

李文婕, 黄草, 夏丹, 等. 2003—2022年洞庭湖区碳储量变化趋势及驱动因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 32-48. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.003

LI Wenjie, HUANG Cao, XIA Dan, et al. Analysis of carbon stock variation trends and driving factors in Dongting Lake area from 2003 to 2022[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 32-48. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.003

2003—2022年洞庭湖区碳储量变化趋势及驱动因素分析

李文婕¹, 黄草^{1,2}, 夏丹¹, 周慧³, 陈玮靖^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与海洋工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 洞庭湖水生态与水环境治理湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 湖南省水文水资源勘测中心, 湖南长沙 410007)

摘要:【目的】作为我国重要的生态屏障,洞庭湖不仅在调节区域气候和维持生物多样性方面发挥着关键作用,也具有显著的固碳能力。旨在分析洞庭湖区的碳储量及其变化趋势,探索不同水文气象要素对碳储量变化的影响,为区域碳管理与生态保护提供科学依据。【方法】基于2003—2022年的遥感数据与修正后的碳密度数据,结合InVEST模型,量化分析洞庭湖区域碳储量的动态变化,探讨碳储量的时空分布特征以及碳储量变化的影响因素。【结果】(1)2003—2022年洞庭湖区碳储量均值为 7.6056×10^8 t, 2007年的碳储量最小,为 7.3684×10^8 t, 2005年的碳储量最大,为 7.9047×10^8 t, 区域碳储量整体呈下降趋势,年均下降0.12%;(2)碳储量受土地利用的影响显著,丘陵区(林地)、平原区(草地和耕地)和水域(水体和滩地)单位面积的碳储量均值分别为 27.05 kg/m^2 、 14.27 kg/m^2 和 1.99 kg/m^2 ;(3)碳储量的变化受到气温、降雨量等水文气象要素影响,年平均温度与碳储量变化呈负相关,冬季(10月至12月)降水量与碳储量呈正相关。【结论】2003—2022年洞庭湖区碳储量总体呈下降趋势,表明区域碳汇功能减弱。碳储量在不同区域间存在显著差异,其中丘陵区因森林覆盖率高对碳汇能力贡献最大,水域最低。土地利用变化、气候波动和水文条件显著影响碳储量,气温升高抑制碳储存,冬季降水则增加促进碳汇。合理应对气候变化以及优化土地利用结构是提升洞庭湖区碳汇功能的重要策略。

关键词: 碳储量; InVEST模型; 洞庭湖; 土地利用变化; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0032-17



与作者互动
听语音 翻译

Analysis of carbon stock variation trends and driving factors in Dongting Lake area from 2003 to 2022

LI Wenjie¹, HUANG Cao^{1,2}, XIA Dan¹, ZHOU Hui³, CHEN Weijing^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114,

收稿日期: 2024-12-31; 修回日期: 2025-02-14; 录用日期: 2025-02-19; 网络出版日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179004), 湖南省水利科技计划项目(XSKJ2022068-04)

作者简介: 李文婕(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源系统分析与管理、气候变化与水资源适应性分析研究。E-mail: 653221742@qq.com

通信作者: 黄草(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水资源系统分析与管理、水库优化调度研究。E-mail: huangcao@outlook.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Hunan, China; 3. Hunan Hydrology and Water Resources Survey Center, Changsha 410007, Hunan, China)

Abstract: [Objective] Dongting Lake, a crucial ecological barrier in China, not only plays a key role in regulating regional climate and maintaining biodiversity, but also has significant carbon sequestration capacity. Carbon stock and its variation trends in Dongting Lake area are analyzed in this study, and the effect of different hydrometeorological factors on the variation of carbon stock is investigated, aiming to provide a scientific basis for regional carbon management and ecological protection. [Methods] Based on the remote sensing data from 2003 to 2022 and the modified carbon density data, combined with the InVEST model, the dynamic variations of carbon stock in Dongting Lake area were quantitatively analyzed, and the spatiotemporal distribution characteristics of carbon stock and the influencing factors of carbon stock variations were discussed. [Results] (1) From 2003 to 2022, the average carbon stock in Dongting Lake was 7.6056×10^8 t, with the lowest value in 2007 at 7.3684×10^8 t and the highest in 2005 at 7.9047×10^8 t. Overall, the regional carbon stock showed a declining trend, with an average annual decrease of 0.12%. (2) Carbon stock was significantly affected by land use. The average values of carbon stock per unit area in hilly regions (forest land), plain regions (grassland and cultivated land), and water areas (water bodies and floodplains) were 27.05 kg/m^2 , 14.27 kg/m^2 , and 1.99 kg/m^2 , respectively. (3) Variations in carbon stock were affected by hydrometeorological factors such as temperature and precipitation. Average annual temperature showed a negative correlation with carbon stock variations, while precipitation in winter (October to December) exhibited a positive correlation with carbon stock. [Conclusion] From 2003 to 2022, carbon stock in Dongting Lake area shows an overall declining trend, indicating a weakening of its carbon sink function. Significant differences are observed in carbon stock across different areas. The hilly regions contribute the most to carbon sink capacity due to their high forest coverage, while the water areas contribute the least. Land use changes, climate fluctuations, and hydrological conditions have significant effects on carbon stock. Rising temperatures inhibit carbon stock, while winter precipitation enhances carbon sequestration. Addressing climate change effectively and optimizing land use structure are key strategies for improving the carbon sink function of Dongting Lake area.

Keywords: carbon stock; InVEST model; Dongting Lake; land use change; influencing factors

0 引言

2020年,为应对《巴黎协定》中关于全球气温控制的倡议,联合国秘书长呼吁主要排放国家于2050年前实现温室气体净零排放。随后,中国政府正式承诺将在2030年前实现“碳达峰”,并努力在2060年前实现“碳中和”^[1-2]。近年来,中国政府高度重视水利高质量发展,明确提出通过生态恢复和土地利用优化来应对气候变化^[3]。已有研究指出,湖泊湿地虽然仅占全球陆地面积的5%~8%,却储存约有525 Gt的碳,占全球陆地碳库的35%。洞庭湖湿地作为世界重要湿地资源之一,不仅是我国极为重要的自然资源库和陆地碳库^[4],还在防灾减灾、减污降碳和生物多样性保护等方面发挥着关键作用,是维持区域生态平衡和实现可持续发展的关键。因此,评估洞庭湖区的碳储量并分析其影响因素,对于科学指导该区域的生态管理以及推动实现“双碳”目标具有重要的现实意义^[5-6]。

目前,研究生态系统碳储量的方法主要包括现场调查^[7]、遥感反演^[8]和模型模拟^[9]。实地调查能够提供精确的数据,但其成本较高、覆盖范围有限,且

可能对环境造成一定破坏^[10-11]。遥感反演方法适合在大尺度甚至全球范围内快速获取数据,因而成为大规模生态系统研究的理想工具。然而,其空间和时间分辨率受传感器性能及卫星重访周期的限制^[12-14]。模型模拟依赖于输入数据和动态框架,能够生成连续的时空碳储存数据。随着生态系统服务与权衡综合评价模型(InVEST)碳储存模块的提出,越来越多的国内外学者开始利用InVEST模型来估算区域碳储量^[15-17]。

与传统碳储量估算方法相比,InVEST模型具有多项优势,包括输入数据易于获取、模型结构简洁、适用范围广泛、计算效率高,以及能够生成连续无缝的时空输出变量。该模型能够准确映射碳储量的空间分布及其动态变化,揭示不同情景下土地利用变化与碳储量之间的关系^[18-19]。PLYATHLLAKE等^[20]通过InVEST模型对2020年斯里兰卡乌瓦省的土地利用碳储量进行了评估,并探讨了各类土地利用对碳储量的影响。朱丽亚等^[21]通过InVEST模型研究了1990至2015年辽宁省沿海地区土地利用和覆盖变化对碳储量的影响,为区域生态管理提供了科学支持。任玺锦等^[22-23]通过降水和气温数据对碳密度数据进行

修正,有效提升了碳储量估算的准确性。这些研究表明,InVEST模型能够有效描述不同生态系统^[24-25]和区域^[26-30]中碳储量变化之间的关系。王志远等^[31]通过InVEST模型对1990—2020年洞庭湖生态经济区土地利用与碳储量的时空变化进行了评估。研究结果显示,洞庭湖生态经济区在1990—2020年间,耕地、林地和草地的面积逐渐减少,而水域、建设用地和未利用地的面积持续扩展。虽然该区域的碳储量整体较高,但土地利用变化导致碳封存能力和潜力下降,其间碳储量减少了 0.433×10^6 t。以往的研究通常以5年为间隔分析土地利用数据,探讨土地利用类型与碳储量变化之间的关系。然而,这种方法忽视了每五年内土地利用和碳储量的年度变化,导致细微的变动和短期波动未能得到充分解释。这可能影响分析结果的准确性和全面性,无法充分揭示土地利用变化对碳储量的即时影响。

因此,本文利用2003—2022年间的遥感影像,解析洞庭湖区土地利用数据,结合InVEST模型计算了碳储量及其空间分布,分析探讨土地利用类型的变化、气候变化、水文条件以及人类活动等因素对洞庭湖区碳储量变化的影响,为科学制定区域的“双碳”实现途径提供一定的技术支持。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

洞庭湖位于湖南省北部,是中国第二大淡水湖,

地理坐标为北纬 28.1° — 30.1° ,东经 110.6° — 113.8° ^[32]。本文选取的研究区域涵盖洞庭湖区的湖南省部分,包括长沙市、常德市、岳阳市和益阳市的23个县级行政区,选取依据为湖南省人民政府网站发布的相关资料,具体位置如图1所示。

该地区的气候为亚热带季风气候,降水丰富,年降水量介于 $1\,148 \sim 1\,837$ mm之间,年均气温在 $16 \sim 18$ °C之间。夏季常有强降雨,冬季则较为干燥,水位呈现显著的季节性波动。基于DEM 30 m分辨率数据,研究区域根据高程分为水域、平原区和丘陵区,其中200 m以上为丘陵区,200 m以下为平原区。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 遥感数据

本研究选取研究区域内无云或低云量覆盖的遥感图像,数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率均为30 m。为确保植被信息的一致性,研究主要使用了10—12月的时间序列图像进行土地覆盖分类,其中冬季数据占数据总数的74%,秋季数据占21%,春季、夏季数据分别占4%和1%。此外,89%的数据的云量低于10%。

本研究使用ENVI软件对原始遥感图像进行波段合成、辐射校正和几何校正处理,然后利用研究区域的向量边界对遥感图像进行剪裁,获得研究区域的有效图像数据。基于卫星遥感图像,通过目视解译方

