

庄子薛, 谢梦晴, 张文萍, 王倩娜. 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测: 以成德眉资地区为例 [J]. 风景园林, 2022, 29 (5) : 38-44.

# 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测 ——以成德眉资地区为例

## Temporal and Spatial Changes and Multi-scenario Simulation Prediction of Carbon Storage Based on FLUS-InVEST Model: A Case Study of Chengdu–Deyang–Meishan–Ziyang Area

庄子薛 谢梦晴 张文萍 王倩娜\*

ZHUANG Zixue, XIE Mengqing, ZHANG Wenping, WANG Qianna\*



中图分类号: TU982

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)05-0038-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.05.0038.07

收稿日期: 2021-10-18

修回日期: 2022-03-06

庄子薛 / 女 / 侗族 / 四川大学建筑与环境学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计、绿色基础设施

ZHUANG Zixue (Dong) is a master student in the College of Architecture and Environment, Sichuan University. Her research focuses on landscape planning and design, and green infrastructure.

谢梦晴 / 女 / 四川大学建筑与环境学院在读硕士研究生 / 研究方向为城市绿地网络规划、绿色基础设施

XIE Mengqing is a master student in the College of Architecture and Environment, Sichuan University. Her research focuses on urban green space network planning, and green infrastructure.

张文萍 / 女 / 四川大学建筑与环境学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计、绿色基础设施

ZHANG Wenping is a master student in the College of Architecture and Environment, Sichuan University. Her research focuses on landscape planning and design, and green infrastructure.

王倩娜 / 女 / 博士 / 四川大学建筑与环境学院副教授、硕士生导师, 风景园林教研室主任 / 研究方向为生态空间规划、绿色基础设施、新能源景观

通信作者邮箱 (Corresponding author Email) : qnwang@scu.edu.cn

WANG Qianna, Ph.D., is an associate professor and master supervisor in the College of Architecture and Environment, Sichuan University, and the director of Landscape Architecture Teaching and Research Section in Sichuan University. Her research focuses on ecological spatial planning, green infrastructure, and new energy landscape.

**摘要:** 通过对陆地生态系统的碳储量研究与各类用地的碳排放与存储核算, 能够有效量化碳排放, 助力国土空间规划, 并优化土地利用方式。以成德眉资地区为研究区, 基于 2000、2010、2020 年的土地利用数据, 耦合 FLUS-InVEST 模型对 20 年来的碳储量时空变化进行分析, 并对 2030 年生态修复力度不同的 3 种情景下的碳储量进行了模拟预测。结果表明: 2000—2020 年, 研究区因耕地与草地面积减少、固碳能力降低导致碳储量相应减少; 2030 年随着生态修复力度的加强, 研究区的碳储量损失会逐渐减小, 生态空间质量将得到更好的改善, 生态系统固碳能力也将显著提升; 现有的政策规划能很好地改善研究区未来碳储量薄弱空间, 并有效提升其固碳能力。建议落实国土空间生态修复规划, 多管齐下引领低碳生活, 助力研究区实现碳中和目标。

**关键词:** 风景园林; FLUS-InVEST 模型; 多情景模拟; 碳储量; 碳中和; 生态修复

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金 (编号 31500581); 成都市科技项目 (编号 2019-RK00-00261-ZF); 2021 四川大学研究生培养教育改革创新改革项目 (编号 GSALK2021021); 2021 四川大学基层教学组织特色品牌项目 (编号 2021JCJX14)

**Abstract:** Studying the carbon storage of terrestrial ecosystems and accounting for carbon emissions and storage of various land uses can support territorial spatial planning and optimize land use by effectively quantifying carbon emissions. Taking Chengdu–Deyang–Meishan–Ziyang Area in Sichuan Province as an sample, this research, based on land use data in 2000, 2010 and 2020, and coupled with the FLUS-InVEST model, analyzes the temporal and spatial changes of carbon storage in the past 20 years. It also simulates and predicts the carbon storage under three scenarios with different ecological restoration efforts in 2030. The result shows that from 2000 to 2020, the carbon storage in the study area decreases due to the degradation of cultivated land and grassland and the reduction in carbon sequestration capacity; by 2030, with the indentification of ecological restoration efforts, the carbon storage loss will gradually decrease, the quality of the ecological space will be further improved, and the carbon sequestration capacity of the ecosystem will also be significantly enhanced; in the future, existing policies and plans can well improve the weak points of carbon storage in the study area and effectively enhance carbon sequestration capacity thereof. This research proposes to the terrestrial spatial ecological restoration planning, lead a low-carbon life in a multi-pronged way, and help the study area to achieve the goal of carbon neutrality.

**Keywords:** landscape architecture; FLUS-InVEST model; multi-scenario simulation; carbon storage; carbon neutrality; ecological restoration

**Fund Items:** Young Scientists Fund of the National Natural Science Fund of China (No. 31500581); Chengdu Science and Technology Project (No. 2019-RK00-00261-ZF); 2021 Sichuan University Graduate Education Innovation Reform Project (No. GSALK2021021); 2021 Sichuan University Primary Teaching Organization Characteristic Brand Project (No. 2021JCJX14)

近年来，各国政府和国内外科学组织制定了系列协议敦促各国解决气候问题<sup>[1-3]</sup>。2020年9月，习近平主席表示中国力争2060年实现碳中和，中国的控碳减排与生态保护工作刻不容缓。陆地生态系统通过林地、草地等碳汇用地捕集CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等温室气体来调节区域气候并增加碳储量<sup>[4]</sup>，研究其碳储量，可通过对各类用地进行碳收支核算，实现国土空间规划层面的碳氧平衡监测，并借力生态保护与修复等措施以优化碳储量，实现碳中和的目标<sup>[5]</sup>。

