引文格式：明昊霖,徐建刚,吴军,等. 土地利用变化情景下太湖流域碳储量估算与影响研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(1): 46-52. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.01.010

土地利用变化情景下太湖流域碳储量估算与影响研究

明昊霖[1]，徐建刚[1*]，吴　军[1]，曾　俊[1]
（1. 南京大学 建筑与城市规划学院，江苏 南京 210095）

摘　要：从流域尺度科学评估碳储量，探究流域国土空间与固碳量之间的关系为推动双碳目标实施提供借鉴意义。以太湖流域为研究区，基于多期土地利用数据，首先运用 PLUS 模型模拟预测 2030 年太湖流域土地利用情况，再借助 InVEST 模型估算 2010—2030 年太湖流域碳储量的时空分异特征，最后利用地理探测器模型探究土地利用变化下碳储量时空变化影响因素的交互作用。结果表明，2010—2030 年太湖流域碳储量格局总体较稳定，总量呈下降趋势，流域碳储量时空分异受 NDVI、土壤类型和夜间灯光单因子影响较大；NDVI∩土壤类型是解释力最大的交叉作用。根据碳储量冷热点区域划定太湖流域生态保护修复政策优先次序，以自然解决方案推动城乡低碳发展。

关键词：流域国土空间；土地利用；碳储量；生态系统服务；太湖流域
中图分类号：TU982　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）01-0046-07

Carbon Stocks Estimation and Its Impact in Tai Lake Watershed Under Land-use Change Scenario

MING Haolin[1], XU Jiangang[1], WU Jun[1], ZENG Jun[1]
(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The scientific estimation of carbon stocks at the basin scale and the investigation of relationship between territorial space and carbon sequestration in the basin can provide a reference for promoting the implementation of dual-carbon target. Based on multi-period land-use data, we used PLUS model to simulate and predict the land-use condition of Tai Lake watershed in 2030 at first. Then, we used InVEST model to estimate the characteristics of spatio-temporal changes of carbon stocks in Tai Lake watershed from 2010 to 2030. Finally, we used Geodetector model to investigate the interactions among factors affecting the spatio-temporal changes of carbon stocks under the land-use change. The results show that the carbon stocks pattern in Tai Lake watershed remained relatively stable from 2010 to 2030, but the total carbon stocks amount exhibits a decreasing trend. The spatio-temporal changes of carbon stocks are primarily influenced by NDVI, soil type, and nighttime lighting. The cross-tabulation of NDVI ∩ soil type provides the highest explanatory power. Based on the hot and cold spots of carbon stocks, the ecological protection and restoration policy priorities of Tai Lake watershed are determined, and the low-carbon development of urban and rural areas is promoted by natural solutions.

Key words: watershed territorial space, land-use, carbon stocks, ecosystem service, Tai Lake watershed

在快速城市化、工业化背景下，全球气候变暖、生态系统功能丧失等逐渐成为威胁人类福祉的全球性环境危机。已有研究表明，人类活动的碳排放是引起全球复杂和剧烈气候变化的主因[1-2]，双碳目标和“十四五”规划都反映出固碳减排与生态文明建设刻不容缓[3]。流域是基于水的基本地理空间单元[4]，城市发展的各类问题离不开流域。流域层面的国土空间规划已被明确纳入国土空间规划体系框架之内[5]，从流域尺度统筹国土空间规划与治理成为当前的研究热点[6]。固碳释氧作为区域生态系统的主要环节之一，从流域视角科学评估碳储量，并探究流域国土空间与碳排放量之间的关系，对优化流域国土空间格局服务“碳中和”目标以及推动基于低碳理念的流域生态保护补偿机制具有重要的实践意义。

目前常用的碳储量估算方法包括样地实测法、遥感反演法和模型模拟法等，样地实测法根据土壤剖面数据估算土壤碳储量[7]，采用人工定点测量，结果最准确，适用于小面积区域，且为单期静态数据[8]，多为某特定生态功能区的环境监测服务，如退耕还草后的黄土高原[9]、长江经济带森林[10]等；遥感反演法根据

项目来源：国家自然科学基金面上项目（52178043）。
第一作者简介：明昊霖（1999—），硕士研究生，研究方向为国土空间规划新技术，E-mail：1053127331@qq.com。
通信作者：徐建刚（1960—），教授，博士生导师，研究方向为区域城乡空间规划、数字城市与智慧规划技术，E-mail：xjg129@sina.com。

