DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.026
兰健,渠立权.未来 10 年珠江流域土地利用多情景模拟及碳储量评估[J].水土保持学报,2024,38(3):
LAN Jian, QU Liquan. Multi-scenario simulation of land use and carbon storage assessment in the Pearl River Basin in the next decade[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024, 38(3):

未来 10 年珠江流域土地利用多情景模拟及碳储量评估

兰 健, 渠立权
(江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:[目的] 分析珠江流域过去 20 年及未来 10 年土地利用与碳储量的时空变化,以期为该地区的土地利用格局优化和生态系统固碳管理提供参考依据。**[方法]**基于 2002 年、2012 年、2022 年 3 期土地利用数据,分析土地利用类型变化,使用 PLUS 模型模拟 2032 年自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景下的土地利用格局,利用 InVEST 模型评估 3 种情景下生态系统碳储量变化情况。**[结果]**近 20 年,珠江流域土地类型发生较大变化,耕地向建设用地的单向转化以及耕地与林地间的双向转化是该地区土地利用变化的主要特点;同期陆地生态系统碳储量整体呈下降趋势,降幅为 0.52%;2032 年碳储量预测显示,生态保护情景下碳储量明显高于耕地保护情景和自然发展情景,分别高出 4.81×10^6 和 10.22×10^6 t。**[结论]**采取有效的生态保护政策可提高区域碳储量,维系生态系统的健康发展,未来在制定土地利用规划时应考虑经济发展与生态保护的平衡关系,强化流域生态保护和绿色发展理念,增加土地碳存储功能,助力"双碳"目标的实现和区域可持续发展。

关键词: 珠江流域; 土地利用; PLUS 模型; 碳储量
中图分类号:F301.2 **文献标识码:**A

Multi-scenario Simulation of Land Use and Carbon storage Assessment in the Pearl River Basin in the Next Decade

LAN Jian, QU Liquan
(*Jiangsu Normal University, School of Geography, Geomatics and Planning, XuZhou, Jiangsu* 221116, *China*)

Abstract: [**Objective**] The temporal and spatial changes of land use and carbon storage in the Pearl River Basin in the past 20 years and the next 10 years were analyzed in order to provide a reference for the optimization of land use pattern and ecosystem carbon sequestration management in the Pearl River Basin. [**Methods**] Based on the land use data of 2002, 2012, and 2022, this paper analyzed the changes of land use types, used the PLUS model to simulate the land use pattern under the natural development scenario, cultivated land protection scenario and ecological protection scenario in 2032, and used the InVEST model to evaluate the changes of ecosystem carbon storage under the three scenarios. [**Results**] The land types in the Pearl River Basin have changed greatly in the past 20 years, and the one-way conversion of cultivated land to construction land and the two-way conversion between cultivated land and forest land were the main characteristics of land use change in the Pearl River Basin. During the same period, the carbon storage of terrestrial ecosystems showed a downward trend as a whole, with a decrease of 0.52%. The carbon storage projection in 2032 shows that the carbon storage under the ecological protection scenario is significantly higher than that under the cultivated land protection scenario and the natural development scenario, which are 4.81×10^6 and 10.22×10^6 t higher, respectively. [**Conclusion**] Therefore, when formulating land use planning in the future, decision-makers should consider the balance between economic development and ecological protection, strengthen the concept of ecological protection and green development in river basins,

收稿日期:2023-11-07 **修回日期:**2023-12-17 **录用日期:**2024-01-15
资助项目:国家自然科学青年基金项目(42101256)
第一作者:兰健(1999—),女,广西柳州人,硕士研究生,主要从事土地利用与区域发展研究。E-mail:1371849287@qq.com
通信作者:渠立权(1978—),男,江苏徐州人,教授,博士,研究生导师,主要从事土地利用与区域发展研究。E-mail:qlq78@jsnu.edu.cn

increase the function of land carbon storage, and help achieve the "double carbon" goal and regional sustainable development.

Keywords: the Pearl River Basin; land use; PLUS model; carbon storage

Received: 2023-11-07 **Revised**: 2023-12-17 **Accepted**: 2024-01-15

土地是人地耦合系统的重要组成部分和核心载体。土地利用/覆被变化(land－use and land－cover change, LUCC)是由社会、经济和生态因素组成的相互影响的复杂过程,是对某个区域土地资源使用的直观反馈,直接表现人和自然环境的相互作用关系[1]。在快速城镇化进程中,中国城市规模不断扩大,大量农业用地转化成建设用地,土地利用和人地关系正在发生深刻变化。联合国可持续发展目标(SDGs 2030)强调,LUCC 对全球环境变化产生重要影响,中国为改善日益严峻的环境问题提出"碳达峰、碳中和"战略目标并纳入到"十四五"规划中。已有研究[2]表明,提高陆地生态系统碳储量能够有效减少 CO_2 含量,维护生态系统平衡和减缓气候变暖,助力"双碳"目标实现。区域土地利用变化是导致生态系统碳储量变化的主要原因之一[3],土地利用变化和碳储量间的内在联系也成为当前学者研究热点,如何优化土地利用结构,科学引导城市发展建设,合理有效地保护农业和生态用地,增加区域碳储量,构建自然与社会发展平衡关系已经成为当前亟待解决的问题。