目前，国内外用于研究碳储量的方法主要有生物量法<sup>[6]</sup>、簿记法<sup>[7]</sup>、联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）清单法<sup>[8]</sup>等。近年来，多数学者开始运用运行快、所需数据少且实用性较强的生态系统服务和权衡综合评估（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST）模型研究流域<sup>[9]</sup>、城市<sup>[10]</sup>、湿地等区域的碳储量，并指出碳储量的研究对陆地生态系统碳库管理有重要参考价值。

然而陆地生态系统处于动态变化中，因此一些学者通过模拟未来土地利用变化来预测碳储量，如元胞自动机马尔科夫链（Cellular Automata-Markov, CA-Markov）<sup>[11]</sup>、小尺度土地利用变化及空间效应（Conversion of Land Use and Its Effects at Small Region Extent, CLUE-S）<sup>[12]</sup>等模型，既往的模型大多只能模拟单个土地利用类型的动态变化，无法预测不同土地利用类型之间的相互作用和竞争<sup>[13]</sup>，且碳储量预测还需考虑自然环境、交通区位和社会经济等因子的变化。

模拟不同规划政策下的城市土地利用格局，能够指导国土空间规划增加蓝绿碳汇，推动生态文明建设。未来土地利用模拟（Future Land Use Simulation, FLUS）模型能耦合人类活动和自然环境因素的影响，模拟区域空间内各类土地的相互作用并计算出较高精度的未来土地利用的分布<sup>[14-18]</sup>。已有学者基于FLUS模型在全国、区域或市域尺度下研究碳储量<sup>[15]</sup>、生态空间<sup>[16]</sup>、水文<sup>[17]</sup>或土地利用<sup>[18]</sup>的变化。但利用FLUS模型评估生态修

复效果、指导国土空间规划的研究较为罕见。

本研究选取成德眉资地区为研究区，针对生态修复将如何影响土地利用并作用于生态系统碳储量的时空变化这一科学问题，基于研究区2000、2010、2020年的土地利用数据，耦合FLUS模型与InVEST模型，对研究区历史碳储量时空变迁作出研究，并预测2030年多情景下的碳储量情况。研究旨在从国土空间生态修复的视角出发，对研究区的碳储量进行问题研判和趋势预测，助力碳中和目标的达成。与以往研究不同的是，本研究聚焦目前较为前沿的碳中和议题，将已成熟的FLUS模型与InVEST模型进行耦合，结合国土空间规划探究固碳功能优化路径，基于研究结果，针对研究区碳储下降问题，从生态修复的视角提出针对性建议，为研究区未来碳的“零排放”提供支撑和参考。

## 1 研究区概况、数据来源及预处理

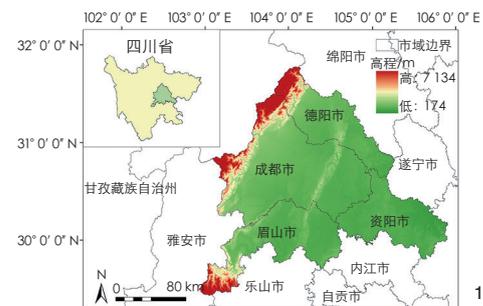
### 1.1 研究区概况

成德眉资地区（102°49′~105°27′E，29°15′~31°42′N）由成都市、德阳市、眉山市及资阳市组成，是四川省政府为将区域发展新格局的主干从“成都”扩展为“成德眉资”而划定的区域<sup>[19]</sup>，也是国家新批复的“成都都市圈”的规划扩展范围<sup>[20]</sup>。研究区地处四川盆地西部，东邻重庆，西连阿坝州、雅安，南接乐山、内江，北靠绵阳（图1），总面积共3.31万km<sup>2</sup>，地势西高东低、河网纵横、物产丰富，以亚热带季风性湿润气候为主。研究区2020年常住人口2966万，地区生产总值2.23万亿元。

“十三五”以来，经过生态屏障建设和美丽四川目标的奋斗，研究区的生态修复治理取得了显著成效，但仍面临着保护修复工作的系统性不足、固碳服务功能提升成效不明显等问题<sup>[21]</sup>。通过对碳储量进行评估和模拟，能从多方面为研究区的生态文明建设提出有效策略，打造生态宜居的都市圈<sup>[20]</sup>。

### 1.2 数据来源及预处理

研究数据<sup>[22-23]</sup>（表1）中的土地利用数据经ArcGIS去黑边、合并与裁剪后按《土地利用现状分类》<sup>[24]</sup>重分类为耕地、林地、草地、



1 研究区区位及高程图  
Location and elevation map of the study area

水域和建设用地5类；DEM数据经ArcGIS合并、裁剪与栅格坡度、坡向计算得到坡度、坡向数据；铁路、高速公路、国道、省道与水体的矢量数据经过ArcGIS欧氏距离计算得到交通区位因子；自然保护区数据经过ArcGIS栅格转化与插值得到限制因子。土地利用、驱动因子及限制因子统一坐标系至WGS\_1984\_UTM后重采样至30m分辨率，用于FLUS模型计算；ArcGIS计算2000—2010年、2010—2020年的各土地利用类型的土地利用转移矩阵及概率（表2、3），用于总结土地利用历史变化规律以设定FLUS模型相关参数。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用时空变迁研究

土地利用动态度可定量研究一段时间内某种土地利用类型的数量变化情况，对区域内土地利用时空变迁研究具有重要作用<sup>[25]</sup>。以研究区2000、2010、2020年3期土地利用数据（成都市与资阳市统一采用2016年成都市代管简阳市之后的行政边界进行计算）为基础，计算出各用地类型的土地利用的动态度、时空转移矩阵及概率（表2、3），用以预测研究区2030年多情景下的土地利用与碳储量情况。