遥感影像反演归一化植被指数等指标来估算碳储量，多用于特定生态系统（森林）的单个碳库研究[11]，但难以估算长时间序列的碳储量数据；模型模拟法目前较广泛地应用于山区、流域以及省市层面[12-13]等大中型研究尺度，利用RS、GIS技术建立估算模型来研究碳储量，如基于各类土地利用类型的碳密度来估算碳储量的InVEST模型[14-15]，该模型通常与GIS软件相结合，操作简单、数据精确，可快速可视化模拟研究区碳储量分布情况和空间动态变化。通过碳储量估算结果分析生态系统固碳服务和预测未来趋势，通常需要耦合多种模型。目前的研究已深化到研究土地利用变化与碳储量的关系[16]、不同土地利用发展情景下碳储量模拟预测[17]等，利用CA-Markov[18]、系统动力学模型[19]、FLUS模型[20]等分析土地利用变化和预测未来土地利用，耦合InVEST模型预测碳储量格局[21]。大量研究表明，随着耕地、林地等用地面积的减少，碳储量相应下降，近年来大部分研究区的碳储量整体呈下降趋势。总体而言，碳储量估算研究多为短期或长时间序列某区域的碳储量静态情况[22]，即使对碳储量进行未来模拟预测分析，但对其背后的影响机制和定量归因研究较少；且研究区域多为内陆重要的生态系统[23-25]和以城市[26-27]为单位的生态系统，对于城市化水平较高、碳排放集中的东部沿海发达地区研究较少。

太湖流域作为长三角城市群重要的区域生态系统，随着快速城市化逐渐向高质量发展转型，其生态系统结构、生态系统服务权衡与协同随之演变，流域碳储量也随之发生改变。因此，本文基于太湖流域2010年、2020年历史土地利用数据，利用PLUS模型预测模拟了2030年太湖流域的土地利用情况；借助InVEST模型碳储量模块模拟分析了该区域3期碳储量格局，并利用地理探测器研究了土地利用变化下碳储量时空变化的影响因素交互作用，从流域尺度统筹协调固碳生态系统服务与国土空间布局优化的关系，为太湖流域乃至长三角一体化高质量发展提供参考。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

太湖流域位于30°05′~32°15′N、119°02′~121°54′E，总面积约为3.71万km²，分属苏、浙、沪、皖4省（市），包括上海、苏州、无锡、常州、镇江、杭州、嘉兴、湖州等大中型城市，是长三角一体化发展核心区域。研究区内河网如织，湖泊星罗棋布，为典型的平原河网地区，平原区面积占比为80%。近20年来城市化进程加快，居住、工业等建成区的快速扩张侵占了山水林田湖草等蓝绿生态空间，不透水率占比逐渐上升，引发了一系列影响人类福祉的生态修复、环境恶化、资源短缺问题。在长三角生态绿色一体化发展和太湖流域综合治理背景下，从流域尺度出发，研究国土空间与碳储量的关系成为太湖流域乃至长三角城市群生态环境统筹协调发展的现实需求。

1.2　数据来源

本文采用的数据主要包括土地利用数据、自然环境数据和社会经济数据，具体指标见表1。

表1　数据信息

数据名称	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
土地利用数据	2010年、2020年	30 m	GlobeLand30全球地理信息公共产品（http://www.globallandcover.com/）
DEM	2020年	30 m	NASA DEM（https://lpdaac.usgs.gov/）
坡度	2020年	30 m	
土壤类型	2023年	1 km	HWSD V2（https://gaez.fao.org/pages/hwsd）
NDVI	2020年	30 m	国家生态科学数据中心（http://www.nesdc.org.cn/）
年均气温	2020年	1 km	中科院资环数据中心（https://www.resdc.cn/）
年均降水	2020年	1 km	
距水域距离	2023年	–	OpenStreetMap（https://www.openstreetmap.org/）
人口密度	2019年	1 km	中科院资环数据中心
地均GDP	2019年	1 km	
夜间灯光数据	2022年	500 m	国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn/）
距铁路距离	2023年	–	OpenStreetMap
距高速距离	2023年	–	
距主干道距离	2023年	–	
距次干道距离	2023年	–	

2　研究方法

2.1　PLUS模型

PLUS模型是中国地质大学高性能空间计算智能实验室开发的斑块生成土地利用变化模拟模型[28]，主要由土地扩张分析策略和基于多类随机种子的CA模型两部分组成。与近年来常用的CA-Markov、CLUE-S、FLUS等模型相比，该模型进一步探究了各类土地利用之间的非线性关系，从斑块尺度弥补了草地、林地等变化较小的土地利用类型模拟精度不足的问题，可以更好地模拟预测未来土地利用格局。另外，由于PLUS模型缺少土地利用发展需求模块，因此采用模拟时空演变能力较好的Markov模型来预测各地类的需求情况。本文以2010年、2020年GlobeLand30数