建立 LUCC 模型是全面深入了解土地利用变化研究的主要方法,目前,已有诸多相关研究成果,土地类型变化研究常用的方法有土地利用动态度、土地利用程度[4]、土地利用转移矩阵[5]等。土地利用多情景模拟是通过建立不同的土地利用情景分析土地利用变化和内部相互响应作用,可为未来土地利用规划提出决策性建议,具体方法模型有 CA－Markov 模型[6]、Logistic 模型[7]、FLUS 模型[8]、CLUE－S 模型[9]、PLUS 模型[10]等。在上述诸多模型中,PLUS 模型是一种新兴的土地利用预测模型,集成土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子 CA 模型(CARS),能够准确模拟出不同年份中不同土地利用斑块级在设定的环境中发生的变化,快速精准的预测出特定条件下未来土地使用情况[11]。当前生态系统碳储量计算的方法有实测法[12]、遥感估算法[13]、模型估算法[14]等,InVEST 模型可用于生态系统碳储量评价,其拥有模拟精度较高,运行所需数据较少,可视性强、速度快、稳定性强等优点[15],是目前应用最广泛、技术最成熟的生态系统碳储量评估模型之一,部分学者利用 PLUS－InVEST 模型模拟一些地区不同情景下的土地利用变化并估算碳储量,得到较为理想的结果[16-18]。

目前,针对珠江流域的相关研究还比较少见。珠江流域是中国南部的一个完整地理单元,区域人口相对聚集,经济发展活跃,土地利用变化剧烈。流域内山区面积占 94.5%,并且有显著的喀斯特地貌发育,生态环境极其脆弱,是全国水土流失、石漠化最为严重的地区之一。因此,在国家实施"双碳"战略背景下,开展珠江流域土地利用变化和碳储量研究具有重要意义。综上,对珠江流域的土地利用变化研究进行完善和发展,描述近 20 年来珠江流域土地利用的演变过程,在 PLUS 模型和 InVEST 模型基础上,对珠江流域不同情景下的土地利用、生态系统固碳能力进行预测研究,以期能够提出可持续性的土地管理方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠江流域地处中国南部(102°14′—115°53′E、21°31′—26°49′N),包括云南东部、贵州湖南和江西南部、广西广东大部以及香港和澳门行政区等广大地区,面积约为 44.68×10^4 km^2,由西江、北江、东江和珠江等干支流流域组成(图 1)。

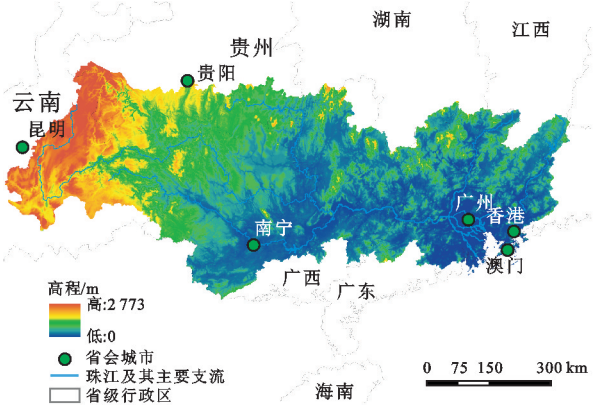

图 1 研究区地理区位

Fig. 1 Geographical location map of the study area

流域内地形复杂多样,西部是云贵高原,中部多丘陵盆地,东部为三角洲平原,地势在总体上呈西北高、东南低的特征。珠江流域属于亚热带,北回归线横贯流域中部,温和多雨,年平均气温在 14～22 ℃之间,年平均降水量为 660～2 200 mm,降水年内分配

不均匀，各个地区间差异较大。珠江河川径流丰沛，水利资源、矿产资源丰富。改革开放以来，国民经济快速发展，但由于自然条件差异大，流域西部的贵州、云南、广西等省份经济发展较慢，相比之下，东部的珠江三角洲地区已经成为全国重要的经济中心，至 2020 年珠江流域常住人口占全国 16.3%（不包括港澳地区），GDP 约占全国 15.6%。

1.2　数据来源及预处理

本研究中，各期土地利用数据来源于武汉大学 YANG 等[19]发布的全国土地覆盖数据，土地利用分类体系参考刘纪远等[20]研究成果，对数据进行整合和重分类，分成耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等 6 个一级类。使用数据包括基础地理数据、土地利用数据、限制转化数据、社会经济数据、气候数据和土壤数据等[21]。其中，社会经济数据来源于资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn）和全国地理信息资源目录服务系统（https://www.webmap.cn）；土壤类型、气候数据来源于资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn）；高程数据来源于地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn），运用 ArcGIS 软件重采样功能对土地利用数据分辨率统一为 90 m×90 m，其余栅格数据空间分辨率统一为 1 000 m×1 000 m，投影坐标系均采用 Krasovsky_1940_Albers。

1.3　研究方法

1.3.1　PLUS 模型　PLUS 模型是基于元胞自动机的斑块生成土地利用变化模型，是中国地质大学（武汉）HPSCIL@CUG 实验室团队[22]于 2020 年提出，PLUS 模型集成土地扩张分析策略（LEAS）和多类型随机种子 CA 模型（CARS），弥补现有 CA 模型在转换规则挖掘策略和土地利用动态变化模拟策略的不足，同时加入未来规划政策对土地利用变化的影响和驱动作用，计算公式为：

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

式中：X 为驱动因子组成的向量；M 为决策树数量；d 取值为 0 或者 1，1 表示其他土地利用类型可转变为土地利用类型 k，0 表示其他地类不可转变为地类 k；$h_n(X)$ 是在决策树为 n 时计算得到的土地利用预测类型；$I[h_n(X)=d]$ 为决策树的指数函数；$P_{i,k(X)}^{d}$ 为空间单元 i 处 k 类土地利用类型增长的概率。

