

杭州城西科创大走廊地表覆盖碳储量 变化分析与情景预测

詹远增^{1,2,3}, 马彦^{1,2}, 王兴坤^{1,2,3}, 冯存均^{1,2,3}, 李佳鑫^{1,2}, 徐盼^{1,2}

(1.浙江省测绘科学技术研究院, 浙江 杭州 310001; 2.自然资源浙江省卫星

应用技术中心, 浙江 杭州 310001; 3.自然资源部地理国情监测重点实验室, 浙江 杭州 310001)

摘要: [目的] 通过高分辨率遥感影像分析杭州城西科创大走廊的地表覆盖变化与碳储量变化,在“三区三线”成果约束下预测碳储量未来发展趋势,为城市新中心的国土空间优化和生态发展提供科学依据。[方法] 基于2010,2015,2020,2023年4期地表覆盖数据,采用GeoSoS-FLUS模型模拟2035年自然发展、极限建设开发、极限农业生产、生态功能服务和城乡融合发展5种不同情景下的地表覆盖变化,并运用模型为框架计算2010—2023年和2023—2035年模拟情境下的碳储量变化情况。[结果] ①2010—2023年杭州城西科创大走廊呈现碳储量增长趋势,共计变化1 720.69 t,其中植被碳储量约增加为913.67 t,土壤碳储量约增加566.18 t,水域碳储量约增加240.84 t; ②耕地内部类型转变导致土壤碳储量减少119.33 t,林地内部类型转变导致的碳储量变化占总变化的39.50%; ③自然增长情景及生态功能服务情景下,林地增长相对明显,极限建设开发情景、极限农业生产情景地表覆盖类型更为稳定,城乡融合发展情景下,通过耕地、林地、草地与其他地表覆盖类型的合理置换,其他地表覆盖类型获得了更大的发展空间; ④2023—2035年,在自然增长情景下,碳储量将增加898.74 t,在极限建设开发情景下,碳储量将增加538.58 t,在极限农业生产情景下,碳储量将增加517.45 t,在生态功能服务情景下,碳储量将增加813.09 t,在城乡融合发展情景下,碳储量将增加356.91 t。[结论] 在控制线的约束下进行发展可以有效地保障城市碳汇能力,合理的地表覆盖类型转变及内部结构调整可以为城市新中心发展提供进一步的空间。

关键词: 遥感影像; 地表覆盖; 碳储量; GeoSoS-FLUS模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0369-13

中图分类号: TP79, F301.2

文献参数: 詹远增, 马彦, 王兴坤, 等. 杭州城西科创大走廊地表覆盖碳储量变化分析与情景预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 369-381. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.039; Zhan Yuanzeng, Ma Yan, Wang Xingkun, et al. Carbon stock change analysis and scenario prediction on land cover of Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 369-381.

Carbon Stock Change Analysis and Scenario Prediction on Land Cover of Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City

Zhan Yuanzeng^{1,2,3}, Ma Yan^{1,2}, Wang Xingkun^{1,2,3}, Feng Cunjun^{1,2,3}, Li Jiaxin^{1,2}, Xu Pan^{1,2}

(1.Zhejiang Academy of Surveying and Mapping, Hangzhou, Zhejiang 310001, China;

2.Zhejiang Application Center of Nature Resources Satellite Technology, Hangzhou, Zhejiang 310001, China;

3.Key Laboratory of National Geographic Census and Monitoring, MNR, Hangzhou, Zhejiang 310001, China)

Abstract: [Objective] The changes in land cover and carbon stock of the Hangzhou Chengxi Sci-tech Innovation Corridor through high-resolution remote sensing images were analyzed and the development trend of carbon stock under the constraints of the “three zones and three lines” achievements was predicted to provide scientific basis for the optimization of national land space and ecological development of new urban centers. [Methods] Based on four periods of land cover data from 2010, 2015, 2020, and 2023, the GeoSoS-FLUS model was used to simulate both past and future changes in land cover under five different scenarios: the natural growth, extreme construction and development, extreme agricultural production, ecological

收稿日期: 2024-02-06

修回日期: 2024-04-16

资助项目: 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室开放基金项目“基于高分卫星影像的地表覆盖变化碳汇监测研究”(KLSMNR-G202210)

第一作者: 詹远增(1986—), 男(汉族), 浙江省乐清市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事卫星遥感应用研究。Email: geozyz@zuaa.zju.edu.cn。

通信作者: 马彦(1994—), 女(汉族), 浙江省安吉县人, 博士, 工程师, 主要从事卫星遥感应用研究。Email: mayan17@mails.ucas.ac.cn。

function services, and urban-rural integration development scenarios up to the year 2035. The model was used as a framework to calculate the changes in carbon stock under the simulated scenarios from 2010 to 2023 and from 2023 to 2035, respectively. [Results] ① The carbon stock of Chengxi Sci-tech Innovation Corridor showed an increasing trend from 2010 to 2023, with a total change of 1 720.69 t, where the carbon stock of vegetation, soil, and water increased to approximately 913.67 t, 566.18 t, and 240.84 t, respectively. ② The internal type transformation of cultivated land resulted in a decrease of 119.33 t in soil carbon stock, while the internal type transformation of forest land accounted for 39.50% of the total change in carbon stock. ③ In the natural growth and ecological function services scenarios, forest land growth was relatively significant, while in the extreme construction and development and extreme agricultural production scenarios, the land cover types were more stable. In the urban-rural integration development scenario, through reasonable replacement between cultivated land, forest land, grassland, and other land cover types, other land cover types obtained greater development space. ④ During 2023—2035, carbon stock will rise by 898.74 t under the natural growth scenario, 538.58 t under the extreme construction and development scenario, 517.45 t under the extreme agricultural production scenario, 813.09 t under the ecological function services scenario, and 356.91 t under the urban-rural integration development scenario. [Conclusion] Development under the constraint of control lines could effectively guarantee the carbon sequestration capacity of cities. Reasonable transformation of land cover types and internal structural adjustments can provide more space for the development of new urban centers.

Keywords: remote sensing images; land cover; carbon stock; GeoSoS-FLUS model

多中心化已经成为城市发展的新格局,“三区三线”是维护生态健康,保障粮食安全,引导城镇开发的底线。根据城镇空间、农业空间、生态空间 3 种类型的空间,分别对应划定城镇开发边界、永久基本农田保护红线、生态保护红线三条控制线,在国土空间开发中具有不可逾越性。地表覆盖变化是开展国土空间优化的数据基础,可以辅助“三区三线”范围的划定^[1],同时也会显著地影响区域碳循环。因此研究地表覆盖变化对陆地生态系统碳储量的影响具有重要意义,既可以促进城市新中心土地资源的高效集约利用,还可以为区域可持续发展提供更多生态系统服务^[2]。

近年来,国内外学者基于地表覆盖变化碳储量监测进行了大量的研究。部分学者采用实地取样的方式针对不同地表覆盖类型的碳密度计算开展研究^[3];部分学者选择通量观测的模式^[4],基于激光雷达点云数据,通过生物量换算计算碳储量,该方法数据采集工作量大,对数据精度要求高;部分学者采用模型算法,基于地表覆盖变化数据,结合实测得到的碳参数,使用碳储量分析模型计算了因地表覆盖变化导致的碳储量变化^[5],该方法操作简便,可以从时空角度分析碳储量变化特征。进一步,使用地表覆盖数据还可以结合模拟分析模型开展远期地表覆盖数据对碳储量的影响研究^[6-8]。卫星遥感影像是获取地表覆盖数据的有效手段,PLUS 模型已经被证实可以有效地应用于耦合人类活动和环境因素的地表覆盖变化模拟。

然而目前的研究还存在以下不足:①在研究范围上,当前研究主要集中在大范围区域,多中心可持续发展正在逐渐演变为未来城市的发展方向,各城市中心如何更好地监测地表覆盖变化带来的碳储量变化目前研究较少;②在使用数据上,当前研究主要采用中低分辨率卫星遥感影像作为数据源,对于地表覆盖破碎且变化频繁的区域适用性不强;③在研究内容上,基于国土空间规划的要求,以“三区三线”数据约束作为预设情景,开展碳储量模拟分析的研究较为少见。