据为土地利用基础数据，综合模型手册与已有研究成果，选取DEM、坡度、土壤类型、NDVI、年均气温、年均降水和距水域距离作为自然环境因子，人口密度、地均GDP、夜间灯光数据、距铁路距离、距高速距离、距主干道距离和距次干道距离作为社会经济因子。

2.2 InVEST模型

InVEST模型是美国斯坦福大学、大自然保护协会与世界自然基金会联合开发的生态系统服务功能评估模型，包括年产水量模型、生境质量模型、土壤保持模型等淡水、海洋和陆地生态系统评估3大模块[29]。该模型的碳存储模块估算碳储量适用于较大尺度的研究区域。其原理是基于土地利用数据来估算生态系统碳储量，陆地生态系统碳储量由地上碳储量、地下碳储量、土壤有机碳和土壤有机质4个部分组成。

本文利用InVEST模型的碳储存模块估算太湖流域生态系统碳储量情况，采用的各地类对应的碳密度数据来源于国家生态科学数据中心的中国陆地生态系统碳密度数据集[30]，选取经纬度在太湖流域范围内的碳密度数据，并结合太湖流域内上海、苏州、杭州、长三角等地文献[23-24,31-32]的碳密度数据，通过去除异值、均值法得到太湖流域的最终碳密度表（表2）。

表2 太湖流域各地类对应的碳密度表

土地利用类型	地上碳储量	地下碳储量	土壤有机碳	土壤有机质
耕地	18.9	2.4	100.3	0
林地	36.3	7.3	120.8	3.75
草地	17.4	20.9	55.6	0.86
灌木地	8.1	1.6	91.7	3.48
湿地	2.4	10.9	53.6	1.00
水体	0	0	0	0
人造地表	16.2	3.2	83.4	0

2.3 地理探测器

固碳生态系统服务是区域生态系统服务中表征最显著的，为研究碳储量服务背后潜在的社会—经济—自然关系，利用地理探测器研究各类影响因素对碳储量空间分布异质性的影响程度。地理探测器是一种通过探测特点事物的地理空间分异性来探究其背后影响机制的定量归因模型，并通过地理探测器的 q 值来衡量空间分异性的大小[33]，计算公式[34]为：

$$q=1-\frac{1}{N\times\sigma^2}\sum_{i=1}^{L}N_i\sigma^2{}_i$$

式中，N、N_i 分别为总区域和子区域 i 的样本数量，$i=1,2,\cdots,L$，L 为子区域数量；σ^2、$\sigma^2{}_i$ 分别为区域碳储量总方差和子区域 i 的碳储量方差；$q\in[0,1]$，q 值越大，表示解释力越强，反之越弱。

模型包括因子探测器、风险探测器、交互作用探测器、生态探测器4个模块[35]。本文以碳储量为因变量，选取DEM、坡度、年均气温、年均降水、土壤类型、NDVI等自然因子和地均GDP、人口密度、夜间灯光等社会经济因子作为碳储量的自变量。地理探测器中因变量的输入数据可为离散型，而自变量必须为自然数的类别数据，因此需将9类因子数据在ArcGIS中作离散化预处理[36]。

3 研究结果与分析

3.1 太湖流域土地利用模拟预测

除浙西区地势较高以及浦东浦西区城市化水平较高使得耕地占比较少外，耕地基本上均匀分布于整个太湖流域；林地主要分布于太湖流域浙西区和湖西区的南部；草地、灌木地、湿地多零散分布于流域各区；水体主要由太湖、滆湖、长荡湖、阳澄湖、淀山湖以及各河网水系组成，主要分布于流域中部、阳澄淀泖区和湖西区；人造地表主要分布于流域东北部和东部地区。利用太湖流域2010年、2020年现状土地利用数据得到土地利用类型面积转换弦图（图1），可以看出，2010—2020年研究区人造地表面积由703 698.4 hm^2 增至989 874.5 hm^2，说明太湖流域作为长三角城市群的核心，城市化发展水平迅速增加；水体面积也由500 280.1 hm^2 增至573 949.4 hm^2，水体增加的主要原因是杭嘉湖区和阳澄淀泖区退田还湖、疏通水系等工程措施的开展，间接表明了研究区对水资源水生态保护的重视；耕地面积由2 017 767 hm^2 减至1 636 401 hm^2，说明近年来社会经济的发展不可避免地侵占了大量农田和生态空间；林地、草地、湿地面积和变化情况存在显著差异。总体来说，耕地、草地呈逐渐减少趋势，人造地表、水体、林地等趋于缓慢增长乃至饱和的状态，这也侧面反映出我国由快速城市化阶段逐渐向高质量发展阶段转型。

