耦合FLUS与InVEST模型的粤西地区生态系统碳储量时空演变与预测

滕飞达，孔玲玲，张修玉，陈星宇
（广东省环境科学研究院，广东 广州 510700）

摘　要：［目的］在“双碳”目标与“绿美广东”生态建设双重背景下，揭示粤西地区生态系统碳储量对土地利用转型的响应机制，并模拟其未来演化路径，为区域国土空间治理与低碳发展提供理论支撑。［方法］融合FLUS模型的多情景土地利用模拟与InVEST模型的碳储量评估，基于2006年、2014年、2022年三期土地利用数据，集成FLUS模型与InVEST模型，耦合自然发展、生态保护与快速发展3类情景，模拟预测2030年与2038年土地利用格局并评估碳储量响应。［结果］①2006—2022年粤西土地利用结构发生显著转型，耕地持续减少（－895.10 km²），建设用地快速扩张（＋375.86 km²），林地作为碳汇主体稳步增长（＋810.74 km²）；②碳储量呈稳步上升趋势，从2006年1.252 5×10⁸ t增至2022年1.280 7×10⁸ t，空间分布呈现“中部丘陵高，沿海城镇低”的显著异质性；③多情景模拟显示，生态保护情景碳汇增益最为显著（2030年达1.283 1×10⁸ t，2038年达1.285 8×10⁸ t），自然发展情景次之，而快速发展情景因建设用地扩张剧烈，碳储量增长极为有限。［结论］粤西地区碳储量的提升依赖于生态用地尤其是林地的严格保护与结构优化。未来应强化空间管控，遏制建设用地无序蔓延，构建陆海统筹的生态碳汇格局，以支撑区域“双碳”目标与高质量协调发展。

关键词：碳储量；土地利用变化；FLUS模型；InVEST模型；粤西地区
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X（2026）04-0310-12　　**中图分类号：**F301.2，X87

文献参数：滕飞达，孔玲玲，张修玉，等.耦合FLUS与InVEST模型的粤西地区生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报，2026，46（4）：310-321. Teng Feida, Kong Lingling, Zhang Xiuyu, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage in western Guangdong Province by coupling FLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 310-321.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.029　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.029**

Spatiotemporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage in western Guangdong Province by coupling FLUS and InVEST models

Teng Feida, Kong Lingling, Zhang Xiuyu, Chen Xingyu
（*Guangdong Academy of Environmental Sciences*, *Guangzhou*, *Guangdong* 510700, *China*）

Abstract: [Objective] Under the dual context of the “dual carbon” goals and the “green and beautiful Guangdong” ecological construction initiative, the response mechanism of ecosystem carbon storage to land use transition was investigated, and its future evolution in western Guangdong Province was simulated, in order to provide a theoretical basis for regional spatial planning and low-carbon development. [Methods] The multi-scenario land use simulation capability of the FLUS model was integrated with the carbon storage assessment function of the InVEST model. Based on land use data from 2006, 2014, and 2022, the two models were coupled to simulate future land use patterns for 2030 and 2038 under three scenarios: natural development, ecological protection, and rapid development. The corresponding responses in carbon storage were then assessed. [Results] The results indicated that: ① from 2006 to 2022, the land use structure in western Guangdong Province underwent a significant transition, marked by a continuous decrease in cultivated land (－895.10 km²), rapid

收稿日期：2026-01-17　　**修回日期：**2026-03-05　　**采用日期：**2026-03-10
资助项目：广东省环保专项资金项目“美丽湾区理论体系、评价方法与战略路径研究”（粤财预〔2024〕4号）
第一作者：滕飞达（1995—），男（汉族），辽宁省铁岭市人，工程师，主要从事生态保护监管等方面的研究。Email：panyucs2022@163.com。
通信作者：张修玉（1979—），男（汉族），山东省高密市人，正高级工程师，主要从事生态文明战略与生物多样性保护等方面的研究。Email：zhangxiuyu@scies.org。

expansion of construction land (+375.86 km^2), and a steady increase in forest land (+810.74 km^2), which served as the primary carbon sink. ② Carbon storage showed a steady upward trend, increasing from 1.252 5×10^8 t in 2006 to 1.280 7×10^8 t in 2022. Its spatial distribution exhibited significant heterogeneity, characterized by high values in the central hilly areas and low values in coastal urban areas. ③ Multi-scenario simulations demonstrated that the ecological protection scenario yielded the most significant carbon sink gain (reaching 1.283 1×10^8 t by 2030 and 1.285 8×10^8 t by 2038), followed by the natural development scenario. In contrast, the rapid development scenario resulted in very limited growth in carbon storage due to extensive construction land expansion. [Conclusion] Enhancing carbon storage in western Guangdong Province depends on the strict protection and structural optimization of ecological land, particularly forest land. To support the regional "dual carbon" goals and facilitate high-quality, coordinated development, it is imperative to strengthen spatial control policy, curb the disorderly sprawl of construction land, and construct a coordinated land-sea ecological carbon sink pattern.

Keywords: carbon storage; land use change; FLUS model; InVEST model; western Guangdong Province

当前,全球气候变暖已被公认为人类面临的最严峻挑战之一[1]。陆地生态系统中积累的碳储量构成了全球碳循环的核心部分,对缓解温室效应和促进碳汇增长发挥着至关重要的作用[2]。土地利用方式的变化对陆地生态系统中碳的存储和循环过程具有显著影响。这种影响主要体现在通过调整生态系统的结构与功能,从而改变地表植被和土壤的碳固持能力,进而在局部乃至全球范围内调控碳平衡[3]。2021年9月,中共中央、国务院发布了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,提出力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的重大战略,同时指出强化国土空间规划和用途管控,严守生态保护红线,严控生态空间占用,稳定现有森林、草原、湿地、海洋、土壤、冻土、岩溶等固碳作用,提升生态系统碳汇增量[4]。2022年6月,广东省人民政府印发《广东省碳达峰实施方案》,提出2030年前实现碳达峰目标,开展巩固提升生态碳汇能力行动,具体为坚持系统观念,推进山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,提高生态系统质量和稳定性,有效提升森林、湿地、海洋等生态系统碳汇增量[5]。同年12月,中共广东省委通过《关于深入推进绿美广东生态建设的决定》,提出改善森林结构,提高森林单位面积蓄积量,充分发挥森林固碳储碳作用,增强"双碳"服务功能[6]。可见从中央到广东省均提出了2030年碳达峰目标,并将提升生态系统碳汇增量作为实现碳达峰碳中和的重点任务,而土地利用格局优化已成为调控区域碳汇功能、支撑"双碳""绿美广东"战略落地的关键路径之一[7]。