（1）土地扩张分析策略 LEAS

LEAS 是 PLUS 模型中的一个板块，通过提取 2 个时期土地利用变化间各类用地扩张的部分并叠加多重驱动因素进行采样，从而获得每种土地利用类型和驱动因素的增长样本[23]，选取采样点后经过 RF 进行各类型土地用途扩张因素贡献和每类土地生长概率计算，再采用随机森林算法逐一对各类土地利用的驱动因素进行挖掘，获取各类用地的发展概率及该类驱动因素对该时段各类用地扩张的贡献[24]。

（2）基于多类型随机斑块种子的 CARS

该板块是基于多种土地利用随机种子的补丁生成机制[25]，是一种情景驱动的土地利用模拟模型，综合土地利用需求和土地利用竞争效应及邻域权重、转换成本矩阵和递减阈值等，在模拟过程中，土地利用需求通过一个自适应系数影响当地土地利用竞争，驱动土地利用量达到未来需求。

1.3.2　多情景设置　构建自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景 3 种发展情景。在 PLUS 模型中通过修改土地利用需求等相关参数来预测不同情景下的未来土地利用的格局变化，多情景转移矩阵设置见表 1。

自然发展情景基于 2012—2022 年土地利用变化的规律自然增长，保持土地转移概率不变，不更改土地利用转换规则，不考虑政策影响，使用 PLUS 软件中的 Markov Chain 预测 2032 年自然情境下的土地利用需求。耕地保护情景根据土地利用总体规划和“十四五”规划中有关耕地保护的政策，守住耕地数量，保护耕地质量不下降，实施最严格的耕地保护措施，通过减缓耕地向其他地类转移的速度并且抑制建设用地向外扩张的速度，实现保护耕地的目的，参考李俊等[26]的研究，将耕地向建设用地转移的概率减少 60%，降低耕地向其他用地类型转移概率。生态保护情景下重点保护林地、草地和耕地，设置耕地向建设用地的转移概率降低 30%，除建设用地外其他地类均可转换成林地、草地，并将林地、草地向建设用地转移的概率降低 50%，林地和草地可相互转换[27]，以此来预测 2032 年珠江流域生态保护情景下的土地利用类型分布。

1.3.3　驱动因子的选取　根据研究区的实际情况和数据可获取性，选取人口、GDP、距主要公路距离、距铁路距离、距城市中心距离、距水域距离、土壤类型、年平均温度、年平均降水、高程、坡度 11 种驱动因子，用于输入 PLUS 模型的 CARS 板块获取土地利用模拟结果（图 2）。

表 1 多情景转移矩阵设置

Table 1 Multi－context transition matrix setup

地类	自然发展情景						耕地保护情景						生态保护情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
b	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
d	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注：a、b、c、d、e、f 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

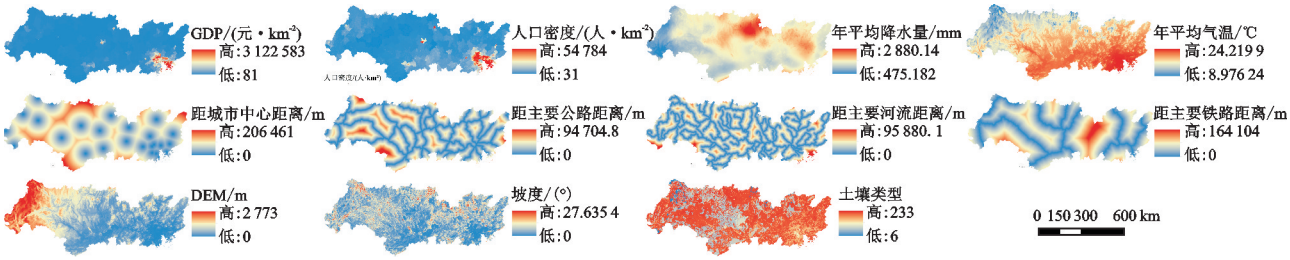

图 2 土地利用驱动因子

Fig. 2 Land use drivers

1.3.4 InVEST 模型 InVEST 模型可用于碳储量的评估，将生态系统碳储量分成地上、地下、土壤、死亡有机质 4 种基本碳库[28]。地上生物量碳库是地表土壤以上的植被所有活体的生物量，地下生物量碳库是地下植物根系中的碳，土壤有机质碳库是土壤中不同分解阶段的各种动植物残体，但由于死亡有机质凋落物的碳库数据难以获取，不给予考虑。研究区碳储量的总量是所有地类碳储量的数量之和，计算公式为：

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (2)$$

式中：C_{total} 为生态系统碳储量，C_{above}、C_{below}、C_{soil} 和 C_{dead} 分别为地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机质碳库碳储量。InVEST 模型中碳储量计算模块需要输入研究区不同地类的碳密度值，由于碳密度测定难度较大，故使用已有研究[29]中处于同一地区具有代表性的数据进行分析运用，主要参考中国森林生态系统植被碳储量，周汝波等[30]对珠江西岸生态碳储量的研究以及林彤等[31]以广东省为例的碳储量空间测算，综合可得珠江流域各土地利用类型碳密度（表 2）。