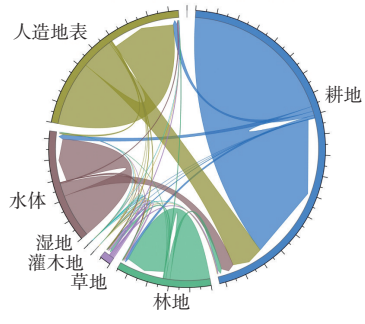


图1 2010—2020年太湖流域土地利用面积转换弦图

为验证PLUS模型预测研究区土地利用数据的可行性，基于2010年现状土地利用数据，利用PLUS模

型预测了2020年的土地利用情况，并与2020年实际土地利用数据进行精度验证。结果表明，Kappa系数为0.827 529，总体精度为0.883 559，满足精度大于0.8的要求，说明PLUS模型可用于研究区的土地利用模拟预测。本文假设所用土地利用类型的发展规律为自然发展情景，综合林地保护和城市建设用地基本不发生转化等原则，太湖流域建设用地仍会继续扩张，侵占部分耕地资源，但总体趋势已趋于缓慢，且林地、草地、湿地等高质量生态空间正被重视保护，总体呈恢复上升趋势。从空间上看，太湖流域的建设用地在大城市之间的过渡地区扩张迅速，尤其是大都市郊区地段，也表明该地区耕地资源等生态空间日益萎缩，可能会导致生态系统服务差异化的时空演变特征。

3.2　太湖流域碳储量时空变化与预测

基于太湖流域3期土地利用栅格数据和各地类对应的碳密度数据，本文利用InVEST模型的碳存储模块估算模拟2010年、2020年、2030年研究区碳储量的空间分布情况（表3、图2）。结果表明，2010—2030年太湖流域碳储量格局总体较稳定，但空间分布上呈现西南高、东北低的特征，碳储量估算值在各子流域间差异显著，呈现西南高、东北低的分布格局。其中，碳储量高值区主要分布在浙西区和湖西区，多为山地丘陵地区，海拔较高、林草茂盛，是太湖流域的主要生态源地；由于水体对应的碳密度值基本为0，大部分碳储量低值区均位于水体周边，尤其是地上碳储量、地下碳储量和土壤有机碳的空间分布情况。从碳储量的时空演变来看，太湖流域的地上碳储量、土壤有机碳等总体呈下降趋势，如武澄锡虞区、阳澄淀泖区以及浦东浦西区等平原地区由于建成区面积大量扩张，耕地、林地等绿色基础设施空间占比减少，高值区逐渐转变为较高值区。从碳储量的局部变化来看（表4），2010—2020年碳储量服务变化程度比2020—2030年更剧烈，其中2010—2020年碳储量增加区域主要位于太湖周边、阳澄湖周边以及浙西山区等地，减少区域主要分布于杭嘉湖区的湖州菱湖等密集水体，总体增减空间分布范围更大；2020—2030年碳储量增减情况较稳定，除林地资源丰富的浙西区和重点保护的太湖周边湿地碳储量仍在增加外，太湖流域大部分地区固碳服务呈下降趋势。

表3　太湖流域碳储量时空变化/MgC

类型	2010年	2020年	2030年
土壤有机质	1 705 535	1 783 515	1 834 847
土壤有机碳	316 876 023	305 151 123	297 668 520
地下碳储量	11 445 589	11 609 744	11 767 703
地上碳储量	66 237 160	64 413 640	63 279 397
总碳储量	396 356 608	382 842 072	374 289 595

