

基于土地利用变化的洞庭湖地区碳储量 时空演变及情景模拟

申海建^{1,2}, 郭荣中^{3,4}, 张阔³, 刘华平⁵

(1. 湖南省测绘科技研究所, 长沙 410007; 2. 湖南省自然资源调查与监测工程技术研究中心, 长沙 410007; 3. 长沙环境保护职业技术学院, 长沙 410004; 4. 自然资源部南方丘陵区自然资源监测监管重点实验室, 长沙 410118; 5. 湖南省国土资源规划院, 长沙 410118)

摘要: [目的] 探讨区域土地利用变化与生态系统碳储量的关系, 预测不同情景下未来碳储量时空分布, 为优化土地利用格局, 提高区域碳储量和“双碳”战略目标的实现提供科学支撑。[方法] 利用PLUS-InVEST模型分析洞庭湖地区2000—2020年碳储量的时空演变特征, 并结合16个驱动因子, 预测研究区域在不同情景下, 2040年土地利用和碳储量变化趋势。[结果] (1) 2000—2020年洞庭湖地区土地利用类型以耕地和林地为主, 二者占总面积接近80%。耕地、林地、草地、水体呈现减少趋势, 建设用地和未利用地呈增长趋势。(2) 2000—2020年洞庭湖地区总碳储量呈减少趋势, 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年总碳储量分别为 7.455×10^8 t, 7.436×10^8 t, 7.414×10^8 t, 7.402×10^8 t和 7.389×10^8 t, 其中林地为主要碳源。(3) 土地利用类型转化直接影响碳储量, 2000—2020年耕地转出、林地转出分别引起碳储量减少了 6.3×10^5 t, 1.56×10^7 t, 草地转出、水体转出分别引起碳储量增加了 5.8×10^5 t, 5.8×10^6 t, 建设用地转出、未利用地转出引起碳储量增加了 2.7×10^5 t, 8.5×10^5 t。(4) 预测2040年, 自然发展、耕地保护、经济发展、生态保护4种情景下的碳储量分别为 7.352×10^8 t, 7.363×10^8 t, 7.347×10^8 t, 7.398×10^8 t, 其中生态保护情景总碳储量相比2020年有所增加, 其他3种情景均为减少趋势。[结论] 洞庭湖地区碳储量减少的主要原因是林地、耕地等高碳储地类向建设用地等低碳储地类转变, 未来需优化国土空间规划布局, 提高区域碳储量。

关键词: 土地利用变化; 洞庭湖地区; 碳储量; 情景模拟

中图分类号: X22; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0266-11

Spatiotemporal evolution and scenario simulation of carbon storage in Dongting Lake area based on land use change

Shen Haijian^{1,2}, Guo Rongzhong^{3,4}, Zhang Kuo³, Liu Huaping⁵

(1. Hunan Institute of Geomatics Sciences and Technology, Changsha 410007, China; 2. Hunan Engineering Technology Research Center of Natural Resources Survey and Monitoring, Changsha 410007, China; 3. Changsha Environmental Protection Vocational College, Changsha 410004, China; 4. Key Laboratory of Natural Resources Monitoring and Supervision in Southern Hilly Region, Ministry of Natural Resources, Changsha 410118, China; 5. Hunan Provincial Institute of Land and Resources Planning, Changsha 410118, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the relationship between regional land use changes and ecosystem carbon storage, and to predict the spatiotemporal distribution of future carbon storage under different scenarios, thereby providing scientific support for optimizing land use patterns, enhancing regional carbon storage, and achieving the “dual carbon” strategic goals. [Methods] The PLUS-InVEST model was used to analyze the

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-08-12

接受日期: 2025-08-14

资助项目: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ8363, 2023JJ60253); 自然资源部南方丘陵区自然资源监测监管重点实验室开放基金课题(NRMSSHR2022Y11); 湖南省教育厅科研项目(23C1058)

第一作者: 申海建(1978—), 男, 湖南石门人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事土地信息与土地生态研究。E-mail: 78482490@qq.com

通信作者: 郭荣中(1979—), 女, 湖南桂东人, 博士, 教授, 研究员, 主要研究方向: 土地信息与土地生态研究。E-mail: 865495696@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

spatiotemporal evolution characteristics of carbon storage in the Dongting Lake area from 2000 to 2020. Combined with 16 driving factors, this study predicted land use and carbon storage change trends in the study area under different scenarios for 2040. [Results] (1) From 2000 to 2020, the main land use types in the Dongting Lake area were cultivated land and forest land, together accounting for nearly 80% of the total area. Cultivated land, forest land, grassland, and water bodies showed a decreasing trend, while construction land and unused land exhibited an increasing trend. (2) From 2000 to 2020, the total carbon storage in the Dongting Lake area showed a decreasing trend. The total carbon storage in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 were 7.455×10^8 t, 7.436×10^8 t, 7.414×10^8 t, 7.402×10^8 t, and 7.389×10^8 t, respectively, with forest land being the primary carbon source. (3) The conversion of land use types directly affected carbon storage. From 2000 to 2020, the transfer of cultivated land and forest land resulted in decreases in carbon storage of 6.3×10^5 t and 1.56×10^7 t, respectively. The transfer of grassland and water bodies caused carbon storage to increase by 5.8×10^5 t and 5.8×10^6 t, respectively. The transfer of construction land and unused land caused carbon storage to increase by 2.7×10^5 t and 8.5×10^5 t, respectively. (4) It was predicted that by 2040, the carbon storage under the four scenarios of natural development, cultivated land protection, economic development, and ecological protection would be 7.352×10^8 t, 7.363×10^8 t, 7.347×10^8 t, and 7.398×10^8 t, respectively. Among these, the total carbon storage under the ecological protection scenario was predicted to increase compared to 2020, while the other three scenarios showed a decreasing trend. [Conclusion] The main reason for the decrease in carbon storage in the Dongting Lake area is the conversion of high carbon storage land types such as forest land and cultivated land to low carbon storage land types such as construction land. In the future, it is necessary to optimize territorial spatial planning to increase regional carbon storage.