表 2 6 种土地利用类型碳密度

Table 2 Carbon intensity of six land-use types t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度	总碳密度
耕地	19.43	3.85	22.57	0	45.85
林地	76.96	23.09	77.11	0	177.16
草地	14.29	30.78	53.42	0	98.49
水域	6.14	8.89	5.14	0	14.79
建设用地	5.93	0.98	7.88	0	22.79
未利用地	5.12	2.71	0.83	0	8.66

2 结果与分析

2.1 过去 20 年土地利用变化

2.1.1 土地覆盖类型变化及其演化 利用 ArcGIS 10.7 软件对 2002 年、2012 年、2022 年 3 期土地利用数据进行重分类后得到珠江流域土地利用空间分布情况。珠江流域自西向东依次为云贵高原、两广丘陵和珠江三角洲，以山地为主、平原和盆地间隔分布的自然地理环境塑造相对稳定的地表覆被格局。林地和耕地是主要的用地类型，分别占区域总面积的 70%，25%，建设用地、草地、水域和未利用地等地类面积较小。从土地利用变化看，过去 20 年，建设用地扩张最为明显，面积从 2002 年的 6 170.89 km² 增长到 2022 年的 11 502.33 km²，扩大 86.40%，耕地、林地、草地、水域和未利用地则均有不同程度的减少（表 3）。草地面积减少幅度较大，20 年共减少 3 252.34 km²，减少 48.69%，约占初期面积的一半。耕地面积呈先减少后缓慢增加趋势，2002—2012 年减少 1 623.65 km²，2012—2022 年增加 1 118.59 km²，总

体共减少 505.06 km²，在 21 世纪初期，人们对耕地的保护意识还比较薄弱，占用大量耕地开发建设，使得耕地面急剧减少，截止 2013 年，中央农村工作会议明确提出，保证粮食安全，坚守 18 亿亩耕地红线目标，耕地面积缩减的情况才得以有效缓解。虽然不同年份的土地利用结构数据可折射出相应时段的土地利用变化结果，但其掩盖土地利用转移过程，实际的土地利用变化过程远比研究数据所反映更剧烈。

表 3　土地利用数量变化

Table 3　Changes in the number of land use types

地类	2002 年		2012 年		2022 年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
耕地	115 185.42	25.95	113 561.77	25.58	114 680.36	25.83
林地	308 836.31	69.57	308 531.86	69.50	308 709.78	69.54
草地	6 697.73	1.51	5 522.42	1.24	3 445.39	0.78
水域	7 012.53	1.58	7 070.44	1.59	5 543.67	1.25
建设用地	6 170.89	1.39	9 198.78	2.07	11 502.33	2.59
未利用地	7.37	0.002	24.99	0.01	28.71	0.01

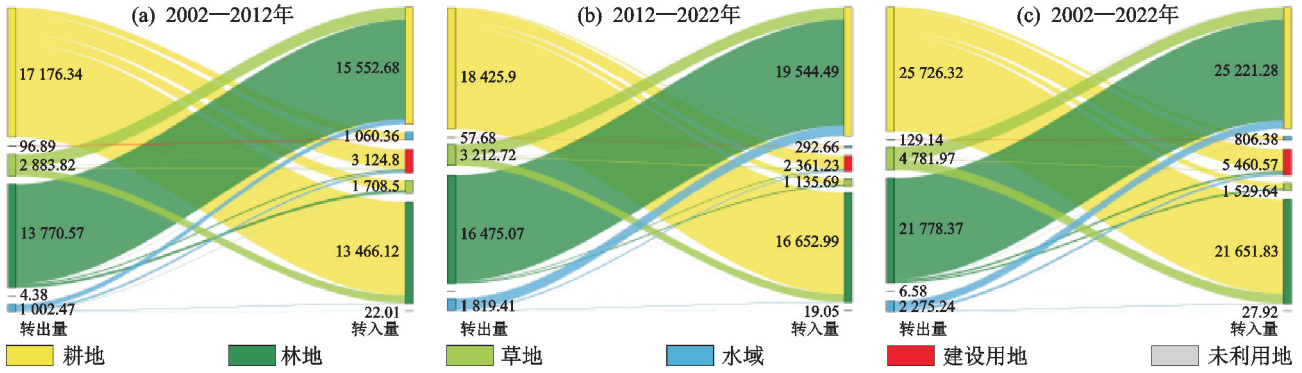

图 3　土地利用转移过程

Fig. 3　Land use transfer process

2.1.2　土地利用转移分析　土地利用转移矩阵桑基图(图 3)可看出，研究区各个地类间的相互转换和面积分流特征，耕地向建设用地的单向转化及耕地与林地间的双向转化是珠江流域过去 20 年土地利用变化的主要特征。受到快速城镇化的影响，城乡建设用地急剧膨胀，面积从 2002 年的 6 170.89 km² 增长到 2022 年的 11 502.33 km²，其中，挤占耕地 4 421.05 km²，占建设用地增量的 82.92%。近年来，珠江三角洲地区城市群的高速发展不断侵占着周边地区其他用地，生态保护和城市建设用地扩张间的平衡性受到威胁。与之同时，在耕地占补平衡和退耕还林政策的双重作用下，20 901.20 km² 的林地被开发成耕地，19 544.82 km² 的耕地被退耕还林。期间，草地、水域和未利用地也发生不同程度的土地利用转移，过去 20 年，前后 10 年的各类土地转移过程也略有不同。

2.2　未来 10 年土地利用模拟预测结果

2.2.1　模型精度检验　为验证 PLUS 模型对未来土地的利用类型模拟的精确度，以 2012 年为初始年，模拟 2022 年土地利用分布情况，并将模拟结果与 2022 年真实土地利用进行一致性检验显示，Kappa 值为 0.78，总体精度为 0.90，表明该模型具有较高的可靠性，可用于预测未来土地利用空间格局。