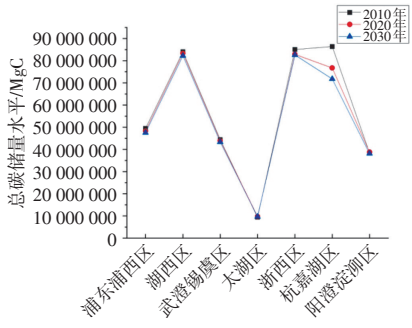


图2　2010—2030年各子流域总碳储量水平

表4　太湖流域子流域固碳服务变化情况/MgC

子流域	2010—2020年	2020—2030年
浦东浦西区	−1 150 526	−786 644
湖西区	−653 005	−1 124 650
武澄锡虞区	−517 869	−599 881
太湖区	284 493	−55 507
浙西区	−2 192 199	−310 964
杭嘉湖区	−9 670 248	−4 935 494
阳澄淀泖区	444 967	−689 117

3.3　碳储量定量归因

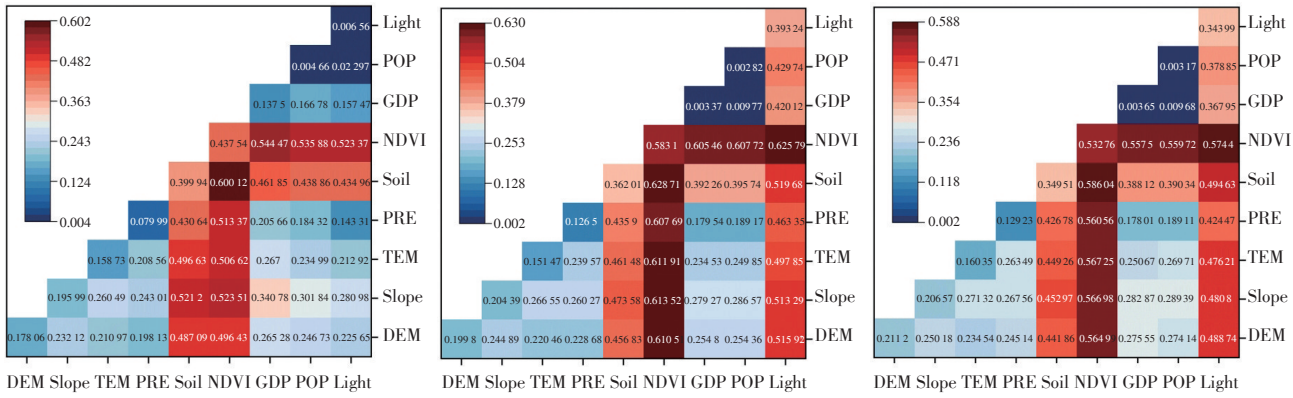
为进一步探究碳储量时空分异背后的原因，利用地理探测器模型对选取的9类自然和社会经济因子与碳储量空间分布进行相关性分析。从单因子探测结果来看（表5），9类影响因子对太湖流域碳储量的时空变化均具有显著驱动作用（p值小于0.001）；从各期年份均值来看，NDVI、土壤类型和夜间灯光对研究区碳储量的空间分布具有较大的解释力，其他影响因子差异较小；从不同年份来看，NDVI和土壤类型一直都是影响较大的主导因子，而夜间灯光和GDP的影响力变化较大，且随着城市化发展正逐渐提高其解释力。从各类因子解释力来看，NDVI、土壤类型较稳定且空间差异化较大，湖西区和浙西区多为林地、草地

表5　单因子探测结果

影响因子	2010年	2020年	2030年	年份均值
DEM	0.178 062	0.199 800	0.211 202	0.196 355
坡度	0.195 995	0.204 386	0.206 570	0.202 317
年均温度	0.158 734	0.151 467	0.160 355	0.156 852
年均降水	0.079 985	0.126 496	0.129 226	0.111 902
土壤类型	0.399 939	0.362 008	0.349 513	0.370 487
NDVI	0.437 536	0.583 096	0.532 765	0.517 799
GDP	0.137 496	0.003 372	0.003 653	0.048 174
人口密度	0.004 661	0.002 823	0.003 174	0.003 553
夜间灯光	0.006 556	0.393 238	0.343 986	0.247 927

等生态空间，西部NDVI指数必然高于其他区域；太湖流域土壤类型众多，西部多为亚热带黄棕壤和中亚热带红壤，东部平原地区多为滨海平原盐土、冲积平原草甸土和太湖周边的沿湖沼泽土，因此太湖流域碳储量受其类型空间差异化影响较大。