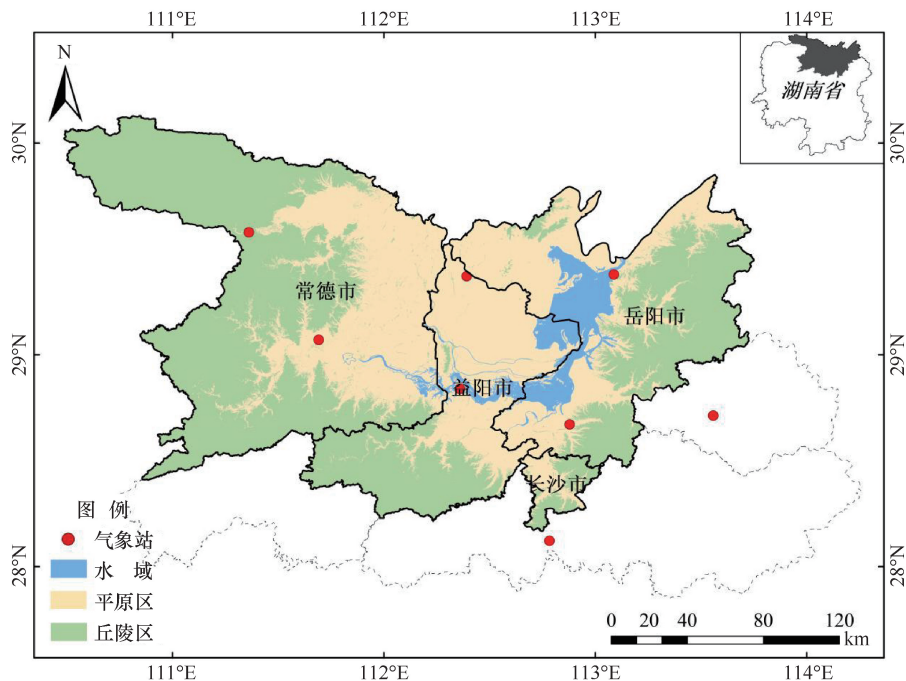


图1 湖南省洞庭湖区区域范围示意

Fig. 1 Schematic diagram of location of Dongting Lake in Hunan Province

法, 将土地利用类型划分为六类: 耕地、林地、水域、草地、建设用地和未利用地。通过分析图像中的颜色、形状、纹理和位置等特征, 识别不同的土地覆盖类型。

1.2.2 碳密度数据

碳密度数据包括地上植被、地下植被、土壤和死亡有机物的碳密度, 在 InVEST 模型中用于评估生态系统的碳储量。基于前人的研究数据^[33-35], 得出不同土地利用类型待修正的碳密度数据, 如表 1 所列。

表 1 不同土地利用类型碳密度数据 t/hm²
Table 1 Carbon density by land use types t/hm²

土地利用类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
草地	6	6	20	0
耕地	5.42	1.96	146.2	1
林地	64.2	118	207.3	3.5
水域	0	0	0	0
建设用地	7.61	1.52	34.33	0
未利用地	1	1	10	0

注: C_{above} 代表地面上的所有生物; C_{below} 代表所有地面下的生物; C_{soil} 代表矿物和有机土壤; C_{dead} 代表所有死亡的有机物。

1.2.3 其他数据

降水数据来源于中国气象数据服务中心下载的中国地表气候数据日数据集 (V3.0); 气温数据来源于国家青藏高原数据中心提供的中国 1 km 月平均温度 (1901—2022 年) 数据集; 人口数据来源于 Landsat 人口数据集, 空间分辨率为 1 km; GDP 数据来源于 2003—2022 年各城市国民经济和社会发展统计公报。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型

本研究采用 InVEST 模型中的碳储量模块, 分析了 2003—2022 年洞庭湖碳储量的变化, 将每种土地利用类型的碳密度划分为 4 个主要碳池: (1) 地上碳储量: 土壤上方的所有活植物物质 (如树皮、树干、树枝、叶); (2) 地下根系碳储量: 地上生物的活根系; (3) 土壤碳储量: 土壤中的有机成分, 它代表了陆地上最大的碳池; (4) 死亡有机物碳储量: 土壤上的死有机物, 包括凋落物以及躺着和站立着的枯木。根据洞庭湖地区土地利用类型的分布情况, 分析了各类土地利用类型的碳密度。随后, 计算了每种土地利用类型的平均碳密度。具体计算公式为

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (1)$$

$$C_i = C_{i, above} + C_{i, below} + C_{i, soil} + C_{i, dead} \quad (2)$$

式中, i 为第 i 种土地利用类型; C_{total} 为陆地生态系统碳总量 (t); S_i 为第 i 种土地利用类型面积 (hm²);

C_i 为第 i 种土地利用类型总碳密度 (t/hm²); $C_{i, above}$ 为第 i 种土地利用类型地面生物量碳密度 (t/hm²); $C_{i, below}$ 为第 i 种土地利用类型地下生物量碳密度 (t/hm²); $C_{i, soil}$ 为第 i 种土地利用类型土壤有机质的碳密度 (t/hm²); $C_{i, dead}$ 为第 i 种土地利用类型死亡有机物的碳密度 (t/hm²)。

InVEST 模型碳储量模块的运行, 基于地理信息系统 (GIS) 栅格数据的网格地图, 每个栅格数据都代表一种土地利用/土地覆被类型。每种土地利用/覆被类型, 模型至少需要上述 4 个碳库中的 1 个碳库的碳储量才能运行, 碳库类型越全、土地利用类型划分越详细, 模型运算的结果就越准确。因此, InVEST 碳储量估算模型的必要输入数据包括: (1) 土地利用/土地覆被栅格数据集; (2) 每种土地利用/土地覆被类型存储在天上、地下根系、土壤和死亡有机物 4 个部分的碳密度数据。

1.3.2 碳密度修正

年降水量与生物量碳密度、土壤碳密度之间的关系, 依据 ALAM 等^[36] 研究中的公式进行计算。年均气温与生物量碳密度的关系则借鉴 GIARDINA 等^[37] 与陈光水等^[38] 研究中的公式。与降水量相比, 气温与土壤碳密度的相关性较低。因此, 本文仅分析降水量对土壤碳密度的影响^[39], 计算公式为

$$C_{SP} = 3.3968 \times P + 3996.1 (R^2 = 0.11) \quad (3)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times P} (R^2 = 0.70) \quad (4)$$

$$C_{BT} = 28 \times T + 398 (R^2 = 0.47, p < 0.01) \quad (5)$$

式中, C_{SP} 为通过年降水量计算得到的土壤碳密度 (kg · m⁻²); C_{BP} 和 C_{BT} 分别为通过年降水量和年均气温计算得到的生物量碳密度 (kg · m⁻²); P 为年均降水量 (mm); T 为年均气温 (°C)。

将洞庭湖区年均气温 17.62 °C, 年均降水量 1360.36 mm; 洞庭湖生态经济区年均气温 16.87 °C, 年均降水量 1421.92 mm 代入上述公式中, 洞庭湖区的碳密度修正系数计算公式为

$$\begin{cases} K_{BP} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}} \\ K_{BT} = \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \\ K_B = K_{BP} \times K_{BT} \end{cases} \quad (6)$$

$$K_S = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}} \quad (7)$$

式中, K_{BP} 和 K_{BT} 分别为生物量碳密度的降水因子和

气温因子的修正系数; C'_{SP} 和 C''_{SP} 分别是洞庭湖区和洞庭湖生态经济区的碳密度数据 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); K_B 和 K_S 分别为生物量碳密度修正系数和土壤碳密度修正系数。洞庭湖区的碳密度数据(见表2)通过将碳密度修正系数与洞庭湖生态经济区碳密度数值(见表1)相乘得到。

表2 洞庭湖区各土地利用类型碳密度数据 t/hm^2

Table 2 Carbon density by land use types in Dongting

土地利用类型	Lake area t/hm^2			
	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
草地	4.38	4.38	19.60	0
耕地	3.96	1.43	143.28	0.73
林地	46.97	86.14	203.15	2.56
水域	0	0	0	0
建设用地	5.56	1.11	34.64	0
未利用地	0.73	0.73	9.80	0

1.3.3 相关性分析

1.3.3.1 空间自相关性

空间自相关分析用于衡量相邻区域中变量属性值之间的相关程度, 主要用于判断空间变量是否存在聚集性, 以及聚集或离散的程度。本研究采用 Moran's I 指数对洞庭湖区的碳储量进行空间自相关分析。其计算公式为

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中, n 是观测数(个); x_i 和 x_j 是位置 i 和 j 处的碳储量(t); \bar{x} 是这些值的平均值(t); w_{ij} 是位置 i 和 j 之间的空间权重(通常根据距离或邻接关系定义)。

通常用标准化 Z 值来检验 Moran's I 的显著性, 当 $|Z| > 1.65$ 时, 表明碳储量具有显著的空间自相关性。Moran's I 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当值大于 0 时, 表示碳储量存在正空间自相关, 且值越大空间集聚程度越强; 当值小于 0 时, 表示碳储量呈负空间自相关, 且值越小空间离散程度越大; $I \approx 0$ 则表示没有空间自相关, 即碳储量呈随机分布。

1.3.3.2 皮尔逊相关分析

皮尔逊相关分析是一种统计方法, 用于测量两个连续变量之间的

线性关系的强度和方向。这种分析有助于确定一个变量的增加或减少是否对应于另一个变量的增加或减少。其计算公式如下

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中, x_i 和 y_i 是单独的样本点; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为样本点 x 和 y 的平均值。

2 碳储量特征及变化趋势分析

2.1 时间变化特征

基于 InVEST 模型估算的 2003—2022 年洞庭湖区碳储量如图 2 所示, 该区域碳储量总体呈下降趋势, 20 年间减少了 $1.82 \times 10^7 \text{ t}$, 年平均碳储量为 $7.6056 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中碳储量最高值出现在 2005 年, 达 $7.9047 \times 10^8 \text{ t}$, 其次为 2015 年的 $7.8062 \times 10^8 \text{ t}$, 最低值则出现在 2007 年, 为 $7.3684 \times 10^8 \text{ t}$ 。这可能是由于 2005—2007 年间耕地面积大幅增加, 侵占了草地和森林等碳汇区域, 同时, 随着经济活动的增加, 城市化进程和基础设施建设也加剧了土地利用变化, 进一步导致了碳损失。