Keywords: land use change; Dongting Lake area; carbon storage; scenario simulation

当前,全球变暖已成为人类生存面临的最大挑战,“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”是中国应对全球气候变化作出的郑重承诺。中国自1970年以来,年度碳排放量占全球比重持续升高,目前已成为全球碳排放量最大的国家,如何实现以减排增汇为核心的经济社会绿色发展转型,统筹推进低碳可持续的高质量发展进程,对中国已是严峻挑战。陆地生态系统是全球碳循环的重要部分,可以吸收大气中的二氧化碳,将其转换为有机碳,存储在植被、土壤和地下,对维持大气中的二氧化碳水平、调节气候和维持生物多样性至关重要^[1-2]。土地作为碳排放和生态系统碳汇的主要空间载体,承载了作为碳汇实体的各类自然资源,也承载了作为碳源的相关社会经济活动,土地利用变化直接或间接地改变生态系统的组成、过程及分布格局,进而影响到生态系统碳储量的变化^[3]。定量评估和预测土地利用变化和生态系统碳储量的时空演变,对提高国土空间固碳能力,增强区域碳储量、落实“双碳”目标具有重要的意义^[4]。

目前,国内外学者对碳储量的相关研究越来越深入,在研究区域上,王明明^[5]从全球角度对土壤有机氮进行研究;王少剑等^[6]从全国角度,对中国陆地生态系统1980—2020年期间碳储量在时空上的分布格局与演进规律进行研究;王双等^[7]从省域角度,基于土地覆

被数据,分析了河南省2005—2020年LUCC的时空演变,以及未来2035年不同情景下的碳储量情况;石晶等^[8]从市域角度,基于PLUS-InVEST模型,分析了酒泉市生态系统碳储量的时空演变,并对未来情况进行预测。在研究方法上,碳储量的估算最早使用的方法为实地调查法^[9]、生物量模型法^[10]、模型模拟等^[11],但实地调查法虽然简单而且精度较高,但具有一定滞后性,只适合于小区域;生物量模型则主要针对特定植被类型,具有一定局限性。随着3S技术的发展,国内外学者对碳储量的估算逐渐向遥感与模型相结合的方向发展,越来越多的土地利用变化模型和生态系统过程预测模型得到广泛应用。在土地利用变化模型上,元胞自动机(Cellular Automata, CA)及其优化模型得到推广,Markov, ANN, SLEUTH, CLUE-S, FLUS, GEOMOD, CGE等模型,在土地利用模拟与预测中也已日益普及^[12];生态系统过程预测模型则主要有FORCCHN, HASM, InVEST等^[13]。其中,结合土地利用变化与InVEST模型探讨土地利用变化对碳储量的影响,因其数据获取简便、运算速度快、结果可靠,并且能够在不同尺度上模拟、预测和评估碳储量,因而备受关注。如杨洁等^[14]以黄河流域为研究对象,耦合InVEST和CA-Markov模型,对其碳储存的时空变化情况进行了分析;傅楷翔

等^[15]利用 PLUS-InVEST-Geodector 模型,以新疆地区为研究对象,探究碳储量的时空变化情况,并深入分析其影响因素和驱动机制;李井浩等^[16]利用 InVEST 和 FLUS 模型,模拟未来不同情景下的土地利用及碳储量、产水量和土壤保持量 3 项生态系统服务功能的时空分布格局;张爽等^[17]以纳帕海流域为研究区域,分析其碳储量的时空变化情况,并对其驱动因素开展研究。研究表明,多种模型相结合能够有效模拟城市发展复杂情形下的土地利用变化,从而对碳储量的估算与分布结果具有较高的真实性和可信度^[18]。

洞庭湖是湖南湘资沅澧四水的汇聚之地,洞庭湖具有独特的水文气候条件和地理位置,是长江经济带的重要组成部分,是长江中游洪水重要调蓄场所,是长江中下游重要农业主产区,被誉为“长江之肾”;洞庭湖湿地总面积达 18 780 km²,每年容纳的湖水在 2 776 亿 m³,是中国最大的淡水湿地。作为实施中部地区崛起战略、融入长江经济带的重点区域,洞庭湖地区经济社会得到快速发展,但也对区域碳循环和生态环境产生重要影响^[19]。因此,本文以洞庭湖地区为研究区域,利用 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年五期遥感数据,耦合 PLUS-InVEST 模

型,评估和预测其土地利用变化及其碳储量的时空演变特征,以期为洞庭湖地区固碳能力的提升和“双碳”目标的实现提供支撑,并为区域国土空间规划等提供参考。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

洞庭湖位于湖南省北部,洞庭湖是长江流域重要湖泊,是全国水量最大、水面面积第二的淡水湖泊,面积达 2 579.2 km²,总容积 220 亿 m³,多年平均入湖水量 2 761 亿 m³。本文以环洞庭湖区的常德市、岳阳市、益阳市、长沙市的 23 个县级行政区域为研究区域,地跨东经 110°20′—113°50′、北纬 28°10′—30°10′,位于湖南省北部,总面积约 3.7 万 km²。

1.2 数据来源

本文所使用的具体数据来源主要包括土地利用栅格数据、气候环境数据、社会经济数据,分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地 6 类一级土地类型。本文参考前人研究成果^[7],综合考虑模型的准确性和现实性,并根据数据可获取、可量化和驱动因素的一致性原则,从自然地理、社会经济、可达性 3 个维度,选取 16 项驱动因子,数据来源详见表 1。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

| 数据类型 | 数据名称 | 空间分辨率 | 数据来源 |
|--------|-------------------|-------|---|
| 土地利用数据 | 2000—2020 年土地利用数据 | 30 m | 资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/) |
| | 年平均气温 | 1 km | 国家气象科学数据中心 (http://data.cma.cn/) |
| | 年均降水 | 1 km | |
| 气候环境数据 | DEM 高程 | 30 m | 资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/) |
| | NDVI | 1 km | |
| | 土壤类型 | 1 km | |
| | 人口密度 | 1 km | |
| | GDP | 1 km | |
| | 夜间灯光 | 1 km | |
| | 社会经济数据 | 距铁路距离 | |
| 距公路距离 | | 1 km | |
| 距水系距离 | | 1 km | |
| 距道路距离 | | 1 km | |

2 研究方法

2.1 InVEST 模型

InVEST 模型包含生物多样性、水质净化、碳储存、授粉、水电和木材产量等多个模块内容。本研究选用 InVEST 模型的碳储模块进行评估,碳总量 (C_{total}) (t/km²) 的计算公式如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

式中: C_{above} 、 C_{below} 分别为地上、地下碳库量; C_{soil} 、 C_{dead} 分别为土壤有机质、死亡有机质碳库量。

在 InVEST 模型中,各个碳库的碳储量是由不同土地利用类型的面积乘以相应的碳密度进行测算^[20],由于地处同一气候带的区域碳密度较为接近,本研究参考已发表的湖南省碳密度数据及 Alam 等

学者的研究成果^[21-23],结合洞庭湖区域的年平均气温和降水因子,进行研究区碳密度的修正,由于考虑了年均气温和降水的影响,该公式具有较高的普适性,并已在相关研究^[24-26]中得到广泛应用。

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054MAP} \quad (2)$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \quad (3)$$