从碳储量影响因子的交互探测结果（图3）来看，太湖流域碳储量时空演变是自然、社会经济各类影响因素共同作用的结果，2010年、2020年、2030年9类影响因子之间均存在双因子增强或非线性增强的关系，不存在独立关系和相互减弱的情况，即任意两个影响因素的交互作用对于研究区碳储量时空分异的解释力均大于单因子的作用；NDVI∩土壤类型是影响2010—2030年太湖流域碳储量的最大因素，其q值分别为0.600 12、0.628 71和0.586 05，其次是2010年的NDVI∩GDP、2020—2030年的NDVI∩夜间灯光，可见NDVI作为影响太湖流域碳储量时空变化的主导因子，与流域社会经济发展也具有强烈的交互关系。太湖流域作为长江三角洲平原的核心，生态文明建设一直位于全国前列，流域持续开展林地、草地等生态空间的保护工作。随着太湖流域城市化水平的迅速提高，人口和建成区面积迅猛增加，GDP、夜间灯光等社会经济因素对碳储量的影响作用逐渐逼近自然因素，且未来有望超过NDVI等自然因素。



a 2010年　　b 2020年　　c 2030年

图3 太湖流域碳储量空间分布影响因子交互作用

4 结 语

本文基于2010年、2020年土地利用数据，利用PLUS模型模拟预测了自然发展情境下2030年太湖流域土地利用情况，采用转移矩阵、空间分析等方法揭示了太湖流域土地利用变化特征，借助InVEST模型的碳存储模块估算了2010—2030年太湖流域碳储量时空分异特征，利用地理探测器模型探究了土地利用变化下碳储量时空变化的影响因素交互作用，在一定程度上明晰了流域碳储量现状并模拟预测未来情况以辅助绿色低碳规划决策，为太湖流域乃至长三角一体化地区高质量发展提供参考。

1）太湖流域的主要土地利用类型为耕地、人造地表和水体。由于特殊的高速城市化发展和丰富的河湖水系自然地理特征，耕地和人造地表是变化最显著的两种地类。

2）通过InVEST模型估算发现，2010—2030年太湖流域碳储量格局总体较稳定，空间分布呈现西南高、东北低的特征。2020—2030年变化区域面积比2010—2020年持续减少，且碳储量增加区域多集中于林地资源丰富的浙西区和湿地生态保护较好的太湖周边，近年来重视水网疏浚连通以及退耕还湖的杭嘉湖区碳储量有所减少。

3）太湖流域碳储量时空分异随着9类自然和社会经济因子的变化而发生显著变化。单因子探测结果表明，NDVI、土壤类型和夜间灯光对太湖流域碳储量的空间分异具有较大的解释力；而因子交互探测结果表明，影响碳储量时空演变的9类因子之间存在双因子增强或非线性增强的相关性关系，NDVI∩土壤类型是影响2010—2030年太湖流域碳储量的最大因素。

太湖流域作为长三角一体化发展的腹地，其生态系统服务的复杂性和动态性与土地利用变化和自然社会经济影响因素的关系极为重要，从流域大尺度的视角，研究固碳服务空间差异为区域生态系统服务权衡与协同乃至双碳目标实施提供了科学参考。

1）坚持生态保护优先，基于自然解决方案推动低碳规划。要稳固提升经济发达地区的碳储量水平，就要尽可能避免高碳密度地类向人造地表等低碳密度地类转化，守好耕地红线的同时，通过植被林分改造、退耕还湿等自然解决措施增加城乡固碳能力。

2）精准识别碳储量冷热点区域，提升双碳目标实施效率。根据不同区域生态系统固碳差异情况，评价碳储量冷热点重要等级，确定优先生态治理区域，划分流域生态保护修复政策优先次序[37]，使有限的人力和资金效能最大化。

3）构建流域固碳生态系统服务供需评估系统，推动静态评价向动态服务流监测转型。在自然本底较难改变的情况下，社会经济因素等人为干扰是流域生态系统服务关系动态变化的主要因素[38]。动态识别固碳生态系统服务供需关系的交互作用，可从侧面反映碳储量空间差异变化的潜在原因，为流域生态空间格局优化和低碳政策制定提供科学、系统的决策支持。

4）开展流域综合治理，激活上下联动治理体系。抓住流域这一相对独立的地理单元，系统串联流域内自然地理要素，统筹协调各子流域间固碳服务价值，以系统观念综合推进双碳目标建设。