杭州城西科创大走廊是浙江省“面向世界、引领未来、服务全国、带动全省”的创新策源地,同时也是城乡融合发展的典范,要打造为人与自然和谐共生的典型代表,承担着科技创新与生态文明的双重使命。因此,本文选取城西科创大走廊作为研究区域,依托 2010,2015,2020 和 2023 年 4 期高分辨率卫星遥感影像获取高分辨率地表覆盖数据,基于历史地表覆盖变化特征,在国土空间规划“三区三线”数据约束下预设不同情景,运用 GeoSoS-FLUS 模型模拟 2035 年地表覆盖格局,结合碳密度数据开展地表覆盖变化的碳储量时空演变分析,以期未来在有限的增量空间里,为杭州城西科创大走廊国土空间优化和碳储量管理提供有效指导。

1 研究区概况

杭州城西科创大走廊(30°11′—30°22′N,119°41′—

120°7'E)位于杭州主城区西部,属亚热带季风气候,平均气温为 15~23 ℃,年平均降雨量为 1.40×10^3 mm。大走廊横跨西湖、余杭、临安 3 个区,规划面积约 400 km²,长约 33 km,地势表现为西高东低,串联起“一廊四城两翼”的空间结构,自古以水乡文化出名,自然条件优越,坐拥西溪国家湿地公园、五常湿地、和睦湿地以及南湖、青山湖国家森林公园等山水景观资源。大走廊持续贯彻城乡融合发展的思想,推进城市功能、创新资源、产业平台、基础设施、生态环境等一体化规划、一体化布局,地表覆盖结构自 2012 年挂牌以来发生了较大的变化。通过开展大走廊地表覆盖碳储量变化分析与情景预测研究,有利于探究在快速发展的城市新中心空间里,地表覆盖变化对碳储量的影响以及未来如何协调生态环境保护与土地开发建设的关系,为科创高地快速发展过程中的国土空间优化提供技术支撑。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感影像 研究主要包括 2010,2015,2020,2023 年 4 期遥感影像,每期遥感影像均包含研究区全覆盖的 2~2.5 m 空间分辨率卫星遥感影像与 0.2~0.5 m 空间分辨率航摄遥感影像两种数据类型。卫星遥感影像以高分一号、资源三号为主要数据源,来源于自然资源卫星遥感云服务平台(<https://sas-clouds.com/chinese/home/>)。航摄遥感影像来源于基础测绘项目积累的历史航片资料。

2.1.2 碳汇能力与碳密度数据 地表覆盖碳密度是进行碳储量监测的基础,已有研究^[9-10]表明同一气候带一植被带地表覆盖类型碳密度和碳汇能力差异较小,本文依据划分的地表覆盖类型,收集整理相关期刊文献中与本文研究区同处亚热带气候区的华东地区林地^[11-15]、草地^[16]、灌木^[17]、茶树种植园^[18]的碳汇能力和碳密度数据,构建了不同植被类型的碳参数数据集(表 1)。虽然目前主流碳循环模型还未充分考虑水域产生的碳汇,但已有研究表明水循环可以产生重要的碳汇,本文参考前人的研究基础^[12,19-20],将水域碳汇分为 3 类:一是地表覆盖类型未变的水域;二是地表覆盖新增的水域,包括新增水面与新增湿地;三是地表覆盖减少的水域,包括水面流失与湿地流失,不同水域的碳参数数据集如表 2 所示。

2.1.3 土壤有机碳数据 土壤有机碳含量和容重数据来自刘峰等^[21]使用机器学习方法生成的高分辨率三维栅格分布图,空间分辨率为 90 m(<https://poles.>

tpdc.ac.cn/zh-hans/data/elccd22c-348f-41a2-ab46-dd1a8ac0c955/)。0—30 cm 土壤有机碳储量数据通过土壤有机碳、土壤容重和地表覆盖面积进行计算。

表 1 不同植被类型的碳参数数据集
Table 1 Datasets of carbon parameters for different vegetation types

植被类型	碳汇能力/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,以 C 计)	碳密度/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,以 C 计)
针叶乔木林	0.422	17.400
阔叶乔木林	0.568	51.200
竹林	0.883	34.400
人工幼林	0.412	9.236
灌木	0.185	9.150
草地	0.060	3.400
茶树种植园	0.950	29.665
针阔混交林	0.545	34.300
乔灌混合林	0.365	21.725

表 2 不同水域的碳参数数据集(以 C 计)
Table 2 Datasets of carbon parameters in different waters (calculated by carbon) $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$

地表覆盖类型 未变的水域	碳汇能力	地表覆盖类型 转变的水域	碳汇能力
水面	0.567	新增水面	0.630
湿地	0.350	新增湿地	6.040
		水面流失	-0.567
		湿地流失	-0.248

2.1.4 情景模拟分析数据 研究开展的情景模拟分析主要围绕国土空间优化展开,用到“三区三线”划定成果。极限建设用地开发范围、极限耕地开发范围主要通过坡度、高程、地形起伏度、土壤类型、水域等限制性因子计算得出。生态保护重要性范围主要通过水源涵养、水土保持、生物多样性、水土流失等多个因子综合计算,结合国土空间现状用途,基于“生态—城镇—农业—现状”4 维矩阵,加权分析得出。研究区生态保护红线面积约 23 km²,永久基本农田面积约 27 km²,城镇开发边界面积约 193 km²,城镇开发边界内剩余可开发面积比例为 27%。

2.2 地表覆盖变化信息提取

2.2.1 地表覆盖粗分类 利用深度学习语义分割算法^[22],基于 2~2.5 m 空间分辨率卫星遥感影像进行地表覆盖粗分类,分为耕地、林地、草地、水、湿地和其他 6 大类型。其他地表覆盖类型主要包括建筑物、构筑物、道路等建设用地与未利用地。

2.2.2 地表覆盖细分类 利用 LuoJiaNet 遥感专用框架模型服务平台(<http://58.48.42.237/luojiaNet/>

home), 针对地表覆盖粗分类结果中耕地、林地范围, 基于 0.2~0.5 m 空间分辨率航摄遥感影像进行地表覆盖精细化分类, 耕地进一步细分为水田、旱地, 林地精细化类别见表 1。同时进一步获取房屋建筑区内及道路、水域两旁的绿化林木范围。

2.2.3 地表覆盖变化与保持 利用空间叠加工具分析 2010—2015, 2015—2020, 2020—2023 年地表覆盖结果, 地表覆盖类型发生变化的区域认定为地表覆盖变化, 地表覆盖类型未发生变化的区域认定为地表覆盖保持, 结合地表覆盖变化转移矩阵直观地反映地表覆盖变化的数值信息, 计算公式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为面积; i, j 分别为地表覆盖变化前后类型。

本研究利用地表覆盖变化空间叠加分析结果及转移矩阵分析碳储量变化。

2.3 多情景地表覆盖变化预测

利用 GeoSOS-FLUS 模型^[23]模拟人类活动与自然影响下地表覆盖的空间分布。该模型包含 Markov 链和多层前馈神经网络算法(BP-ANN)两大模块。它基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制, 能有效对地表覆盖发生变化时的不确定性和复杂性进行评估, 并在迭代过程中进行自适应调整, 从而使各类地表覆盖向预定目标发展。

(1) 驱动因子选择。地表覆盖变化是地理条件、气候状况、经济发展多种因素综合影响的结果。本研究利用专家打分法筛选出如下 9 种驱动因子(图 1): ①地理条件。高程、坡度、坡向、河流分布、NDVI; ②气候状况。气温、降水; ③经济发展。离道路距离、离中心距离。

