

# 鄱阳湖地区典型湿地碳储量时空演变与情景预测

卫泽柱<sup>1</sup>, 董斌<sup>1</sup>, 许海锋<sup>1</sup>, 徐志立<sup>2</sup>, 陆志鹏<sup>1</sup>, 刘筱<sup>1</sup>

(1.安徽农业大学理学院, 安徽合肥 230036; 2.安徽农业大学资源与环境学院, 安徽合肥 230036)

**摘要:** [目的] 分析鄱阳湖湿地生态系统碳储量时空特征, 为下一步鄱阳湖地区湿地保护, 实现区域“碳达峰、碳中和”提供科学依据。[方法] 结合 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型, 计算 2000—2020 年鄱阳湖地区典型湿地碳储量, 并预测自然发展情景与生态保护情景下 2030 年碳储量变化。借助地理探测器模型, 探究碳储量变化的驱动因素。[结果] ① 2000, 2010, 2020 年鄱阳湖地区典型湿地碳储量分别为  $2.42 \times 10^6$ ,  $2.48 \times 10^6$ ,  $2.46 \times 10^6$  t。② 高碳储量集中于中西部林地, 低碳储量集中于中东部、西部和北部的湖泊水域。③ 土地利用是碳储量转移的主导因素, 其中沼泽草地、沼泽地、林地、耕地对碳储量转移的解释力依次降低。④ 相较于自然发展情景, 生态保护情景 2020—2030 年碳储量变化速率由  $-17.81\%$  变化为  $-1.09\%$ 。[结论] 合理的生态保护政策可以有效地保障湿地的固碳能力, 应强化国土用途管制, 落实生态保护措施, 为提升区域碳储能力提供保障。

**关键词:** 土地利用转移; 碳储量; 鄱阳湖地区典型湿地; InVEST 模型; GeoSoS-FLUS 模型; 地理探测器  
**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2023)03-0290-11 **中图分类号:** X171.1, X36, S157.4

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230526.003; Wei Zezhu, Dong Bin, Xu Haifeng, et al. Spatio-temporal evolution and scenario prediction of carbon storage in typical wetlands in Poyang Lake region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 290-300.

## Spatio-temporal Evolution and Scenario Prediction of Carbon Storage in Typical Wetlands in Poyang Lake Region

Wei Zezhu<sup>1</sup>, Dong Bin<sup>1</sup>, Xu Haifeng<sup>1</sup>, Xu Zhili<sup>2</sup>, Lu Zhipeng<sup>1</sup>, Liu Xiao<sup>1</sup>

(1. College of Science, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;

2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial characteristics of carbon storage in the Poyang Lake wetland ecosystem were analyzed in order to provide scientifically based recommendations to protect Poyang Lake wetlands in the future and to produce regional “carbon peak and carbon neutrality”. [Methods] InVEST and GeoSoS-FLUS models were combined to calculate carbon storage of typical wetlands in the Poyang Lake region from 2000 to 2020, and to predict carbon storage changes in 2030 under natural development scenarios and ecological protection scenarios. The factors driving carbon storage changes were determined by means of the geographic detector model. [Results] ① The carbon reserves of typical wetlands in the Poyang Lake region in 2000, 2010 and 2020 were  $2.42 \times 10^6$  t,  $2.48 \times 10^6$  t and  $2.46 \times 10^6$  t, respectively. ② The high carbon reserves were concentrated in the central and western forests, while the low carbon reserves were concentrated in the east, central, western and northern lakes. ③ Land use was the dominant factor affecting carbon storage transfer. The explanatory power of vegetative cover type with respect to carbon storage transfer followed the order of marsh grassland > marshland > forest land > cultivated land. ④ Compared with the natural development scenario, the change rate of carbon storage for the ecological protection scenario changed from

收稿日期: 2022-10-23

修回日期: 2023-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“农业开发模式对长江中下游典型湿地越冬白头鹤栖息地影响研究”(32071600), “越冬珍稀鹤类地理分布低自然湿地土地利用变化的响应机制”(41571101); 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2020A0112); 安徽省自然资源科技项目(2022-k-1)

第一作者: 卫泽柱(1999—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 研究方向为土地生态和土地信息化。Email: 2276796098@qq.com。

通信作者: 董斌(1970—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 教授, 主要从事测绘地理信息技术研究。Email: dnhyl23@sina.com。

-17.81% to -1.09% during the period from 2020 to 2030. [Conclusion] Reasonable ecological protection policies can effectively guarantee the carbon sequestration capacity of wetlands. Land use control practices should be strengthened and ecological protection measures should be implemented as as to guarantee improvement in regional carbon storage capacity.