区域内碳储量的波动可分为三个阶段: 2003—2007 年、2007—2012 年和 2012—2022 年。在这三个阶段中, 碳储量呈现“先增后降”的变化模式。具体而言, 2003—2007 年期间碳储量波动较大, 2005 年达到峰值后开始下降, 年均下降率为 3.43%。2007—2012 年期间, 碳储量经历两次波动, 整体上自 2009 年峰值后下降, 年均下降率为 1.59%。进入

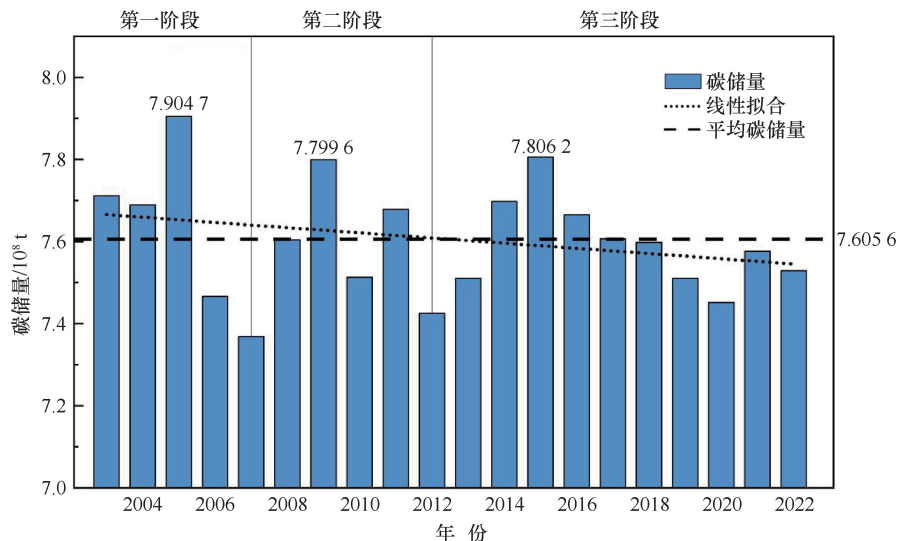


图2 2003—2022年洞庭湖区碳储量变化

Fig. 2 Temporal variations in carbon stock in Dongting Lake area from 2003 to 2022

2012—2022年后, 碳储量波动幅度减小, 先以年均增长率1.68%上升, 至2015年峰值后, 开始以年均下降率0.51%逐年减少。

2.2 空间变化特征

2003—2022年洞庭湖区的碳储量空间分布如图3所示, 碳储量呈现显著的空间异质性, 整体格局表现为“四周高中间低”。高碳储量区域主要集中在西北部、西南部和东北部的山区, 这些区域通常为森林等植被覆盖丰富的地区, 具有较强的固碳能力; 低碳储量区则位于中部, 主要为水体和高度开发的土地, 因植被覆盖较低且人类活动较强, 导致其碳储存能力较弱。2003—2022年, 洞庭湖区西北部及其他地区的林地被转为耕地, 导致整体碳储量下降, 然而, 2004年10月《国务院关于深化改革严格土地管理的决定》文件印发以来, 各地科学落实“耕地占补平衡”政策, 有效弥补了非农建设用地扩张占用耕地带来的碳损失。尽管因耕地征用和补偿, 碳储量有所波动, 但整体变化趋势依然较为平缓, 仅呈轻微下降。

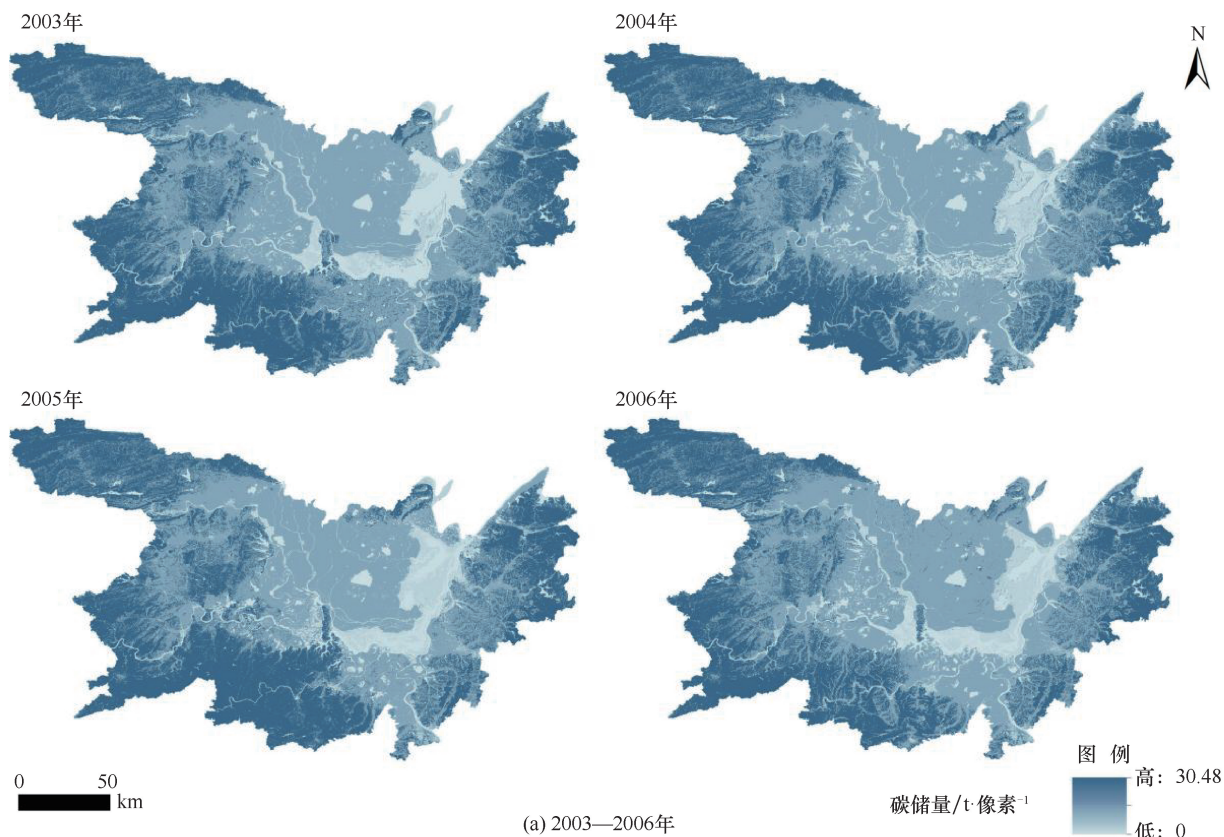
为更详细分析碳储量变化, 本研究根据高程数据将研究区域划分为三个区域: 丘陵区、平原区和水域(见表3和图4)。

洞庭湖区丘陵区的碳储量最高, 年平均值为

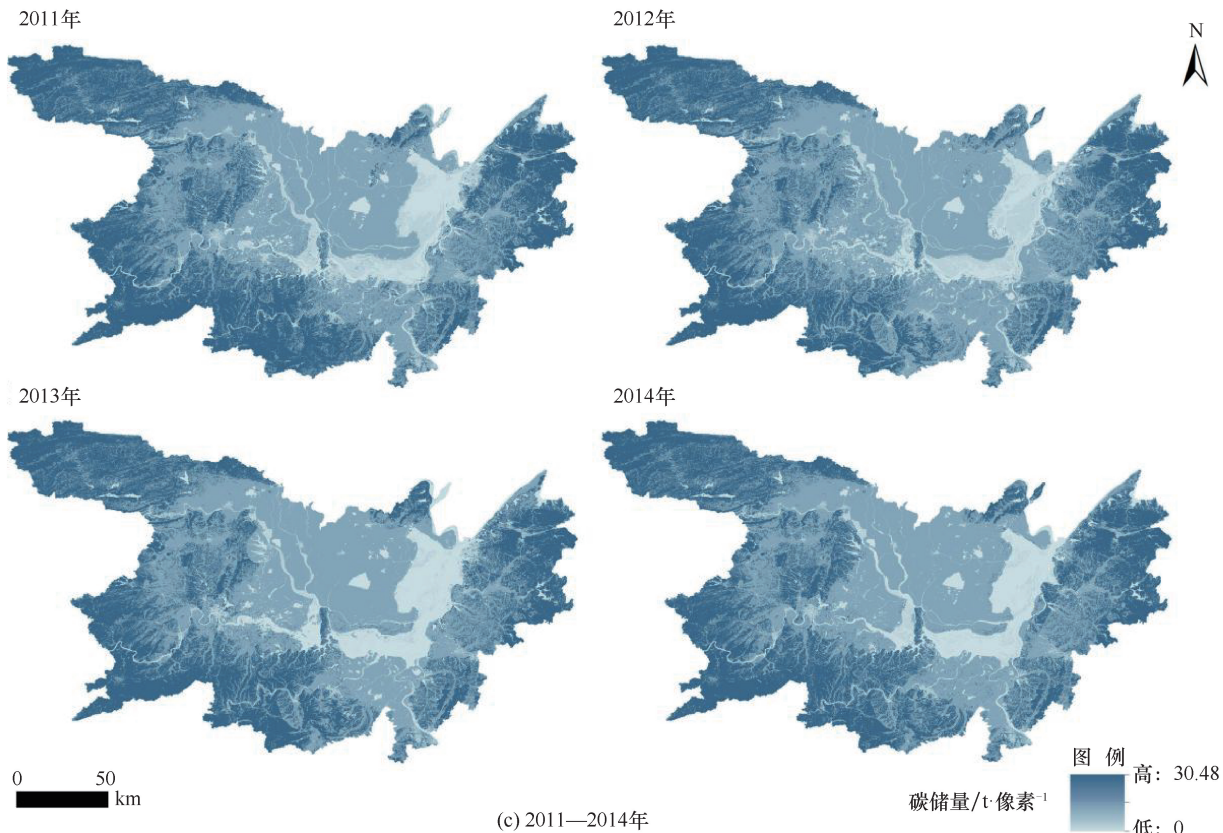
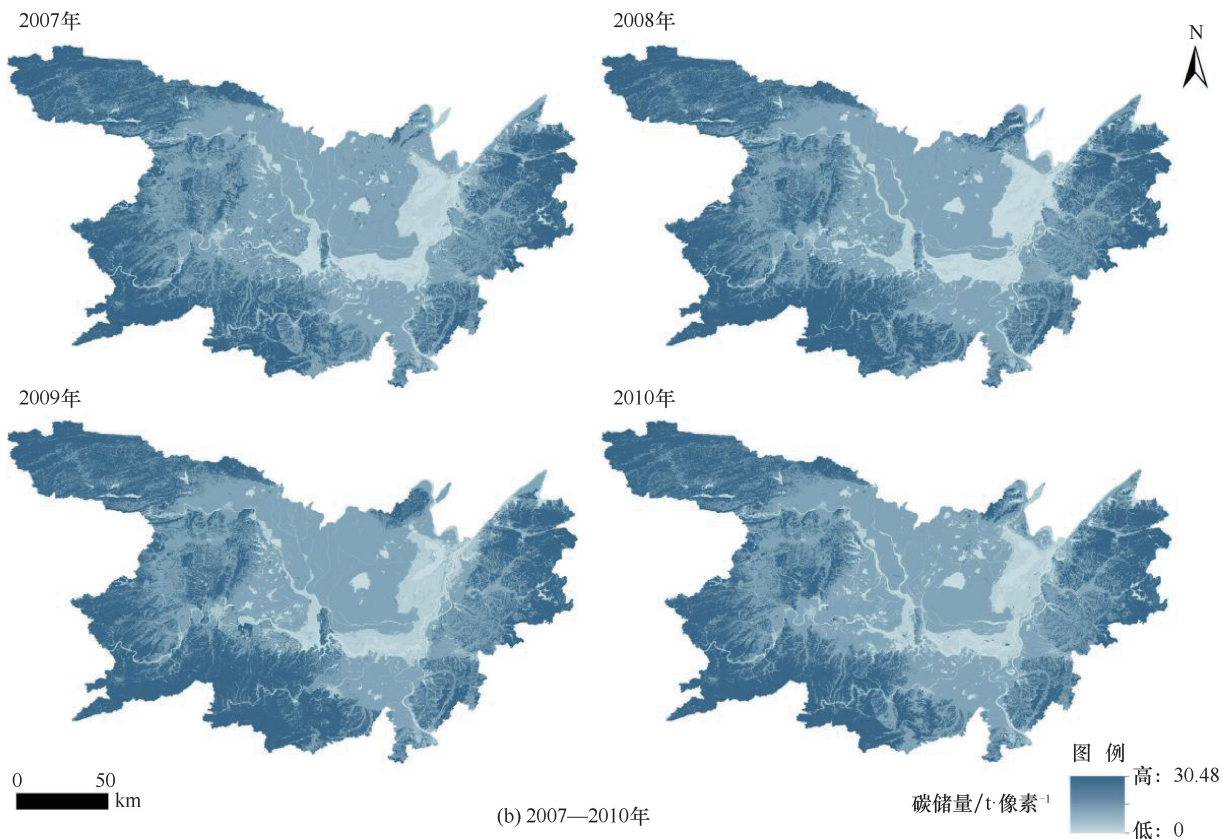
5.4005×10^8 t, 占总碳储量的71%。其碳储量的最大值为 5.5735×10^8 t(2005年), 最小值为 5.2414×10^8 t(2012年)。丘陵区碳储量的变化趋势与区域整体碳储量一致, 呈下降趋势, 但波动幅度相对较小, 相对标准差为1.53%。平原区年平均碳储量为 2.1652×10^8 t, 占总碳储量的28.5%, 且变化幅度较大, 相对标准差为2.86%。水域碳储量最低, 年平均值为 3.99×10^6 t, 仅占总碳储量的0.5%。由于丘陵区的土地利用类型主要是林地(面积占比约为60.66%), 平原区主要为耕地和草地(面积占比约为72.79%), 水域主要为水面和滩地(面积占比约为84.70%), 因此不同区域单位面积下的碳储量存在明显差异, 丘陵区、平原区和水域的单位面积碳储量分别为 27.05 kg/m^2 、 14.27 kg/m^2 和 1.99 kg/m^2 。