2.2.2　多情景预测结果　依据 2012 年和 2022 年研究区土地利用数据，使用 PLUS 模型中的 Markov 功能进行 2032 年各类土地需求量预测，将 11 种驱动因子数据输入 PLUS 模型中的 CARS 模块获得研究区多情景土地利用结果(表 4)，结合 2012—2022 年各类土地利用发展概率，使用模型中的 CARS 功能对 2032 年研究区土地利用空间布局进行情景模拟。

自然发展情景下，耕地、林地、草地的面积相较于 2022 年分别减少 86.86，145.75，860.60 km²，建设用地继续快速扩张，10 年增加 1 046.90 km²。扩张区域主要是珠江三角洲地区，广州、深州、珠海、汕头等大城市聚集于此，另有广西省内的南宁、柳州及贵州六盘水、云南曲靖等地区出现较为明显的扩张(图 4)。由此可见，在不受政策约束情况下，建设用地的无序扩张大量侵占耕地并造成粮食安全问题，而林地和草地的减少导致生态环境遭受破坏，不利于区域可持续性发展。耕地保护情景下，耕地斑块面积显著变大，相比 2022 年增加 802.78 km²，增长 0.70%，在一定程度上能保护粮食安全，建设用地斑块只有少量增加，空间上更加聚集，建设用地增长得到有效控制。该情景下，林地增加 13.78 km²，但草地减少 851.17

km^2，和自然发展情景相比，耕地面积得到有效保护，但土地利用的生态效益降低，不符合生态文明的发展需求。生态保护情景下，限制研究区内对林地、草地、水域等类型生态用地的开发，同时加快退耕还林还草步伐，与 2022 年相比，林地增加 11.91 km^2，草地增加 53.79 km^2，水域增加 22.28 km^2，生态用地面积的增加在一定程度上保护珠江流域的生态系统，建设用地的扩张得到进一步遏制。

表 4 土地利用预测结果

Table 4 Land use projection results km^2

情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2022 年真实	114 680.36	308 709.78	3 445.39	5 543.67	11 502.33	28.71
2032 年自然发展情景	114 593.49	308 564.03	2 584.79	5 592.81	12 549.24	25.89
2032 年耕地保护情景	115 483.14	308 723.56	2 594.22	5 544.19	11 539.11	26.03
2032 年生态保护情景	114 599.27	308 721.69	3 499.18	5 565.95	11 498.11	26.05

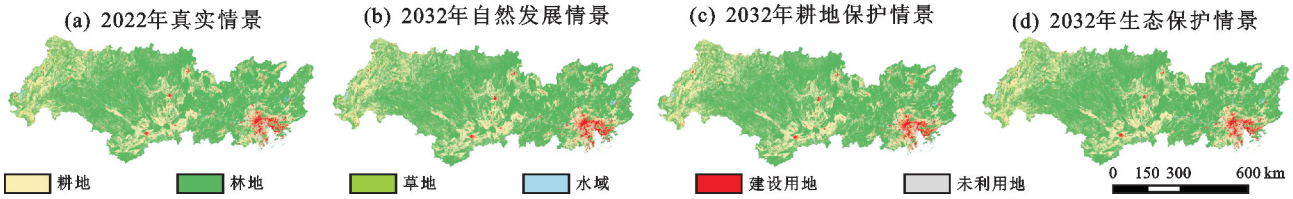

图 4 不同情景下土地覆被

Fig. 4 Land cover under different scenarios

2.3 土地碳储量变化评估

2.3.1 区域碳储量演变 使用 InVEST 模型评价珠江流域不同情景下土地利用变化情况导致的生物碳储量变化，2002 年、2012 年、2022 年珠江流域的碳储量分别为 6 088.71×10^6，6 068.91×10^6，6 057.06×10^6 t(表 5)。2002—2022 年，研究区碳储量呈逐年下降趋势，总体下降 31.65×10^6 t，降幅为 0.52%，说明珠江流域碳存能力有所减弱。结合土地利用类型变化图来看，减少的碳储量最主要的源于林地的减少。各种土地利用类型对碳储量的贡献度从大到小依次为林地、耕地、草地、建设用地、水域和未利用地，林地作为珠江流域最主要的地类，林地类型贡献的碳储量占到总值的 90%以上。草地碳储量的减少趋势最为显著，2002—2022 年减少 32.04×10^6 t，降幅为 48.57%，研究区草地类型面积的减少直接影响草地碳储量变化。耕地碳储量呈先减少后少量增加趋势，总体减少 2.32×10^6 t，降幅为 0.44%，其他地类碳储量变化程度相对较小。

近 20 年来，珠江流域的碳储量空间格局相对稳定，结合图 5 碳储量空间分布情况可知，碳储量高值主要分布在云贵高原低海拔区域及两广丘陵地区，该区域土地利用类型主要为林地、草地和耕地，植被覆盖度高，是重要的碳汇区。碳储量低值区主要位于云贵高原高海拔地区和珠江中下游城市密集区，前者因海拔高而植被稀少，后者则是以建设用地为主，导致碳储量总体较低，除建设用地外，水域也是研究区内典型的低碳储量区域。整体来看，珠江流域碳储量低值区数量较少且分布集中，由于地处低纬度地区，水热资源充足土壤肥力适宜，易形成良好的自然气候环境，为林地、耕地、草地等高碳密度植物提供优越的生长条件。