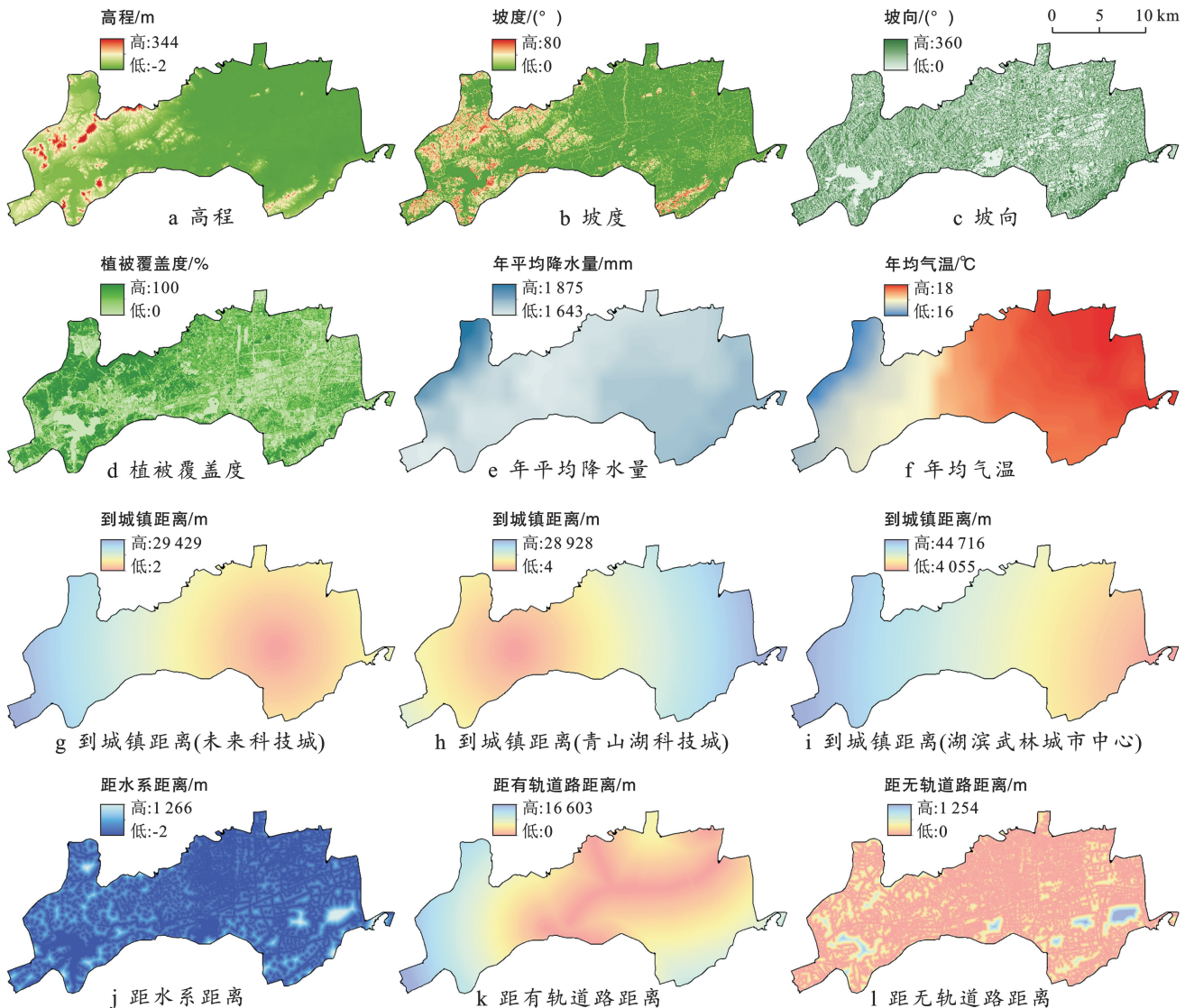


图 1 杭州市城西科创大走廊地表覆盖变化驱动因子示意图

Fig.1 Schematic diagram of driving factors for land cover change in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City

(2) 精度验证。基于 2010—2020 年地表覆盖数据,模拟得到 2023 年地表覆盖预测数据,对比 2023 年实际的地表覆盖数据进行精度验证,模拟结果的总体精度(Overall accuracy)为 93.16%,一致性(kappa)为 0.84,表明模型在研究区的模拟准确度较高,适宜性较好。

(3) 多情景模拟。本研究从国土空间规划的角度,基于研究区科技创新、绿色生态的发展目标定位,结合“三区三线”成果,设定自然增长,极限建设开发,极限农业生产,生态功能服务以及城乡融合发展 5 种不同的场景,对研究区 2035 年地表覆盖空间格局进行预测。其中,自然增长情景(Q₁)遵循自然规律,不考虑任何其他影响;极限建设开发情景(Q₂)重点满足经济建设、城市发展的需求;极限农业生产情景

(Q₃)重点满足耕地保护的需求;生态功能服务情景(Q₄)重点满足生态保护的需求;城乡融合发展情景(Q₅)统筹研究区各项需求综合开展模拟。多情景模拟过程中通过设置成本矩阵与邻域因子,从而控制地表覆盖的转变,邻域因子权重范围为 0~1,越接近 1 表示该地表覆盖类型的扩展能力越强。

2.4 地表覆盖变化碳储量监测

本研究以模型为框架将地表覆盖变化碳储量监测划分为生物量碳储量、土壤碳储量,同时考虑水域、湿地碳汇原理与林地、耕地、草地等有不同,增加水域碳储量监测部分。每一个部分又分别从地表覆盖保持与地表覆盖转变的角度进行了有效的区分,模型结构如图 2 所示。

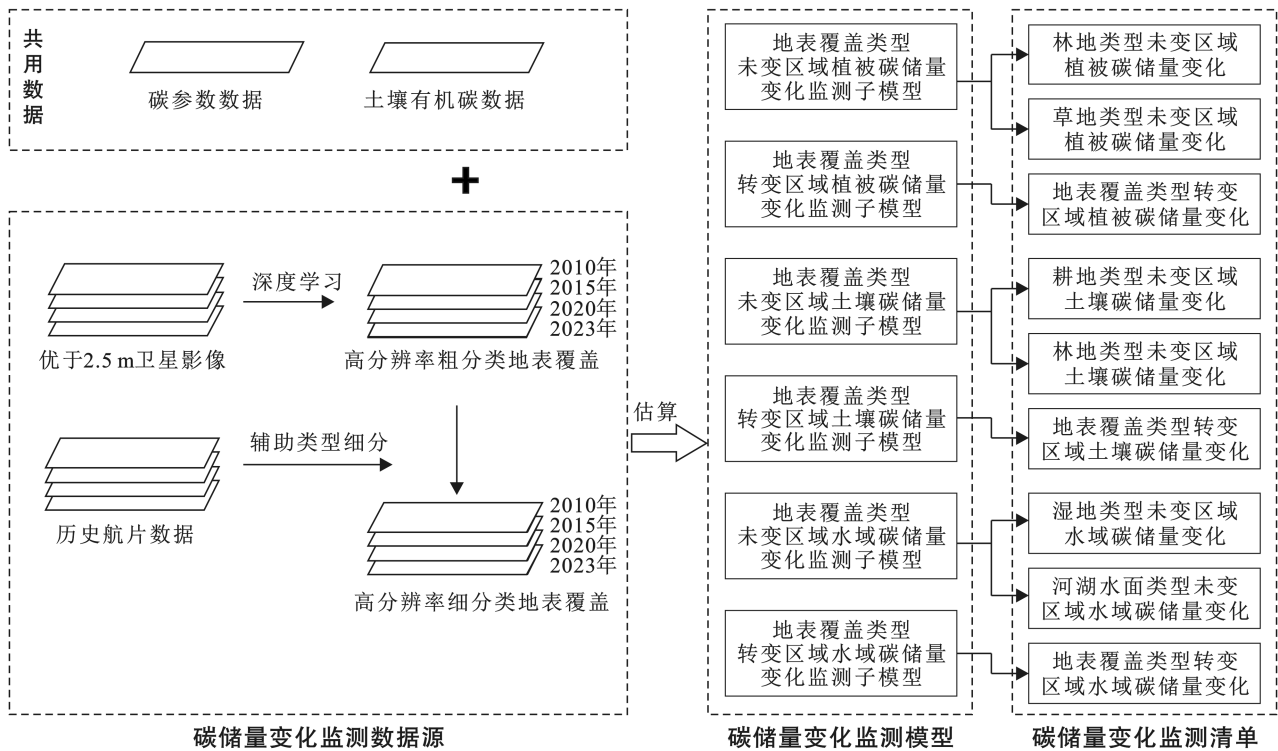


图 2 基于地表覆盖变化的碳储量监测流程图
Fig.2 Flow chart of carbon stock monitoring based on changes in land cover

2.4.1 基于地表覆盖的植被碳储量变化监测 地表覆盖类型未变区域的植被碳储量变化监测步骤: ①叠加不同时期的地表覆盖矢量数据,获取未变的地表覆盖类型; ②根据不同地表覆盖类型的碳汇参数(表 1) 乘上相应面积,计算地表覆盖类型未变区域的植被碳储量变化。地表覆盖类型转变区域的植被碳储量变化通过前后两期地表覆盖植被碳密度差异计算^[12]。

2.4.2 基于地表覆盖的土壤碳储量变化监测 地表覆盖类型未变区域的土壤碳储量变化监测细分为:草地土壤碳储量、林地土壤碳储量和耕地土壤碳储量。由于研究区内草地多稳定为高覆盖度,草地土壤碳储量变化基于植被覆盖度变化来计算,因此本文可不考