### 2.2 基于FLUS模型的土地利用多情景模拟预测

FLUS模型是由Liang等<sup>[14]</sup>基于CA模型改良开发得到的对未来土地利用进行模拟预测的模型，主要包括神经网络模型算法（Artificial Neural Network, ANN）模块、CA模块和Markov模块三大部分<sup>[18]</sup>。本研究首先利用ANN模块对研究区土地利用数据及变化影

表 2 研究区 2000—2010 年土地利用转移矩阵及概率  
Tab. 2 Land use transfer matrix and probability in the study area (2000—2010)

2000 年土地 利用类型	2000—2010 年各类型土地转移面积 (S/km <sup>2</sup> ) <sup>a)</sup>					2000—2010 年各类型土地转移概率 (i, j) / % <sup>b)</sup>				
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	耕地	林地	草地	水体	建设用地
耕地	23 550.22	213.70	14.68	59.17	299.07	97.57, 97.63	0.89, 3.24	0.06, 1.42	0.25, 18.00	1.24, 28.42
林地	138.99	5 698.13	158.57	10.63	1.95	2.31, 0.58	94.84, 86.26	2.64, 15.34	0.18, 3.23	0.03, 0.19
草地	168.32	679.54	818.23	0.16	44.82	9.84, 0.70	39.71, 10.29	47.82, 79.13	0.01, 0.05	2.62, 4.26
水体	144.02	12.09	38.72	253.90	5.14	31.73, 0.60	2.66, 0.18	8.53, 3.74	55.94, 77.24	1.13, 0.49
建设用地	119.43	1.93	3.82	4.85	701.39	14.36, 0.50	0.23, 0.03	0.46, 0.37	0.58, 1.48	84.36, 66.65

注: a) 转移面积 (S) = 前一年份某类土地转换为后一年份另一类土地的面积; b) 转移概率 (i, j) 中,  $i=S/$  前一年份某类土地总面积  $\times 100$ ,  $j=S/$  后一年份另一类土地总面积  $\times 100$ 。

表 3 研究区 2010—2020 年土地利用转移矩阵及概率  
Tab. 3 Land use transfer matrix and probability in the study area (2000—2010)

2010 年土地 利用类型	2010—2020 年各类型土地转移面积 (S/km <sup>2</sup> ) <sup>a)</sup>					2010—2020 年各类型土地转移概率 (i, j) / % <sup>b)</sup>				
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	耕地	林地	草地	水体	建设用地
耕地	21 959.92	229.01	150.48	151.67	1 477.01	91.62, 97.84	0.96, 3.49	0.63, 14.11	0.63, 29.23	6.16, 58.48
林地	233.35	6 129.40	183.29	9.04	20.38	3.55, 1.04	93.22, 93.59	2.79, 17.20	0.14, 1.74	0.31, 0.81
草地	142.49	185.55	713.28	44.82	41.36	12.64, 0.63	16.46, 2.83	63.26, 66.92	3.98, 8.64	3.67, 1.64
水体	53.15	3.78	8.94	309.23	11.36	13.75, 0.63	0.97, 0.01	2.31, 0.84	80.02, 59.60	2.94, 0.45
建设用地	55.66	1.28	9.80	4.12	975.53	5.32, 0.62	0.12, 0.00	0.93, 4.00	0.40, 0.79	93.23, 38.64

注: a) 转移面积 (S) = 前一年份某类土地转换为后一年份另一类土地的面积; b) 转移概率 (i, j) 中,  $i=S/$  前一年份某类土地总面积  $\times 100$ ,  $j=S/$  后一年份另一类土地总面积  $\times 100$ 。

表 1 数据类型及来源  
Tab. 1 Data type and sources

数据类型	数据名称	数据年份	数据来源	分辨率	
基础数据	行政边界	2013	国家地球系统科学数据中心 (geodata.cn)	矢量数据	
	土地利用	2000、2010、2020	GlobeLand30 全球地表覆盖数据 (globallandcover.com)	30 m	
自然环境 因子	DEM		地理空间数据云 (gscloud.cn/home)	30 m	
	坡度	2020	基于 DEM 数据计算得到	30 m	
	坡向				
	年均气温	2015	资源环境科学与数据中心 (resdc.cn)	1 km	
年均降水量					
交通区位 因子	到水体距离	2020	基于土地利用数据计算得到	矢量数据	
	到铁路距离				
	到高速公路距离	2020			全球地理信息资源目录服务系统 (webmap.cn)
	到国道距离				
到省道距离					
社会经济 因子	人口密度	2020	地理国情监测云平台 (dsac.cn)	1 km	
	GDP				
限制因子	自然保护区	2020	资源环境科学与数据中心 (resdc.cn)	矢量数据	
	地上碳密度		《基于 LUCC 的成都平原地区碳排放效应研究》 <sup>[22]</sup>		
碳密度 数据	地下碳密度		《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》 <sup>[23]</sup>		
	土壤碳密度		《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》 <sup>[23]</sup>		

响因子进行计算, 得出每种土地利用类型在各像元上出现的概率; 其次利用 CA 模块将出现概率与土地像元数 (Markov 模块计算得到)、邻域因子及转移成本矩阵结合, 计算出土地

利用变化的最终概率; 最后利用轮盘赌选择机制分配每个像元的土地利用类型, 得到最终结果。

为了明确不同的生态修复力度对研究区

碳储量产生的影响, 评估已有政策的未来保护修复效果并识别潜在敏感区域, 探究固碳服务提升的有效途径, 本研究根据相关政策文件设定了 3 种不同情景发展 (表 4)。基于研究区 2000、2010、2020 年 3 期土地利用时空变迁结果以及不同情景下的 FLUS 模型所需的土地利用影响因子、像元数、领域因子及转移成本矩阵参数, 在模型已验证精准的情况下, 模拟出 2030 年 3 种情景下的土地利用情况, 以便计算对应情景下的碳储量。具体的参数设置流程及精度验证分为如下 5 个步骤。

