-1029.
- [13] 高周冰,王晓瑞,隋雪艳,等.基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测[J].*农业资源与环境学报*,2022,39(5):1001-1013.
Gao Zhoubing, Wang Xiaorui, Sui Xueyan, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5):1001-1013.
- [14] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响:以湖北省为例[J].*生态学报*,2019,39(2):672-683.
Ke Xinli, Tang Lanping. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2):672-683.
- [15] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].*热带地理*,2019,39(3):397-409.
Liu Xiaojuan, Li Xia, Liang Xun, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model [J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3):397-409.
- [16] 王旭,马博文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].*自然资源学报*,2020,35(1):230-242.
Wang Xu, Ma Bowen, Li Dan, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1):230-242.
- [17] 丁岳,王柳柱,桂峰,等.基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J].*环境科学*,2023,44(6):3343-3352.
Ding Yue, Wang Liuzhu, Gui Feng, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay area based on InVEST and PLUS models [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6):3343-3352.
- [18] 孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J].*生态与农村环境学报*,2023,39(1):41-51.
Sun Xinxin, Xue Jianhui, Dong Lina. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1):41-51.
- [19] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].*水土保持学报*,2023,37(1):151-158.
Sun Fanghu, Fang Fengman, Hong Weilin, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):151-158.
- [20] Jiang Yefeng, Huang Mingxiang, Chen Xueyao, et al. Identification and risk prediction of potentially contaminated sites in the Yangtze River Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815:151982.
- [21] 杨朔,苏昊,赵国平.基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟:以汉中市为例[J].*干旱区资源与环境*,2022,36(10):86-95.
Yang Shuo, Su Hao, Zhao Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10):86-95.
- [22] 王洁宁,王文超,海蒙蒙.基于 PLUS 模型的山东省土地利用变化模拟分析[J].*国土与自然资源研究*,2022(6):1-8.
Wang Jiening, Wang Wenchao, Hai Mengmeng. Simulation analysis of land use change in Shandong Province based on PLUS model [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2022(6):1-8.
- [23] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Under-

- standing 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.
- [24] 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.
- [25] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析 [J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2):85-96.
- Wu Dan, Zhu Kangwen, Zhang Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, 7(2):85-96.
- [26] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 等. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3):531-542.
- Zhang Jingdu, Mei Zhixiong, Lv Jiahui, et al. Simulating multiple land use scenarios based on the FLUS model considering spatial autocorrelation [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3):531-542.
- [27] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2019, 39(12):4284-4298.
- Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12):4284-4298.
- [28] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5):22-28.
- Wu Peijun, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST model and CA: A case study of Guangdong Province, China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(5):22-28.
- [29] 刘萍, 邓鉴峰, 魏安世, 等. 广州市森林生物量及碳储量评估 [J]. *西南林业大学学报*, 2015, 35(4):62-65.
- Liu Ping, Deng Jianfeng, Wei Anshi, et al. Assessment on urban forest biomass and carbon storage in Guangzhou [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2015, 35(4):62-65.
- [30] 朱志强, 马晓双, 胡洪. 基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):222-229.
- Zhu Zhiqiang, Ma Xiaoshuang, Hu Hong. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou city by coupling FLUS-InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):222-229.
- [30] 林伟敏, 刘成华. 农业科技创新能力与农业高质量发展耦合协调研究 [J]. *北方园艺*, 2023(9):144-152.
- Lin Weimin, Liu Chenghua. Research on the coupling and coordination between agricultural scientific and technological innovation ability and development of high quality agriculture [J]. *Northern Horticulture*, 2023(9):144-152.
- [31] 刘佳, 余国新. 地方财政支农支出对农业技术效率影响分析—基于随机前沿分析方法 [J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(5):129-134.
- Liu Jia, Yu Guoxin. Provincial variance analysis of effect of local finance for supporting agriculture on the agricultural technical efficiency [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(5):129-134.

(上接第 398 页)

- [28] 张展, 廖小平, 李春华, 等. 湖南省县域农业生态效率的时空特征及其影响因素 [J]. *经济地理*, 2022, 42(2):181-189.
- Zhang Zhan, Liao Xiaoping, Li Chunhua, et al. Spatio-temporal characteristics of agricultural eco-efficiency and its determinants in Hunan Province [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2):181-189.
- [29] 田云, 林子娟. 中国省域农业碳排放效率与经济增长的耦合协调 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(4):13-22.
- Tian Yun, Lin Zijuan. Coupling coordination between agricultural carbon emission efficiency and economic growth at provincial level in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(4):13-22.