虑草地土壤碳储量变化。林地土壤碳储量变化以地表覆盖类型未变区域的植被碳储量变化按经验系数进行折算^[12]。

$$\Delta SOC_l = k \times Sink \quad (2)$$

式中: ΔSOC_l 为林地土壤碳储量变化; k 为经验系数($\frac{1}{2}$); $Sink$ 为地表覆盖类型不变区域的植被碳储量变化。

耕地土壤碳储量计算参考 IPCC 建议的第二层做法,以有机碳含量、容重数据和地表覆盖进行叠加,作为农田有机碳的后时期值,见公式(3)—(4)。耕地管理因子使用金琳等的修正值^[24]。同时,水稻土有

机碳含量计算为旱作土的两倍^[25]。耕地土壤碳储量变化计算见公式(5)。

$$SOC = \sum SOC_{before} \cdot F_{LU} \cdot F_{MG} \cdot A \tag{3}$$

$$SOC_{before} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot m_i \tag{4}$$

$$\Delta SOC = SOC - SOC_{before} \tag{5}$$

式中:ΔSOC 为土壤碳储量变化;SOC 为后时期的土壤碳储量;SOC_{before} 为前时期的土壤碳储量;F_{LU} 为地表覆盖变化的碳储量影响因子(情景为长期耕作 20 a 以上,值为 0.69),F_{MG} 为耕作制度的碳储量影响因子(常耕为 1);A 为土壤面积;ρ_i 为第 i 层的土壤容重;m_i 为第 i 层的土壤有机碳含量;n 为土壤层数。

地表覆盖类型变化区域的土壤碳储量变化计算公式如下:

$$NC = \sum \sum C_j \cdot \Delta IF_{ji} \cdot S_{ji} \tag{6}$$

式中:NC 为地表覆盖类型转变的碳储量变化量;C_j 为第 j 种地表覆盖类型的土壤碳密度;ΔIF_{ji} 为第 j 种地表覆盖类型转变为第 i 种的影响因子变化;S_{ji} 为第 j 种地表覆盖类型转变为第 i 种的面积。

2.4.3 基于地表覆盖的水域碳储量变化监测 地表覆盖类型未变区域的水域碳储量变化监测子模型仅考虑保持为水面和湿地的地表覆盖类型。水域类型转变区域的水域碳储量变化监测子模型计算分为两类^[12]:①水域新增导致的碳储量变化,主要考虑退耕还湖、退耕还泽;②水域减少导致的碳储量变化,相关参数见表 2。

基于地表覆盖类型的水域碳储量变化估算步骤:
①叠加不同时期地表覆盖矢量数据,获得未变/转变

地表覆盖类型的区域;②根据不同地表覆盖类型的碳参数(表 2)乘上相应面积,计算地表覆盖类型未变/转变区域的水域碳储量变化。

3 结果与分析

3.1 地表覆盖变化

从地表覆盖粗分类结果来看,2010 年城西科创大走廊地表覆盖类型以耕地、林地、草地、水面等自然地类为主,面积占比达到了 65.50% 以上。其他地表覆盖类型面积增长了约 80 km²,每年动态变化度达到 4.20%,其中 26.80% 为耕地转出,22.30% 为林地转出,1.30% 为草地转出,8.80% 为水转出。地表覆盖粗分类流入流出如图 3 所示。

2010,2015,2020,2023 年地表覆盖精细化分类空间分布如图 4 所示。

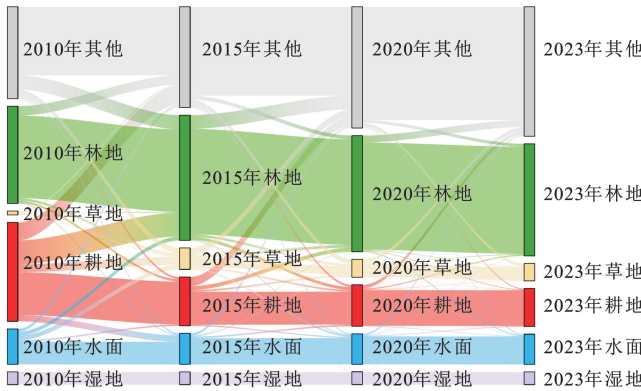


图 3 基于地表覆盖类型的面积流入流出特征
Fig.3 Area inflow and outflow characteristics based on land cover type

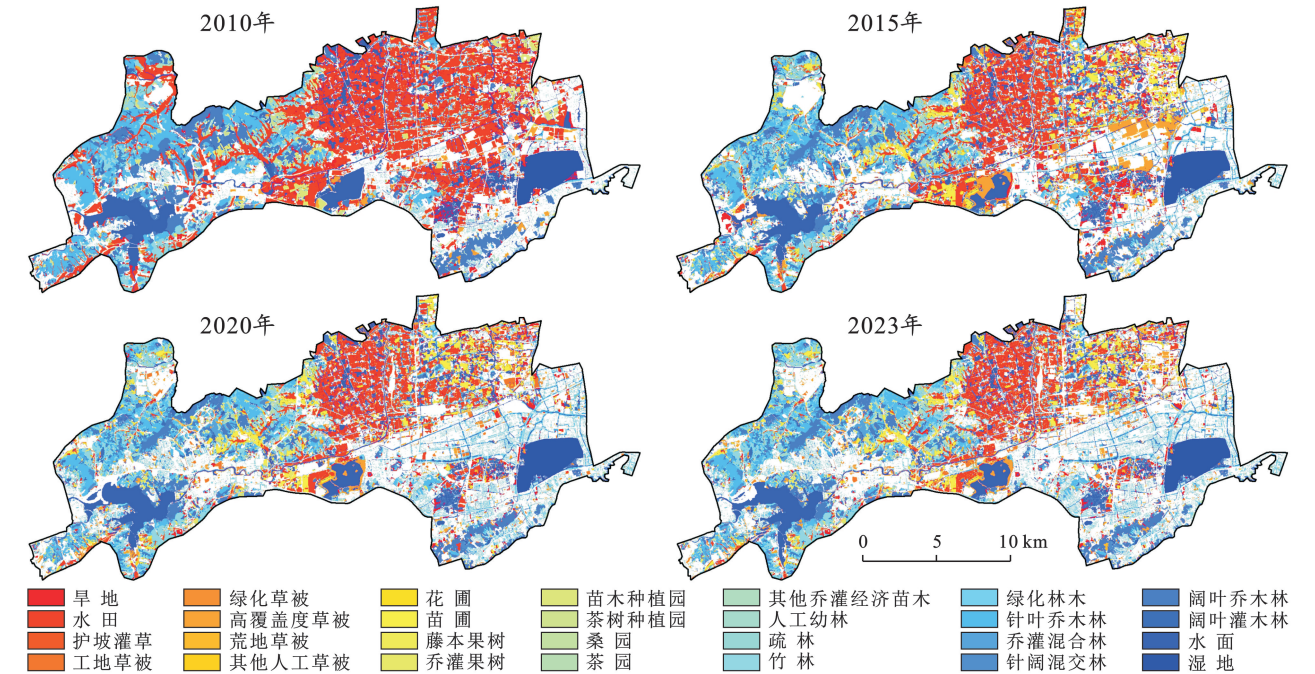


图 4 2010,2015,2020,2023 年城西科创大走廊地表覆盖精细化分类

Fig.4 Fine classification of land cover in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in 2010, 2015, 2020, and 2023

2010—2023 年研究区同一种地表覆盖类型内部结构调整十分频繁,保持不变的耕地中,约有 12.80% 发生了水田与旱地的转变,其中 0.6 km² 的旱地转变成了水田,4 km² 的水田转变成了旱地。保持不变的林地中,约有 39.70% 发生了细分类型的转变,转移面积较大的是阔叶乔木林转变成针叶乔木林,面积约 2.74 km²。地表覆盖细分类流入流出如图 5 所示。

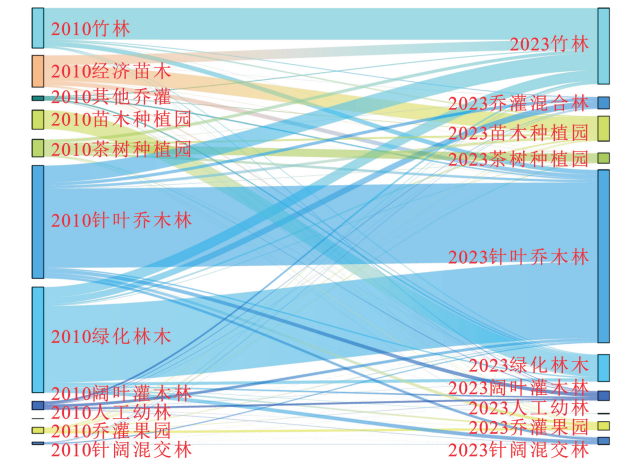


图5 2010—2023 年杭州市城西科创大走廊林地细分类型间的流入流出特征

Fig.5 Inflow and outflow characteristics of forest land subdivisions in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City from 2010 to 2023