1) 土地利用变化影响因子筛选。本研究参考既往 FLUS 模型研究成果<sup>[15-18]</sup>及研究区相关规划政策<sup>[20-21, 26]</sup>, 确定了 12 项驱动因子和 1 项限制因子。驱动因子选取依据为: 海拔、地势起伏、坡面朝向等可从本质上决定土地利用类型, 因此选取 DEM、坡度与坡向数据; 气候可以影响土地覆盖、水文与环境质量, 因此选取年均气温与降雨数据; 研究区在推进基础设施同城化的过程中, 多层次轨道交通网络会对土地利用方式产生显著影响, 同时在强化水资源保障的需求下, 水利基础设施建设等工程也会引起土地变化, 因此选取到铁路、高速公路、国道、省道及水体的

表 4 多情景发展设定<sup>[19-21, 26]</sup>  
Tab. 4 Multiple scenarios development setting<sup>[19-21, 26]</sup>

情景名称	发展目标	生态保护目标	发展情况
A 情景： 正常发展	积极完成同城融合建设步调，打造	形成地区生态安全屏障；形成生态安全底线，提升森林草原质量，改善人居环境	遵循“十三五”规划落实生态保护与修复工作，让生态恶化的趋势得到遏制，碳汇用地质量稳步提升 <sup>[21]</sup> ；但在修复工作上还存在矛盾突出、系统性不足、与经济没有形成良好循环等问题
B 情景： 生态修复力度小	成渝城市群重要极核，建成空间结构清晰的现代化都市圈 <sup>[19-20]</sup>	形成地区生态安全屏障；保护自然生态系统的基本稳定	保守地进行生态保护与修复工作，忽视生态空间的内在规律，生态系统的固碳功能受损；碳减排工作力度不佳，资源、能源的消耗与生态本底保护产生矛盾
C 情景： 生态修复力度大		形成多层次、网络化、功能复合的生态格局；推进研究区生态环境共保共治 <sup>[21, 26]</sup>	基于国土空间规划大力开展系统性的生态保护与修复工作，通过系统治理与分区分类修复增强生态系统服务 <sup>[21]</sup> ；将低碳绿色生产生活的理念落实到具体规划设计中

表 5 多情景下邻域因子参数  
Tab. 5 Neighborhood factor parameters in multiple scenarios

土地利用类型	A 情景下邻域因子参数	B 情景下邻域因子参数	C 情景下邻域因子参数
耕地	0.80	0.85	0.60
林地	0.65	0.65	0.65
草地	0.30	0.40	0.20
水体	0.45	0.45	0.45
建设用地	1.00	1.00	0.80

距离数据<sup>[20]</sup>；此外，研究区对 2025 年 GDP、常住人口城镇化率设定了具体指标，选取能帮助反映建设用地变化的 GDP 和人口密度数据为社会因子<sup>[20]</sup>。限制因子是指一定时间内不会发生土地利用类型变化的区域。研究区内有龙溪-虹口、白水河 2 个国家级自然保护区及多个地方自然保护区，该类保护区被限制土地的开发和转换<sup>[21]</sup>，因此选取为限制因子。

2) 未来土地利用像元设定。研究基于表 2、表 3 数据，通过 Markov 链预测可得到 A 情景下 2030 年的土地利用及转移情况。在 B 情景下，建设用地不断侵占其他用地，国土空间绿化工作推进不足，森林、草原与农田生态系统未得到充分保护与修复，参考规划政策<sup>[20-21]</sup>并调试模型后设定耕地、草地转移为建设用地的概率增加 30%，林地转移为草地的概率增加 15%；同时农田面积还因粮食需求增加而上升，设定林地转移为耕地概率增加 20%。在 C 情景下，研究区强化城市资源环境底线约束并整治全域退化土地，参考规划政策<sup>[20-21]</sup>并调试模型后设定耕地、草地转移为建设用地的概率降低 50%；并开展退耕还林、森林质量提升、森林草原休养生息等工作，设定林地转移为草地的概率减少 30%，

林地转移为耕地的概率减少 50%。

3) 邻域因子参数设定。邻域因子反映了不同用地类型中间以及邻域范围内不同土地利用单元之间的相互作用<sup>[18]</sup>，其参数范围为 0~1，该数值与对应的用地类型扩展能力成正比。本研究使用极差标准化法对各土地利用类型变化量进行无量纲处理，并结合每类情景下各土地的不同扩展趋势对邻域因子参数进行调整，随着生态修复力度的加强，耕地与草地的退化趋势与建设用地的扩展趋势会减弱，原有的林地和水体由于保护政策并不会发生明显变化，最终确定多情景下研究区不同土地利用类型的邻域因子(表 5)。

4) 转移成本矩阵设定。转移成本矩阵代表当前类型用地转换为目标用地类型的可能，其中 0 代表不能转换，1 代表可能转换。本研究根据研究区 2000—2010 年、2010—2020 年的土地利用转移历史趋势(表 2、3)及规划政策<sup>[20-21]</sup>确定了多情景下的转移成本矩阵(表 6)。A 情景下，根据表 2、表 3 中土地利用转移概率*i*值大小来设定转移成本为“1”或“0”，当任意一个时间段的*i* ≥ 0.5 时，认定为可能转换，反之则不能转换；但由于建设用地向耕地转化的概率*i*值由 14.36 降至

表 6 研究区土地利用转移成本矩阵

Tab. 6 Land use transfer cost matrix in the study area

情景类型	2020 年土地利用类型	2030 年土地利用类型转移可能性				
		耕地	林地	草地	水体	建设用地
A 情景	耕地	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	0	0
	草地	1	1	1	1	1
	水体	1	1	1	1	1
	建设用地	0	1	0	1	1
B 情景	耕地	1	0	0	1	1
	林地	1	1	1	0	0
	草地	1	1	1	1	1
	水体	1	1	0	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1
C 情景	耕地	1	1	1	1	1
	林地	0	1	1	0	0
	草地	0	1	1	1	1
	水体	0	1	1	1	1
	建设用地	0	1	0	0	1