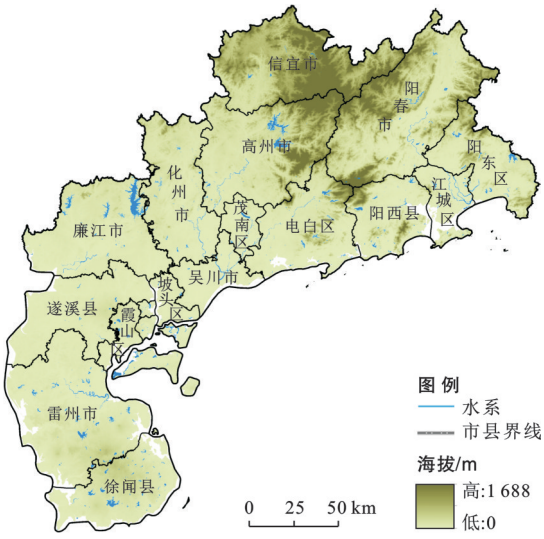
在气候变暖和国家"双碳"目标背景下,国内外大量学者通过生态碳汇模型研究并模拟计算碳储量。如通过BIOME-BGC, CENTURY, CBM-CFS3, CEVSA, InVEST及DNDC等模型[8]模拟生态系统碳循环的动态过程并量化其碳汇潜力[9]。InVEST生态系统服务和交易的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)中的碳储存与碳封存模块(carbon storage and sequestration)具有通用性强,参数简洁,准确性高,运行快等优势,受到了世界各地学者的广泛应用。此外,优化土地利用类型结构已成为应对气候变暖和提升生态系统碳汇增量的重要途径,因此准确预测土地利用类型的空间分布变化对于生态系统碳储量时空演变的计算评估具有重大意义。当前国内外在土地利用类型预测方面的主要模型包括PLUS模型、Markov模型、FLUS模型、元胞自动机(cellular automata, CA)模型等[10-11]。FLUS模型(future land use simulation model)可根据不同的地理区域、环境背景以及社会经济情境进行土地利用类型变化预测,具有灵活性、动态性及整合多元驱动因素的优势[12]。最后,通过耦合FLUS与InVEST模型可科学高效地评估不同政策情景或开发活动对生态系统服务(如碳汇、降水调节、土壤保持等)的影响,为评估不同发展路径和政策取向下的碳汇效应提供更具情景指向性的分析框架。

粤西地区作为广东省的重要区域,拥有丰富的自然生态资源和成熟的能源产业体系,肩负着构建粤西生态屏障,打造广东能源、重化工和海洋经济基地的使命。因此,粤西的发展离不开提升生态系统碳汇增量。然而,现有研究多集中于全国、省域整体或珠三角等经济发达地区,针对粤西地区生态系统碳储量时空演变及其对土地利用变化响应的系统研究仍相对不足,尤其缺乏面向2030年碳达峰关键节点的中长期情景预测分析。由于2022年,广东正式启动"碳达峰""绿美广东"生态建设战略,2022—2030年是成效检验的重要时间段,故本文首先运用FLUS模型以粤西地区2022年土地利用类型数据作

为基准年，计算出的2022—2030年碳储量变化能够更好反映当前政策背景下区域碳汇变化的现实趋势。FLUS模型只能根据基准年（2022年）距预测年（2030年）间隔的8 a倍数开展模拟，故选择2006，2014，2022年土地利用类型数据，结合GDP，DEM、人口密度等多元驱动因素，预测2030年、2038年土地利用类型变化。最后，耦合InVEST模型中的碳储存与碳封存模块预测粤西地区在不同发展情景下2030年、2038年碳储量变化，以期从区域尺度揭示土地利用变化对生态系统碳储量的影响机制，为粤西地区国土空间优化、生态保护修复及“双碳”目标导向下的低碳发展决策提供科学依据，同时为类似生态功能区的碳储量预测研究提供参考。

1 研究区概况

广东粤西地区位于广东省西南部，包含湛江、茂名、阳江三市，地理坐标介于北纬20°15′—22°41′，东经110°21′—112°22′之间。陆域总面积约3.14万km^2，大陆海岸线占全省38.6%，拥有雷州半岛、博贺港等战略地理单元[13]，地貌呈现“三山两原”格局，其中丘陵台地占比58%，沿海平原主要分布于鉴江、漠阳江等河流冲积区（图1）。气候属热带-亚热带过渡带，年均日照时数1 900～2 100 h，7—9月台风登陆频率占全省42%[14]。近年来，粤西地区重点实施“蓝色海湾”与“绿色屏障”工程。2020—2023年累计修复红树林3 200 hm^2，建成湛江雷州半岛、茂名水东湾两大国家级红树林示范区，固碳能力提升至每年6.80×10^4 t[15]。



注：底图来源于广东省自然资源厅标准地图服务系统（https://guangdong.tianditu.gov.cn/ggdt/bzdt/）；审图号为粤S（2023）095号。底图无修改。底图无修改。下同。

图1 粤西地区地理概况

Fig.1 Geographic overview of western Guangdong Province

2 数据选取与研究方法

2.1 数据选取

（1）土地利用及其驱动因子数据的选取。土地利用类型数据来源于武汉大学CLCD（China Land Cover Dataset）土地利用数据，数据集是由武汉大学黄昕老师团队解译制作的中国年度土地覆盖数据集[16]。本文分别获取2006，2014，2022年共3期土地利用遥感监测数据，分辨率均为30 m×30 m，经数据处理归类为耕地、林地、草地、水域、未利用地及建设用地6种一级类型。同时，本文选用GDP值，DEM值、人口密度、路网距离、坡度、植被覆盖度、年均降雨量、年均气温等8个要素作为FLUS模型多元驱动因素。

其中GDP、路网距离等数据来源于中国科学院资源环境数据中心（https://www.resdc.cn/data）。年均降雨量、年均气温来源于国家气象信息中心（https://data.cma.cn/）。DEM采用ASTER GDEM v3高程数据[17]。

（2）碳密度数据的选取。通过InVEST生态系统服务和交易的综合评估模型中的碳储存与碳封存模块将某一土地利用类型的碳密度设置为常量。本文碳密度数据尽量参考粤西所在广东省范围内或邻近纬度邻省前人研究数据。本文地上碳密度主要参考2010年中国陆地生态系统地上碳密度数据集[18]，地下碳密度主要参考黄玫等[19]，土壤碳密度和死亡有机物碳密度主要参考了周汝波等[20]、李瑾璞等[21]和叶金盛等[22]的研究成果，稍加修正得到最终粤西地区碳密度数据（表1）。

2.2 研究方法

（1）应用FLUS模型进行土地利用变化预测。现有土地利用变化预测方法主要包括Markov模型、CA模型、PLUS模型等，但传统Markov模型难以刻画空间异质性，经典CA模型在多驱动因子耦合及情景约束方面存在一定局限。相比之下，FLUS模型基于自适应元胞自动机（adaptive cellular automata，ACA）的方法，引入人工神经网络算法，能够综合自然条件、社会经济与政策约束等多元驱动因素，较好地模拟不同发展情景下土地利用格局的空间演化过程，尤其适用于区域尺度、多情景导向的土地利用变化预测研究。如自适应元胞自动机通过学习影响土地利用变化的自然气象、社会经济、交通条件等驱动因子，从而更好地模拟和预测土地利用变化[23]。

表1　粤西地区碳密度数据

Table 1　Carbon density data for western Guangdong Province　　单位:t/hm²

土地利用类型		C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
一级类	二级类				
耕地	水田	14.92	2.98	10.84	0
	旱地	16.56	3.31	10.84	0
林地	有林地	27.83	6.17	22.57	4.71
	灌木林	20.94	5.69	22.57	2.47
	疏林地	23.72	5.74	22.57	3.59
	其他林地	20.48	5.49	22.57	0.51
草地	高覆盖度草地	18.80	97.76	9.99	0.24
	中覆盖度草地	18.14	94.33	9.99	0.24
	低覆盖度草地	11.23	58.40	9.99	0.24
水域	河渠	0	0	0	0
	湖泊	0	0	0	0
	水库坑塘	0	0	0	0
	滩涂	0.28	1.37	3.03	1.24
	滩地	0.28	1.37	3.03	1.24
建设用地	城镇用地	1.2	0.93	12.48	0
	农村居民点	13.48	2.7	22.15	0
	其他建设用地	13.45	3.08	22.15	0
未利用地	沼泽地	5.52	1.10	23.12	0
	裸土地	0	0	0.86	0
	填海用地	0	0	0	0