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \quad (4)$$

式中: C_{BP} 和 C_{BT} 分别为基于年均降水量和年均温计算的生物量碳密度(t/hm^2); C_{SP} 为基于年均降水量计算的土壤碳密度(t/hm^2);MAP和MAT分别为年均降水量(mm)和年均气温($^{\circ}C$)。湖南区域的年降均水量 1 409 mm,年均气温为 17.075 $^{\circ}C$ 。洞庭湖地区的年均降水 1 283 mm,年均气温 17.209 $^{\circ}C$,代入公式得到修正系数,公式为:

$$K_{BP} = \frac{C_{BP}^1}{C_{BP}^2} \quad (5)$$

$$K_{BT} = \frac{C_{BT}^1}{C_{BT}^2} \quad (6)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} = \frac{C_{BP}^1}{C_{BP}^2} \times \frac{C_{BT}^1}{C_{BT}^2} \quad (7)$$

$$K_S = \frac{C_{SP}^1}{C_{SP}^2} \quad (8)$$

式中: K_{BP} 为降水因子修正系数; K_{BT} 为气候因子修正系数; C_{BP} 和 C_{BP} 分别为洞庭湖地区和湖南区域依据年均降水量计算出的生物量碳密度; C_{BT}^1 , C_{SP}^1 和 C_{BT}^2 , C_{SP}^2 分别为洞庭湖区和湖南区域依据年均气温计算出的生物量碳密度和土壤碳密度; K_B 为生物量碳密度修正系数; K_S 为土壤碳密度修正系数。

通过以上方法建立洞庭湖地区各土地利用类型的碳密度数据库,见表 2。

2.2 PLUS 模型

(1) 邻域权重的设置。在 PLUS 模型中,由于土地利用变化的复杂性,使得各用地类型的扩张强度

较难直接计算,但各用地类型历史过程中的扩张规律,则是对各自扩张能力的最好体现^[27],因此本文用离差标准化值(X^*)来表示邻域权重, X^* 在 0~1 之间,计算方法如下:

$$X^* = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (9)$$

式中: X 为各地类的变化面积; X_{max} 和 X_{min} 分别表示其最大值和最小值,邻域权重越大,表明该地类的扩张能力越强,值越小,则越弱。通过计算可以得出耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地的邻域权重分别为 1,0.802 314,0.875 968,0.181 785,0.489 273,0。

表 2 洞庭湖地区土地利用类型碳密度
Table 2 Carbon density of land use types in Dongting Lake area

| 土地类型 | 地上生物量碳密度 | 地下生物量碳密度 | 土壤碳密度 | 死亡有机物碳密度 |
|------|----------|----------|--------|----------|
| 耕地 | 14.19 | 48.11 | 103.12 | 0.00 |
| 林地 | 25.68 | 77.20 | 202.81 | 1.16 |
| 草地 | 11.60 | 43.99 | 95.03 | 0.06 |
| 水体 | 11.39 | 40.18 | 0.00 | 0.95 |
| 建设用地 | 6.36 | 28.84 | 105.40 | 0.00 |
| 未利用地 | 2.59 | 12.36 | 0.00 | 0.00 |

(2) PLUS 模型精度验证。采用 Kappa 系数来检验 PLUS 模型的模拟精度,一般 Kappa 系数 ≥ 0.8 时,表明模型构建良好^[28]。Kappa 系数 K 的计算式为:

$$K = \frac{K_a - K_b}{1 - K_b} \quad (10)$$

式中: K_a 为模拟正确的栅格比例; K_b 为期望模拟正确的栅格比例。

模拟结果如图 1 所示,2020 年洞庭湖地区土地利用栅格总数为 41 378 127 个,模拟正确的栅格总数为 36 643 213 个,正确率为 88.6%,模型的 Kappa 系数为 0.875,验证了该模型在预测研究区未来土地利用变化方面的可行性。

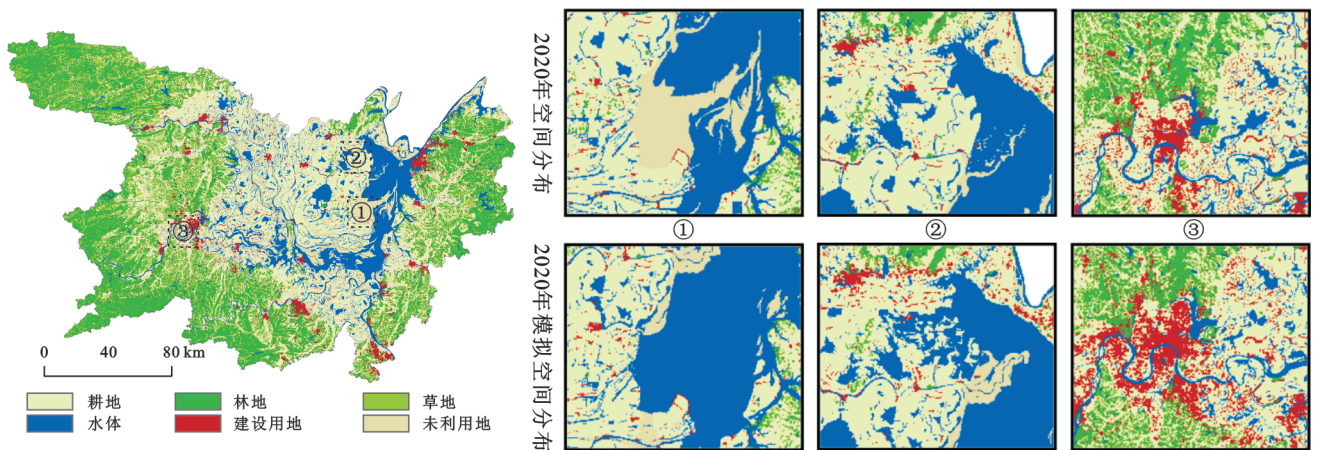


图 1 2020 模拟情景和实际情景的空间分布变化

Fig. 1 Spatial distribution changes of simulated and actual scenarios in 2020

(3) 多情景模拟设置。本研究主要结合《新时代洞庭湖生态经济区规划》中的发展目标以及前人研究成果,设定自然发展情景、耕地保护情景、经济发展情景、生态保护情景 4 种情景进行预测,详见表 3。4 种发展情景下的地类转换成本矩阵情况详见表 4。

表 3 土地利用模拟情景设置
Table 3 Land use simulated scenario settings

| 情景类型 | 情景描述 |
|--------|---|
| 自然发展情景 | 不考虑任何政策的约束性影响,保持 2000—2020 年的变化速率进行预测 |
| 耕地保护情景 | 通过叠加分析 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 个年度的耕地数据,确定了洞庭湖地区长期稳定的耕地范围,划定为限制转换区。控制耕地向林地、草地转移的概率分别减少 20%,20%;未利用地向耕地转移的概率提高 50%,同时,保持水域红线 |
| 经济发展情景 | 耕地、林地、草地向建设用地的转移概率提升 20%,建设用地向其他土地类型转移的概率则降低 20%,同时保持水域红线 |
| 生态保护情景 | 耕地、林地、草地向建设用地转化的概率分别减少 30%,30%,20%,未利用地向建设用地转移概率增加 40%。坚守生态红线,保持水域红线,积极有序地推进退耕还湖的力度 |