本文尝试耦合3种模型具有一定的可靠性和合理性，PLUS模型比CA-Markov、FLUS等模型更适用于宏观区域的多地类动态模拟，且实际模拟精度大于0.8；InVEST模型在大尺度、长时间序列的区域碳储量研究中具有参数灵活、可空间化等优点，其原理是以土地利用数据为主导的，精度大小与土地利用数据精度正相关，且已有研究对InVEST模型模拟的可行性进行了实测验证[39]；地理探测器模型探测得到的 q 值与其他模型代表显著性的 R^2 作用类似，其始终保持明确的物理空间意义。由于模型依赖于不同地类对应的碳密度值，还存在不足之处：由于太湖流域范围较特殊，而非行政边界，流域尺度各地类情况难免存在差异，如何确定适用于整个流域的各地类碳密度值需要更详细的实验来对比验证；且InVEST模型在开发设定中默认各地类的碳密度不随时间和空间的变化而变化，忽视了自然生长、人类活动对耕地、林地、草地内部结构的影响，因此难以获取准确的预测用地类型对应的碳密度值[40-41]，在以后的研究中应通过实地测量获得更准确的碳密度参数数据。

参考文献

[1] 曾穗平，王琦琦，田健. 应对气候变化的韧性国土空间规划理论框架与规划响应研究[J]. 规划师，2023，39(2)：21-29

[2] Anukwonke C C，Tambe E B，Nwafor D C，et al. Climate Change and Interconnected Risks to Sustainable Development[J]. Climate Change，2022，30(3)：71-86

[3] 林辰辉，朱雯娟，张永波，等. “双碳”目标下的国土空间规划方法研究与实践：以天津市为例[J]. 城市规划学刊，2022(增刊2)：229-234

[4] 闫建龙，朱江，曹迪，等. 流域生态保护导向下的高原湖泊城市国土空间总体规划探索[J]. 规划师，2022，38(11)：35-40

[5] 王启轩，任婕. 我国流域国土空间规划制度构建的若干探讨：基于国际经验的启示[J]. 城市规划，2021，45(2)：65-72

[6] Bai Y，Zhuang C，Ouyang Z，et al. Spatial Characteristics Between Biodiversity and Ecosystem Services in a Human-dominated Watershed[J]. Ecological Complexity，2011，8(2)：177-183

[7] 张云倩，张晓祥，陈振杰，等. 基于InVEST模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究，2016，23(3)：100-105

[8] 张哲，时振钦，朱文博，等. 基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟[J]. 环境科学，2024，45(4)：2 332-2 341

[9] 张萌萌，刘梦云，常庆瑞，等. 1985—2015年陕西黄土台塬表层土壤有机碳空间分布[J]. 自然资源学报，2018，33(11)：2 032-2 045

[10] 侯瑞萍，夏朝宗，陈健，等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. 生态学报，2022，42(23)：9 483-9 498

[11] Zhao M，Yue T，Zhao N，et al. Spatial Distribution of Forest Vegetation Carbon Stock in China Based on HASM[J]. ACTA Geographica Sinica，2013，68(9)：1 212-1 224

[12] 徐彩瑶，任燕，孔凡斌. 浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响及其预测[J]. 应用生态学报，2023，34(6)：1610-1620

[13] 夏全升，洪欣，桂翔，等. 基于InVEST模型的芜湖市固碳能力及影响因子研究[J]. 水土保持通报，2023，43(5)：385-394

[14] Liang Y J，Hashimoto S，Liu L J. Integrated Assessment of Land-use/Land-cover Dynamics on Carbon Storage Services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. Ecological Indicators，2021，120：106 939

[15] Wang Z，Li X，Mao Y，et al. Dynamic Simulation of Land Use Change and Assessment of Carbon Storage Based on Climate Change Scenarios at the City Level：A Case Study of Bortala，China[J]. Ecological Indicators，2022，134：108 499

[16] 张晓光，张赢心，李士美，等. 基于土地利用的青岛市碳排放变化特征与预测[J]. 地理空间信息，2022，20(5)：1-5

[17] Li R P，Guan Q F，Merchant J. A Geospatial Modeling Framework for Assessing Biofuels-related Land-use and Land-cover Change[J]. Agriculture Ecosystems and Environmente，2012，161：17-26

[18] Rahnama M R. Forecasting Land-use Changes in Mashhad Metropolitan Area Using Cellular Automata and Markov Chain Model for 2016-2030[J]. Sustainable Cities and Society，2020，64：102 548

[19] Liu D，Zheng X，Wang H. Land-use Simulation and Decision-support System (LandSDS)：Seamlessly Integrat-

ing System Dynamics, Agent-based Model, and Cellular Automata[J]. Ecological Modelling,2020,417:256-263

[20] 张斌,夏秋月,董捷,等. 大都市郊区土地利用变化对碳储量时空格局影响研究:以武汉市黄陂区为例[J]. 生态与农村环境学报,2023,39(6):699-712