2010—2023 年研究区属于建设配套的绿化林木(建筑区内绿化及道路两边绿化)同样增加显著,面积占新增其他地表覆盖类型总面积的 42.20%。2010—2023 年研究区新增绿化林木分布如图 6 所示。

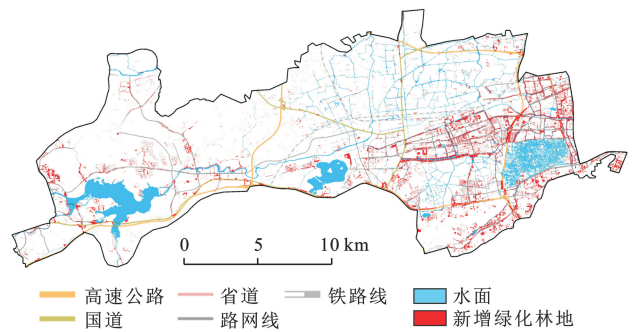


图6 2010—2023 年杭州市城西科创大走廊新增绿化林木分布

Fig.6 Distribution of newly greened trees in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City from 2010 to 2023

3.2 地表覆盖变化碳储量变化

3.2.1 地表覆盖类型变化的碳储量变化分析 基于地表覆盖类型变化的碳储量变化结果汇总见表 3。2010—2023 年,研究区域碳储量增加 1 720.69 t。地表覆盖类型未变区域的碳储量增加 1 156.38 t,其中植被碳储量比例为 54.08%,土壤碳储量比例为

21.38%,水域碳储量比例为 24.55%。地表覆盖类型转变区域的碳储量增加 564.31 t,其中植被碳储量与土壤碳储量各贡献 1/2,而水域碳储量有所减少。

表3 基于地表覆盖类型变化的碳储量监测

Table 3 Carbon stock monitoring based on changes in land cover type

地表覆盖类型未变区域碳储量变化		地表覆盖类型转变区域碳储量变化		总计
植被碳	625.36	植被碳	288.31	913.67
林地	619.41			
草地	5.95			
土壤碳	247.18	土壤碳	319.00	566.18
林地	309.71			
耕地	−62.53			
水域碳	283.84	水域碳	−43.00	240.84
河湖水面	217.26	转入	46.70	
湿地	66.58	转出	−89.70	
总计	1 156.38		564.31	1 720.69

2010—2023 年,植被碳储量增加 913.67 t。植被类型未变区域的碳储量增加 625.36 t,其中,林地贡献了 619.41 t,比例达到 99.05%,2010—2015 年、2015—2020 年、2020—2023 年植被类型未变区域的碳储量增速分别为 30.02,59.61,59.07 t/a。植被类型转变区域的碳储量增加 288.31 t。

2010—2023 年,土壤碳储量增加 566.18 t。未变区域的土壤碳储量增加 247.18 t,其中,耕地土壤碳储量减少 62.53 t,林地土壤碳储量增加 309.71 t。转变区域的土壤碳储量增加 319.00 t,主要来源于耕地转变为林地与草地,共计 438.33 t。

2010—2023 年,水域碳储量增加 240.84 t。水面、湿地保持的碳储量增加 283.84 t,其中河湖水面贡献了 217.26 t,湿地贡献了 66.58 t。由于水域转入导致碳储量增加 46.70 t,水面转出导致碳储量减少 89.70 t。

3.2.2 地表覆盖细化类型转变的碳储量变化 在 3.2.1 的基础上进一步分析地表覆盖细化类型转变导致的碳储量变化如图 7 所示。

从各类的变化来看。2010—2023 年,阔叶乔木林转变为草地导致的碳储量损失最多,达到了 −48.28 t,其次依次为水面转变为草地(−20.20 t)、阔叶乔木林转变为旱地(−17.34 t)、针叶乔木林转变为草地(−16.46 t),水面转变为水田、水面转变为旱地、竹林地转变为草地、竹林地转变为旱地等也造成了碳储量损失。水田、旱地转变为林地带来的碳储量

增加较多,分别为水田转变为竹林地(93.27 t)、水田转变为绿化林木(91.28 t)、旱地转变为竹林地(68.37 t)、旱地转变为阔叶乔木林(51.29 t)等,水田、草地转变为水面也带来了较多的碳储量增加。

从各类内部类型调整来看,2010—2023 年,水田转变为旱地导致的碳储量损失最多,达到 163.38 t,旱地转变为水田带来的碳储量增加为 23.22 t,这部分碳主要来源于两种耕地土壤碳密度的差异。针叶乔木

林碳汇能力相对较低,针叶乔木林转变为竹林地、阔叶乔木林带来了较多的碳储量增加,总量为 190.76 t。阔叶乔木林碳汇能力相对较高,阔叶乔木林转变为竹林地、针叶乔木林、乔灌混合林导致了较多碳储量损失,总量为 184.92 t。林地内部类型调整带来碳储量增加的有灌木林、绿化林木、人工幼林,分别为 38.55 t, 1.10 t,0.78 t。林地内部类型调整导致碳储量减少的有竹林、针阔混交林,分别减少了 9.63 t 和 1.38 t。

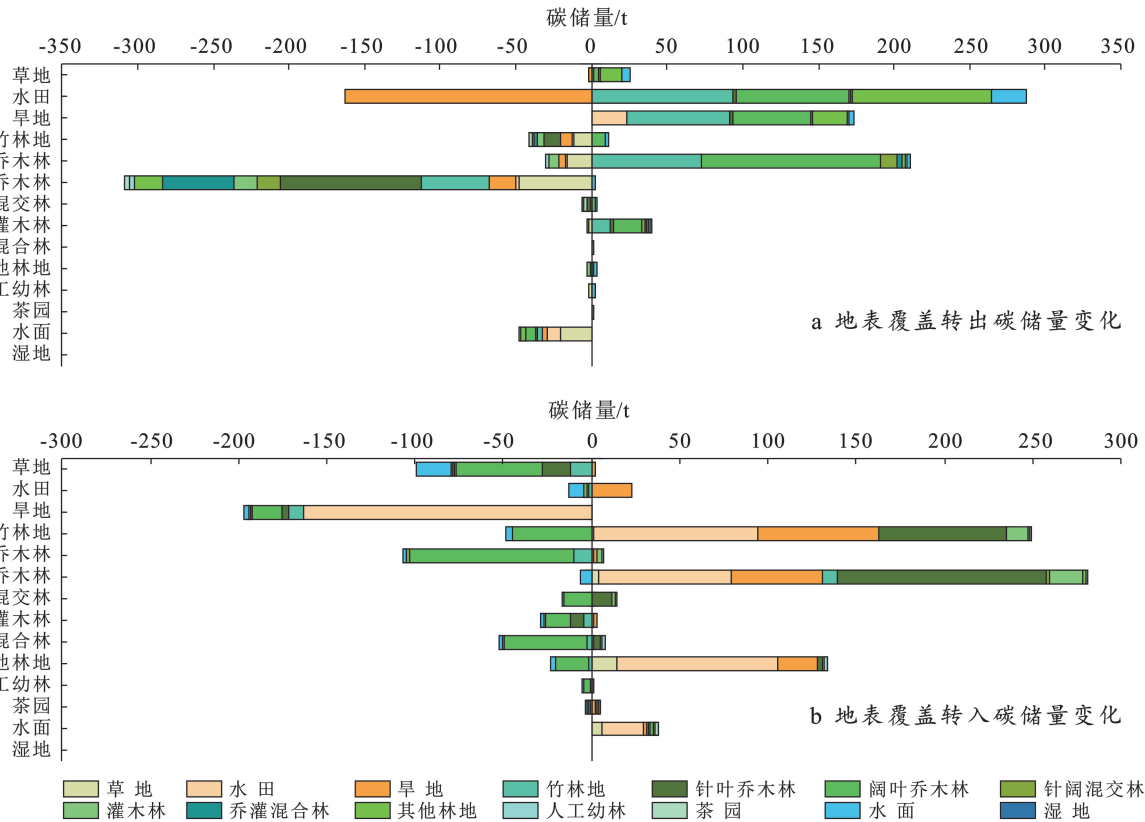


图 7 杭州市城西科创大走廊地表覆盖细化类型转变的碳储量变化特征
Fig.7 Characteristics of carbon storage changes in the transition of land cover fine types in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City