表 4 不同情景地类转换成本矩阵
Table 4 Land use transfer matrix under different scenarios

| 土地利用类型 | 情景 | 自然发展情景 | | | | | | 情景 | 耕地保护情景 | | | | | |
|--------|--------|--------|----|----|----|------|------|--------|--------|----|----|----|------|------|
| | | 耕地 | 林地 | 草地 | 水体 | 建设用地 | 未利用地 | | 耕地 | 林地 | 草地 | 水体 | 建设用地 | 未利用地 |
| 耕地 | 自然发展情景 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 耕地保护情景 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 林地 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 草地 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 水体 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 建设用地 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 未利用地 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 耕地 | 经济发展情景 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 生态保护情景 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 林地 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 草地 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 水体 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 建设用地 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 未利用地 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |

3 结果与分析

3.1 洞庭湖地区土地利用变化分析

3.1.1 土地利用时间变化 由图 2 可以看出,2000—2020 年洞庭湖地区的耕地减少 54 278 hm²,减少了 3.34%;林地减少 16 445 hm²,减少了 1.17%;草地减少 6 928 hm²,减少了 11.2%;水体减少 7 500 hm²,减少了 1.55%;建设用地增加 60 856 hm²,增加了 73.38%;未利用土地增加 24 295 hm²,增加了 33.7%。

3.1.2 土地利用空间变化 由图 3 可以看出,2000—2020 年洞庭湖地区各类土地在空间分布上呈现空间差异。具体来看,耕地集中分布于湖区周边,沅江市、南县、华容县、汉寿县、澧县、鼎城区、桃源县 7 个县区的耕地面积占研究区域 23 个县区的将近 50%;林地主要分布在洞庭湖区东西两侧,鼎城区、临湘市、岳阳县、桃江县、石门县、桃源县 6 个县区的林地面积占研究区域 23 个县区的 70% 以上;草地面积较

小且分布不聚集,呈碎片化分布在其他地类之间,建设用地呈团块状零星分布,水域分布较连贯,主要是洞庭湖及其支流,未利用地主要分布在水体周围,主要是枯水期出露的滩地和裸地。

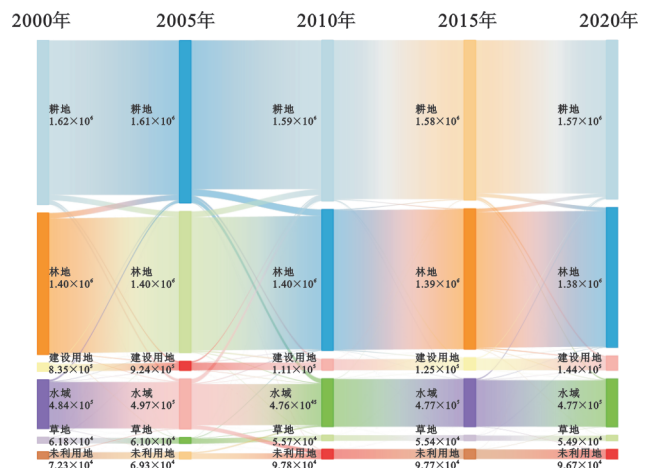


图 2 2000—2020 年土地利用时间变化

Fig. 2 Temporal changes in land use (2000—2020)

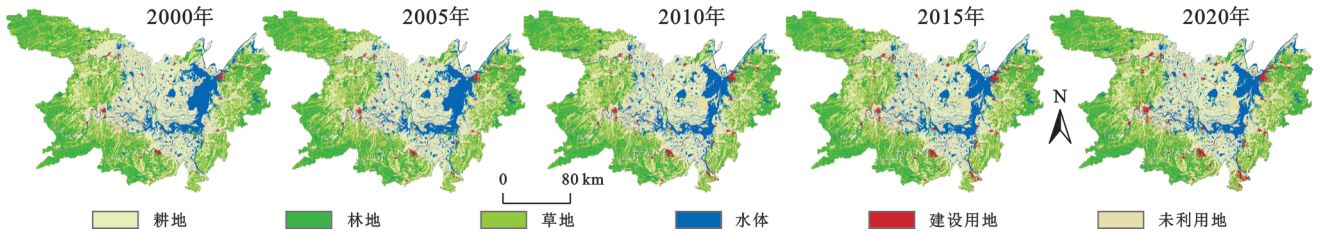


图3 2000—2020年土地利用空间变化

Fig. 3 Spatial distribution changes of land use (2000—2020)

3.2 洞庭湖地区碳储量时空变化

3.2.1 洞庭湖地区碳储量时间变化 通过InVEST模型计算得出洞庭湖地区碳储量和空间分布情况,由表5可以看出,2000—2020年洞庭湖地区的碳储量整体呈下降趋势,总碳储量从 7.455×10^8 t减少至 7.389×10^8 t。耕地、林地、草地的碳储量逐年减少,其中耕地碳储量从 2.684×10^8 t下降至 2.594×10^8 t,

林地碳储量从 4.295×10^8 t减少至 4.244×10^8 t,草地碳储量从 9.32×10^6 t下降至 8.27×10^6 t。建设用地的碳储量大幅增加,从 1.173×10^7 t增至 2.027×10^7 t,未利用地碳储量有所增加,从 1.08×10^6 t增至 1.45×10^6 t。水体碳储量在研究期间小幅波动变化,反映出城市化进程加速,建设用地大幅增加,但是对洞庭湖区域水体保护十分重视,保护较好。

表5 2000—2020年洞庭湖地区碳储量

Table 5 Carbon storage in Dongting Lake area (2000—2020)

| 土地利用类型 | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 耕地 | 268451628.100 | 265863384.500 | 262750543.400 | 261424602.800 | 259444883.900 |
| 林地 | 429467576.900 | 428433609.000 | 428116506.000 | 426353024.500 | 424425771.700 |
| 草地 | 9317057.189 | 9187103.896 | 8383072.135 | 8340332.905 | 8270651.147 |
| 水体 | 25448341.890 | 26130236.460 | 25020270.120 | 25058162.870 | 25050278.800 |
| 建设用地 | 11733282.820 | 12983649.920 | 15643191.830 | 17520121.770 | 20265495.770 |
| 未利用地 | 1084874.850 | 1039738.950 | 1466613.000 | 1465655.850 | 1449463.950 |
| 总计 | 745502761.780 | 743637722.760 | 741380196.500 | 740161900.640 | 738906545.320 |

由图4可以看出,2000—2020年洞庭湖地区所有碳库碳储量均处于减少状态。其中,土壤碳储量减少了 3.21×10^6 t,下降幅度达到0.72%;地上碳储量减少了 9.1×10^5 t,下降了1.28%;地下碳储量减少了 2.44×10^6 t,下降了1.12%;死亡有机物碳储量下降了 2.7×10^4 t,下降了1.15%。20年间死亡有机物碳储量变化趋势变化平稳,地上碳储量、地下碳储量变化趋势一致,基本呈“下降—上升—下降”趋势变化。

现了不同程度的下降,其中碳储量下降最快的是望城区,下降了4.71%,其次是安乡县和岳阳楼区,分别下降4.51%和3.68%,这些区域城市化进程加快,经济活动导致土地被用于工业、城市建设或商业开发,建设用地占用耕地、林地、草地面积较大,导致碳储量下降。