[21] Li Y,Liu Z,Li S,et al. Multi-scenario Simulation Analysis of Land Use and Carbon Storage Changes in Changchun City Based on FLUS and InVEST Model[J]. Land,2022,11(5):1-17

[22] 毛永发,周启刚,王陶,等. 耦合PLUS-InVEST-Geodector模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(5):1 042-1 057

[23] 邹文涛,何友均,叶兵,等. 基于InVEST模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(3):120-128

[24] 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):3 343-3 352

[25] 卫泽柱,董斌,许海锋,等. 鄱阳湖地区典型湿地碳储量时空演变与情景预测[J]. 水土保持通报,2023,43(3):290-300

[26] 郭天,王之昱. 基于LUCC的南京市生态系统碳储量时空演变预测及多情景模拟分析[J]. 湖北农业科学,2022,61(6):33-40

[27] 张元栋,杜芬玲,王涛,等. 基于Landsat影像的建设用地扩展与碳排放关联分析[J]. 地理空间信息,2017,15(6):99-102

[28] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems,2021,85:101 569

[29] 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):3 360-3 367

[30] 徐丽,何念鹏,于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版),2019,4(1):90-96

[31] 刘咏梅,朱彦蓉. 基于InVEST模型的长三角地区陆地生态系统固碳特征变化研究[J]. 南京晓庄学院学报,2020,36(6):82-90

[32] 荣月静,张慧,赵显富. 基于InVEST模型近10年太湖流域土地利用变化下碳储量功能[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):447-451

[33] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134

[34] 丁悦,蔡建明,任周鹏,等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素[J]. 地理科学进展,2014,33(5):657-666

[35] 王欢,高江波,侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. 地理学报,2018,73(9):1 674-1 686

[36] 秦淑洁,钱天陆,吴朝宁,等. 基于地理探测器和最大熵模型的人类出行活动强度空间格局模拟:以云南省域为例[J]. 地理科学,2023,43(8):1 360-1 370

[37] 王天福,龚直文,邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. 自然资源学报,2022,37(5):1 214-1 232

[38] 潘莹,郑华,易齐涛,等. 流域生态系统服务簇变化及影响因素:以大清河流域为例[J]. 生态学报,2021,41(13):5 204-5 213

[39] 邱问心,张勇,俞佳骏,等. InVEST模型水源涵养模块实地应用的可行性验证[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(5):810-817

[40] 何洪林,任小丽,张黎,等. 基于“参照系-现状-变化量”的生态系统评估方法[J]. 生态学报,2023,43(5):2 049-2 060

[41] 侯建坤,陈建军,张凯琪,等. 基于InVEST和GeoSoS-FLUS模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. 环境科学,2022,43(11):5 253-5 262

(上接第40页)

组特征的生态管理分区:以武汉市为例[J]. 生态学报,2024,44(4):1 514-1 525

[19] Gong P,Chen B,Li X,et al. Mapping Essential Urban Land Use Categories in China (EULUC-China): Preliminary Results for 2018[J]. Science Bulletin,2020,65(3):182-187

[20] Li M,Koks E,Taubenböck H,et al. Continental-scale Mapping and Analysis of 3D Building Structure[J]. Remote Sensing of Environment,2020(8):115-118

[21] Wang C,Wang J. Kilometer Grid Dataset of China's Historical GDP Spatial Distribution (1990-2015)[J]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center,2017(9):121-126

[22] Gao J, Shi Y,Zhang H,et al. China Regional 250 m Fractional Vegetation Cover Data Set (2000-2023)[EB/OL]. [2022-10-19]. https://doi. org/10. 11888/Terre. tpdc. 300330

[23] Huang X,Li J,Ren H,et al. 30 m Global Long Time Series Impervious Surface Area Mapping and Improvements GISA (1985-2021)[EB/OL]. [2024-06-19]. https://doi.org/10.5281/zenodo. 5136329

[24] 刘舁伯,张郝萍,吴梓溶,等. 基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市低效工业用地优化利用:以牡丹江为例[J]. 资源科学,2024,46(2):386-406

[25] 杨志,李才文,任正龑,等. 基于熵权TOPSIS模型的宁夏土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(4):796-805

[26] 国土空间规划城市体检评估规程:TD/T1063-2021[S].

[27] 尹宏玲,徐会芝,褚晨晨,等. 度效两维视角下城市居住用地评估与分类研究:以济南中心城区为例[J]. 山东建筑大学学报,2024,39(1):64-71