**Keywords:** land use transfer; carbon storage; typical wetland of Poyang Lake; InVEST model; GeoSoS-FLUS model; geographic detector

全球碳排放治理正处于转型期,寻求有效协调的治理方案和技术成为有待解决的关键问题<sup>[1]</sup>。实现“碳达峰、碳中和”的关键是碳减排和碳增汇,而不同类型生态系统在碳减排和碳增汇上存在显著差异<sup>[2]</sup>。因此,定量估算湿地生态系统碳储量时空转移特征,分析其碳储量转移驱动因素,对相应生态系统碳储量计算有重要参考作用,对区域碳排放减量和碳汇增量有重要意义。

目前,生态系统碳储量估算主要采用实地取样样方法<sup>[3]</sup>、碳通量监测法<sup>[4]</sup>及模型演算法<sup>[5]</sup>。实地采样法是以人工调查为主,基于资源现状布设调查样方,以样方为基准推算区域碳储总量,该方法工作量大,数据采样周期长。碳通量监测法是采用以激光点云等现代测量技术推算区域碳储量,该方法精度较高,但是对于采样仪器要求较高。相较于前两种方法,模型演算法操作便捷,可以从时空角度分析碳储量变化特征。近年来,国内外学者应用模型演算法从多个方面评估生态系统碳储量变化。估算红树林<sup>[6]</sup>、城市森林<sup>[7]</sup>、国家公园等<sup>[8]</sup>不同生态系统研究对象的碳储量变化特征,探究土地利用<sup>[9]</sup>、植物光合作用<sup>[10]</sup>、气候变化等<sup>[11]</sup>因素对碳储量转移的影响机制,这些应用模型演算对生态系统碳储量展开的研究,为我们研究鄱阳湖地区典型湿地碳储量提供了理论支撑,具有重要的参考意义。国内外学者在森林<sup>[12]</sup>、农田<sup>[13]</sup>、草原等<sup>[14]</sup>生态系统碳储量方面做了大量研究,但湿地生态系统碳储量研究较为欠缺。此外,大部分学者在探究生态系统碳储量转移驱动力时,缺少对驱动因素的空间异质性的考虑,缺少对驱动因素间交互叠加效应的研究。

本文以鄱阳湖地区典型湿地的陆地生态系统碳储量为研究对象,结合 InVEST 模型和 GeoSoS-FLUS 模型技术,耦合长时间、多尺度的土地利用变化和碳储量演变,分析碳储量变化趋势及发展方向。借助地理探测器模型,综合考虑驱动因子间的交互叠加效应,分析碳储量转移的驱动因子及其交互作用。结合自然发展情景和生态保护情景对比分析,分析鄱阳湖湿地碳储量变化的生态保护政策驱动因素,为下一步鄱阳湖地区湿地保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

鄱阳湖国家级自然保护区,位于江西省鄱阳湖西北部,地理坐标为 115°47′—116°45′E 和 28°22′—29°45′N,由蚌湖、大汉湖、大湖池、沙湖、常湖池、中湖池、象湖、梅西湖、朱市湖组成<sup>[15]</sup>。

本文以鄱阳湖国家级自然保护区(由蚌湖、沙湖、朱市湖、大湖池、中湖池、常湖池、象湖、梅西湖、大汉湖组成,图 1)界线为基础,沿湖泊河流走向和地势起伏向外扩张约 1 km(东南方向扩张约 5 km),选为本文研究区,面积约为 41 993 hm<sup>2</sup>。研究区包含整个鄱阳湖国家级保护区,为区分二者,下文中研究区统称为鄱阳湖地区典型湿地。鄱阳湖地区典型湿地属亚热带季风气候,年平均气温为 17.6 °C,年均降水量为 1 614.3 mm,境内气候温和、降水充沛、光照充足<sup>[16]</sup>。鄱阳湖地区典型湿地的地形以平原和盆地为主,部分山地地形集中分布于中部及北部。研究区内湿生草甸、森林、湖泊资源丰富,动植物资源种类繁多。