3.2.2 洞庭湖地区碳储量空间变化 由图5可以看出,洞庭湖地区各县区碳储量变化存在明显的空间差异性,2000—2020年碳储量增加的区域有君山区、华容县、南县、资阳区,分别增加9.15%,1.84%,1.64%,0.17%,这些县区在2000—2020年期间耕地、林地、草地等高碳密度土地类型的面积均出现了增长,其中君山区的耕地面积增加17.8%,草地面积也大幅增加,华容县的耕地、林地、草地面积都出现了小幅增长,南县的林地面积出现大幅增加,研究期间国家十分重视洞庭湖区域的生态建设,通过环洞庭湖基本农田建设重大工程项目,一系列土地整治项目等,加强农用地整理、耕地后备资源开发、废弃建设用地复垦,提高粮食产量,提高碳储量。同时,研究区域内其他县区的碳储量都出

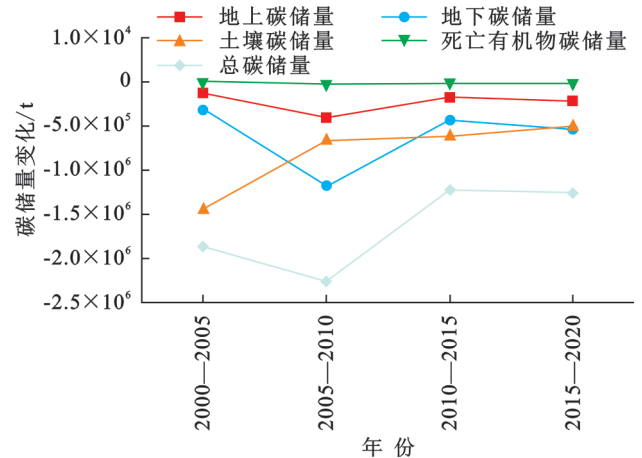


图4 2000—2020年各碳库碳储量变化

Fig. 4 Changes in carbon storage of different carbon pools (2000—2020)

3.2.3 洞庭湖地区土地利用转化碳变化情况 2000—2020年期间洞庭湖地区土地利用变化引起的碳储量

变化见图 6。2000—2020 年期间耕地转出、林地转出分别引起碳储量减少了 6.3×10^5 t, 1.56×10^7 t, 耕地转出碳储量减少主要是由于建设用地占用耕地, 而建设用地碳密度较低, 同时, 耕地转为碳密度高的林地增加了 8.6×10^6 t 碳储量。林地转出碳储量减少主要是由于林地转变为耕地和建设用地, 林地的碳密度是最高的。草地转出、水体转出分别引起碳储量增加了 5.8×10^5 t, 5.8×10^6 t, 主要原因是草地转

变为林地、耕地, 水体转变为耕地、林地、草地, 其中水体转变为耕地的面积最大。建设用地碳储量增加了 2.7×10^5 t, 主要是废弃建设用地复垦后转换为碳密度大的土地利用类型。未利用地主要转化为碳密度较大且变化面积较大的耕地、林地、草地、水体和建设用地, 有助于碳储量的积累, 总计增加了 8.5×10^5 t。可见, 高碳密度土地类型转变为低碳密度土地类型是碳储量减少的主要原因。

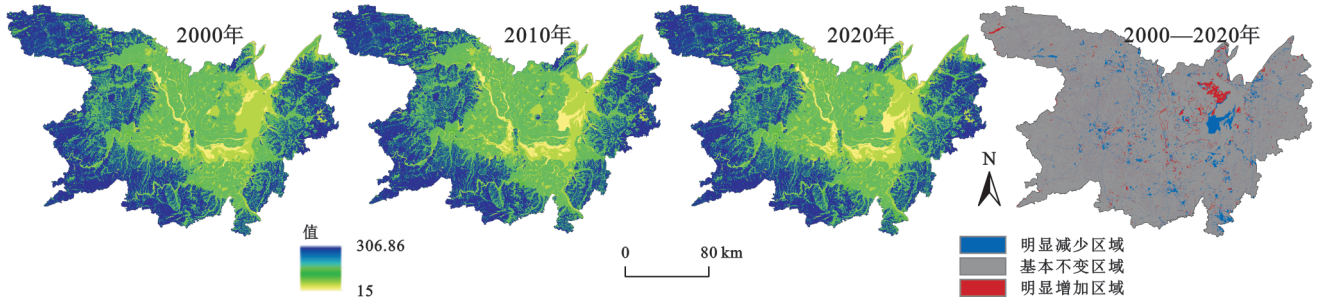
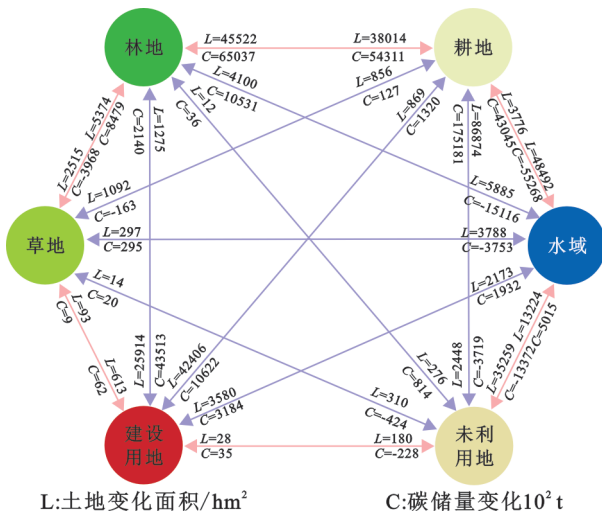


图 5 2000—2020 年洞庭湖地区碳储量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon storage in Dongting Lake area (2000—2020)



L: 土地变化面积/hm² C: 碳储量变化10² t
图 6 2000—2020 年土地利用类型变化及其引起的碳储量变动情况

Fig. 6 Land use type changes and resulting carbon storage variations (2000—2020)

3.3 土地利用多情景模拟分析

3.3.1 土地利用变化驱动力分析 本文利用 PLUS 模型将选取的 16 个驱动因子与土地利用扩张区域进行叠加, 得出的驱动因子对各土地利用类型的贡献度见图 7。可以看出, 耕地中夜间灯光的贡献度最高, 达 0.149 6, 表明其空间分布受人类活动影响显著, 同时夜间灯光对农作物生长等产生影响。林地则主要受 DEM 影响, 贡献度高达 0.149 7, 说明其格局深受地形条件约束。草地最主要的驱动因子是坡度, 贡献度为 0.152 7, 未利用地则以到二级道路距离为主导, 贡献度达 0.144 9, 这反映出这两类用地主要分布在地势崎岖、交通不便的区域, 不适宜开发。水体的变化以

DEM 为主导, 贡献度为 0.168 6, 说明其形成和分布受地势和水文条件严格限制。相比之下, 建设用地受夜间灯光影响最大, 贡献度高达 0.256 3, 体现出城市扩张与人类活动强度之间的高度耦合关系。可见, 自然因子主导了生态用地的空间格局, 而社会经济因子则是耕地与建设用地演变的核心驱动力。