注:C_{above}为地上生物碳;C_{below}为地下生物碳;C_{soil}为土壤碳;C_{dead}为死亡有机质碳。

为准确预测粤西地区2030,2038年土地利用变化趋势,本文运用FLUS模型基于粤西地区2006年、2014年土地利用数据,选取GDP值、DEM值、人口密度、路网距离、坡度、植被覆盖度、年均降雨量、年均气温等8个要素并归一化处理,以学习训练土地利用变化的空间分布模式。同时设置自然发展、生态保护和快速发展3个情景下的转移矩阵参数、邻域因子参数(表2),表中0代表不可以发生转换,1代表可以发生转换。邻域因子权重的选取范围大于0小于1,邻域因子权重越大,表示该地类的扩张能力越强[24]。FLUS模型常见的情景包括自然发展情景、生态保护情景和快速发展情景,这些情景根据不同的政策导向和社会经济发展假设进行模拟。其中,自然发展情景是指在有限的人类干预下,预测土地利用变化的自然趋势;生态保护情景指优先保护自然生态系统,限制对土地的过度开发与利用进行的预测;快速发展情景指社会经济快速发展,人口增长、工业化和城市化进程加速,土地利用变化以城市扩展为主的预测。

最终,模拟得到2022年粤西地区土地利用变化数据,并将其与2022年粤西地区实际的土地利用类型数据进行对比,通过计算kappa系数衡量模拟结果与实际数据的空间一致性,并采用总体精度(overall accuracy)指标计算模拟数据与实际数据匹配的像素比例[25]。本文kappa系数和Overall Accuracy指标结果分别为,0.822 5,0.913 6,均接近于1,这表明学习训练模拟结果与实际情况一致性好,结果可信度高,精准度高。同时,本文Figure of Merit(FoM)指标计算结果为0.02,满足精度要求。受社会经济发展不确定性、政策调控强度变化及模型结构简化等因素影响,预测结果仍存在一定误差,但整体能够较好地再现建设用地扩张,林地持续增加和耕地结构性转出的总体演变方向,能够满足趋势判断和规划决策支撑的精度要求。

表2　邻域因子和转移矩阵参数设置

Table 2　Parameter settings of neighborhood factors and transition matrix

土地利用类型		自然发展情景						生态保护情景						快速发展情景					
		耕地	林地	草地	水域	未利用土地	建设用地	耕地	林地	草地	水域	未利用土地	建设用地	耕地	林地	草地	水域	未利用土地	建设用地
邻域因子参数		0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.3	0.3
转移矩阵	耕地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
	林地	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
	草地	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1
	水域	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
	建设用地	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	未利用土地	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:表中0代表不可以发生转换,1代表可以发生转换。

(2)土地利用动态度及土地利用转移矩阵。土地利用动态度(land use dynamic degree)和土地利用转移矩阵(land use transition matrix)是研究土地利用变化的常用方法。其中,土地利用动态度可用于量

化某类土地利用在特定时间段内的变化速率，以揭示土地利用的变化强度[26]。该指标通常分为单一动态度和综合动态度，前者衡量某一特定土地类型的变化情况，后者用于评估整体土地利用的变化趋势。

土地利用转移矩阵是一种用于分析土地利用结构变化的定量方法。该方法通过构建矩阵，能够直观地展现不同土地类型之间的相互转化关系以及演变趋势。基于遥感数据和GIS技术的支持，土地利用转换矩阵能够有效揭示土地利用类型的增减变化，为土地管理与规划提供科学依据。

（3）运用InVEST模型碳储存与碳封存模块计算碳储量。在生态系统碳储量测算方面，现有模型如BIOME-BGC，CENTURY，DNDC等能够刻画碳循环的生物地球化学过程，但对输入参数和长期监测数据依赖较高，难以在区域尺度、情景模拟条件下高效应用。InVEST模型中的碳储存与碳封存模块以土地利用/覆被类型为基础，结构清晰、参数需求相对简洁，能够在保证结果可靠性的同时实现不同土地利用格局下碳储量的快速评估，已在国内外区域尺度碳储量研究中得到广泛验证[27]。该模块包含4类基本碳库，分别是地上生物量碳、地下生物量碳、土壤碳及死亡有机物碳，其中地上生物量碳基于野外样地调查数据与遥感指数反演至整个区域获得，地下生物量碳由地上生物量碳乘以经验根茎比系数得出，土壤碳从历史文献或数据库获得，死亡有机物碳采用恒定经验值。基于土地利用面积数据，模块为每一种土地利用类型赋以上4个碳库的碳密度值（单位面积碳储量）。总碳储量即为所有栅格碳储量之和，其计算公式如下：

$$C_{i_total} = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead}$$

式中：i为第i种土地利用类型；C_{i_total}为研究区范围内土地利用类型总的碳储量；C_{i_above}为地上生物量碳储量；C_{i_below}为地下生物量碳储量；C_{i_soil}为土壤碳储量；C_{i_dead}为死亡有机物碳储量。

因此，本研究通过耦合FLUS模型与InVEST模型，将FLUS在土地利用空间格局与情景模拟方面的优势，与InVEST在生态系统服务量化评估方面的优势相结合，实现“土地利用变化模拟—碳储量响应评估”的有机衔接。

3 结果与分析

3.1 粤西地区土地利用变化

应用ArcGIS软件对2006，2014，2022年粤西地区三期土地利用数据进行栅格处理，计算其结构占比与动态变化率（表3）可知，从2006—2022年粤西地区土地利用类型发生了一些变化，主要表现为耕地面积的持续减少，建设用地的快速扩张，林地面积的稳步增长以及水域面积的阶段性下降。其中，耕地面积由15 374.10 km²下降至14 479.00 km²，占比由49.05%降至46.19%，累计减少895.10 km²，表明农业生产空间有所缩减。尤其在2006—2014年期间，耕地减少速度较快（动态度−0.75%），而2014—2022年基本趋于稳定（动态度0.03%）。这一趋势与城镇化推进、建设用地扩张以及土地利用结构调整有关。此外，建设用地面积从781.53 km²增长至1 157.38 km²，占比由2.49%提升至3.659%，累计增加375.85 km²，是所有土地利用类型中增幅最大的类别。2006—2014年和2014—2022年两个阶段，其动态度分别为2.69%和2.74%，表明区域城镇化进程持续推进，基础设施建设和城市扩展不断加快，对耕地及其他土地类型的占用压力逐步增强。同时，林地面积稳步增加，由14 136.04 km²增至14 946.78 km²，占比由45.10%提高至47.69%，整体呈现稳定增长趋势，反映粤西地区生态空间质量的持续优化。而水域面积阶段性变化，在2006—2014年略有增加（动态度0.60%），但在2014—2022年显著下降（动态度−3.86%），最终占比由3.27%下降至2.37%，减少283.17 km²。水域面积的波动可能受到自然水文条件变化、围填海、河道治理及城市扩张的综合影响。草地面积整体减少，由22.30 km²降至15.16 km²（占比由0.07%降至0.05%），未利用土地有所减少，部分低效土地被开发利用，土地资源利用效率有所提升。