### 1.2 数据来源

研究使用的土地利用数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)平台,空间分辨率为 30 m × 30 m,以 Landsat 4—5, TM 和 Landsat 8, OLITIRS 影像为主要数据源,通过解译获得鄱阳湖地区典型湿地 2000, 2010, 2020 年 3 期土地利用类型图,土地利用类型包括水域、建设用地、耕地、林地、沼泽草地、沼泽地。

研究选用人均 GDP、河流、路网、坡度、坡向、年均降水量、人口密度作为土地利用的驱动因子,数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。为了确保数据的一致性,在研究中对数据进行了重采样,规定数据的空间分辨率为 30 m × 30 m,投影坐标采用 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50 N。

碳密度数据包括不同土地利用类型的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度 4 个碳库<sup>[17]</sup>。本文所使用的水域、建设用地、沼泽草地的碳密度根据张凯琪等<sup>[18]</sup>的研究得到;耕地、林地的碳密度数据根据李克让等<sup>[19]</sup>的研究得到;沼泽地的碳

密度根据揣小伟等<sup>[20]</sup>、朱文博等<sup>[21]</sup>的研究得到。为了得到较为准确的碳储量估算值,本研究借助碳密度修正公式对参考的碳密度值进行了修正(表 1)。计算公式如下:

$$K_{BP} = \frac{6.789 \times e^{0.0054 \times MAP}}{6.789 \times e^{0.054 \times MAP}} \quad (1)$$

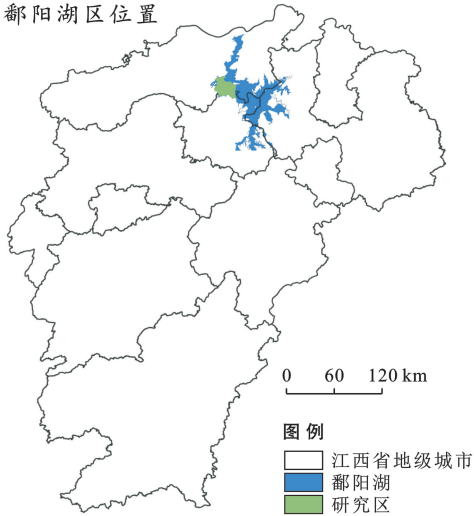
$$K_{BT} = \frac{28 \times MAT_A + 398}{28 \times MAT_B + 398} \quad (2)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} \quad (3)$$

$$K_S = \frac{3.3968 \times P_A + 3996.1}{3.3968 \times P_B + 3996.1} \quad (4)$$

式中:MAP 为地区的年均降水量(mm);MAT 为区域的年均气温(°C); $K_{BP}$ 为根据年均降水量得到的地上生物量碳密度修正系数; $K_{BT}$ 为依据年均气温计算出的地上生物量碳密度修正系数; $K_B$ 为地上生物量碳密度修正系数; $K_S$ 为土壤碳密度修正系数<sup>[22]</sup>。

a 鄱阳湖区位置



b 典型湿地分布



注:本图源于地理空间数据云,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)3333 号标准地图校准制作,下同。

图 1 鄱阳湖地区位置及典型湿地分布

Fig.1 Location and distribution of typical wetlands in Poyang Lake region

表 1 鄱阳湖地区典型湿地各土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon density of land use types at typical wetland in Poyang Lake area

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
水域	2.24	1.92	0.00	0.00
建设用地	9.18	0.75	0.89	0.00
耕地	8.57	8.36	124.80	0.00
林地	79.34	23.65	194.87	0.00
沼泽草地	2.41	10.85	53.57	1.00
沼泽地	31.00	5.00	91.90	0.00

### 1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化情景模拟 本研究中依据国内外已有的土地利用变化情景方案设计的研究成果<sup>[23]</sup>,结合研究区降水充沛,经济缓慢增长,人口密度较低,沼泽草地退化等特征,综合考虑研究区资源环境条件和社会经济技术因素。将研究区设置了两种模拟情景,自然发展情景和生态保护情景。

(1) 自然发展情景( $Q_1$ )是基于当前土地利用现状和自然条件,允许研究区内林地、沼泽草地、水域的转入转出。根据鄱阳湖地区典型湿地 2010—2020 年