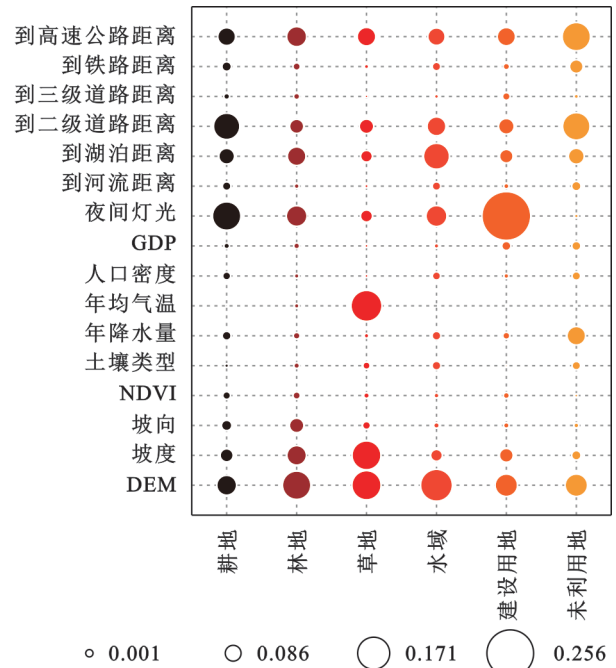


图 7 2000—2020 年土地利用扩张驱动因贡献度
Fig. 7 Contribution rate of driving factors of land use expansion (2000—2020)

3.3.2 多情景土地利用变化 运用 PLUS 模型对 2040 年洞庭湖地区土地利用变化进行模拟, 见图 8。相对于 2020 年, 自然发展情景下, 耕地、林地、草地面

积减少,减少量分别为32 095.36 hm²,16 857.37 hm²,3 266.51 hm²,减少幅度分别为2.05%,1.22%,5.95%;水体、建设用地、未利用地面积增加,增加幅度分别为0.02%,35.22%,1.53%。在耕地保护情景下,耕地、水体、建设用地面积增加,耕地面积的增加量最多,增加量为9 212.1 hm²,增加幅度为0.59%;其次为建设用地,增加量为12 730.37 hm²,增加幅度为8.85%;林地、草地、未利用地面积减少,减少幅度分别为1.30%,6.02%,0.85%。在经济

发展情景下,耕地、林地、草地面积减少,减少量分别为42 012.90 hm²,18 851.65 hm²,2 459.35 hm²,减少幅度分别为2.68%,1.36%,4.48%;水体、建设用地、未利用地面积增加,增加幅度分别为0.02%,43.58%,0.58%。在生态保护情景下,林地、水体、建设用地面积增加,增加量分别为7 654.88 hm²,113.53 hm²,14 134.06 hm²,增加幅度分别为0.55%,0.02%,9.83%;耕地、草地、未利用地面积减少,减少幅度分别为1.19%,5.76%,0.04%。可见,生态保护情景兼顾了维护区域生态安全以及社会经济发展的需要,能为研究区域国土空间规划提供参考。

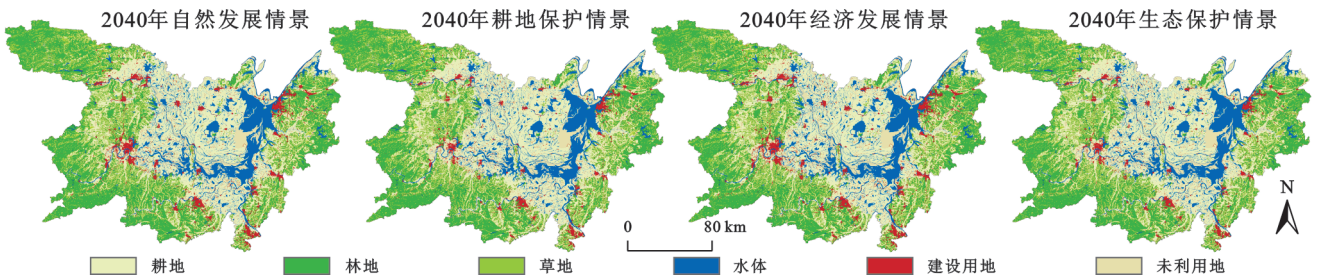


图8 2040年不同情景下土地利用变化模拟

Fig. 8 Simulation of land use changes under different scenarios in 2040

3.4 不同情景模拟下碳储量时空变化

3.4.1 不同情景模拟下碳储量时间变化 通过InVEST模型,计算并统计出洞庭湖地区各土地利用分类下的碳储量,结果见表6,图9。可以看出:自然发展情景下,2040年的碳储量为7.352×10⁸t,比2020年的7.389×10⁸t减少了约3.7×10⁶t;耕地保护情景

下,2040年的碳储量为7.363×10⁸t;经济发展情景下,碳储量为7.347×10⁸t,减少最多;生态保护情景下,研究区域2040年的碳储量为7.398×10⁸t,在4种情景中碳储量最高,而且相比2020年碳储量也是有所增加的,其主要原因是林地碳储量的增加。

表6 4种情景下不同土地利用类型的碳储量对比分析

Table 6 Comparative analysis of carbon storage in different land use types under four scenarios t

| 土地利用类型 | 自然发展 | 耕地保护 | 经济发展 | 生态保护 |
|--------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| 耕地 | 254245025.70 | 261076166.200 | 252604930.900 | 256459794.50 |
| 林地 | 419286421.90 | 418956034.900 | 418674558.300 | 426807026.90 |
| 草地 | 7774485.57 | 7768926.216 | 7896072.713 | 7790322.95 |
| 水体 | 25050278.80 | 25050278.800 | 25050278.800 | 25050278.80 |
| 建设用地 | 27331223.94 | 22002649.620 | 29021039.170 | 22199976.10 |
| 未利用地 | 1467845.55 | 1433520.450 | 1454109.300 | 1445219.55 |
| 总计 | 735155281.40 | 736287576.200 | 734700989.300 | 739752618.80 |

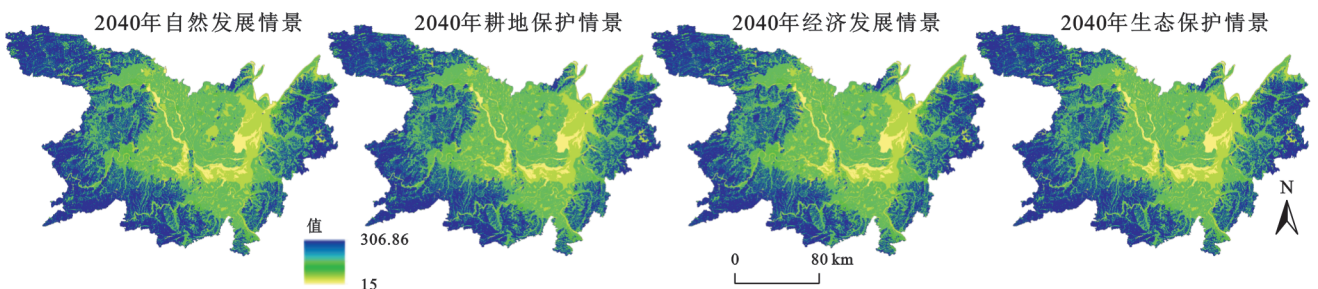


图9 2040年4种情景模拟下的碳储量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of carbon storage under four simulated scenarios in 2040