由2006—2022年粤西地区土地利用转移矩阵（见表4）及土地利用转移弦图（见图2）可知，16 a间耕地减少895.10 km²，其中，84.9%转出为林地，12.3%转出为建设用地。林地共增加810.74 km²，其中，31.5%来自耕地，23.2%来自未利用土地，18.7%来自水域。水域减少283.17 km²，其中，71.5%转出为耕地，18.3%转出为建设用地，10.2%转出为林地。建设用地共增加375.86 km²，其中，45.8%来自耕地，18.6%来自水域，5.6%来自林地，30.0%来自未利用土地。从2006—2022年整体转移格局看，粤西地区土地利用变化呈现出较为清晰且稳定的内在规律：一是耕地作为主要的“转出地类”，在不同阶段同时承担城镇扩张和生态修复的双重转出功能；二是林地作为最主要的“承接地类”和“净增长地类”，其扩张主要来源于耕地、未利用土地和部分水域，表明区域生态空间总体处于持续恢复与优化过程；三是建设用地扩张具有明显的选择性特征，主要占用低碳

密度、开发成本相对较低的地类,而对高碳密度林地的直接侵占相对有限。

总体来看,2006—2022年该区域逐步形成以“耕地结构性转出—林地持续扩张—建设用地集约增长”为核心特征的阶段性演进路径。该规律性变化为后续碳储量时空演变及多情景模拟结果提供了关键的结构性解释基础。其中,建设用地的扩张幅度最大,耕地的减少最为显著,反映出城镇化的加速推进对农业空间的挤压。同时,林地面积的持续增长表明区域生态保护成效初显,但水域面积的下降可能对区域生态系统及水资源利用构成一定挑战。因此,未来土地利用规划应在保障城镇化需求的同时,加强耕地保护与水资源管理,促进生态空间的可持续发展。水域面积的波动可能受到自然水文条件变化、围填海、河道治理及城市扩张的综合影响,需进一步关注水资源利用与生态环境保护的协调发展。

表 3　2006—2022 年粤西地区土地利用类型结构变化

Table 3　Structural changes in land use types in western Guangdong Province (2006—2022)

土地利用类型	2006年		2014年		2022年		动态度/%		
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	2006—2014年	2014—2022年	2006—2022年
耕 地	15 374.10	49.05	14 449.72	46.10	14 479.00	46.19	−0.75	0.03	−0.36
林 地	14 136.04	45.10	14 855.05	47.39	14 946.78	47.69	0.64	0.08	0.36
草 地	22.30	0.07	12.75	0.04	15.16	0.05	−5.35	2.36	−2.00
水 域	1 025.23	3.27	1 074.11	3.43	742.06	2.37	0.60	−3.86	−1.73
未利用土地	5.55	0.02	3.62	0.01	4.36	0.01	−4.35	2.56	−1.34
建设用地	781.53	2.49	949.50	3.03	1 157.38	3.69	2.69	2.74	3.01
合 计	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00	−6.53	3.89	−2.07

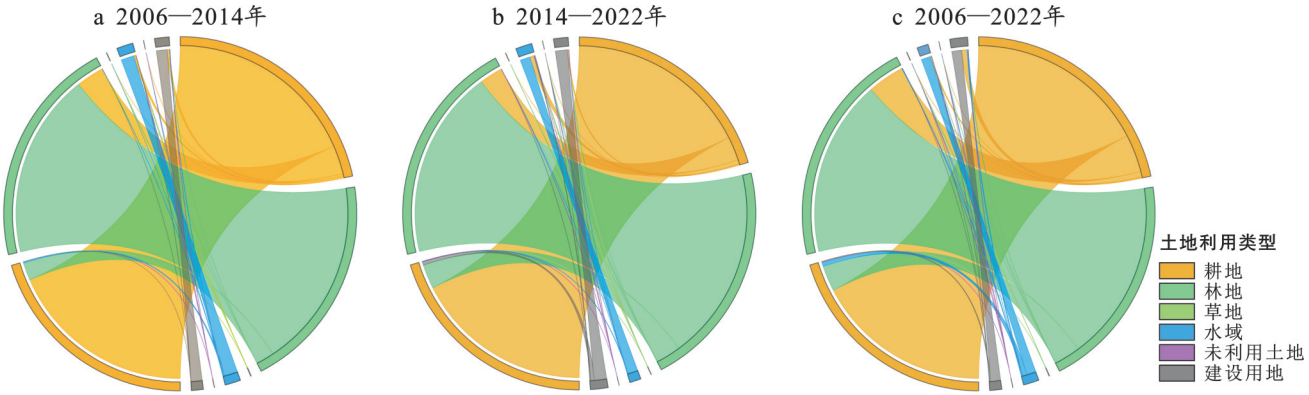


图 2　2006—2022 年粤西地区国土空间类型转移的数量变化

Fig.2　Quantitative changes in territorial space type transition in western Guangdong Province (2006—2022)

表 4　2006—2022 年粤西地区土地利用转移矩阵

Table 4　Land use transition matrix for western Guangdong Province (2006—2022)　　单位:km²

土地利用类型		2022年							
		耕 地	林 地	草 地	水 域	未利用土地	建设用地	合 计	转 出
2006年	耕 地	12 332.74	2 581.43	7.77	76.22	1.08	374.87	15 374.10	3 041.36
	林 地	1 793.34	12 313.77	1.42	6.46	0.10	20.95	14 136.04	1 822.27
	草 地	4.00	17.66	0.64	0.00	0.00	0.00	22.30	21.66
	水 域	274.76	29.99	4.81	643.90	2.01	69.77	1 025.23	381.34
	未利用土地	1.69	0.04	0.22	0.99	1.08	1.53	5.55	4.47
	建设用地	72.47	3.90	0.31	14.49	0.09	690.27	781.53	91.26
	合 计	14 479.00	14 946.78	15.16	742.06	4.36	1 157.38	31 344.75	—
	转 入	2 146.26	2 633.02	14.53	98.17	3.27	467.11	—	—
	变化量	−895.10	810.74	−7.14	−283.17	−1.20	375.86	—	—

3.2 粤西地区土地利用模拟

本文以2014年土地利用数据作为训练样本，预测2022年土地空间分布。前文验证的kappa系数和Overall Accuracy指标均满足要求。故模拟得到粤西地区2030年、2038年自然发展情景、生态保护情景、快速发展情景3种情景土地利用空间分布（表5，图3）。其中，自然发展情景以2014—2022年土地利用变化趋势为基准，假设未来区域社会经济发展和土地利用政策保持相对稳定，各类用地按照历史演变规律进行转移，主要用于刻画在无显著政策干预条件下土地利用格局的自然演化状态。生态保护情景以“绿美广东”和区域生态文明建设目标为导向，通过提高林地和水域的转入概率，限制建设用地对生态用地的占用，强化生态空间保护与修复约束，以反映生态优先发展路径下土地利用结构的优化方向。快速发展情景则在假设区域经济增长和城镇化进程加快的背景下，适当提高建设用地扩张强度和转入概率，放宽部分非生态敏感区的用地转化限制，用以模拟城镇扩张和土地开发加速条件下的土地利用变化格局。在自然发展情景下，耕地和林地占主导地位，分别占46.09%和47.92%，建设用地占比较低，水域和草地的比例稳定，未利用土地几乎为零，整体呈现出土地利用的自然平衡；生态保护情景下，耕地略有减少，林地比例略有增加，表现出对森林和生态环境保护的加强。水域面积增大，建设用地有所减少，未利用土地变化不大，整体注重生态修复和保护；在快速发展情景下，建设用地比例增加至4.10%，林地面积略有减少，耕地保持稳定。水域面积略增，未利用土地有所增加，整体反映出城市扩张和土地开发的加速。