土地利用转移矩阵的变化趋势,预测 2030 年各类土地利用类型的面积(表 2)。

(2) 生态保护情景( $Q_2$ )是模拟鄱阳湖地区典型湿地 2020—2030 年的生态保护政策下土地利用类型的转移趋势,即加强对林地、沼泽草地、水域的保护,减少研究区沼泽草地和林地的退化,约束建设用地的无序扩张。规定林地、沼泽草地、水域资源转出面积的范围为 2020 年 3 类土地面积的 0%~40%,将建设用地的邻域因子参数下调为 0.4(表 2)。

表 2 生态保护情景下土地利用转移限制矩阵

Table 2 Restriction matrix of land use transfer under ecological protection scenario

项目	水域	建设用地	耕地	林地	沼泽草地	沼泽地
水域	1	0	0	1	1	0
建设用地	0	1	1	0	0	1
耕地	0	1	1	0	0	1
林地	1	0	0	1	1	0
沼泽草地	1	0	0	1	1	0
沼泽地	0	1	1	0	0	1

1.3.2 基于 GeoSoS-FLUS 模型的土地利用变化模拟 本研究采用 GeoSoS-FLUS 模型分别预测了两种情景下鄱阳湖地区典型湿地 2030 年土地利用状况,主要包括以下几个方面。

(1) 遥感影像预处理。研究数据选用 2000, 2010, 2020 年 3 期同时间段遥感影像,经过大气校正、影像增强、影像融合、影像裁剪等处理,使用 ENVI 5.2 软件解译得到 3 期土地利用栅格数据(表 3)。

表 3 鄱阳湖地区典型湿地遥感解译标志

Table 3 Remote sensing interpretation markers of typical wetlands in Poyang Lake region

土地利用类型	解译标志	实地调查标志	颜色	特征
水域			青色、浅蓝色	主要为湖泊水面及河流
建设用地			蓝白色、白色	边界清晰,散落分布
耕地			浅绿色、浅红色	影像纹理细腻,规则分布于居民区附近
林地			深红色、红色	影像边界较为模糊,多分布于高程较高的山区
沼泽草地			红色、淡红色	沿河流走向呈带状分布
沼泽地			灰色	岸边零散分布,边界较为明显

(2) 适宜性处理。本研究使用德尔菲法,以专家匿名函件征询的形式,从空间格局、社会经济、气候环境等诸多影响因子中筛选土地利用、河流分布、距离道路距离、人均 GDP、坡向、坡度、人口密度、年均降水、年均气温作为土地利用变化驱动力(表 4)。借助 GeoSoS-FLUS 模型中的神经网络算法(ANN)训练 2030 年土地利用类型的适宜性概率。本文采用随机取样的方式,选用 10% 的栅格数据作为训练样本,计算各类土地类型的适宜性概率,即得到每类土地利用类型在单个像元上出现的概率。

表 4 土地利用情景模拟驱动因素

Table 4 Driving factors of land use scenario simulation

数据类型	数据名称	数据格式
土地利用数据	土地利用数据	30 m 分辨率栅格
	人均 GDP	1 km 分辨率栅格
社会经济数据	人口密度	1 km 分辨率栅格
	距离铁路距离	矢量数据
	距离国道距离	矢量数据
	距离省道距离	矢量数据
	DEM	90 m 分辨率栅格
气候环境因子	坡度	90 m 分辨率栅格
	坡向	90 m 分辨率栅格
	年均降水量	1 km 分辨率栅格
	河流分布	矢量数据

(3) 限制条件设置。通过设置土地利用转移限制矩阵,确定自然发展情景( $Q_1$ )和生态保护情景( $Q_2$ )下各类土地类型转入转出的条件。矩阵中 0 代表无法转入/转出,矩阵中 1 代表允许转入/转出;通过设置邻域因子参数,确定各类土地类型在转入/转出中的权重,参数的值为 $[0, 1]$ ,值越大代表转移权重越高;通过计算 kappa 系数,检验模拟结果的精度,经 2020 年鄱阳湖地区典型湿地土地利用现状与 FLUS 模拟土地利用现状对比,得到 kappa 系数为 0.89,预测具有可信度(图 2)。