3.4.2 不同情景模拟下碳储量空间变化 由图10可以看出,不同情景下,洞庭湖地区碳储量变化呈现

空间差异性。自然发展情景下,研究区域内各县区的碳储量都呈现下降趋势,其中减少最多的是赫山

区,达 296 939.67 t,其次为鼎城区、桃源县,分别减少 291 315.08 t 和 273 683.68 t;减少最少的是南县,减少 21 240.91 t,其次为安乡县、君山区,分别减少 33 539.00 t 和 36 253.00 t,碳储量下降较多的区域主要集中在研究区域的东北、东南和西部区域。经济发展情景下,研究区域内各县区的碳储量都呈现下降趋势,其中减少最多的是赫山区,达 343 982.94 t,其次为鼎城区、桃源县,分别减少 338 557.13 t 和 317 399.63 t;减少最少的是安乡县,减少 28 010.77 t,其次为南县、君山区,分别减少 28 078.84 t 和 36 866.88 t,碳储量下降明显的区域集中在研究区域的东南和西部,可见,在自然发展和经济发展情景下,碳储量减少幅度大的地区基本是相同的,相比而言,在经济发展情景下,碳储量减少在数量上还要明显些,这是因为随着经济增长和城市化水平的提高,林地和草地大量转

化为建设用地导致的。

在耕地保护情景下,安乡县、南县、君山区、沅江市 4 个县区的碳储量是增加的,主要分布在研究区域的中部地区,其他县区的碳储量出现减少趋势,其中减少最多的是赫山区,达 295 032.23 t,其次为望城区、鼎城区,分别减少 250 465.72 t 和 213 349.92 t,在耕地保护情景下,2040 年耕地碳储量为 261 076 166.2 t,相对于 2020 年的耕地碳储量略有增加,但是由于碳密度高的林地、草地面积的减少,造成研究区域多数县域总碳储量仍呈现下降趋势。在生态保护情景下,除了武陵区、安乡县、南县 3 个地区的碳储量是减少的,其他县区的碳储量都呈现不同程度的增加,增加最多的是石门县,达 194 302.06 t,其次是澧县和汨罗市,分别增加 99 418.83 t 和 98 496.20 t,表明生态保护在碳储量稳定中能起到重要作用。

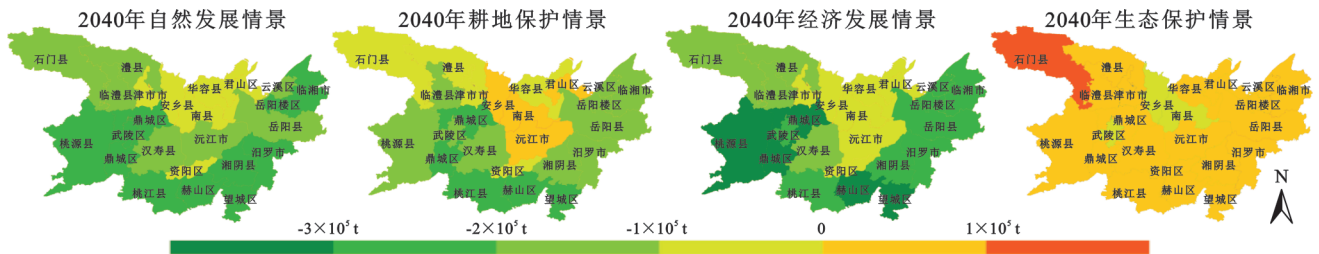


图 10 2020—2040 年 4 种情景下各县区碳储量变化

Fig. 10 Changes in carbon storage across counties and districts under four scenarios (2020—2040)

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文探讨土地利用类型与生态系统碳储量的关系,对区域碳管理和国土空间规划具有重要意义。碳密度取值直接影响着碳储量估算结果的准确性,文章运用 InVEST 模型的碳储存模块对洞庭湖地区的碳储量进行评估,利用年均气温和降水修正各土地利用类型的碳密度值,从而使研究结果更符合实际。在运用 PLUS 模型进行预测时,通过多种驱动因子的引入,提高了模型的精度和准确性。文章采用的 PLUS-InVEST 模型,基于土地利用变化对未来生态系统碳储量进行模拟,能为“双碳”目标向下区域国土空间规划提供科学依据,有助于分区县针对性制定土地利用规划和生态保护对策,如桃源县、石门县、桃江县、岳阳县、临湘市、鼎城区等森林资源丰富的县区,应加强对自然保护区的保护,严守生态红线,以保证洞庭湖地区固碳能力稳定;华容县、汉寿县、澧县等耕地面积较大的县区,则要加强耕地保护,实现耕地减少可控,提高耕地质量。研究结果与环太湖城市群^[29]相比可以看出,洞庭湖区林地是主要的碳源,应特别注重加强森林保护,构建绿色生态

屏障。但是,本文在 InVEST 模型中的碳密度是个常量,实际上碳密度会受气候、土壤、地形等多因素制约,并处于不断变化的状态;在驱动因子的分析上需进一步加强因子之间的交互分析,这些都是今后要重点研究的方向。

4.2 结论

(1) 2000—2020 年洞庭湖地区土地利用类型以耕地和林地为主,二者占总面积接近 80%。耕地、林地、草地、水体呈现减少趋势,建设用地和未利用地呈增长趋势。

(2) 2000—2020 年洞庭湖地区总碳储量呈减少趋势,2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年总碳储量分别为 7.455×10^8 t, 7.436×10^8 t, 7.414×10^8 t, 7.402×10^8 t 和 7.389×10^8 t,其中林地为主要碳源。

(3) 土地利用类型转化直接影响碳储量,2000—2020 年耕地转出、林地转出分别引起碳储量减少了 6.3×10^5 t, 1.56×10^7 t,草地转出、水体转出分别引起碳储量增加了 5.8×10^5 t, 5.8×10^6 t,建设用地转出、未利用地转出碳储量增加了 2.7×10^5 t, 8.5×10^5 t。

(4) 预测 2040 年,自然发展、耕地保护、经济发展、生态保护 4 种情景下的碳储量分别为 7.352×10^8 t, 7.363×10^8 t, 7.347×10^8 t, 7.398×10^8 t,其中生态保

护情景总碳储量相比2020年有所增加,其他3种情景均为减少趋势。同时不同情景下,洞庭湖地区碳储量各区县的碳储量呈现空间差异性,能为区域生态保护和国土空间规划提供参考。

参考文献(References):