5.32，且在打造具有国际竞争力的现代化都市圈地区、推进城镇化率上升至 75% 等目标下，建设用地向耕地、草地发生转换的概率极小，故设定为不会发生转换；另外构建以天府绿道体系为脉络的生态网络、打造龙泉山城市森林公园、健全城市绿地体系等措施，使得建设用地转化为林地存在可能性<sup>[20]</sup>。B 情景下，地区推进基础设施同城同网、共建现代高效农业示范区，同时粮食需求增加，但疏于城乡人居环境提升<sup>[20]</sup>，故在 A 情景基础上，设定建设用地不会转换为其他用地，耕地不会转换为草地、水体。C 情景下，绿化全川行动大规模开展，森林覆盖率提高、草原湿地退化得到有效遏制，故在 A 情景基础上，设定林地、草地与水体不会转化为耕地。

5) 精度验证。以 2010 年土地利用数据为基础通过 FLUS 模型预测 2020 年土地利用结果，利用 2020 年实际土地利用数据，通过精度验证得到总体精度为 0.89，Kappa 系数为 0.79，表明 FLUS 模型的模拟准确度较高，在本研究中适宜性较好。

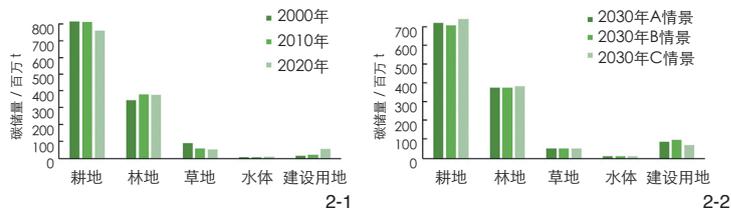
### 2.3 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量多情景模拟预测

InVEST 模型是目前最成熟的生态系统服

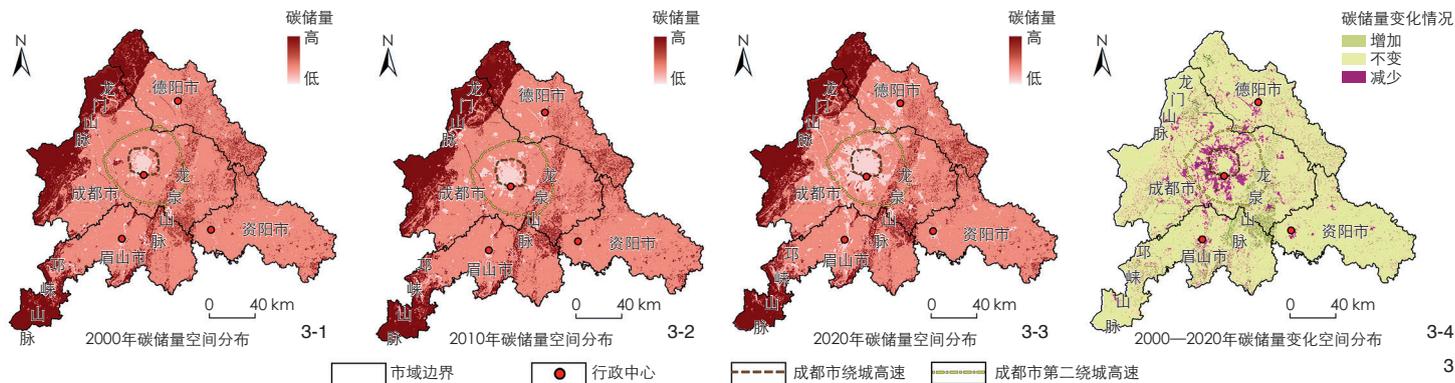
表 7 研究区各土地利用类型碳密度值 [22-23]

Tab. 7 Carbon density values of different land use types in the study area [22-23]

土地利用类型	地上生物碳密度	地下生物碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度	t/hm <sup>2</sup>
耕地	36.3	80.7	223.7	0	
林地	42.4	115.9	424.9	0	
草地	34.6	86.5	406.9	0	
水域	0	0	213	0	
建设用地	0	0	233.4	0	



注：研究区 2000、2010、2020 年水体碳储量分别为 9.142 百万 t、8.233 百万 t、11.05 百万 t。2030 年 A、B、C 情景下水体碳储量分别为 13.105 百万 t、13.102 百万 t、13.097 百万 t。



2 研究区 2000—2020 年及 2030 年多情景下各土地利用类型碳储量

Carbon storage of different land use types in the study area under multiple scenarios from 2000 to 2020 and 2030

2-1 研究区 2000—2020 年各土地利用类型碳储量

Carbon storage of different land use types in the study area from 2000 to 2020

2-2 研究区 2030 多情景下各土地利用类型碳储量

Carbon storage of different land use types in the study area under multiple scenarios in 2030

3 2000—2020 年碳储量空间及变化空间分布

Spatial distribution of carbon storage and changes thereof from 2000 to 2030

务评估模型，它拥有生境质量、碳储量、水源供给等多个评估模块 [27-28]。其中碳储量模块是利用土地数据和 4 个碳库（地上生物量、地下生物量、土壤、死亡的有机物质）的碳储量来估算当前情景或一个时间段内的碳固持。死亡有机碳储量因难以观测且在综合碳储量中的占比极小，在本研究中不做计算。

模型的运行需要土地利用分布数据及各类型土地碳密度值，碳密度值可以从针对四川盆地或西南地区的生物与土壤碳储量研究中得到 [11, 29]（表 7）。此外，本研究将基于土地利用动态得到的土地利用时空变迁结果与基于 FLUS 模型得到的 2030 年多情景下的土地利用结果，耦合 InVEST 模型进行计算，得到历史及未来多情景下碳储量时空特征。