表 5 2002—2032 年各地类碳储量

Table 5 Carbon stocks by region from 2002 to 2032 ×10^6 t

土地利用类型	2002 年	2012 年	2022 年	2032 年自然发展情景	2032 年耕地保护情景	2032 年生态保护情景
耕地	393.01	387.47	391.29	390.99	394.03	391.01
林地	5 471.34	5 465.95	5 469.10	5 466.52	5 469.35	5 469.31
草地	65.97	54.39	33.93	25.46	25.55	34.46
水域	24.20	24.40	19.13	19.30	19.13	19.21
建设用地	14.06	20.96	26.20	28.60	26.30	26.20
未利用地	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
总计	5 968.59	5 953.20	5 939.70	5 930.89	5 934.38	5 940.22

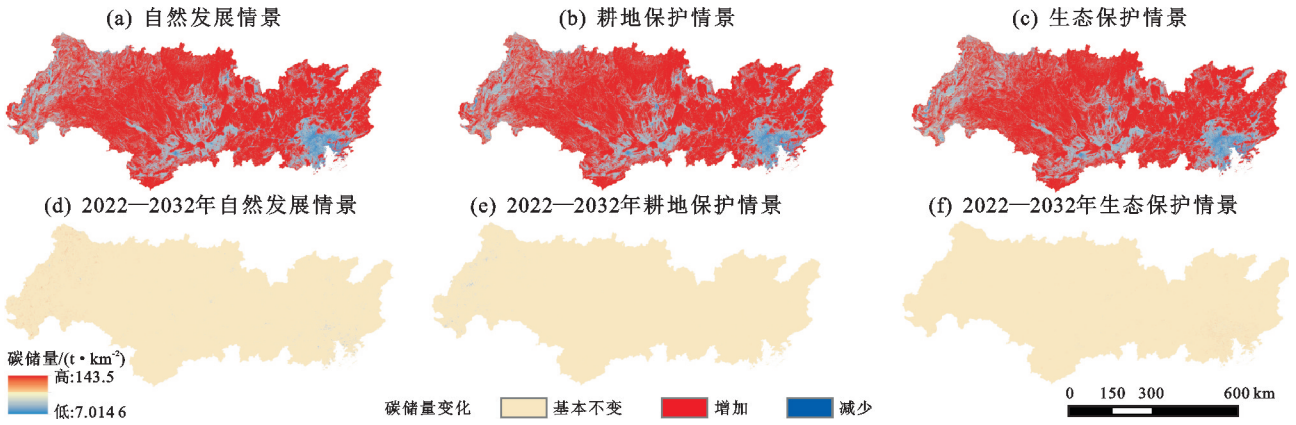

图 5　不同情景下碳储量分布及空间变化特征

Fig. 5　Distribution and spatial variation characteristics of carbon stocks under different scenarios

2.3.2　碳储量预测评估　根据模拟结果预测出 2032 年 3 种情景下的碳储量分布，2032 年珠江流域在自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景下碳储量分别为 6 047.25×10^6，6 052.66×10^6，6 057.47×10^6 t，自然发展情景和耕地保护情景下碳储量都有减少，分别比 2022 年碳储量减少 9.81×10^6，4.41×10^6 t，而在生态保护情境下，碳储量则比 2022 年增加 0.41×10^6 t。土地利用覆被分布情况是分析碳储量的依据，通过改变陆地生态系统结构和分布情况直接影响碳储量的结构和分布，从土地利用变化角度探究碳储量的变化具有积极意义[32]，土地利用类型变化伴随着大量的碳交换，碳密度值较高的用类型如林地转变为碳密度值较低的类型如建设用地，导致区域整体的生态系统碳储量下降，反之则增加。

自然发展情境下，碳储量减少主要的原因是建设用地的扩张和生态用地的流失，相比于 2022 年，耕地、林地、草地分别减少 86.87，145.75，860.60 km^2，碳储量相应减少 0.39×10^6，2.58×10^6，8.47×10^6 t，而建设用地虽然扩张 1 046.91 km^2，但由于其碳密度较小，面积少量扩张对区域碳储量总量影响较小，因此，自然发展情景下碳储量总值仍在减少。由图 5 不同情景下碳储量分布及空间变化特征可知，2022—2032 年碳储量增加区主要集中在珠江流域西部云贵高原地区，以高原山地为主植被覆盖度高生态完整性保持较好，而碳储量减少区全流域均有分布，由于自然发展情景模拟下不考虑政策调控导致大量碳密度值高的生态用地类型转变为建设用地，使碳储量进一步减少。耕地保护情景下，碳储量总较 2022 年减少 4.41×10^6 t，但仍高于自然发展情景，耕地的增加来自于林地、草地和水域的转变，碳储量减少区主要分布在流域西部，耕地保护政策的影响下林地等高碳植被类型转变为固碳能力更低的耕地，导致碳储量总量相应减少，但该情景下对耕地的保护使林地、草地等生态建设用地也得到改善，在一定程度上限制建设用地的扩张，所以，该情景与自然发展情景相比碳储量增加。生态保护情景下，碳储量达到最高，该情景下耕地、林地和草地等生态用地分别增加 81.90，11.91，53.79 km^2，用地类型碳密度较高，碳储量共增加 0.37×10^6 t，整体贡献率达 99.24%，增加显著区域主要位于珠江三角洲城市群外围，表明该情景限制城市建设向外扩张，更多注重于恢复生态环境建设，表明采取一定的生态保护措施可有效的增加区域碳储量，但是生态保护情景也在一定程度上限制城市的建设发展，如何协调生态保护和城市发展间的平衡关系值得进一步研究。