2.3 空间相关性特征

2003—2022年期间, 洞庭湖区碳储量的 Moran's *I* 指数结果如图5所示, 所有年份的 Moran's *I* 指数均大于0.2, 并通过显著性检验(*Z*得分均大于1.65), 表明碳储量的空间分布呈现显著的集群现象, 而非随机分布。总体而言, 碳储量呈现空间正相关, 高碳储量区域与高碳储量区域聚集, 低碳储量区域与低碳储量区域聚集, 表现出明显的空间聚集特征。



(a) 2003—2006年



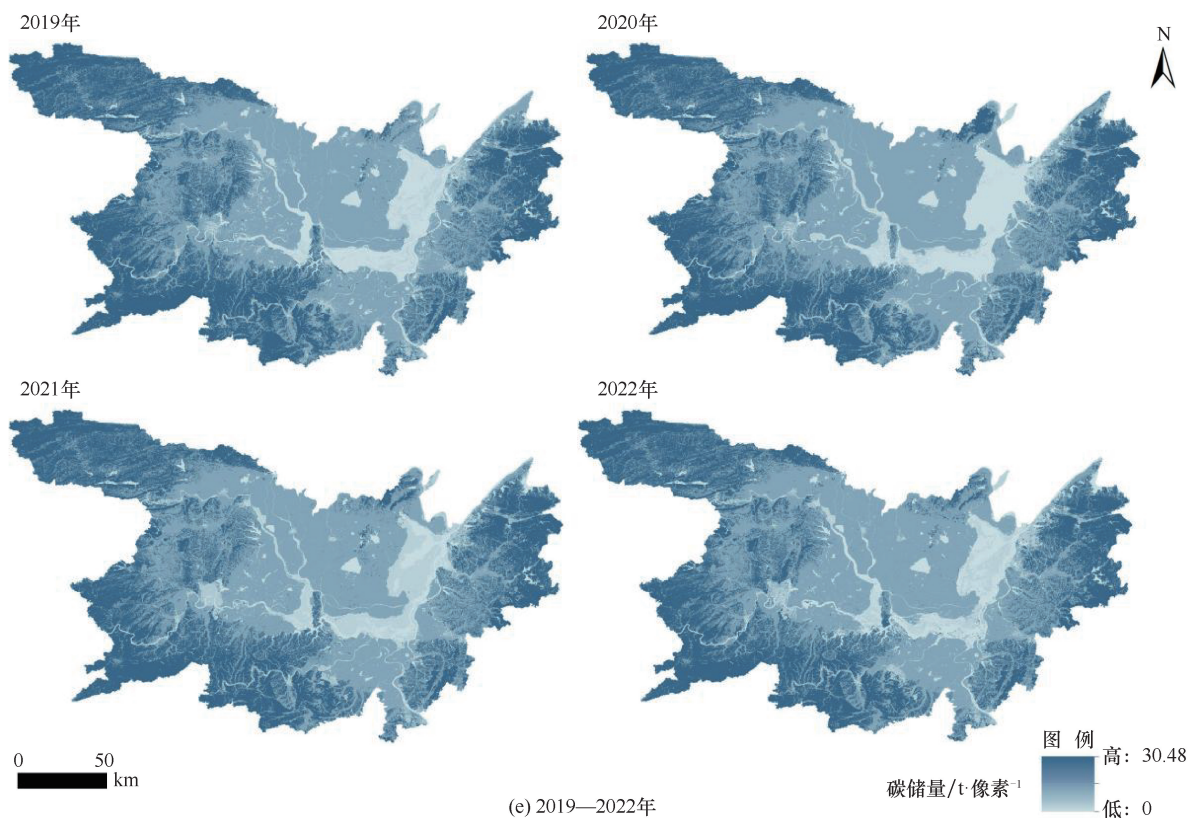
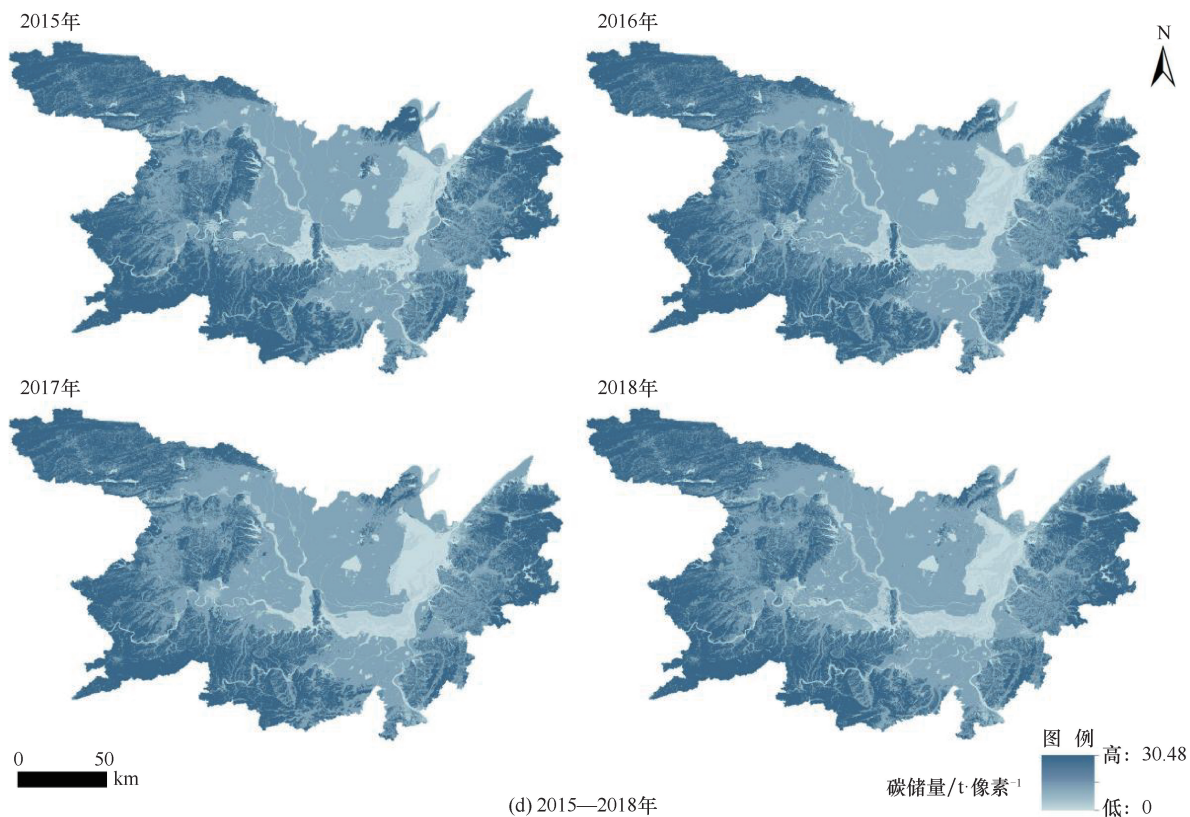