1.3.3 基于 InVEST 模型的碳储量估算 本文使用 InVEST 模型计算鄱阳湖地区典型湿地的碳储量变化状况。基于碳密度表和土地利用数据,计算研究区的碳储量,分析研究区碳储量的时空变化。InVEST 模型的碳储存模块将生态系统的碳储量分成 4 个部分:地上碳( $C_{above}$ )、地下碳( $C_{below}$ )、土壤有机碳( $C_{soil}$ )、死亡有机碳( $C_{dead}$ )<sup>[24]</sup>,计算公式如下:

$$C_i = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (5)$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \quad (6)$$

式中: $i$  为某种土地利用类型; $C_i$  为  $i$  种土地利用类型的碳密度; $C_{above}$  为地上碳密度( $t/hm^2$ );  $C_{below}$  为地

下碳密度( $t/hm^2$ );  $C_{soil}$  为土壤碳密度( $t/hm^2$ );  $C_{dead}$  为死亡有机碳密度( $t/hm^2$ );  $C$  为研究区生态系统的

总碳储量( $t$ );  $n$  为土地利用类型数量, 本文设置为 6;  $A_i$  为第  $i$  类土地面积( $hm^2$ )。

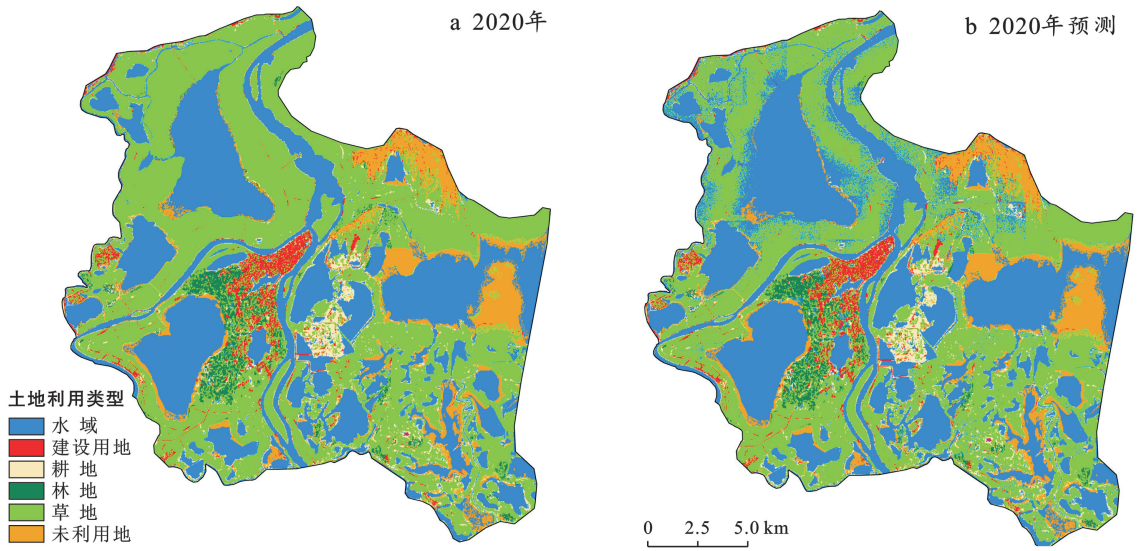


图 2 2020 年鄱阳湖地区典型湿地土地利用现状与 FLUS 模拟对比

Fig.2 Comparison of land use status of typical wetlands in Poyang Lake region in 2020 and FLUS simulation

1.3.4 基于地理探测器的碳储量驱动力分析 地理探测器模型是通过分析因变量与自变量在空间格局上的相关性和异质性, 探究因变量对自变量的解释程度<sup>[25]</sup>。其基本原理是如果某个自变量与因变量之间存在显著关联性, 那么这两个指标在空间分布上具有相似性。

本研究使用地理探测器模型中的因子探测和交互探测模块, 探究鄱阳湖地区典型湿地碳储量变化的驱动因素。研究采用自然断点法对各驱动因子进行离散处理, 重分类为 6 类, 使用 ArcGIS 创建采样点, 删除 -999 异常值, 共 1 324 条数据参与计算, 分析碳储量变化的驱动因素。