3.3 多情景预测

3.3.1 多情景预测下的地表覆盖变化 通过设置成本矩阵与邻域因子权重,利用 2010—2023 年地表覆盖数据模拟 2030 年不同情景下的地表覆盖情况,结果如图 8 所示,其中保持率指 2023—2030 年地表覆盖类型不变的面积与 2023 年该地表覆盖类型面积的比值;转出率指某地表覆盖类型 2030 年相比 2023 年转出的面积与 2023 年该地表覆盖类型面积的比值;转入率指某地表覆盖类型 2030 年相比 2023 年转入的面积与 2030 年该地表覆盖类型面积的比值,由于各情景模拟后湿地均保持稳定,因此表格中未列入湿地的变化情况。

自然增长情景,本文没有考虑任何限制条件,研

究区域内变动的潜力为 100.00%。此情景下,林地优势性较大,不仅保持率较高,耕地、草地、水、其他转出的 60.00%以上均变为林地,林地的转出主要变为其他地表覆盖类型。其他地表覆盖类型的转出中,有 56.20%以上变为林地,21.20%变为耕地,18.10%变为草地。

极限建设开发情景,本文考虑在极限建设用地开发范围内优先保证各地表覆盖类型向其他地表覆盖类型的转变,研究区域内变动的潜力为 68%。此情景下,各地表覆盖类型反而更为稳定,保持率均为最高,其他地表覆盖类型保持率达到 98.65%,但也导致了此情景调整空间较小,其他地表覆盖类型转入率最低,仅有 8.21%。

极限农业生产情景,本文考虑在极限农业开发范围内保持现状耕地的稳定,同时不限制各地表覆盖类型向耕地的转变,研究区域内变动的潜力为 87%。此情景下,耕地保持率最高,达到了 98.45%,但依然无法改变林地优势地表覆盖类型的现象,林地的转出中有 99.30%以上变为其他地表覆盖类型,耕地、林地、其他地表覆盖类型的转出中 60.00%以上变为了林地。同时此情景调整空间也相对较小,各地表覆盖类型转入转出率不高。

生态功能服务情景,本文考虑在生态保持重要区范围内(综合区域水土保持、水源涵养、生物多样性等功能)限制各地表覆盖类型向其他地表覆盖类型转变,研究区域内变动的潜力为 76%。此情景下,目前在生态保持重要区范围内的其他地表覆盖类型与范围外的林地发生了明显的类型转换,在林地转出中约 84.30%变为其他地表覆盖类型,在林地转入中约

49.40%由其他地表覆盖类型转变得得到。同时耕地的转入转出也非常明显,耕地除了与林地、草地、水等类型发生了明显的置换以外,耕地转入中其他地表覆盖类型比例达到 71.20%。

城乡融合发展情景,本文考虑在农业—城镇—生态综合适宜性评价范围内,分别向耕地转入、其他地表覆盖类型转入及林地转入倾斜,同时考虑国土空间规划硬性要求,在永久基本农田、城镇开发边界及生态保护红线范围内分别参考极限农业生产、极限建设开发及生态功能服务情景的预设条件,研究区域内变动的潜力为 87%。此情景下,耕地、林地、草地 3 类地表覆盖类型与其他地表覆盖类型发生了最充分的置换,转入转出率均达到一个较高的水平,约 77.60%的耕地转出、97.30%的林地转出、52.60%的草地转出变为其他地表覆盖类型,73.50%的耕地转入、44.60%的林地转入、73.00%的草地转入由其他地表覆盖类型转变得得到。

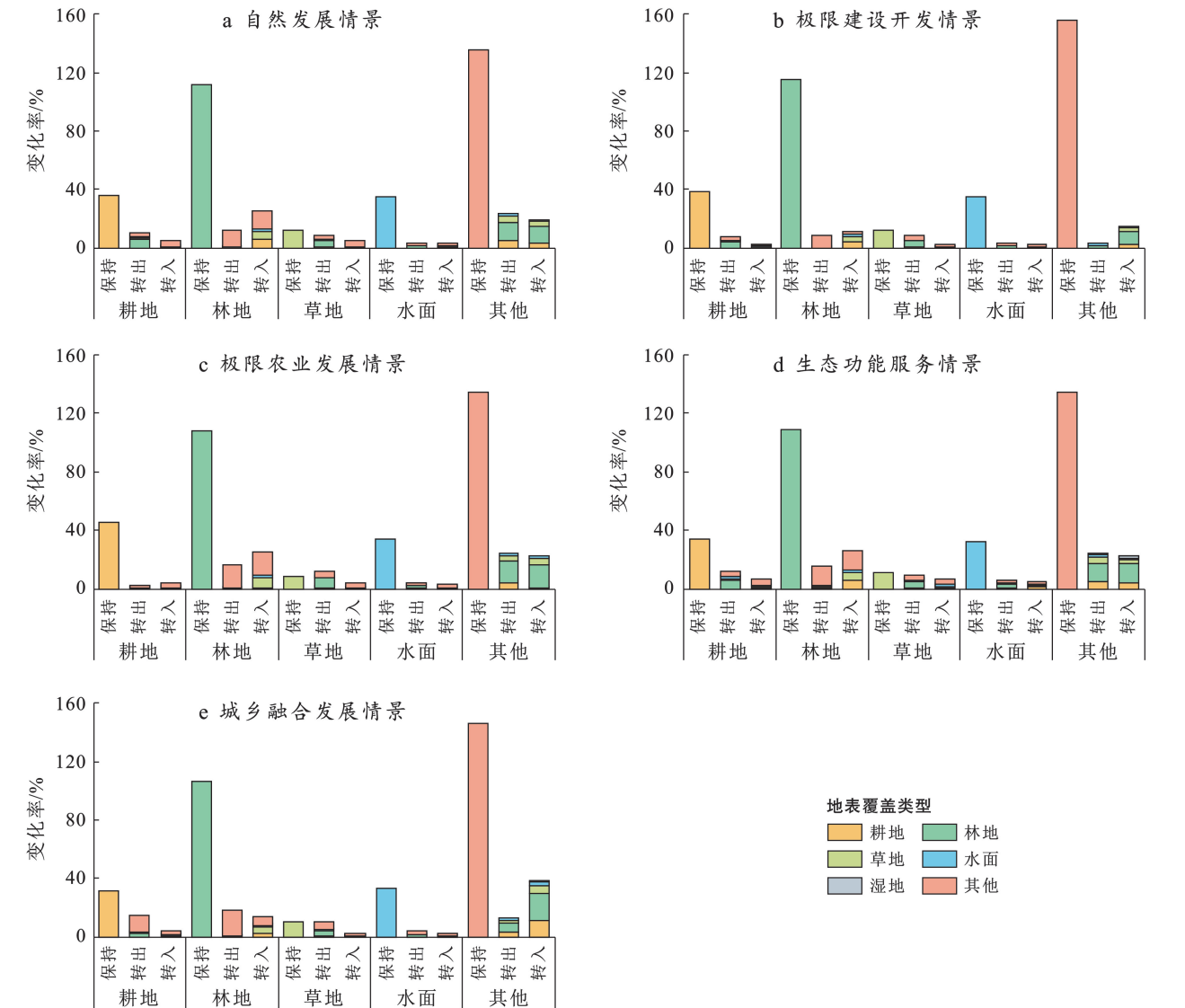


图 8 杭州城西科创大走廊多情景下地表覆盖类型变化特征

Fig.8 Characteristics of land cover type change under multiple scenarios in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City

3.3.2 多情景预测下的碳储量监测 基于前期结果,计算不同情景下地表覆盖碳储量变化,结果如图 9 所示。5 个情景预测下的 2030 年研究区碳储量均有增加,自然增长情景碳储量增加最多,城乡融合发展情景碳储量增加最少,各情景下水域碳储量增加相差不大,差异主要来源于植被碳与土壤碳。自然增长情景下,林地为优势地表覆盖类型,保持率、转入率都很高,带来植被碳储量增长明显,同时也有较大面积的耕地转变为林地,因此抑制了土壤碳储量的减少。极限建设开发情景下,已有的其他地表覆盖类型基本保