3　讨 论

本研究发现，虽然土地利用变化导致陆地生态系统碳储量变化，但是后者对前者变化表现的并不是特别敏感，碳储量变化总体上呈稳定状态，变化幅度较小。2002—2022 年，耕地、建设用地、林地分别减少 505.06，5 331.44，126.53 km^2，但是区域碳储量仅减少 0.52%，原因是不同的土地类型均具有一定的碳储能力或者土地分类数据精细程度不够，在一定程度上掩盖土地碳储能力的差异。例如，由于未区分乔木林地、灌木林地、幼林地、疏林地，加之 2014—2020 年脱贫攻坚期间大力推进退耕还林，大量的幼林地、疏林地被统计为林地，碳储量统计结果比实际偏大。

土地利用格局的变化必然引起区域碳储量的变化，但并不是决定区域碳汇、碳排放的唯一因素。要实现“双碳”目标，加强生态保护、优化土地利用格局只是一条路径，优化经济结构，促进绿色产业发展，节能减排，使用清洁能源，培养人们绿色低碳生活方式等同样重要。再者，珠江流域是我国重要的经济带，近年来，有关“珠江—西江经济带发展”“泛珠三角洲区域合作”等政策极大的促进珠江流域的经济发展水平，但是珠江流域范围大，涉及省份多，国土空间规划

和生态保护理念难以协调统一，极有可能造成局部环境和生态保护问题严峻。因此，如何从土地利用类型变化的视角探索区域经济发展，同时，遵循珠江流域生态环境自然演变规律，实现珠江全流域经济建设和生态保护的平衡是当前亟待解决的难题之一。

4 结 论

基于PLUS－InVEST模型，利用2002年、2012年、2022年3期土地利用遥感数据反演过去20年珠江流域的土地利用格局变化发现，近20年来，研究区土地类型发生较大变化，耕地向建设用地的单向转化及耕地与林地间的双向转化是该地土地利用变化的主要特点，同时，陆地生态系统碳储量整体呈下降趋势。以2012年和2022年的数据为基础，采用PLUS模型模拟该区域2032年3种情境下的土地利用格局，kappa系数为0.78，精度符合要求。预测结果显示，自然发展情景下，建设用地持续扩张，挤占大量耕地资源，不符合持续发展需求。在耕地保护情景下，耕地面积大量增加，城市扩张势头也得到遏制，但草地骤减851.17 km^2，土地利用的生态效应降低，有悖于生态文明建设理念。相比之下较为理想的是生态发展情景，该情景下林地增加11.91 km^2，草地增加53.79 km^2，水域面积也有增加，符合新时代区域持续发展对生态保护和生态建设的需要。从碳储量来看，生态保护情景下碳储量最高，说明对生态环境的合理保护可有效提高植物固碳效应。

参考文献：

[1] 匡文慧，张树文，杜国明，等.2015—2020年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析[J].地理学报，2022，77(5)：1056-1071.
KUANG W H，ZHANG S W，DU G M，et al. Remotely sensed mapping and analysis of spatio-temporal patterns of land use change across China in 2015-2020[J]. Acta Geographica Sinica，2022，77(5)：1056-1071.

[2] 朴世龙，张宪洲，汪涛，等.青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J].科学通报，2019，64(27)：2842-2855.
PIAO S L，ZHANG X Z，WANG T，et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change[J].Chinese Science Bulletin，2019，64(27)：2842-2855.

[3] 朴世龙，何悦，王旭辉，等.中国陆地生态系统碳汇估算：方法、进展、展望[J].中国科学：地球科学，2022，52(6)：1010-1020.
PIAO S L，HE Y，WANG X H，et al. Estimation of carbon sequestration in terrestrial ecosystems in China：methods，progress and prospects[J]. Scientia Sinica (Terrae)，2022，52(6)：1010-1020.

[4] 朱悦，徐志红，蒋晓敏，等.基于遥感生态指数的土地利用程度与环境质量协调发展研究：以浙江省为例[J].浙江大学学报(理学版)，2023，50(3)：322-331.
ZHU Y，XU Z H，JIANG X M，et al. Study on coordinated development of environmental quality and land use degree based on remote sensing ecological index：A case study of Zhejiang province[J].Journal of Zhejiang University (Science Edition)，2023，50(3)：322-331.

[5] 张建国，李晶晶，殷宝库，等.基于转移矩阵的准格尔旗土地利用变化分析[J].水土保持通报，2018，38(1)：131-134.
ZHANG J G，LI J J，YIN B K，et al. Evaluation ofland use change of jungar banner based on land use transfer matrix[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(1)：131-134.

[6] 刘小妮，鞠琴，鞠晓晗，等.基于CA-Markov模型的渭河中下游干流土地利用变化模拟及预测[J].节水灌溉，2022(11)：1-8.
LIU X N，JU Q，JU X H，et al. Simulation and prediction of land use change in the middle and lower reaches of the Weihe River Basin based on the CA-Markov model[J].Water Saving Irrigation，2022(11)：1-8.

[7] 阿如旱，都来，盛艳，等.基于Logistic回归模型的内蒙古多伦县土地沙漠化驱动力分析[J].干旱区地理，2019，42(1)：137-143.
A R H，DU L，SHENG Y，et al. Driving forces on land desertification in Duolun CountyInner Mongolia based on Logistic regress model[J].Arid Land Geography，2019，42(1)：137-143.