- [1] 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. Piao S, He Y, Wang X, Chen F. 2022. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 641-651
- [2] Ito A, Nishina K, Noda H M. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data[J]. *Polar Science*, 2016,10(3):346-355.
- [3] Houghton R A, Nassikas A A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850—2015[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017,31(3):456-472.
- [4] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: an analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(3):534-546.
- [5] 王明明.全球土壤有机碳对气候变化的响应研究[D].杭州:浙江大学,2024.
Wang M M. Response of global soil organic carbon to climate change[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
- [6] 王少剑,周诗洁,方创琳.1980—2020年中国陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律[J].中国科学:地球科学,2024,54(10):3323-3339.
Wang S J, Zhou S J, Fang C L. Spatial-temporal patterns and evolution of carbon storage in China's terrestrial ecosystems from 1980 to 2020[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2024,54(10):3323-3339.
- [7] 王双,赵晓,周生辉.未来多情景土地利用变化对河南省区域碳储量的影响[J].环境科学,2025,46(6):3830-3845.
Wang S, Zhao X, Zhou S H. Exploring the impact of future multi-scenario land use change on Henan Province regional carbon storage [J]. *Environmental Science*, 2025,46(6):3830-3845.
- [8] 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.
- [9] 郭晓敏,揣小伟,张梅,等.扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):269-280.
Guo X M, Chuai X W, Zhang M, et al. Spatio-temporal analysis of land-use change and the impact on terrestrial ecosystems carbon storage in Yangtze River City Group [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019,28(2):269-280.
- [10] 吴恒,胥辉.森林植被碳密度遥感反演和校准研究[J].林业资源管理,2021(6):43-51.
Wu H, Xu H. Remote sensing retrieval and calibration of forest vegetation carbon density based on time-series data [J]. *Forest Resources Management*, 2021(6): 43-51.
- [11] 童荣鑫,梁迅,关庆锋,等.2000—2020年中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算[J].地理学报,2023,78(9):2209-2222.
Tong R X, Liang X, Guan Q F, et al. Estimation of soil carbon storage change from land use and management at a high spatial resolution in China during 2000—2020[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023,78(9):2209-2222.
- [12] An X X, Jin W P, Long X R, et al. Spatial and temporal evolution of carbon stocks in Dongting Lake wetlands based on remote sensing data[J]. *Geocarto International*, 2022,37(27):14983-15009.
- [13] 王春晓,李明倩.基于文献计量的土地利用变化与碳汇评估交叉研究进展[J].生态学报,2024,44(13):5893-5903.
Wang C X, Li M Q. Progress in cross disciplinary research on land use change and carbon sequestration assessment based on bibliometrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(13):5893-5903.
- [14] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021,29(6):1018-1029.
- [15] 傅楷翔,贾国栋,余新晓,等.耦合PLUS-InVEST-Geodector模型的新疆地区碳储量时空变化及驱动机制分析[J].环境科学,2024,45(9):5416-5430.
Fu K X, Jia G D, Yu X X, et al. Analysis of temporal and spatial carbon stock changes and driving mechanism in Xinjiang Region by coupled PLUS-InVEST-geodector model [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5416-5430.
- [16] 李井浩,柳书俊,王志杰.基于FLUS和InVEST模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J].水土保持研究,2024,31(3):287-298.
Li J H, Liu S J, Wang Z J. Multi-scenario simulation of

- spatiotemporal changes of land use pattern and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau based on FLUS and InVEST models[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3):287-298.
- [17] 张爽,高启晨,张戎,等.基于PLUS-InVEST模型碳储量时空演变及驱动因素分析:以纳帕海流域为例[J]. 2024(9):5192-5201.
Zhang S, Gao Q C, Zhang R, et al. Evaluating the changes and driving factors of carbon storage using the PLUS-InVEST model: a case study of Napa Sea Basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(9):5192-5201 [J]. *China Environmental Science*, , 2024(9):5192-5201.
- [18] 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, 85:101569.
- [19] 王惠,王凌霞,李忠武,等.洞庭湖流域碳储量变化对未来气候和政策的响应[J]. *环境科学*, 2024, 45(12):6870-6880.
Wang H, Wang L X, Li Z W, et al. Response of carbon storage evolution to future climate and policy at the basin scale [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(12):6870-6880.
- [20] Rao Y X, Wu C X, He Q S. From expansion to shrinkage: an assessment of the carbon effect from spatial reconfiguration of rural human settlements in the Wuhan metropolitan area [J]. *Land*, 2024, 13(8):1176.
- [21] Zhang J Y, Ding H Q, Xu J K, et al. A simulation-based prediction of land use change impacts on carbon storage from a regional imbalance perspective: a case study of Hunan Province, China [J]. *Land*, 2024, 13(10):1721.
- [22] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89:67-76.
- [23] 糜毅,李涛,吴博,等.基于优化模拟的长株潭3+5城市群碳储量时空演变与预测[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(5):1740-1751.
Mi Y, Li T, Wu B, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Chang-Zhu-Tan 3+5 urban agglomeration based on optimization simulation [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(5):1740-1751.
- [24] 万幸,姬广兴,陈伟强,等.基于PLUS-InVEST模型的长江流域生态系统碳储量时空演变模拟与预测[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(2):518-528.
Wan X, Ji G X, Chen W Q, et al. Simulation and prediction of spatio-temporal evolution of ecosystem carbon storage in the Yangtze River basin based on the PLUS-InVEST model [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(2):518-528.
- [25] 任玺锦,裴婷婷,陈英,等.基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. *生态科学*, 2021, 40(4):66-74.
Ren X J, Pei T T, Chen Y, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4):66-74.
- [26] 韩震,翁暄,周怿,等.崇明岛滨海湿地碳储量时空分布及影响因素[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(6):78-86.
Han Z, Weng X, Zhou Y, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of carbon storage in Chongming coastal wetlands [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(6):78-86.
- [27] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置:以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(12):4284-4298.
Wang B S, Liao J F, Zhu W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: a case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12):4284-4298.
- [28] 陈影,周忠发,孙耀鹏,等.基于建设用地扩张的重点生态功能区碳储量时空变化及模拟预测:以贵州省黄平县为例[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2025, 61(4):791-804.
Chen Y, Zhou Z F, Sun Y P, et al. Spatiotemporal variations in carbon stock of key ecological functional zones under construction land expansion and scenario-based simulation prediction: a case study of Huangping County, Guizhou Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2025, 61(4):791-804.
- [29] 赵晶晶,周松,葛颜祥,等.基于PLUS-InVEST-Geodetector模型的环太湖城市群土地利用多情景模拟与碳储量评估[J/OL]. *环境科学*, 2025:1-19. (2025-04-25). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202412034>.
Zhao J J, Zhou S, Ge Y X, et al. Multi-scenario simulation of land use and carbon storage assessment of urban agglomeration around Taihu Lake based on PLUS-InVEST-Geodetector model [J/OL]. *Environmental Science*, 2025:1-19. (2025-04-25). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202412034>.