表5 2030，2038年粤西地区土地利用类型3种情景预测结果

Table 5 Scenario prediction results of land use types in western Guangdong Province for 2030 and 2038

土地利用类型	自然发展情景				生态保护情景				快速发展情景			
	2030年		2038年		2030年		2038年		2030年		2038年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
耕地	14 450.49	46.10	14 446.58	46.09	14 421.04	46.01	14 378.95	45.87	14 433.92	46.05	14 390.54	45.91
林地	14 988.65	47.82	15 020.65	47.92	15 025.48	47.94	15 108.20	48.20	14 944.70	47.68	14 938.18	47.66
草地	12.69	0.04	10.99	0.04	13.55	0.04	12.60	0.04	13.99	0.04	12.49	0.04
水域	694.38	2.22	646.91	2.06	723.24	2.31	695.08	2.22	725.10	2.31	710.54	2.27
未利用土地	4.21	0.01	3.77	0.01	2.72	0.01	1.87	0.01	5.92	0.02	7.99	0.03
建设用地	1 194.33	3.81	1 215.84	3.88	1 158.72	3.70	1 148.05	3.66	1 221.12	3.90	1 285.02	4.10
合计	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00	31 344.75	100.00

3.3 粤西地区碳储量模拟预测

运用InVEST模型碳储存与碳封存模块计算粤西地区2022年碳储量为$1.280\ 7\times10^8$ t。基于2030年、2038年土地利用空间分布格局预测2038年碳储量分布与变化情况并与2006年、2022年碳储量进行对比（图4）。在自然发展情景下，2030年、2038年预测粤西地区碳储量分别为$1.282\ 9\times10^8$ t，$1.285\ 0\times10^8$ t，较2022年碳储量分别增加2.27×10^5 t，4.35×10^5 t；在生态保护情景下，2030年、2038年预测粤西地区碳储量分别为$1.283\ 1\times10^8$ t，$1.285\ 8\times10^8$ t，较2022年碳储量分别增加了2.40×10^5 t，5.12×10^5 t；在快速发展情景下，2030年、2038年预测粤西地区碳储量分别为$1.281\ 1\times10^8$ t，$1.281\ 2\times10^8$ t，较2022年碳储量分别增加了4.11×10^4 t，4.99×10^4 t；

模拟结果表明，3个情景下2030，2038年粤西地区碳储量均呈现增长的趋势，其中生态保护情景碳储量变化最大，2030年碳储量增加2.40×10^5 t，与2022年相比增长0.19%，2038年碳储量增加5.12×10^5 t，与2022年相比增长0.40%，该情景下更多的林地和草地被划入保护地范围，抑制了建设用地的扩张，有利于碳储量的增加；在自然发展情景下建设用地虽自然增长，但随着“绿美广东”生态建设深入推进，林地面积显著增加，2030年碳储量增加2.27×10^5 t，与2022年相比增长0.17%，2038年碳储量增加4.35×10^5 t，与2022年相比增长0.34%；快速发展情景与自然发展情景有相似点，建设用地急剧扩张，主要集中在阳江市江城区、茂名市茂南区、电白区、湛江市麻章区、吴川市等地区，但并未占用大面积林地，主要由耕地转为建设用地，因此碳储量与2022年相比基本持平，2030年仅增加4.11×10^4 t，相比2022年增长0.03%，2038年仅增加4.99×10^4 t，相比2022年增长0.04%。

从碳储量预测结果来看，粤西地区未来碳储量变化总体呈“稳中有增、情景分化显著”的演变特征，

其内在机理主要受土地利用结构调整方式的主导。生态保护情景下,碳储量增幅显著高于其他情景,说明在现有碳密度条件下,林地和草地等高碳密度地类的面积变化对区域碳储量具有放大效应;自然发展情景虽建设用地持续扩张,但由于林地保持净增长,碳储量仍呈缓慢上升趋势,反映出生态修复政策在一定程度上对冲了城镇化带来的碳损失;相比之下,快速发展情景中碳储量几乎停滞,表明当建设用地扩张速度超过生态用地增长能力时,区域碳汇提升空间将明显受限。