图3 2003—2022年洞庭湖区碳储量空间分布情况

Fig. 3 Spatial distribution of carbon stock in Dongting Lake area from 2003 to 2022

表3 2003—2022年研究区域内各区域碳储量变化特征

10⁸ t

Table 3 Characteristics of carbon stock variations in each region of study area from 2003 to 2022

10⁸ t

时间	区域	平均值	最大值	最小值	标准差	相对标准差
2003—2022年	丘陵区	5.400 5	5.573 5	5.241 4	0.082 7	1.53
	平原区	2.165 2	2.280 7	2.064 6	0.061 9	2.86
	水域	0.039 9	0.092 1	0.004 0	0.018 2	45.59

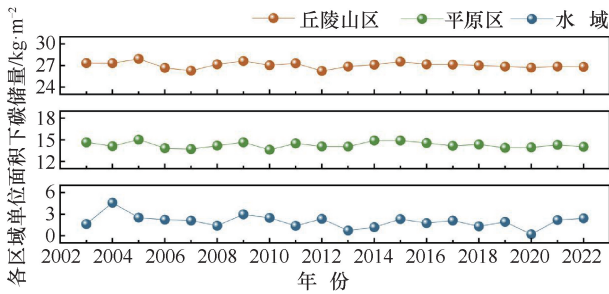


图4 2003—2022年洞庭湖区各区域单位面积下碳储量变化情况

Fig. 4 Carbon stock variations per unit area in each region of Dongting Lake area from 2003 to 2022

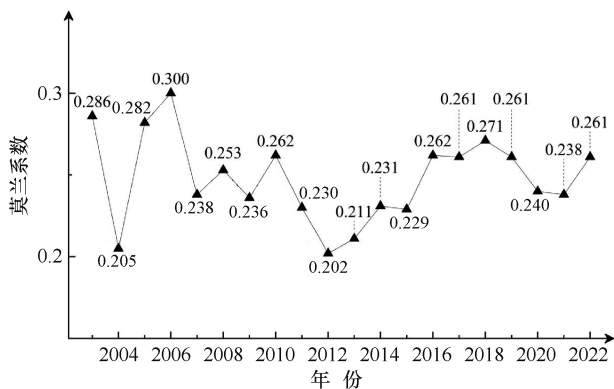


图5 2003—2022年洞庭湖区碳储量莫兰指数变化情况

Fig. 5 Variations in Moran's *I* index of carbon stock in Dongting Lake area from 2003 to 2022

3 碳储量变化驱动因素分析

3.1 土地利用变化及其对碳储量的影响

2003—2022年, 各类土地利用类型的总面积和分布均发生了一定的变化, 具体情况如图6和图7所示。下文以2022年为例, 对每种土地利用类型的比例进行详细分析。

首先, 耕地是该地区主要的土地利用类型, 占地面积约为18 266 km², 占整个研究区域的49%, 主要分布在中低海拔的平原和丘陵地区。其次, 林地覆盖约14 000 km², 占研究区域的38%, 主要分布在高海拔山区。水域和草地位居研究区的第三和第四, 面积比例分别为7.87%和2.71%。这些类型主要分布在

湖泊、河流及其周边的低海拔地区。建设用地面积约占2.7%, 主要集中在洞庭湖周边的中心城市和主城区。

在2003—2022年期间, 水域和草地的面积受气候和水文因素影响较大, 特别是在干旱和汛期交替的年份, 波动较为明显。自2003年以来, 建设用地面积稳步增长, 从480 km²增加至998 km², 年增长率约为4.7%。这表明随着经济增长和人口增加, 更多土地被转为住宅、商业和工业用途, 以支持城市扩张。

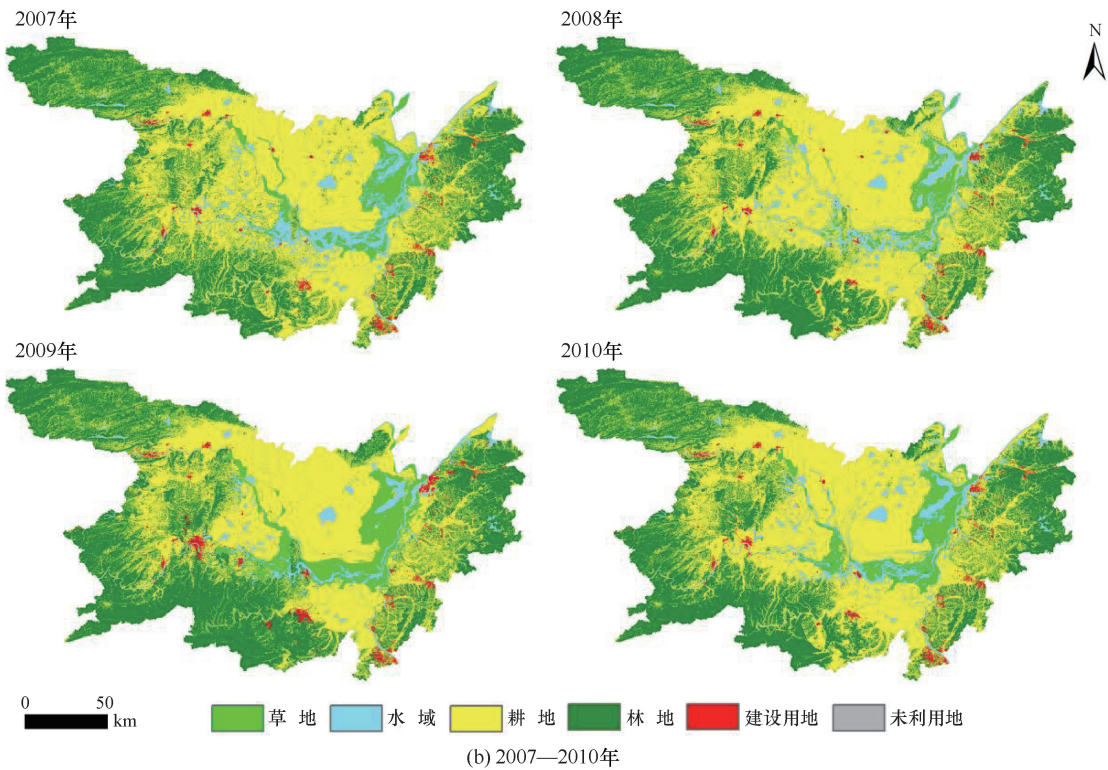
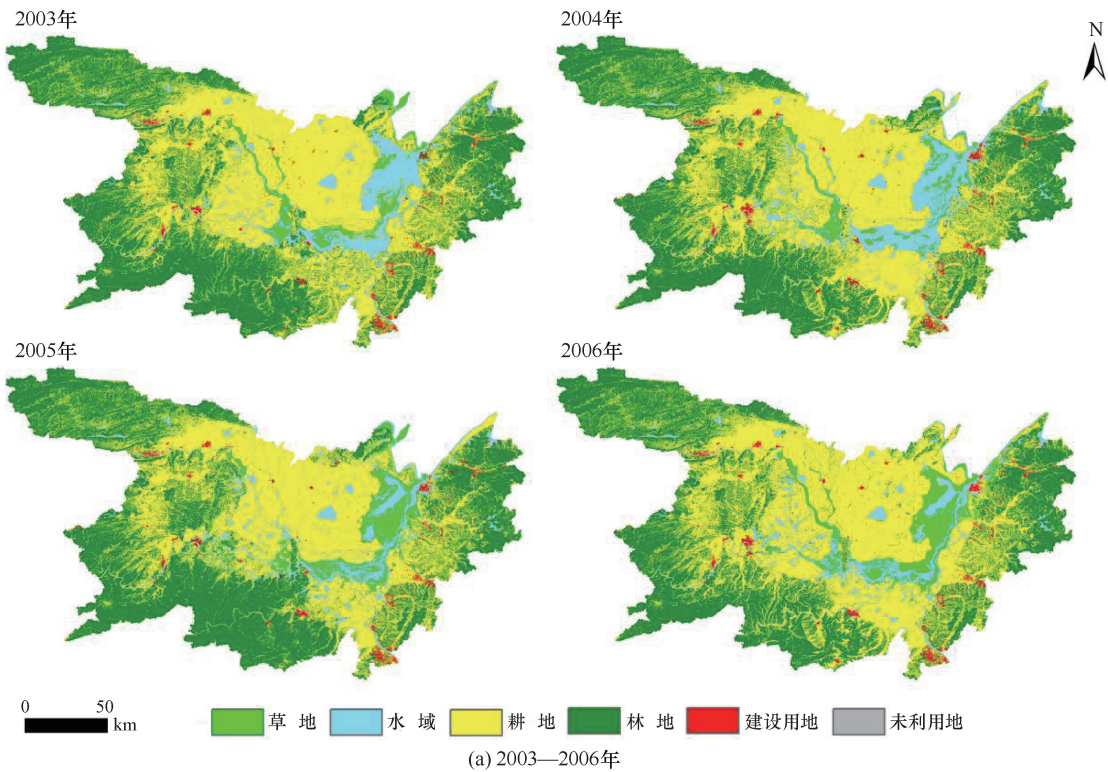
如图7所示, 2003—2022年期间, 耕地的变化最显著, 其最大值为18 786.13 km²(2007年); 最小值为16 078.64 km²(2005年), 两者相差2 707.49 km²。耕地扩张主要侵占了草地和森林, 2005—2007年间, 草地和林地面积分别减少了2 376.75 km²和197.83 km², 与此同时, 碳储量在这一时期也减少了5.36×10⁷ t, 2007年的碳储量为20 a间的最低值。这一现象的主要原因可以归结为耕地扩张带来的植被覆盖面积减少削弱了固碳能力。