### 3 结果与分析

#### 3.1 2000—2020 年碳储量时空变化特征

##### 3.1.1 碳储量数量变化特征

根据 InVEST 模型计算，2000—2020 年，研究区碳储量呈先平缓上升再快速下降趋势，

碳储量整体减少  $18.212 \times 10^6$  t，降幅为 1.41%。2000、2010、2020 年研究区总碳储量分别为  $12.915 \times 10^8$  t、 $12.924 \times 10^8$  t、 $12.733 \times 10^8$  t；2000—2010 年研究区碳储量平均每年缓慢增加  $9.27 \times 10^4$  t，但 2010—2020 年平均每年减少量高达  $19.139 \times 10^5$  t（图 2-1）。表明 2000—2020 年研究区为碳源，陆地系统的固碳能力被严重破坏，部分有机碳被转化为 CO<sub>2</sub> 并释放，给城市气候环境带来不利影响。

从各土地利用类型来看（图 2-1），2000—2020 年耕地、林地为核心碳储用地。耕地 3 期的碳储量占比都大于 60%，但其碳储量不断下降，主要由于成都平原的农田大面积减少、集中连片程度急剧降低；林地的碳储量先上升再缓慢下降，草地的碳储量与占比呈不断下降趋势，表明国土绿化工作虽有成效但力度不足，自然生态系统低质化明显，森林、草原生态系统出现逆向演替现象；建设用地与水体的碳储量的占比极少但都呈上升趋势。

##### 3.1.2 碳储量空间变化特征

从空间分布来看，2000、2010、2020 年研

究区碳储量总体呈现出西部优于东部、中部最低的特点（图 3-1~3-3），其中碳储量高值区域有：西部龙门山脉与西南部邛崃山脉区域，呈片状分布；中部龙泉山脉区域，呈带状分布；德阳市中江县南部、简阳市五凤山森林公园以及眉山市仁寿县东北部的区域，呈点状分布。

研究得到 2000—2020 年研究区碳储量变化分布情况（图 3-4）。2000—2020 年碳储量减少主要发生在城市建成区、高速路网以及国省干道的周边区域，其中变化显著的区域有成都市郫都区、温江区、双流区、龙泉驿区、青白江区、金堂县、天府国际机场，德阳市旌阳区、广汉市，眉山市东坡区，资阳市雁江区、乐至县。碳储量增加主要发生在自然保护区周边以及城郊地段，该类地区通过建立自然保护地体系来打造生态安全底线，陆地生态系统得到了有效改善。其中，碳储量增加最显著的区域为龙泉山脉周边，龙泉山公园的建设打造了世界级绿心，极大改善了山脉周边的碳储量。此外，成都市绕城高速

周边区域的碳储量显著增加，得益于对绕城高速周边即环城生态带的大量绿化建设。

### 3.2 2030年多情景下碳储量时空变化特征及对比

#### 3.2.1 多情景下碳储量变化特征及对比

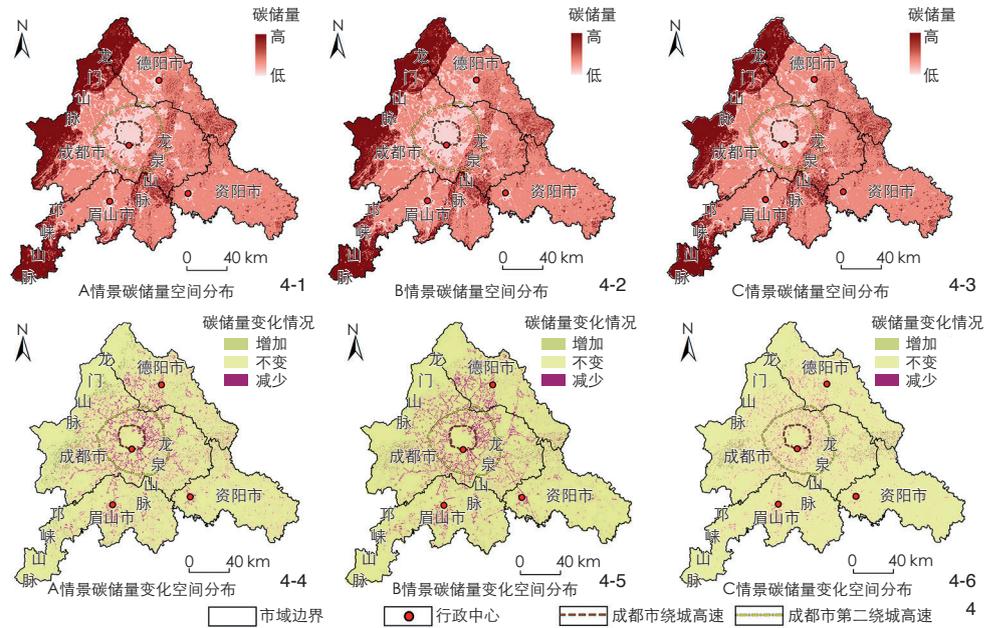
根据 FLUS-InVEST 模型计算，相较于 2020 年，2030 年 3 种情景下的碳储量总量都将发生明显下降(图 2)，A、B、C 情景下的碳储量减少量分别为  $17.102 \times 10^6$  t、 $22.401 \times 10^6$  t、 $6.912 \times 10^6$  t。B 情景下，碳储量下降速率为正常发展的 1.3 倍，研究区生态系统固碳功能受损严重并将面临巨大的气候变化压力。而 C 情景下，碳储量下降速率为正常发展的 0.4 倍，大量生态修复工作有效减缓了碳储损失。