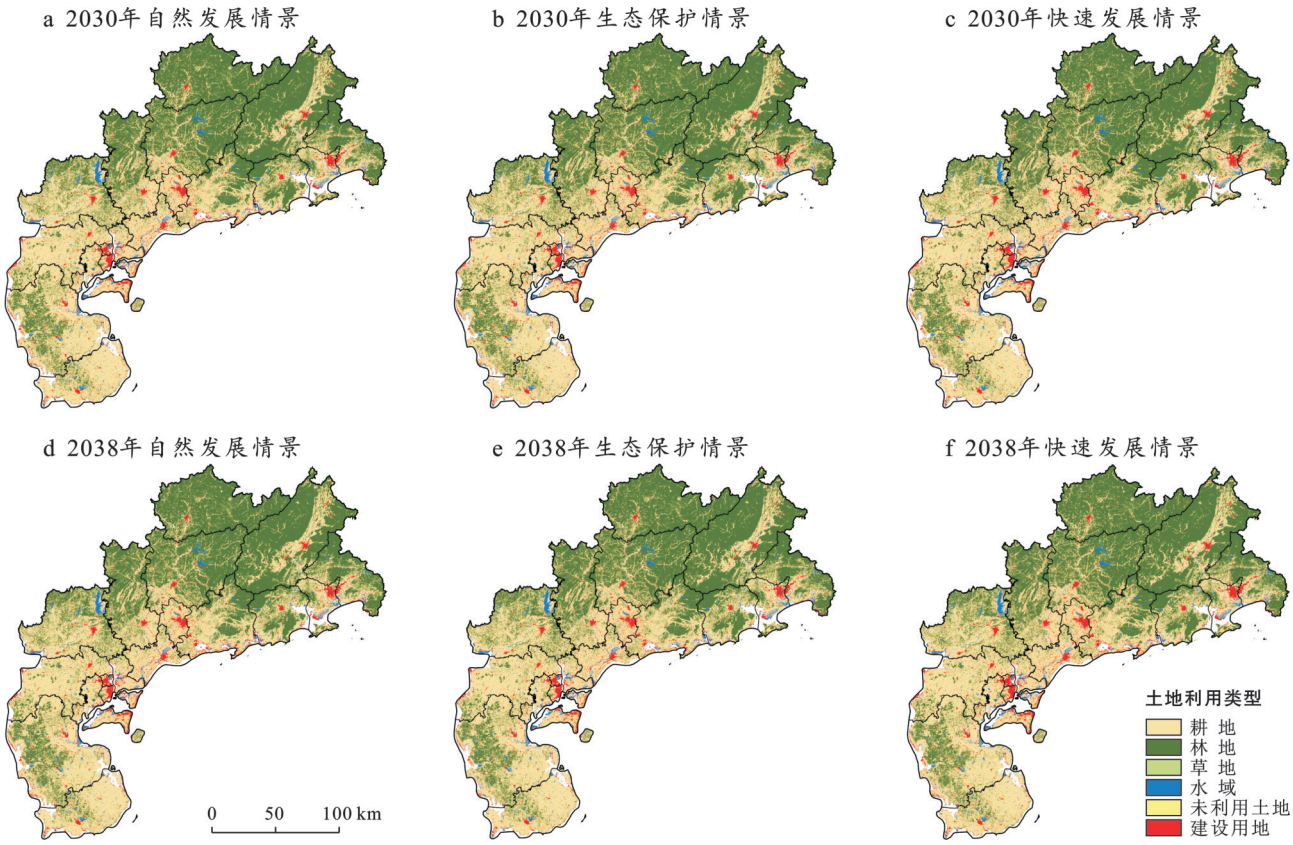


图 3　2030,2038 年粤西地区 3 种情景土地利用空间分布预测图

Fig.3　Spatial distribution prediction maps of land use for three scenarios in western Guangdong Province for 2030 and 2038

3.4　碳储量变化冷点与热点分析

基于2030,2038年碳储量预测结果,通过Getis-Ord G_i*分析得到粤西地区碳储量变化热点图(图5)。①自然发展情景下,2030—2038年粤西地区碳储量热点区较为分散,主要分布于阳江市江城区、茂名市电白区、湛江市吴川市、坡头区、麻章区及徐闻县等沿海区域,主要由于沿海地区人类经济活动频繁,土地利用类型变化频率高,导致成为碳储量变化热点;其次粤西北部茂名市高州市、信宜市等山林地区热点较多,主要因为“双碳”战略实施与“绿美广东”生态建设,使粤西地区北部森林碳储量增加。②生态保护情景下,2030—2038年粤西地区碳储量热点区集中在茂名市高州市、信宜市、湛江市廉江市等山林地区,沿海地区,说明该情景下,森林资源在“双碳”战略实施与“绿美广东”生态建设背景下进一步得到丰富,碳储量增加主要集中在粤西地区北部。③快速发展情景下,2030—2038年粤西地区碳储量热点区集中在阳江市江城区、台山市、茂名市电白区、湛江市吴川市、坡头区、麻章区及雷州市等沿海区域,说明该情景下沿海地区加速的城市化和土地开发导致了显著的碳损失,使这些区域成为碳储量减少的主要焦点。

冷热点分析结果进一步揭示了粤西地区碳储量变化在空间上的非均衡集聚特征及其形成机制。不同发展情景下粤西地区碳储量变化具有显著的空间集聚特征。自然发展与快速发展情景中,碳储量变化热点主要分布于沿海城镇和经济活跃区,反映出高强度人类活动对碳汇变化的主导影响;而生态保护情景下,热点集中于北部山地林区,表明生态政策持续实施可有效增强森林生态系统的碳汇功能。结果揭示了碳储量空间分异由人类活动强度与生态保护力度共同驱动的内在机制。

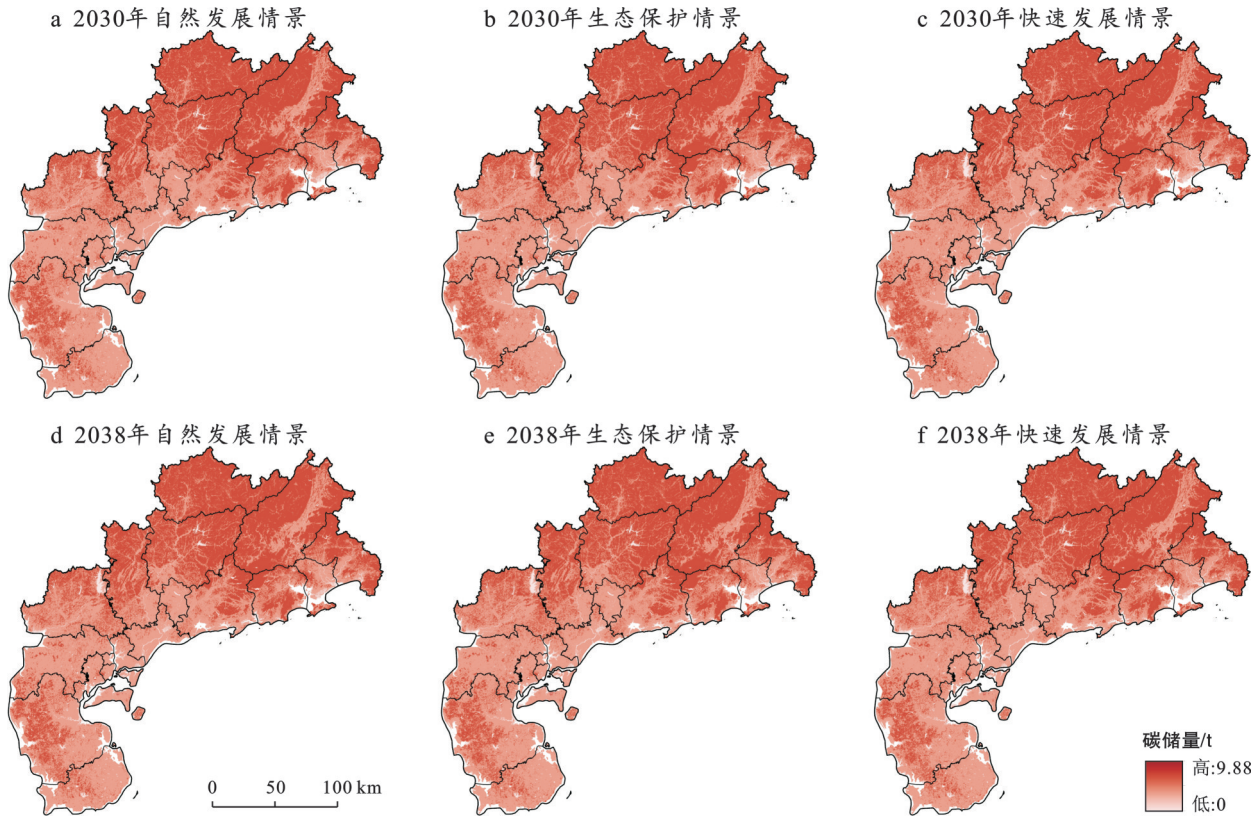


图 4 粤西地区 3 种情景 2030 年、2038 年碳储量分布预测

Fig.4 Predictions of carbon storage distribution under three scenarios in western Guangdong Province for 2030 and 2038