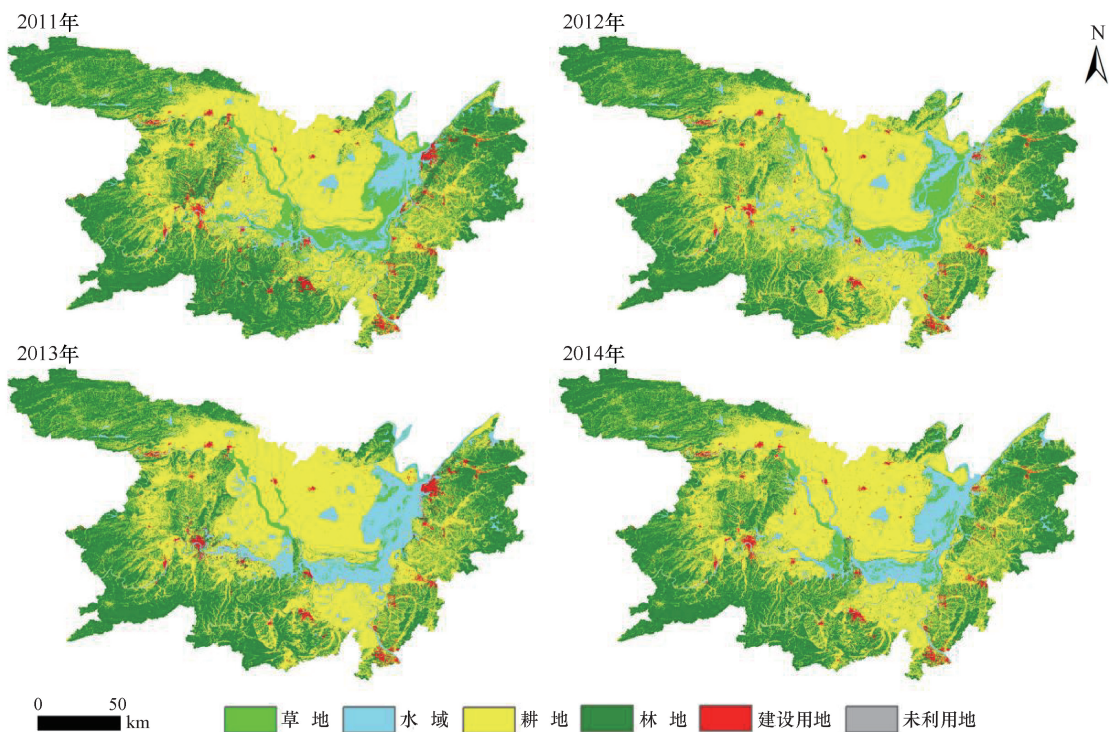
为进一步分析土地利用变化与碳储量变化之间的关系, 采用相关性分析方法, 量化耕地、林地和草地面积的年度变化与碳储量变化的相关性。分析结果表明, 耕地面积变化与碳储量变化呈显著负相关(相关系数为-0.77, $p < 0.01$), 而林地面积变化与碳储量变化呈显著正相关(相关系数为0.95, $p < 0.01$)。这表明, 耕地扩张通过减少植被覆盖直接降低了碳储量, 而林地面积的减少进一步加剧了碳损失。

此外, 碳储量的下降幅度在林地减少最显著的2005—2007年间尤为突出。这可能是由于森林对土壤碳和植被碳的储存能力较强, 其面积减少直接削弱了碳储存能力。由于模型的局限性, 土地利用变化对碳储量的影响表现得尤为直接和显著, 故耕地面积的增加及林地、草地面积的减少是碳储量下降的主要原因。

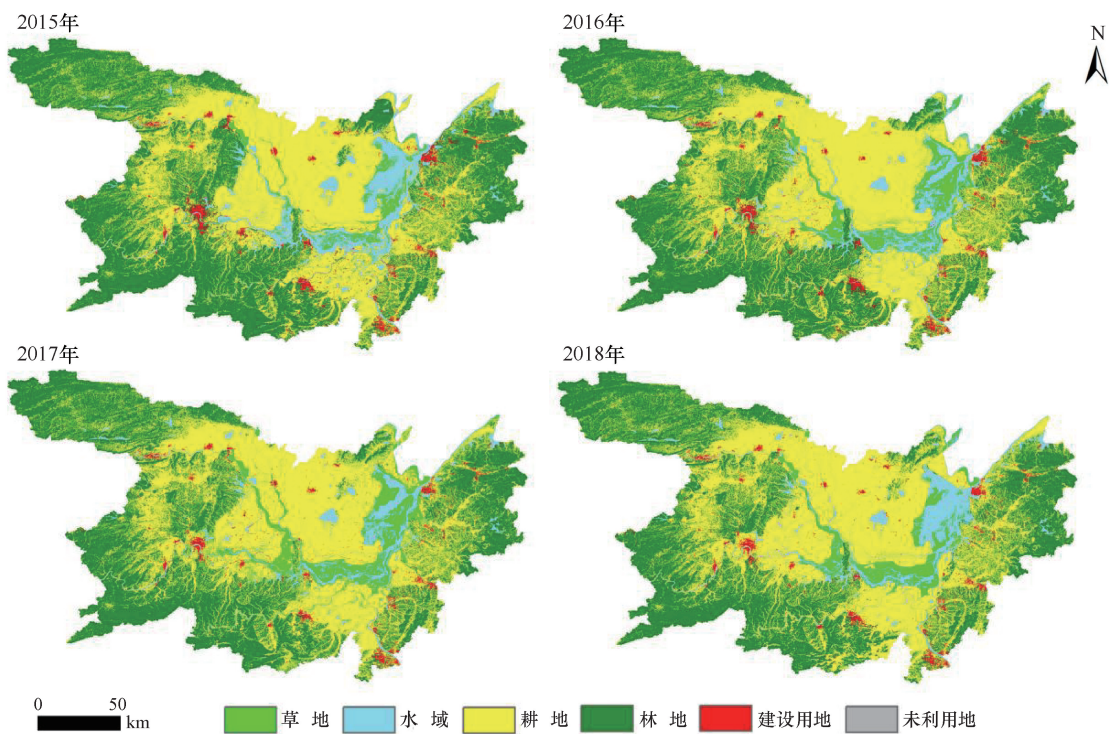
3.2 水文要素与碳储量关系分析

基于1972—2022年间51 a的降水系列资料, 本研究采用P-III型曲线分析降水频率, 将降水频率





(c) 2011—2014年



(d) 2015—2018年

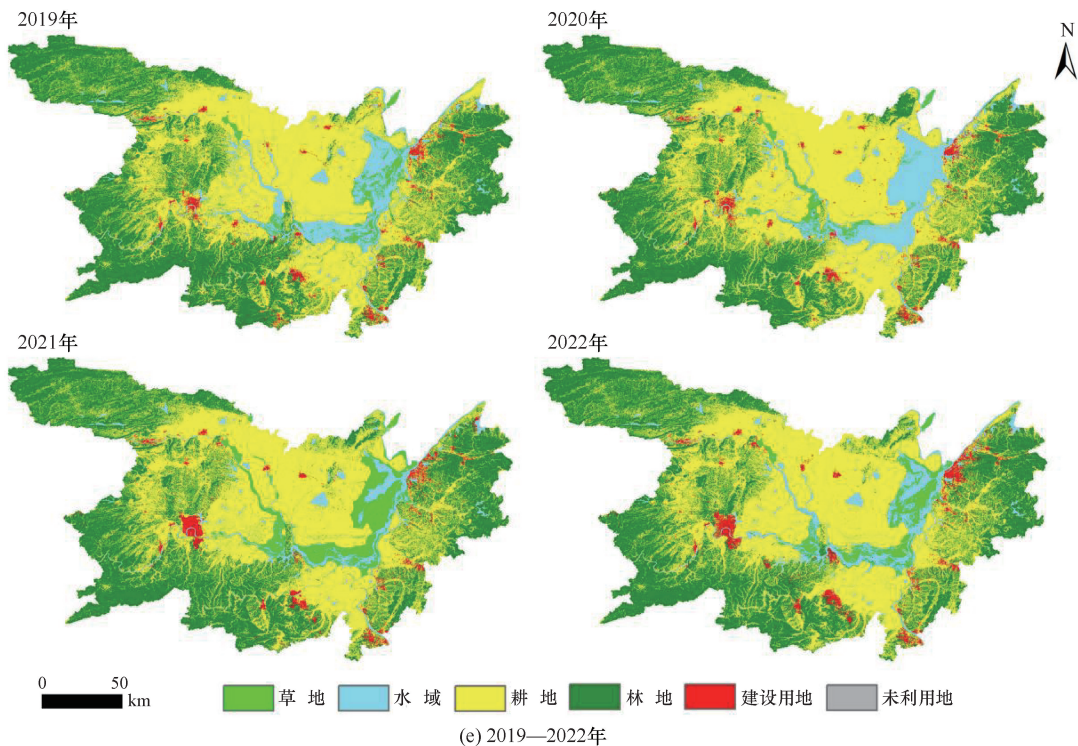


图6 2003—2022年洞庭湖区土地利用分布情况

Fig. 6 Land use distribution in Dongting Lake area from 2003 to 2022

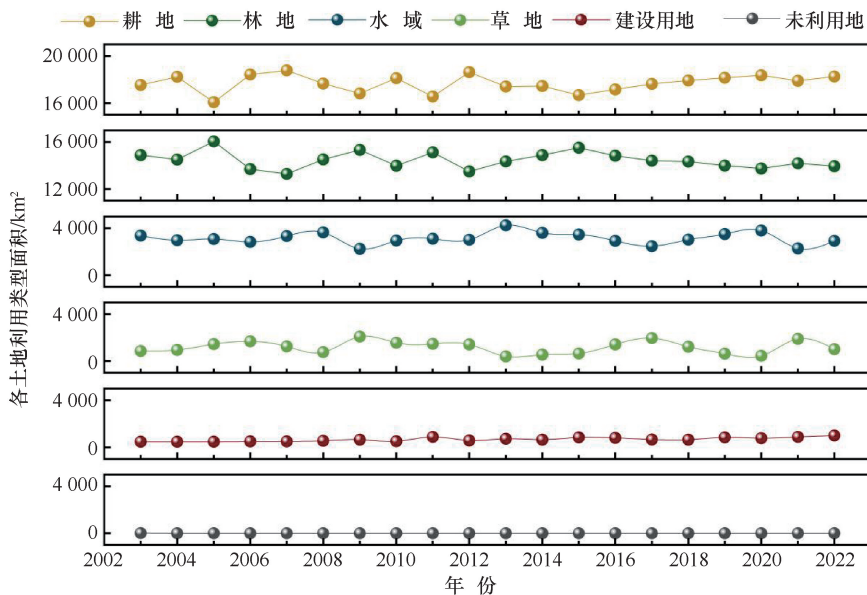


图7 2003—2022年洞庭湖区土地利用变化情况

Fig. 7 Land use change in Dongting Lake area from 2003 to 2022

小于 25% 的年份定义为丰水年, 25%~75% 之间的为平水年, 大于 75% 的为枯水年。2003—2022 年期间的水量等级划分结果如表 4 所列。选取 2005 年、2011 年、2015 年和 2022 年为分析对象, 探讨其变化特征。具体而言, 2005—2011 年为平水年转为连续