从各土地利用类型来看(图 2-2)，3 种情景下研究区的耕地的碳储量均呈下降趋势，未来需持续关注农田生态系统的健康；林地的碳储量在 A 与 B 两种情景下将分别减少  $3.32 \times 10^6$  t 与  $6.03 \times 10^6$  t，但在 C 情景下将会增加  $3.60 \times 10^6$  t，表明修复治理措施力度的加大能显著改善林地的碳汇能力；草地与水体的碳储量在多情景下由于土地面积变化不大，差异并不明显。

#### 3.2.2 多情景下碳储量空间分布特征及对比

根据 2030 年多情景下的碳储量的空间分布结果(图 4-1~4-3)，在 3 种情景下，碳储量高值区域的分布情况与 2000、2010、2020 年近似(图 3-1~3-3)。碳储量低值区域则因情景不同差异较大：A 情景的低值区域将侵占高速路网周边用地，其中成都市第二绕城高速附近低值区域已明显成环；B 情景下，低值区域将以成都市为中心发展成网络状，线状分布在高速路网两侧，点状分布在国道及与水体周边区域，并有连接四市行政中心的趋势；C 情景下，低值区域集中分布在成都市中心区，零散分布在其他三市区县行政中心附近，另有部分碳储量低值区域分布在高速路网沿线及附近地区，但该类区域未明显连接。

研究模拟得到 2030 年多情景下碳储量的变化情况(表 8)及空间分布(图 4-4~4-6)。A 情景下，碳储量减少的土地大多呈环带状分布在城市建成区周边，少量分布在主要高速公路与国道两侧，极少量分布在成都市环城



4 2030 年多情景下碳储量空间及变化空间分布  
Spatial distribution of carbon storage and changes thereof under multiple scenarios in 2030

表 8 2030 年多情景下研究区土地碳储量变化情况  
Tab. 8 Changes of land carbon storage in the study area under multiple scenarios in 2030

碳储量变化情况	发展情景 A		发展情景 B		发展情景 C	
	土地面积 /km <sup>2</sup>	占比 /%	土地面积 /km <sup>2</sup>	占比 /%	土地面积 /km <sup>2</sup>	占比 /%
不变	30 965.79	93.51	31 003.31	93.63	32 148.91	97.09
减少	1 782.07	5.38	1 982.99	5.99	775.31	2.34
增加	365.55	1.10	127.21	0.38	189.32	0.57

生态区、龙泉山脉等原本碳储量高值区域；碳储量增加的土地零散分布在原有自然保护区、自然风景区周边。B 情景下，碳储量减少的土地分布位置与正常发展情景大致相当，但分布的范围更广、网络化也更加明显；该情景下各类生态系统遭受干扰并呈破碎化的风险更高，而其储存的碳也更易损失；碳储量增加的土地面积积极小且分布情况极为零散。C 情景下，碳储量减少的土地主要以线状或点状分布在建成区周边；碳储量增加的土地主要分布在位于研究区西部的成都市大邑县与邛崃市、中部的龙泉山脉、西部的德阳市中江县，碳储量生态系统服务的集中提升效果在空间上并不明显。

## 4 结论

本研究采用 FLUS-InVEST 模型对研究区历史及未来碳储情况进行了定量计算与分析，

发现生态修复将会显著影响林地、草地与耕地的面积及分布，并作用于相应的森林、草原与农田生态系统碳储量变化。研究结果能较好地从事态系统服务提升、土地综合治理、区域生态品质提升等方面为研究区的国土空间生态修复规划提供依据和参考。

2000—2020 年碳储量历史时空变迁结果表明，研究区在 20 年间的城镇建设用地快速扩张与生态本底保护工作不足，产生了农田生态系统破碎、森林、草地生态系统退化、生态本底破碎、生态系统服务变差等影响。尽管随着四川省生态文明建设与公园城市政策的落实，生态恶化的趋势基本得到遏制，但生态系统存在的许多威胁并未得到根本解决，部分修复治理工程忽视了生态演替的规律与内在机理。由此，本研究通过模拟 2030 年多情景下的研究区碳储量情况，探究生态系

统的固碳功能受到不同生态保护与修复政策影响时的差异,以指导形成更科学的国土空间生态修复规划。

2030年多情景下碳储量时空预测结果表明,生态修复力度的不足、对生态系统内在规律的忽视,将会对生态本底带来巨大的压力。而多情景下的碳储量时空变化规律的对比结果,体现了现有《四川省国土空间生态修复规划》<sup>[21]</sup>及《成都都市圈发展规划》<sup>[20]</sup>中生态环境规划的科学性:1)耕地碳储量的损失反映出对成都平原林盘、土埂等生境进行修补的必要性;2)退耕还林还草、提高森林覆盖率、完善城市公园体系等规划措施对林地碳储量的改善效果明显;3)规划持续推进龙泉山生态保护修复、加强大熊猫国家公园等地区的修复工程,能带动该类区域附近的土地碳储量增加;4)《成都都市圈发展规划》<sup>[20]</sup>开展的天府绿道、生态宜居细胞、骨干道路景观绿化等工程,有利于缓解高速路网、国省干道周边用地碳储量低的现象。

## 5 建议

通过模拟预测未来碳储量得到生态系统固碳功能的演替变化,对研究区未来国土空间的保护与修复工作提出建议:1)未来的川西林盘保护修复工程除了围绕成都市周边的林地与耕地进行外,还应注重对德阳市中江县与资阳市乐至县林地、耕地的综合治理,并通过划定保护红线、增加缓冲区等方式来巩固该类碳储量高值区域的稳定性;2)成都市第2、第3绕城高速附近土地固碳功能极易受损,在推进绕城高速公路绿化工作的同时,还应保护和提升周边的森林、湿地、农田等生态系统的健康水平<sup>[30]</sup>;3)通过健全形态类型丰富的城市绿地体系、改善植被群落结构、环境污染治理等措施,保护龙泉山城市森林公园与成都市环城生态区等敏感区域的碳储供给;4)生态系统内部作用关系错综复杂,应充分考虑研究区与周边市、区、县山水林田湖草沙的关系,实现系统性的生态修复,带动并实现省域范围内的生态系统固碳功能提升。