持不变,同时还有大量林地转变为其他地表覆盖类型,因此植被碳储量增长相对较低。极限农业生产情景下,已有的耕地类型基本保持不变,造成土壤碳储量减少明显。生态功能服务情景下,耕地与林地发生了明显的置换,同时其他地表覆盖类型转出较多,因此植被碳储量增长较多,也极大地抑制了土壤碳储量的减少。城乡融合发展情景下,耕地、林地、草地 3 类地表覆盖类型与其他地表覆盖类型发生了最充分的置换,其他地表覆盖类型面积达到最大,因此植被碳储量增长最少。

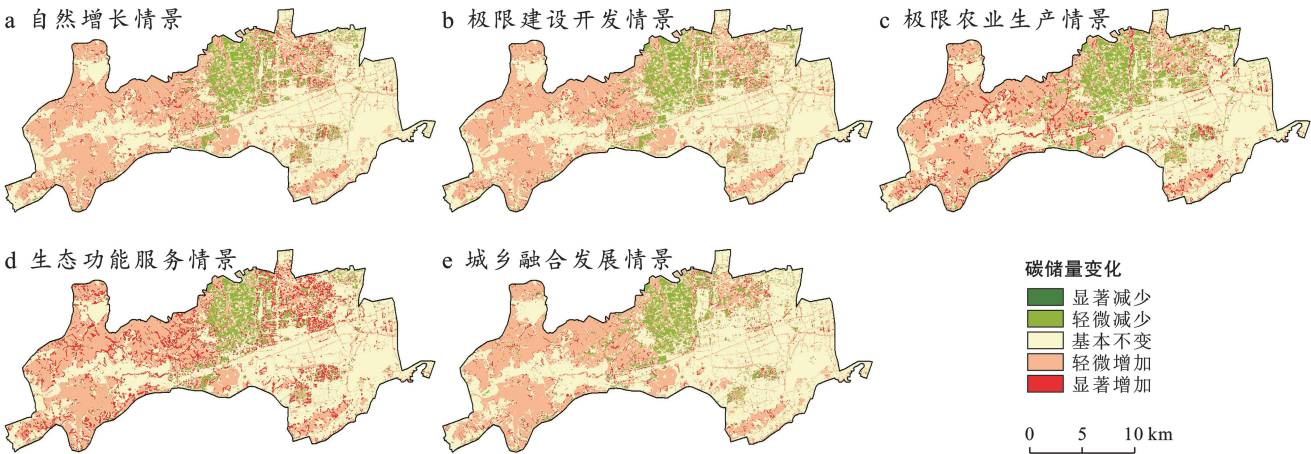


图 9 杭州市城西科创大走廊不同情景下地表覆盖碳储量变化

Fig.9 Changes in land cover carbon stocks under different scenarios in Chengxi Sci-tech Innovation Corridor in Hangzhou City

从空间层面分析。生态功能服务情景与极限农业生产情景碳储量显著增加的区域分布明显,但极限农业生产情景碳储量减少的区域分布也更多。极限建设开发情景碳储量减少的区域分布较多,同时碳储量增加的区域分布范围较少,碳储量明显增加的区域属于零星分布状态。城乡融合发展情景,在西北山区碳储量获得了一个较大的增长范围,在东部平原区域,碳储量增加较弱,但也能保持一个稳定的状态,碳储量减少的区域范围也最少。

4 讨论

(1) 城市快速发展背景下的碳储量增长因素。杭州城西科创大走廊作为目前浙江省发展最迅速的城市新中心,人口由 3.00×10^5 增长到 8.00×10^5 ,建设用地面积由 70.60 km^2 扩大至 150.70 km^2 ,但碳储量增速依然能维持在每年 60 t 左右,本研究结果表明主要原因有 3 点: ①城西科创大走廊开发一直秉持着城乡融合发展的理念,坚守底线原则,按杭州市富阳地区相关研究来看,林地转化为耕地导致的碳损失量可以占到土壤有机碳和植被碳总损失量的 $1/4$ 和 $1/3$ ^[26],由此可以看出林地的转入转出对碳平衡变化

的影响极其显著。由于森林的土壤有机碳密度较高,较小的面积减少也会造成显著的土壤碳损失,在生态保护红线范围内,研究区对林地、湿地的保护极为重视,贡献了 50.00% 以上的碳增长量; ②重视城市绿化的建设,已有研究^[27]表明城市绿化是城市地区固碳最直接有效的方式,也有研究人员指出^[28]中国多数城市的绿化举措能够抵消城市化造成的植被损失,研究区属于建设配套的绿化林木面积占新增其他地表覆盖类型总面积的 42.20% ,2010—2023 年贡献了 270.00 t ,约占每年碳增长量的 30.00% 以上,考虑到新增的其他地表覆盖类型前期多数为耕地,其碳汇能力相比绿化林木更弱,因此城市绿化可以抵消一半以上由于城市建设带来的碳储量损失; ③水域提供了不可忽视的碳储量增加,Wang Mei 等^[29]研究表明自全新世以来,中国湖泊碳积累速率总体上呈增加趋势,碳积累速率的平均值为 $(7.70 \pm 1.4) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,研究区整体水域变化范围较小,保持面积较大,维持了较好的水域碳汇能力。

(2) 城市发展后期“双碳”目标下的国土空间优化建议。①重视全方位发展,极限建设开发情景与极限农业生产情景模拟结果表明,单一的发展方向只能

保证目前现状的稳定,很难获得进一步的发展空间,而生态功能服务情景与城乡融合发展情景模拟结果表明,在严格遵守3条控制线的基础上,通过各类地表覆盖类型的相互置换,可以获得更好的发展空间,城乡融合发展情景相比极限建设开发情景,可以多获得 18 km^2 的建设用地指标;②进一步优化目前地表覆盖分布格局,在自然发展情景下,耕地、草地、其他地表覆盖类型面积均出现了不同程度的衰退,在城乡融合发展情景下,地表覆盖类型也出现了较大程度的相互转换,一些零散分布的地表覆盖类型形成了更加聚集的分布格局,这充分说明目前研究区存在地表覆盖类型布局不合理的现象,主要是由于研究区国土空间规划前期无序扩张导致,更重要的是,城乡融合发展情景相比极限建设开发情景,每增加 1 km^2 的其他地表覆盖类型损失的碳储量会少 4 t ,因此进一步优化地表覆盖分布格局,可以缓解城市建设与生态保护的矛盾;③重视地表覆盖类型内部结构的调整,研究区由于旱地、水田转换导致土壤碳储量减少 119.33 t ,水田转为旱地过程中减少的碳储量占耕地碳储量变化的 36.23% ,由林地内部类型转变导致的碳储量变化占总变化的 39.50% ,竹林地转出为阔叶林会使碳储量增加,针叶林转为竹林地和阔叶林使碳储量增加较多,阔叶乔木林转出为其他类型后导致碳储量大幅减少,占总减少碳储量的 51.81% 。由此看见地表覆盖类型内部结构的调整带来的碳储量变化占碳储量变化总量的比重很大,在满足研究区生产功能的前提下,可以向碳汇能力更强的地表覆盖内部类型调整,从而获得更好的碳储量增长能力;④生态系统的打造,研究区湿地、河流面积占比达到研究区 12.6% ,贡献了 14% 的碳储量,湿地是研究区重要的碳库,已有研究^[30]表明形成湿地生态系统可以提升湿地整体的土壤碳密度水平,因此后续可以考虑将目前分布较为独立的湿地、河流串联成链,打造湿地湖链生态系统,将目前刚性边界的生态空间扩充为更加开放的模式,提升水土保持能力,提升生态系统价值,从而进一步提升研究区整体碳储量水平。

(3) 研究的优势和局限性。优势主要体现在以下3点:①体现在数据源,本研究基于高分辨率影像精细化地表覆盖变化构建了碳储量监测模型,满足了城市新中心区域性碳储量精细化监测的需求,本文研究成果也与常用的 30 m 分辨率地表覆盖数据计算得到的碳储量数值进行了对比,本文2023年研究区碳储量会多 500 t ;②体现在地表覆盖的分类体系及模型,本研究在计算碳储量时考虑到各大类细分类碳密度的差异,例如水田与旱地的差异,各类林地的差异