[8] 汤佳，胡希军，韦宝婧，等.基于FLUS模型的流域土地利用变化预测及水文响应评估[J].长江科学院院报，2022，39(4)：63-69.
TANG J，HU X J，WEI B J，et al. Landuse change prediction and hydrological response assessment of watershed based on FLUS model[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2022，39(4)：63-69.

[9] 樊文杰，戴晓爱，谢一茹，等.利用CLUE-S模型对四川省未来10年土地利用变化的预测与分析[J].科学技术与工程，2022，22(7)：2641-2647.
FAN W J，DAI X A，XIE Y R，et al. Prediction and analysis of land use change in Sichuan province in the next 10 years based on CLUE-S model[J].Science Technology and Engineering，2022，22(7)：2641-2647.

[10] 李安林，周艳，唐丽毅，等.怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估：基于PLUS模型的多情景分析[J].中国农业资源与区划，2023，44(1)：140-149.
LI A L，ZHOU Y，TANG L Y，et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang prefecture—a multiple-scenario analysis based on PLUS model[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and

Regional Planning,2023,44(1):140-149.

[11] 罗芳,潘安,陈忠升,等.四川省宜宾市 1980—2018 年耕地时空格局变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2021,41(6):336-344.
LUO F, PAN A, CHEN Z S,et al. Spatiotemporal pattern change of cultivated land and its driving forces in Yibin city, Sichuan province during 1980-2018[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2021,41(6):336-344.

[12] 奚小环,张建新,廖启林,等.多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题:以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例[J].第四纪研究,2008,28(1):58-67.
XI X H, ZHANG J X, LIAO Q L, et al.Multi-purpose regional geochemical survey and soil carbon reserves problem: Examples of Jiangsu, Henan, Sichuan, Jilin provinces and inner Mongolia[J].Quaternary Sciences,2008,28(1):58-67.

[13] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907.
MA X Z, WANG Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(17):5898-5907.

[14] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
HUANG C H, YANG J, ZHANG W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress[J].Chinese Journal of Ecology,2013,32(12):3360-3367.

[15] 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].Acta Ecologica Sinica,2021,41(10):4052-4065.

[16] 祁迷,王飞,滑永春,等.基于 PLUS 与 InVEST 模型的内蒙古自治区土地利用变化及碳储量评估[J].水土保持学报,2023,37(6):194-200.
QI M, WANG F, HUA Y C,et al. Assessment of land use change and carbon storage in inner Mongolia autonomous region based on PLUS and InVEST models[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):194-200.

[17] 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 J, SHI P J, WANG Z Y, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Jiuquan city ecosystem based on PLUS-InVEST model[J].Environmental Science,2024,45(1):300-313.

[18] 胡佶熹,勒先文,王卫林,等.基于 PLUS-InVEST 模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测[J/OL].环境科学,1-17[2024－02－23]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202305239.
HU J X, LE X W, WANG W L, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiangxi province based on PLUS-InVEST model[J/OL].Environmental Science,1-17[2024－02－23]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202305239.

[19] YANG J, HUANG X. 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.

[20] 刘纪远,邵全琴,延晓冬,等.土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探[J].地球科学进展,2011,26(10):1015-1022.
LIU J Y, SHAO Q Q, YAN X D,et al. An overview of the progress and research framework on the effects of land use change upon global climate[J]. Advances in Earth Science,2011,26(10):1015-1022.

[21] 王佳楠,张志.基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析[J].西北林学院学报,2022,37(3):139-148,179.
WANG J N, ZHANG Z. Land use change and simulation analysis in the northern margin of the Qaidam Basin based on Markov-PLUS model[J].Journal of Northwest Forestry University,2022,37(3):139-148,179.

[22] LIANG X, GUAN Q F, 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.

[23] 陈竹安,刘子强,张立亭,等.南昌市 LUCC 多情景模拟和生境质量时空演变与预测[J].农业机械学报,2023,54(5):170-180.
CHEN Z A, LIU Z Q, ZHANG L T,et al. Multi-scenario simulation of LUCC and spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in Nanchang city[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):170-180.

[24] 杨潋威,赵娟,朱家田,等.基于 PLUS 和 InVEST 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-temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi'an based on PLUS and InVEST models[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(4):175-182.

[25] 张澔宇,史名杰,曹月娥,等.基于 MOP-PLUS 模型的新疆阿克苏地区土地利用景观格局优化及多情景模拟.西南农业学报,2022,35(10):2256-2264.

ZHANG H Y, SHI M J, CAOY E, et al. Optimization of land use landscape pattern and multi scenario simulation in Aksu region of Xinjiang based on MOP-PLUS model[J].2022,35(10):2256-2264.

[26] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估.水土保持通报,2023,43(1):378-387.
LI J, YANG D H, WU F Z, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and in VEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(1):378-387.

[27] 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.生态与农村环境学报,2023,39(1):41-51.
SUN X X, XUE J H, DONG L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and In-VEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(1):41-51.

[28] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.
PIAO S L, FANG J Y, HE J S,et al. Spatial distribution of grassland biomass in China[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2004,28(4):491-498.

[29] 徐新良,曹明奎,李克让.中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J].地理科学进展,2007,26(6):1-10.
XU X L, CAO M K, LI K R.Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China[J]. Progress in Geography,2007,26(6):1-10.

[30] 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 R B, LIN M Z, WU Z, 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.

[31] 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.

[32] 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]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(13):4625-4636.