枯水年; 2011—2015 年为连续枯水年转为连续丰水年; 2015—2022 年则表现为丰水年向枯水年的转变。碳储量变化结果如图 8 所示, 图中蓝色表示碳储量增加, 红色表示减少, 白色表示无变化。

在 2005—2011 年期间, 红色区域明显, 表明碳

表4 2003—2022年洞庭湖区水量等级划分

Table 4 Water level classification in Dongting Lake area from 2003 to 2022

时 间	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
水量等级	平水年	平水年	平水年	枯水年	枯水年	枯水年	枯水年	丰水年	枯水年	丰水年
时 间	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
水量等级	平水年	平水年	丰水年	丰水年	丰水年	平水年	平水年	丰水年	平水年	枯水年

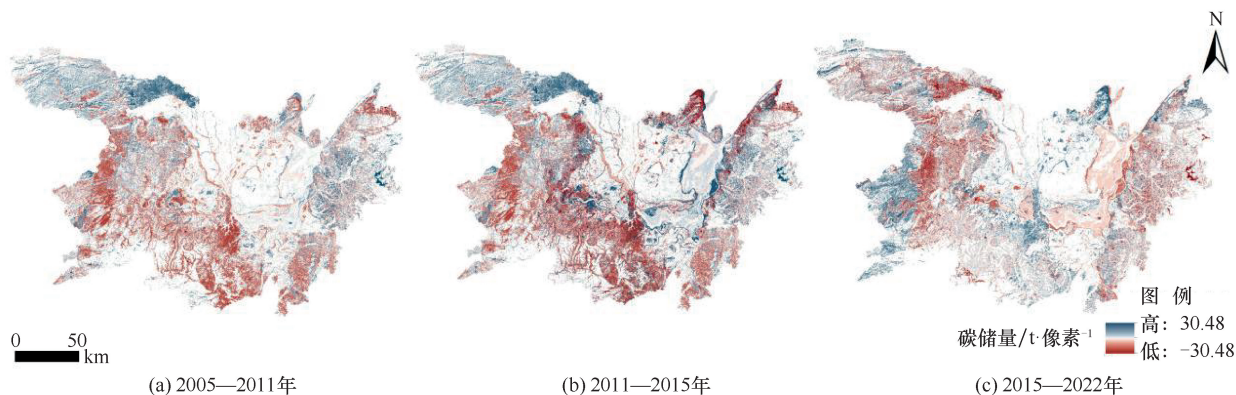


图8 2003—2022年洞庭湖区碳储量变化情况

Fig. 8 Carbon stock variations in Dongting Lake area from 2003 to 2022

储量下降, 总下降量为 2.3×10^7 t; 而 2011—2015 年, 蓝色区域占主导, 碳储量增长, 总增长量为 1.3×10^7 t; 2015—2022 年, 红色区域再次占多数, 碳储量下降, 总下降量为 2.8×10^7 t。综上所述, 碳储量在枯水年向丰水年转变时有所增加, 而从丰水年转向枯水年时则表现为减少。

洞庭湖区碳储量的变化不仅与降水息息相关, 还受到多种复杂因素的交互作用, 主要包括气候变化、水文条件和人类活动。为全面评估这些因素对碳储量的影响, 本研究采用皮尔逊相关性分析法, 系统分析了六种自然环境因素和四种社会经济因素。自然环境因素包括年平均气温、10—12月平均气温、年降水量、10—12月降水量、年平均水位以及10—12月的平均水位。由于本研究中选取的遥感图像主要在10—12月期间, 分析中特别考虑了这一时段的水文因素。此外, 为进一步探讨人类活动对碳储量的潜在影响, 本研究还分析了国内生产总值(GDP)、人口、建设用地面积和固定资产投资总额四个社会经济因素, 以期从更广泛的角度理解碳储量变化的驱动因素。

需要注意的是, 2012年年平均气温显著偏低, 且年降水量异常高, 因此该年份被视为异常值并从分析中排除。碳储量与选定的驱动因素之间的皮尔逊相关性分析结果如图9所示。

研究表明, 研究区域碳储量变化的主要驱动因素按影响程度排序为: 年平均气温、10—12月降

水量、人口、固定资产投资总额、10—12月平均气温、GDP、10—12月平均水位、年平均水位、建设用地面积和年降水量。在这些因素中, 只有年平均气温和10—12月降水量与碳储量呈显著相关 ($p < 0.01$), 其皮尔逊相关系数分别为 -0.53 和 0.40 。为量化其与碳储量之间的关系, 本研究进行了线性回归分析, 结果如图10和图11所示。图10表明, 年平均气温与碳储量呈负相关, 决定系数为 0.28 , 意味着年平均气温每升高 1°C , 碳储量减少约 2.5×10^7 t, 表明气温升高可能对碳储量有抑制作用。图11显示, 10—12月降水量与碳储量呈正相关, 决定系数为 0.16 , 表明降水量每增加 100 mm, 碳储量可能增加约 8.5×10^6 t。

4 讨论

4.1 土地利用变化对碳储量的影响

根据本文研究结果, 洞庭湖地区碳储量变化的主要驱动因素是土地利用类型的变化。耕地面积的增加和林地、草地面积的缩减, 导致了植被覆盖的下降, 并增加了碳排放源, 从而削弱了区域的碳存储能力。

随着长江经济带战略的实施, 洞庭湖区经历了快速的经济增长和城市化^[40-41], 导致林地和湿地的面积减少, 进而引发了生态系统退化^[42-43]和碳损失^[44-45], 这一现象与其他地区碳储量时空变化研究结果一致^[46-47]。为遏制生态系统退化, 中国政府近年来实施了“粮食换绿色”计划、“耕地占补平

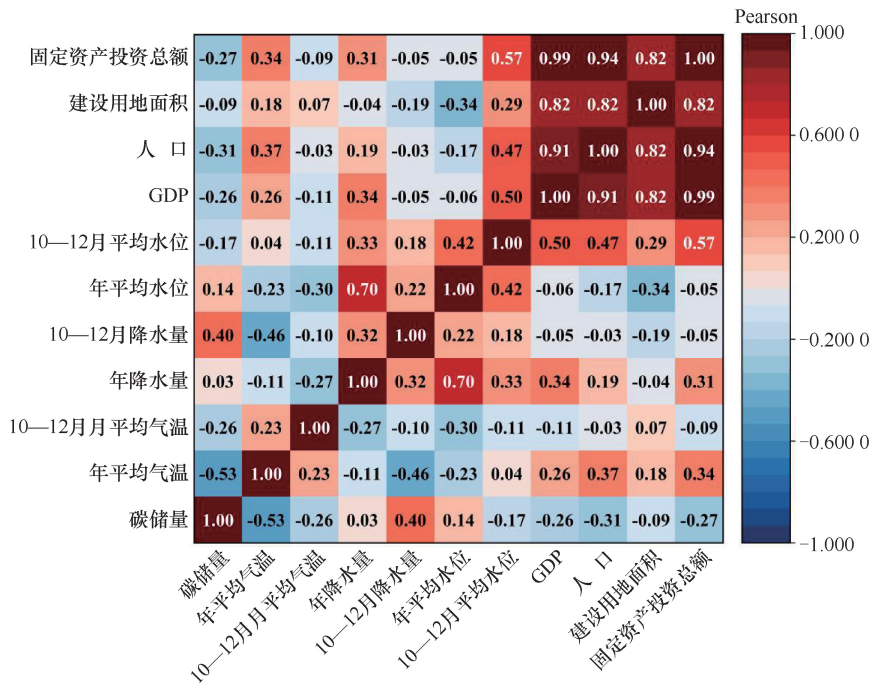


图9 碳储量与选定的驱动因素间的皮尔逊相关性分析结果

Fig. 9 Pearson correlation analysis between carbon stock and selected driving factors

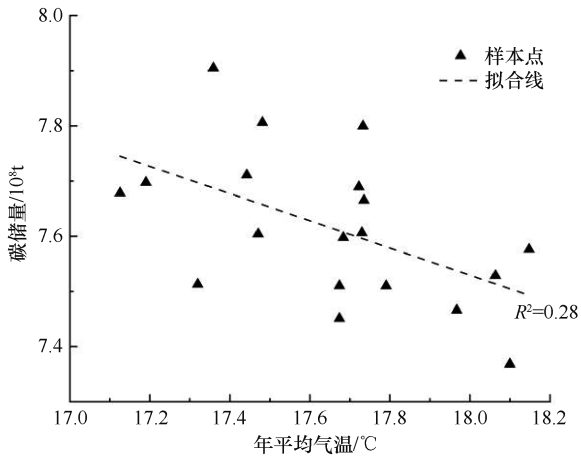


图10 洞庭湖区碳储量与年平均气温的线性拟合关系

Fig. 10 Linear fitting relationship between carbon stock and average annual temperature in Dongting Lake area

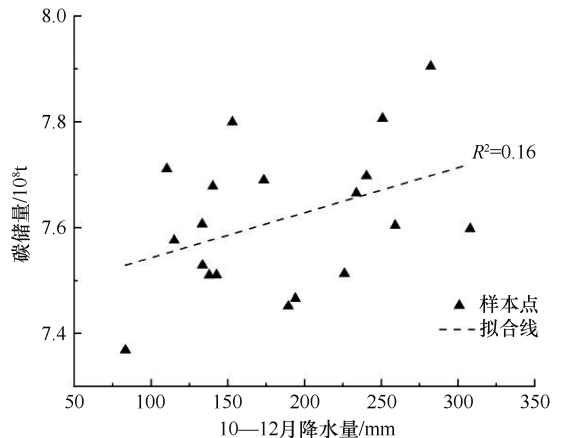


图11 洞庭湖区碳储量与10—12月降水量的线性拟合关系

Fig. 11 Linear fitting relationship between carbon stock and precipitation from October to December in Dongting Lake area

衡”和自然森林保护计划等生态恢复措施, 这些政策在改善生态系统服务方面取得了显著成效^[48-51]。

4.2 不确定性和限制性

遥感影像在碳储量估算中的精度可能受到多种因素影响, 主要包括云层遮挡、数据不连续性和影像解译误差等。这些因素可能导致估算结果存在一定偏差。云层遮挡会导致部分地区的影像无法获取, 进而造成数据缺失或不完整, 影响土地利用类型的准确识别。数据不连续性问题通常源于卫星影像的时间间隔

或观测频率差异, 可能导致某些时段内缺乏足够的连续影像数据, 影响土地利用变化的时效性和全面性。此外, 影像解译精度受到分辨率、地形复杂性和影像质量等因素的限制, 可能导致土地利用分类错误, 进而影响碳储量估算的准确性。因此, 在进行碳储量评估时, 应考虑这些误差来源, 并结合其他数据源进行校正和验证, 以提高估算结果的可靠性。