等,同时也构建了分层的碳汇监测模型,植被碳储量,土壤碳储量,水域碳储量均选择了更合理的计算方式,地表覆盖变化与地表覆盖保持的碳储量计算方式也有差异,因此本研究的碳储量计算结果更加合理细致;③体现在模拟情景的选择,本研究基于国土空间规划“三区三线”范围控制进行模拟情景的预设,一方面模拟得到的结果更加符合国土空间规划的要求,另一方面也可以更加真实地反映未来城市发展与生态环境变化的关系。局限性主要体现在模拟分析模型,利用GeoSoS-FLUS模型开展地表覆盖变化模拟时需要考虑驱动因子,本文针对精细化类别变化无法找到合适的驱动因子,因此情景模拟研究仅能针对地表覆盖大类开展,未能进一步体现未来地表覆盖类型内部的调整情况。

5 结论

(1) 2010年,研究区主要以耕地、林地、草地、水等自然地物为主,比例达到 65.50% 以上,13a期间地表覆盖类型发生了明显的变化,其他地表覆盖类型增长了约 80 km^2 ,2010—2023年研究区碳储量总体保持增长趋势,增长了约 $1\,720.69\text{ t}$,这主要归功于研究区施行城乡融合发展策略,始终保持永久基本农田、生态保护红线、城镇开发边界三条控制线的不可逾越性。

(2) 水域、绿化林木碳汇能力在碳储量计算过程中经常被忽视,在本文中这部分碳储量占总体碳储量增长的 30.00% 以上,同时本文也证明了同一地表覆盖类型内部结构的调整带来的碳储量变化量也相对可观,因此在碳储量监测中这两块的碳储量变化需要进一步重视。

(3) 情景预测结果显示,2023—2035年,自然增长情景、生态功能服务情景碳储量增长最明显,达到了每年 67 t 以上,甚至高于目前每年的 60 t ,主要原因是林地与研究区域的优势地表覆盖类型,自然增长情景与生态功能服务情景下,林地增长明显,其他地表覆盖类型出现了减少。极限建设开发情景、极限农业生产情景虽然能保障现状其他地表覆盖类型、耕地保持率较高,但可发展的空间也因此受限,极限建设开发情景其他地表覆盖类型只增长了 12 km^2 。城乡融合发展情景,各类地表覆盖类型发生了最显著的置换,虽然碳储量增长最少,但获得了最多的 25.80 km^2 其他地表覆盖类型的增长,同时 1 km^2 建设用地的增加带来的碳储量损失是最小的。因此,应统筹城市发展与生态保护,促进区域可持续性发展。

参考文献 (References)

- [1] 孙中原,孙成苗,展昀,等.国土空间规划体系下“三生空间”与“三区三线”划定及功能定位研究[J].自然资源情报,2023(12):26-30.
Sun Zhongyuan, Sun Chengmiao, Zhan Yun, et al. Delineation and functional positioning of “production-living-ecological space” and “three zones and three lines” under the territorial spatial planning system [J]. Natural Resources Information, 2023(12):26-30.
- [2] Luo Kui, Wang Hongwei, Ma Chen, et al. Carbon sinks and carbon emissions balance of land use transition in Xinjiang, China: Differences and compensation [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):22456.
- [3] 沈浩,姜姜,周晨,等.江西石城不同起源阔叶林碳储量驱动因子分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(4):185-190.
Shen Hao, Jiang Jiang, Zhou Chen, et al. Research on factors driving carbon storage in broad-leaved forests of different origins from Shicheng, Jiangxi Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023,47(4):185-190.
- [4] 陈治中,咎梅,杨雪峰,等.新疆森林植被碳储量预测研究[J].生态环境学报,2023,32(2):226-234.
Chen Zhizhong, Zan Mei, Yang Xuefeng, et al. Prediction of forest vegetation carbon storage in Xinjiang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(2):226-234.
- [5] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
Fang Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007,37(6):804-812.
- [6] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
Sun Fanghu, Fang Fengman, Hong Weilin, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):151-158.
- [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] 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[J].水土保持通报,2023,43(1):378-387.
Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(1):378-387.
- [9] 方精云,黄耀,朱江玲,等.森林生态系统碳收支及其影响机制[J].中国基础科学,2015,17(3):20-25.
Fang Jingyun, Huang Yao, Zhu Jiangling, et al. Carbon budget of forest ecosystems and its driving forces [J]. China Basic Science, 2015,17(3):20-25.
- [10] 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.
Xu Caiyao, Ren Yan, Kong Fanbin. Impacts and prediction of land use change on ecosystem carbon sequestration in Zhejiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(6):1610-1620.
- [11] 方精云,陈安平.中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J].植物学报,2001,43(9):967-973.
Fang Jingyun, Chen Anping. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2001,43(9):967-973.
- [12] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏 南京:南京大学,2010:142.
- [13] 王效科,冯宗炜,欧阳志云.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报,2001,12(1):13-16.
Wang Xiaoke, Feng Zongwei, Ouyang Zhiyun. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001,12(1):13-16.
- [14] 王大卫,沈文星.中国主要树种人工乔木林碳储量测算及固碳潜力分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):11-19.
Wang Dawei, Shen Wenxing. The carbon storage calculation and carbon sequestration potential analysis of the main artificial arboreal forest in China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022,46(5):11-19.
- [15] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J].植物生态学报,2000,24(5):518-522.
Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000,24(5):518-522.
- [16] 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 Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004,28(4):491-498.
- [17] 胡会峰,王志恒,刘国华,等.中国主要灌丛植被碳储量[J].植物生态学报,2006,30(4):539-544.
- Hu Huifeng, Wang Zhiheng, Liu Guohua, et al. Vegetation carbon storage of major shrublands in China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006,30(4):539-544.
- [18] 张敏,陈永根,于翠平,等.在茶园生产周期过程中茶树群落生物量和碳储量动态估算[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2013,39(6):687-694.
- Zhang Min, Chen Yonggen, Yu Cuiping, et al. Dynamic assessments of plant biomass and carbon storage during the production cycle of tea gardens [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2013,39(6):687-694.
- [19] 段晓男,王效科,逯非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):463-469.
- Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Lu Fei, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(2):463-469.
- [20] 刘子刚.湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究[J].地理科学,2004,24(5):634-639.
- Liu Zigang. Carbon stock and GHG emission of wetland ecosystem [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004,24(5):634-639.
- [21] Liu Feng, Wu Huayong, Zhao Yuguo, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China [J]. *Science Bulletin*, 2022,67(3):328-340.
- [22] Chen L C, Zhu Yukun, Papandreou G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation [M] // *Computer Vision-ECCV 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [23] Chen Zhanhuo, Huang Min, Zhu Daoye, et al. Integrating remote sensing and a Markov-FLUS model to simulate future land use changes in Hokkaido, Japan [J]. *Remote Sensing*, 2021,13(13):2621.
- [24] 金琳,李玉娥,高清竹,等.中国农田管理土壤碳汇估算[J].中国农业科学,2008,41(3):734-743.
- Jin Lin, Li Yu'e, Gao Qingzhu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008,41(3):734-743.
- [25] 许信旺,潘根兴.中国水稻土碳循环研究进展[J].生态环境,2005,14(6):961-966.
- Xu Xinwang, Pan Genxing. The Progress in the carbon cycle researches in paddy soil in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005,14(6):961-966.
- [26] 邱乐丰,虞舟鲁.1979—2020年杭州市富阳区土地利用对耕层土壤有机碳储量变化的影响[J].浙江农业学报,2019,31(2):291-296.
- Qiu Lefeng, Yu Zhoulu. Land use changes induced soil organic carbon stock variations in cropland soils in Fuyang District, Hangzhou City in 1979—2020 [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019,31(2):291-296.
- [27] 朱良骏.碳中和视角下城市行道树碳汇能力研究:以海口市为例[D].海南 海口:海南大学,2023.
- Zhu Liangjun. Research on the carbon sink capacity of urban street trees based on the perspective of carbon neutrality: taking Haikou as an example [D]. Haikou, Hainan: Hainan University, 2023.
- [28] Zhang Xiaoxin, Brandt M, Tong Xiaoye, et al. Urban core greening balances browning in urban expansion areas in China during recent decades [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2024,4:112.
- [29] Wang Mei, Chen Huai, Yu Zicheng, et al. Carbon accumulation and sequestration of lakes in China during the Holocene [J]. *Global Change Biology*, 2015,21(12):4436-4448.
- [30] 何苏南,王凯,郁凯,等.2001—2021年中国湿地碳汇研究进展与热点趋势分析[J].湿地科学与管理,2024,20(1):70-75.
- He Sunan, Wang Kai, Yu Kai, et al. Research progress and hot spot trends in wetland carbon sink in China during 2001 to 2021 [J]. *Wetland Science & Management*, 2024,20(1):70-75.