在完善生态修复进阶工作的基础上,研究区还需结合绿色交通出行、清洁能源使用、

产业绿色转型等措施来减缓CO<sub>2</sub>的排放,并通过建立碳排放交易体系、发展“负碳排”技术、推动绿色金融工具发展等措施为碳中和做支撑,才有望在未来实现碳的“零排放”目标。

### 致谢 (Acknowledgements):

感谢四川大学建筑与环境学院风景园林在读硕士研究生魏琪力、何柳燕为本文数据计算与模型运行做出的贡献。

### 参考文献 (References):

[1] CANADELL J G, RAUPACH M R. Managing Forests for Climate Change Mitigation[J]. Science, 2008, 320(5882): 1456-1457.

[2] 刘长松. 气候变化背景下风景园林的功能定位及应对策略[J]. 风景园林, 2020, 27(12): 75-79.

[3] 吴隼宇, 张一蕾, 江伟康. 粤港澳大湾区生态系统碳储量时空演变[J]. 风景园林, 2020, 27(10): 57-63.

[4] STOCKER B D, YU Z C, MASSA C, et al. Holocene Peatland and Ice-Core Data Constraints on the Timing and Magnitude of CO<sub>2</sub> Emissions from Past Land Use. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(7): 1492-1497.

[5] 郭义强. 生态保护修复有助于碳中和[J]. 资源与人居环境, 2021(4): 52-53.

[6] 殷利华, 杭天, 徐亚如. 武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究[J]. 南方建筑, 2020(3): 41-48.

[7] 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.

[8] 孟士婷, 黄庆旭, 何春阳, 等. 区域碳固持服务供需关系动态分析: 以北京为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1191-1203.

[9] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593.

[10] 韩依纹, 张舒, 殷利华. 大都市区绿地碳储存能力及其空间分布特点探究: 以韩国首尔市为例[J]. 景观设计学, 2019, 7(2): 55-65.

[11] 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.

[12] 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.

[13] VERBURG P H, OVERMARS K P. Combining Top-Down and Bottom-Up Dynamics in Land Use Modeling: Exploring the Future of Abandoned Farmlands in Europe with the Dyna-CLUE Model[J]. Landscape Ecology, 2009, 24: 1167-1181.

[14] LIANG X, LIU X P, LI X, et al. Delineating Multi-scenario Urban Growth Boundaries with a CA-based FLUS Model and Morphological Method[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 177: 47-63.

[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.

[16] 王旭, 马伯文, 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.

[17] 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/OL]. (2022-03-25) [2021-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20210707.0922.002.html>.

[18] 王明常, 郭鑫, 王凤艳, 等. 基于FLUS的长春市土地利用动态变化与预测分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(6): 1795-1804.

[19] 朱直君, 彭耕, 熊琳, 等. 成都都市圈空间协同策略探讨[J]. 规划师, 2020, 36(19): 79-83.

[20] 四川省人民政府. 成都都市圈发展规划[EB/OL]. (2021-11-29) [2021-11-30]. <http://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2021/11/29/40678782564141e68f4d1d27180befb9/files/d359ac2bcce440c782b597db912491f2.PDF>.

[21] 四川省自然资源厅. 四川省国土空间生态修复规划(征求意见稿)[EB/OL]. (2021-11-11) [2021-11-30]. <http://dnr.sc.gov.cn/scdnr/scyjzj/2021/11/11/5b04722c2e5d401eb9f8ca62169e16b8/files/21aa4b34223841058f91308669234a90.pdf>.

[22] 张优. 基于LUCC的成都平原地区碳排放效应研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.

[23] 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(1): 58-67.

[24] 中国土地勘测规划院, 国土资源部地籍管理司. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017.

[25] 王秀兰. 土地利用/土地覆盖变化中的人口因素分析[J]. 资源科学, 2000, 22(3): 39-42.

[26] 四川日报. 关于推动成渝地区双城经济圈发展的指导意见[EB/OL]. (2020-7-31) [2021-10-12]. <https://epaper.scdaily.cn/shtml/scrb/20200731/239942.shtml>.

[27] 张梦迪, 张芬, 李雄. 基于InVEST模型的生境质量评价: 以北京市通州区为例[J]. 风景园林, 2020, 27(6): 95-99.

[28] 邹天娇, 倪畅, 郑曦. 基于CA-Markov和InVEST模型的土地利用格局变化对生境的影响研究: 以北京浅山区为例[J]. 中国园林, 2020, 36(5): 139-144.

[29] 郑华, 傅斌, 肖洋, 等. 生态系统服务评估与权衡模型使用手册[EB/OL]. (2017-10-08) [2021-10-12]. [https://storage.googleapis.com/invest-users-guides/InVEST%203.2.0%20User's%20Guide\\_Chinese%20Version\\_20171008.pdf](https://storage.googleapis.com/invest-users-guides/InVEST%203.2.0%20User's%20Guide_Chinese%20Version_20171008.pdf).

[30] 克拉克. 山地森林的碳捕获潜力: 从全球角度看地方景观的韧性[J]. 风景园林, 2021, 28(7): 54-68.

### 图表来源 (Sources of Figures and Tables):

文中所有图片均由作者绘制, 其中图1、3~4底图来自国家地球系统科学数据中心(geodata.cn), 审图号GS(2021)1487; 表1~3、5、6、8由作者绘制; 表4由作者根据参考文献[19]~[21][26]绘制; 表7由作者根据参考文献[22][23]绘制。

(编辑 / 肖书文 李清清)