InVEST模型通过土地利用数据和碳密度来估算碳储量。本研究中, 碳密度值主要来源于已有文献数

据并基于降水量和气温特征进行修正,而非实地测量。同时, InVEST模型假设各土地利用类型碳密度在研究期间保持不变,这一假设引入了一定的不确定性。实际上,生态系统在自然演替过程中碳密度会动态变化,人类活动也会对碳密度产生重要影响。因此,开展长期持续的碳密度监测有助于减少这种不确定性,更真实地反映生态系统的变化。此外, InVEST模型主要关注不同土地利用类型之间的碳密度差异,忽略了同一土地利用类型内部的碳密度变化。例如,阔叶林转变为灌木丛可能会显著影响碳密度。在本研究中,土地利用划分为6种主要类型,但这种较粗略的分类可能影响碳储量评估的精度。未来研究建议采用更精细化的土地利用分类,以更准确地反映不同地表类型的碳储量变化。

5 结论

本研究利用 InVEST模型对洞庭湖区2003—2022年的碳储量进行了计算,并分析了其时空分布特征。研究还探讨了碳储量变化的主要原因及其影响因素,为理解洞庭湖生态系统的碳动态变化提供了科学依据。主要结论如下。

(1) 2003—2022年洞庭湖区碳储量总体上表现为下降的趋势,20 a间碳储量共计减少了 1.8×10^7 t,年均下降率为0.12%,表明研究区域内碳汇功能正逐渐减弱。

(2) 研究区域内碳储量呈显著空间正相关聚集分布,碳储量在不同区域间存在显著差异,其中丘陵区因森林覆盖率高对碳汇能力贡献最大,水域最低。2003—2022年丘陵区、平原区和水域单位面积下碳储量平均值分别为 30.82 kg/m^2 、 15.13 kg/m^2 和 2.25 kg/m^2 。

(3) 土地利用变化、气候波动和水文条件都会对碳储量产生影响,通过皮尔逊相关性分析发现,年平均气温和10—12月降水量与碳储量之间存在显著相关性。其中,年平均气温与碳储量呈负相关($R^2 = 0.28$, $p < 0.01$),表明气温升高可能抑制碳储存;而冬季(10—12月)的降水量与碳储量呈正相关($R^2 = 0.16$, $p < 0.01$),表明降水量的增加有助于碳汇。

参考文献 (References):

[1] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality

[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2022, 52(4): 534-574.
[2] GUO A J, YANG C L, ZHONG F L. Influence mechanisms and spatial spillover effects of industrial agglomeration on carbon productivity in China's Yellow River Basin [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(6): 15861-15880.
[3] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在2023年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
[4] 毛晓茜. 洞庭湖湿地生态环境健康评价[J]. 四川环境, 2020, 39(5): 101-106.
MAO X Q. Ecological and environmental health assessment of wetland in Dongting Lake [J]. *Sichuan Environment*, 2020, 39(5): 101-106.
[5] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在2024年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.
[6] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在2025年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.
LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 1-12.
[7] DANGULLA M, ABD MANAF L, RAMLI M F, et al. Exploring urban tree diversity and carbon stocks in Zaria Metropolis, North Western Nigeria [J]. *Applied Geography*, 2021, 127: 102385.
[8] 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.
[9] 程鹏飞, 王金亮, 王雪梅, 等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. 林业调查规划, 2009, 34(6): 39-45.
CHENG P F, WANG J L, WANG X M, et al. Research progress in estimating carbon storage of forest ecosystem [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2009, 34(6): 39-45.
[10] 张志堂. 上海城市典型绿地的碳汇估算[J]. 绿色科技, 2017, 19(15): 60-62.
ZHANG Z T. Carbon sequestration estimation of typical urban green land in Shanghai [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017, 19(15): 60-62.

- [11] 应天玉, 李明泽, 范文义. 哈尔滨城市森林碳储量的估算[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 33-35.
YING T Y, LI M Z, FAN W Y. Estimation of carbon storage of urban forests in Harbin[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(9): 33-35.
- [12] 张桂莲. 基于遥感估算的上海城市森林碳储量空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1777-1786.
ZHANG G L. Spatial distribution characteristics of carbon storage of urban forests in Shanghai based on remote sensing estimation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(9): 1777-1786.
- [13] SCHEDLBAUER J L, POLOHOVICH S. Current and future carbon storage capacity in a southeastern Pennsylvania forest [J]. Natural Areas Journal, 2020, 40(4): 300-308.
- [14] LIPATOV D N, SHCHEGLOV A I, MANAKHOV D V, et al. Spatial variation of organic carbon stocks in peat soils and gleyzems in the northeast of Sakhalin Island [J]. Eurasian Soil Science, 2021, 54(2): 226-237.
- [15] XIAO D Y, NIU H P, GUO J, et al. Carbon storage change analysis and emission reduction suggestions under land use transition: A case study of Henan Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(4): 1844.
- [16] CHAPLIN-KRAMER R, RAMLER I, SHARP R, et al. Degradation in carbon stocks near tropical forest edges [J]. Nature Communications, 2015, 6: 10158.
- [17] OUYANG Z Y, ZHENG H, XIAO Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital [J]. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [18] GÓMEZ C, ALEJANDRO P, HERMOSILLA T, et al. Remote sensing for the Spanish forests in the 21st century: A review of advances, needs, and opportunities [J]. Forest Systems, 2019, 28(1): eR001.
- [19] LI Y X, LIU Z S, LI S J, 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): 647.
- [20] PIYATHILAKE I D U H, UDAYAKUMARA E P N, RANAWEERA L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva Province, Sri Lanka [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2213-2223.
- [21] 朱丽亚, 胡克, 孙爽, 等. 基于 InVEST 模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究 [J]. 现代地质, 2022, 36(1): 96-104.
ZHU L Y, HU K, SUN S, et al. Research on the spatiotemporal variation of carbon storage in the coastal zone of Liaoning Province based on InVEST model [J]. Geoscience, 2022, 36(1): 96-104.
- [22] 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.
- [23] 陈其, 魏媛. 贵州省土地利用变化对生态系统碳储量的影响 [J]. 自然资源情报, 2023(2): 28-34.
CHEN Q, WEI Y. Impact of land use change on ecosystem carbon stocks in Guizhou [J]. Natural Resources Information, 2023(2): 28-34.
- [24] 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.
ZOU W T, HE Y J, YE B, et al. Study on carbon storage of ecosystem in Qianjiangyuan National Park based on InVEST model [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(3): 120-128.
- [25] 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 等. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 267-272.
YANG J, ZHOU P Q, YUAN S J, et al. Land ecosystem service functions for Dongting Lake ecological economic zone based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 267-272.
- [26] 虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 323-331.
HU S, ZHANG X R, GUAN D J. Analysis on carbon storage change of construction land expansion in Chongqing based on InVEST model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 323-331.
- [27] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化 [J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 174-182.
LIU M Z, WANG Y F, PEI H W. The changes of land use and carbon storage in the northern farming-pastoral ecotone under the background of returning farmland to forest (grass) [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 174-182.
- [28] 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.
LIU X J, LI X, LIANG X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model [J]. Tropical Geography, 2019, 39(3): 397-409.
- [29] 薛万来, 朱莎莎, 朱梦洵, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的永定河流域碳储量功能变化分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 13-25.
XUE W L, ZHU S S, ZHU M X, et al. Carbon storage function in Yongding River Basin based on the FLUS-InVEST model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 13-25.
- [30] 龙文芹, 职露, 郭娅迪, 等. 西洞庭湖自然保护区 2000—2020 年间碳储量时空演变及成因分析 [J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 185-192.
LONG W Q, ZHI L, GUO Y D, et al. Spatiotemporal evolution and origin of carbon stock in the West Dongting Lake National Nature Reserve over the last two decades [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 185-192.
- [31] 王志远, 吴凡, 万鼎, 等. 多情景模拟区域土地利用变化对碳储量的影响 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 6063-6078.
WANG Z Y, WU F, WAN D, et al. Multi-scenario simulation of the impact of regional land use change on carbon reserve [J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 6063-6078.

- [32] 姚仕明, 胡呈维, 渠庚, 等. 长江通江湖泊演变及其影响效应研究进展[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(9): 15-23.
YAO S M, HU C W, QU G, et al. Research advances in morphological evolution of lakes connecting the Yangtze River and its influences[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(9): 15-23.
- [33] AN X X, 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.
- [34] 李姣, 汪杰, 李朗, 等. 洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1156-1165.
LI J, WANG J, LI L, et al. Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake Eco-economic Zone[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(6): 1156-1165.
- [35] 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, 2019, 4(1): 90-96.
XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. China Scientific Data, 2019, 4(1): 90-96.
- [36] 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.
- [37] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. Nature, 2000, 404(6780): 858-861.
- [38] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 34-42.
CHEN G S, YANG Y S, LIU L Z, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2007, 2(1): 34-42.
- [39] 黄卉. 基于 InVEST 模型的土地利用变化与碳储量研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
HUANG H. Research on Land Use/Land Cover Change and Carbon Storage Based on InVEST Model[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [40] CHEN W X, ZHAO H B, LI J F, et al. Land use transitions and the associated impacts on ecosystem services in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt in China based on the geo-informatic Tupu method[J]. Science of The Total Environment, 2020, 701: 134690.
- [41] XIE H L, HE Y F, CHOI Y, et al. Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS[J]. Science of The Total Environment, 2020, 704: 135427.
- [42] XIANG S J, WANG Y, DENG H, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109205.
- [43] TANG L P, KE X L, ZHOU Q S, et al. Projecting future impacts of cropland reclamation policies on carbon storage[J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106835.
- [44] HE C Y, ZHANG D, HUANG Q X, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 75: 44-58.
- [45] JIANG W G, DENG Y, TANG Z H, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models[J]. Ecological Modelling, 2017, 345: 30-40.
- [46] LIU G H, ZHAO Z H. Analysis of carbon storage and its contributing factors: A case study in the Loess Plateau (China)[J]. Energies, 2018, 11(6): 1596.
- [47] WANG Y M, ZHANG Z X, CHEN X. Land use transitions and the associated impacts on carbon storage in the Poyang Lake basin, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(11): 2703.
- [48] LU F, HU H F, SUN W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [49] TONG X W, BRANDT M, YUE Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(1): 44-50.
- [50] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 122-129.
- [51] VILLA J A, BERNAL B. Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework[J]. Ecological Engineering, 2018, 114: 115-128.

(责任编辑 王海锋)