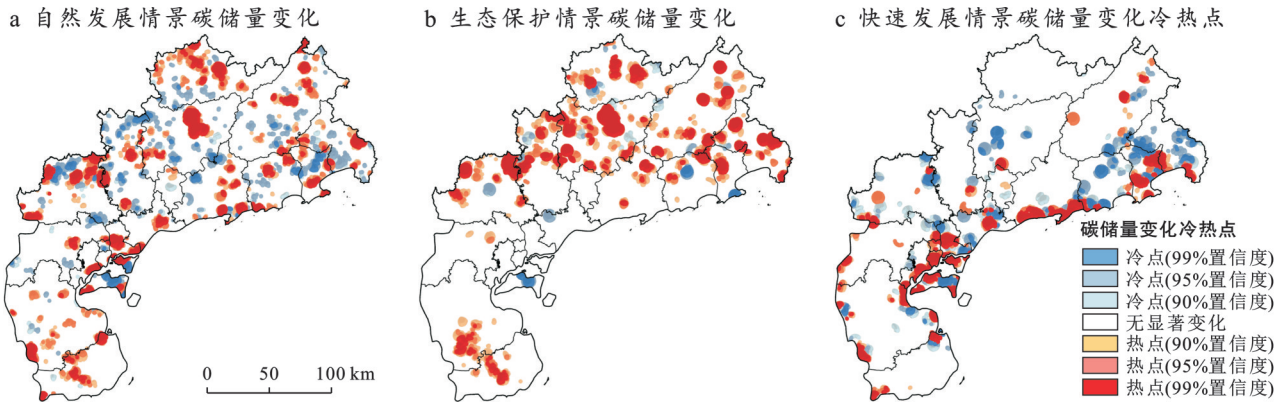


图 5 2030 年、2038 年粤西地区 3 种情景碳储量变化冷热点分布

Fig.5 Cold and hot spot distribution of carbon storage change under three scenarios in western Guangdong Province for 2030 and 2038

4 结 论

（1）2006—2022 年粤西地区土地利用变化主要表现为耕地持续减少与建设用地快速扩张，同时林地面积稳步增长，水域呈阶段性波动减少。区域土地利用以林地和耕地为主导，两者合计占比超过 93%，建设用地比例虽较低但增长最为显著，空间上主要集聚于湛江、茂名等城镇发展核心区。研究期间，耕地减少 895.10 km^2，建设用地增加 375.86 km^2，林地增加 810.74 km^2。碳储量总体呈上升趋势，从 2006 年的 1.25×10^8 t 增长至 2022 年的 1.28×10^8 t，反映出区域生态系统碳汇能力有所增强。

（2）碳储量空间分布与生态用地格局高度一致，表现为中部丘陵林地集中区碳储量较高，沿海平原及城镇周边区域碳储量相对较低，空间上呈现“中部丘陵高，沿海平原偏低”的分布特征，与林地集中分布区高度吻合。高碳储量区主要分布于中部丘陵林地集中区，而低碳储量区则集中于湛江、茂名等建设用地密集的沿海城镇区域，说明生态用地的空间配置对碳储量具有显著影响。

（3）至2030,2038年,粤西地区碳储量在3种发展情景下均有所提升,但增幅差异明显。自然发展情景下,2030年和2038年碳储量分别增加2.27×10^5 t和4.35×10^5 t,表现为在既有发展路径下碳汇能力的缓慢提升;生态保护情景下,碳储量增量进一步扩大至2.40×10^5 t和5.12×10^5 t,较自然发展情景在2030年多增加约1.30×10^4 t,2038年多增加约7.70×10^4 t,表明通过强化林地与生态空间保护,可在中长期尺度上形成稳定且持续的碳汇增益。相比之下,快速发展情景下2030年与2038年碳储量仅分别增加4.11×10^4 t和4.99×10^4 t,其增幅不足生态保护情景的1/10,显示当建设用地扩张占主导时,区域碳汇提升空间显著受限。上述结果表明,粤西地区未来生态空间调控若仅维持快速发展水平,碳储量提升幅度有限;而当生态保护强度达到一定水平后,碳汇增量将呈现明显的累积效应,为实现区域“双碳”目标提供更具现实意义的支撑。

（4）基于2030年与2038年的预测,本研究通过Getis-Ord Gi*分析揭示了不同发展情景下粤西地区碳储量变化的热点格局:自然发展情景下,热点分散于沿海与北部山林;生态保护情景下,热点集中于北部森林,表明生态政策有效提升了固碳能力;而快速发展情景下,热点则聚焦于沿海地区,凸显了快速城市化导致的碳流失风险。该结果明确了人类活动与生态政策是驱动碳储量空间分异的关键因素。

5　讨　论

（1）粤西地区碳储量时空变化影响因素。随着粤西地区城镇化与工业化进程加快,建设用地持续扩张成为区域土地利用变化的主要特征,对耕地、林地等生态用地形成明显挤压,进而影响生态系统碳储量的空间分布。张凯琪等[28]指出建设用地与水域的扩张往往会削弱区域固碳能力,与本文研究中建设用地快速增长对碳储量提升形成的制约作用相吻合。此外,林地与草地的转出是导致碳储量下降的关键因素,需加强对高碳密度地类的管控与保护。本研究显示,2006—2022年粤西地区碳储量总体呈上升趋势,反映出区域生态系统碳汇功能有所增强。这一变化与林地面积的稳步扩大及建设用地扩张未显著侵占高碳密度林地密切相关。研究期间,林地面积由14 136.04 km^2增至14 946.78 km^2,成为碳储量提升的重要推动力。与此同时,建设用地虽扩张显著,但主要由耕地和水域转入,未对林地主体造成大规模破坏,从而在一定程度上缓解了碳损失。此外,粤西地区实施的“蓝色海湾”“绿色屏障”等生态修复工程,以及红树林、珊瑚礁等典型生态系统的保护与恢复,也对区域碳汇能力的巩固与提升起到了积极作用。因此,在国土空间规划中应严格控制生态用地向建设用地的转化,尤其需注重对林地和部分高碳汇草地的保护,以维持区域碳汇功能的稳定。

（2）FLUS与InVEST模型的适用性与局限性。本研究通过耦合FLUS与InVEST模型,实现了对粤西地区土地利用与碳储量的多情景模拟,具有较好的区域适用性,有效评估了粤西地区碳储量的时空演变趋势。然而,该模型将各类土地碳密度设为常数,在模拟复杂生态系统碳循环机制方面存在一定局限。例如,模型在设定碳密度时未考虑其随时间与立地条件的动态变化,未能反映其随气候、植被演替、土壤类型及人类管理措施变化的动态过程,也未将“三线一单”、生态保护红线等政策限制因素作为硬性约束纳入FLUS模型,可能影响预测精度。未来应加强粤西本地典型生态系统（如红树林、珊瑚礁等）碳密度实地监测,并考虑引入时间动态参数,以提高模型区域适用性与预测准确性。

（3）土地利用变化对碳储量的影响机制。粤西地区碳储量变化与土地利用结构密切相关,林地面积的稳步增长是碳储量提升的主要贡献因素,而建设用地的快速扩张则对碳汇形成潜在压力。研究期内建设用地主要来源于耕地和水域转用,未大规模侵占林地,一定程度上缓解了碳损失,说明合理的土地利用结构调整有助于协同区域发展与生态保护目标。

（4）研究对提升粤西地区生态系统碳储量的启示。多情景模拟表明,2030—2038年生态保护情景下碳储量增长最为显著,说明严格保护林地,控制建设用地无序扩张,实施生态修复是维持和增强区域碳汇功能的有效路径。自然发展情景虽也呈现碳储量增长,但增速低于生态保护情景,反映自然演变过程中仍存在生态空间被挤压的风险。相比之下,快速发展情景因建设用地快速扩张,碳储量增长极为有限,提示若延续高强度的土地开发模式,将削弱生态系统碳汇潜力。同时,多情景模拟表明,粤西地区未来碳储量变化热点呈现显著的空间分异,生态保护政策驱动碳汇增长集中于北部山林,而快速城市化则导致沿海地区成为碳流失的主要热点。这印证了土地利用调控对于区域碳中和目标的关键作用。因此,未来应进一步强化国土空间用途管制,严格落实“三线一单”制度,加强对林地、湿地、红树林等关键生态空间的保护与修复,推动绿色低碳产业布局,促进经济发展与生态保护协同共进,构建与“双碳”目标相适应的绿色低碳发展格局,促进粤西地区生态与经济协调发展。

（5）为增强粤西地区生态系统碳汇功能，应严格保护现有林地、红树林、滨海湿地等高碳汇生态系统，继续推进“绿美广东”生态建设，控制建设用地无序扩张，推动土地集约节约利用。在国土空间规划中需统筹生态保护与经济发展，强化“三线一单”管控要求，构建与“双碳”目标相适应的绿色低碳土地利用格局，为实现区域“碳达峰碳中和”目标提供坚实生态支撑。

参考文献(References)

[1] 刘带，李嘉苑，唐伟，等.“绿美广东”战略下绿色低碳乡村建设的创新路径研究[J].智慧农业导刊，2024，4(23)：84-88.
Liu Dai, Li Jiayuan, Tang Wei, et al. Research on the innovation path of green and low-carbon rural construction under the strategy of “Green and Beautiful Guangdong” [J]. Journal of Smart Agriculture, 2024, 4(23): 84-88.

[2] 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)：9456-9469.
Shao Zhuang, Chen Ran, Zhao Jing, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.

[3] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A Meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1658-1670.

[4] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL].(2021-10-24). https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635518.htm.
Central Committee of the Communist Party of China and State Council of the People's Republic of China. Working guidance for carbon dioxide peaking and carbon neutrality in full and faithful implementation of the new development philosophy [EB/OL]. (2021-10-24). https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635518.htm.

[5] 广东省人民政府关于印发广东省碳达峰实施方案的通知[EB/OL].(2023-02-07). https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yf/content/post_4091117.html.
Notice of the People's Government of Guangdong Province on issuing the implementation plan for carbon peak in Guangdong Province [EB/OL]. (2023-02-07). https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yf/content/post_4091117.html.

[6] 中共广东省委关于深入推进绿美广东生态建设的决定[N].南方日报，2023-02-28(A02).
Guangdong Provincial Committee of the Communist Party of China. Decision on deepening the ecological construction of Green and Beautiful Guangdong [N]. Nanfang Daily, 2023-02-28(A02).

[7] 方赞山，钟才荣，王凤霞，等.耦合InVEST与FLUS模型的海南岛生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报，2023，43(5)：320-329.
Fang Zanshan, Zhong Cairong, Wang Fengxia, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage on Hainan Island by coupling InVEST and FLUS models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 320-329.

[8] 邓喆，丁文广，蒲晓婷，等.基于InVEST模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].水土保持通报，2022，42(3)：324-334.
Deng Zhe, Ding Wenguang, Pu Xiaoting, et al. Spatial-temporal distribution of carbon storage in Qilian Mountain National Park based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 324-334.

[9] 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 Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River basin based on InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.

[10] 史名杰，武红旗，贾宏涛，等.基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J].农业资源与环境学报，2021，38(6)：1010-1019.
Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.

[11] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva Province, Sri Lanka [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2213-2223.

[12] 任胤铭，刘小平，许晓聪，等.基于FLUS-InVEST模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J].生态学报，2023，43(11)：4473-4487.
Ren Yinming, Liu Xiaoping, Xu Xiaocong, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4473-4487.

[13] 吴素芳.粤西地区资源环境承载力评价研究[D].广东湛江：广东海洋大学，2021.
Wu Sufang. Study on resource and environment carrying capacity evaluation in west Guangdong region [D].

Zhanjiang, Guangdong: Guangdong Ocean University, 2021.

[14] 徐东鹏,郑佳荣,尤创鹏,等."双碳"目标背景下粤西地区低碳经济发展路径探析[J].中国商论,2025,34(23):138-142.
Xu Dongpeng, Zheng Jiarong, You Chuangpeng, et al. Exploring the development path of the low-carbon economy in western Guangdong under the "dual-carbon" goals [J]. China Business & Trade, 2025, 34(23):138-142.

[15] 李博,罗勉,皮泽红.绿美广东引领生态效益与经济发展协同推进[N].中国改革报,2025-08-13(2).
Li Bo, Luo Mian, Pi Zehong. Beautiful green guangdong leads the coordinated advancement of ecological benefits and economic development [N]. China Reform News, 2025-08-13(2).

[16] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[17] 张朝忙,刘庆生,刘高焕,等.SRTM 3与ASTER GDEM数据处理及应用进展[J].地理与地理信息科学,2012,28(5):29-34.
Zhang Chaomang, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan, et al. Data processing and application progress of SRTM 3 and ASTER GDEM [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012,28(5):29-34.

[18] 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):86-92.
Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. China Scientific Data, 2019,4(1):86-92.

[19] 黄玫,季劲钧,曹明奎,等.中国区域植被地上与地下生物量模拟[J].生态学报,2006,26(12):4156-4163.
Huang Mei, Ji Jinjun, Cao Mingkui, et al. Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(12):4156-4163.

[20] 周汝波,林媚珍,吴卓,等.珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J].生态科学,2018,37(6):175-183.
Zhou Rubo, Lin Meizhen, Wu Zhuo, et al. Responses of ecosystem carbon stocks to land use change on the west side of the Pearl River [J]. Ecological Science, 2018,37(6):175-183.

[21] 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.

[22] 叶金盛,汪求来.广东省森林植被碳储量及其地理分布规律[C]//第二届中国林业学术大会:S3森林经理与林业信息化的新使命论文集.南宁,2009:282-289.
Ye Jinsheng, Wang Qiulai. Forest vegetation carbon storage and its geographical distribution patterns in Guangdong Province [C] // The 2nd China National Forestry Academic Conference: S3 New Mission of Forest Management and Forestry Informatization Proceedings. Nanning, 2009: 282-289.

[23] 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.

[24] 刘吉平,王健翔,张凤,等.基于CA原理的土地利用变化模拟模型对比研究[J].吉林师范大学学报(自然科学版),2024,45(2):116-122.
Liu Jiping, Wang Jianxiang, Zhang Feng, et al. Comparative study on prediction models of land use change based on CA principle [J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition), 2024,45(2):116-122.

[25] 谢凌凌,许进龙,臧俊梅,等.基于Markov-FLUS模型的广西土地利用变化模拟预测[J].水土保持研究,2022,29(2):249-254.
Xie Lingling, Xu Jinlong, Zang Junmei, et al. Simulation and prediction of land use change in Guangxi based on Markov-FLUS model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):249-254.

[26] 李广东.全球土地覆被时空变化与中国贡献[J].地理学报,2022,77(2):353-368.
Li Guangdong. Spatio-temporal change of global land cover and China's contribution [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(2):353-368.

[27] 彭清清,迪丽努尔·阿吉,李平平,等.基于PLUS-InVEST模型的干旱区碳储量时空演变与预测:以开都河流域为例[J].环境科学,2025,46(12):7758-7768.
Peng Qingqing, Dilinuer Aji, Li Pingping, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Kaidu River basin based on PLUS-InVEST model [J]. Environmental Science, 2025,46(12):7758-7768.

[28] 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 in VEST and GeoSOS-FLUS model [J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2799-2809.