## 2 结果与分析

### 2.1 鄱阳湖地区典型湿地碳储量时空变化

如表 5 所示, 2000—2020 年, 鄱阳湖地区典型湿地的土地利用类型存在明显变化, 变化最为明显的是沼泽草地和建设用地, 沼泽草地减少了 1 067.22  $hm^2$ , 建设用地增加了 600.84  $hm^2$ 。沼泽草地出现明显退化现象, 转变为水域、沼泽地和耕地的面积分别为 3 449.97, 1 041.66, 932.67  $hm^2$ , 是沼泽草地面积减少的主要转化类型。建设用地面积明显增加, 增加的面积主要来自沼泽草地和耕地, 转入面积分别为 542.88, 170.10  $hm^2$ 。

表 5 2000—2020 年鄱阳湖地区典型湿地土地利用类型转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of land use at types typical wetlands in Poyang Lake Region during 2000—2020  $hm^2$

项目	2000 年面积						转入总计
	沼泽草地	耕地	建设用地	林地	水域	沼泽地	
沼泽草地	14 119.11	774.45	177.66	374.85	2 744.28	1 491.57	19 681.92
耕地	932.67	249.66	65.25	82.44	409.68	88.29	1 827.99
建设用地	542.88	170.1	226.8	123.12	84.87	80.37	1 228.14
林地	662.85	74.16	85.05	226.53	78.57	24.39	1 151.55
水域	3 449.97	298.08	58.59	109.89	10 102.95	576.09	14 595.57
沼泽地	1 041.66	172.53	13.95	38.43	1 271.16	971.01	3 508.74
转出总计	20 749.14	1 738.98	627.3	955.26	14 691.51	3 231.72	41 993.91
面积变化	-1 067.22	89.01	600.84	196.29	-95.94	277.02	

如图 3 所示, 2000, 2010, 2020 年鄱阳湖地区典型湿地总碳储量分别为  $242 \times 10^6$ ,  $2.48 \times 10^6$ ,  $2.46 \times$

$10^6$  t, 每 1  $hm^2$  土地平均碳储量分别为 57.62, 59.11, 58.58 t, 整体上呈现“先增加后降低”的变化趋势。其

中,2000—2010 年鄱阳湖地区典型湿地碳储量出现增加趋势,增加量为  $6.26 \times 10^4$  t,与 2000 年相比增幅为 2.59%;2010—2020 年鄱阳湖地区典型湿地碳储量呈现小幅度的下降趋势,减少量为  $2.23 \times 10^4$  t,与 2010 年相比减幅为 4.86%。

从整体上来看,2000—2020 年鄱阳湖地区典型湿地的碳储量呈现为“中西部、东北、中部、东部较高,北部、西部、西南部较低”的分布特征。高碳储量集中分布于鄱阳湖地区典型湿地的中西部林地,沿湖泊岸线呈带状分布;碳储量值较低的区域集中分布于研究区中东部、西部和北部的湖泊水域范围。

2000—2020 年,鄱阳湖地区典型湿地碳储量转移存在明显的区域特征和地区差异(图 4)。碳储量增加的区域多分布在湿地的西南部、东部地区,集中在湖泊岸边,呈现明显的带状分布。碳储量未出现明显转移的区域集中分布于湿地的水域、沼泽草地区域,在空间上位于湿地的北部、东北部、西部、西北部

和东部地区。碳储量减少的区域呈现点状分布,散落分布于研究区沼泽草地部分。

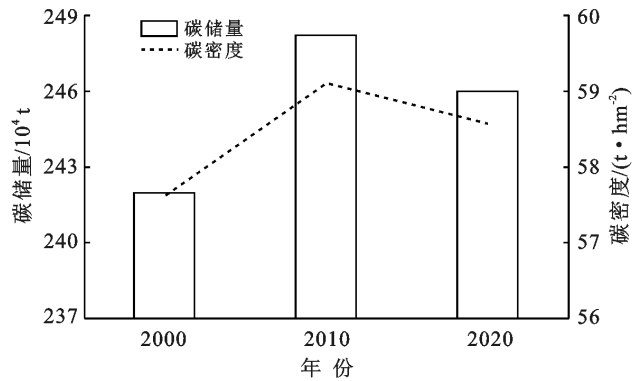


图 3 2000—2020 年鄱阳湖地区典型湿地碳储总量及碳密度变化

Fig.3 Changes in total carbon storage and carbon density of typical wetlands in Poyang Lake region during 2000—2020

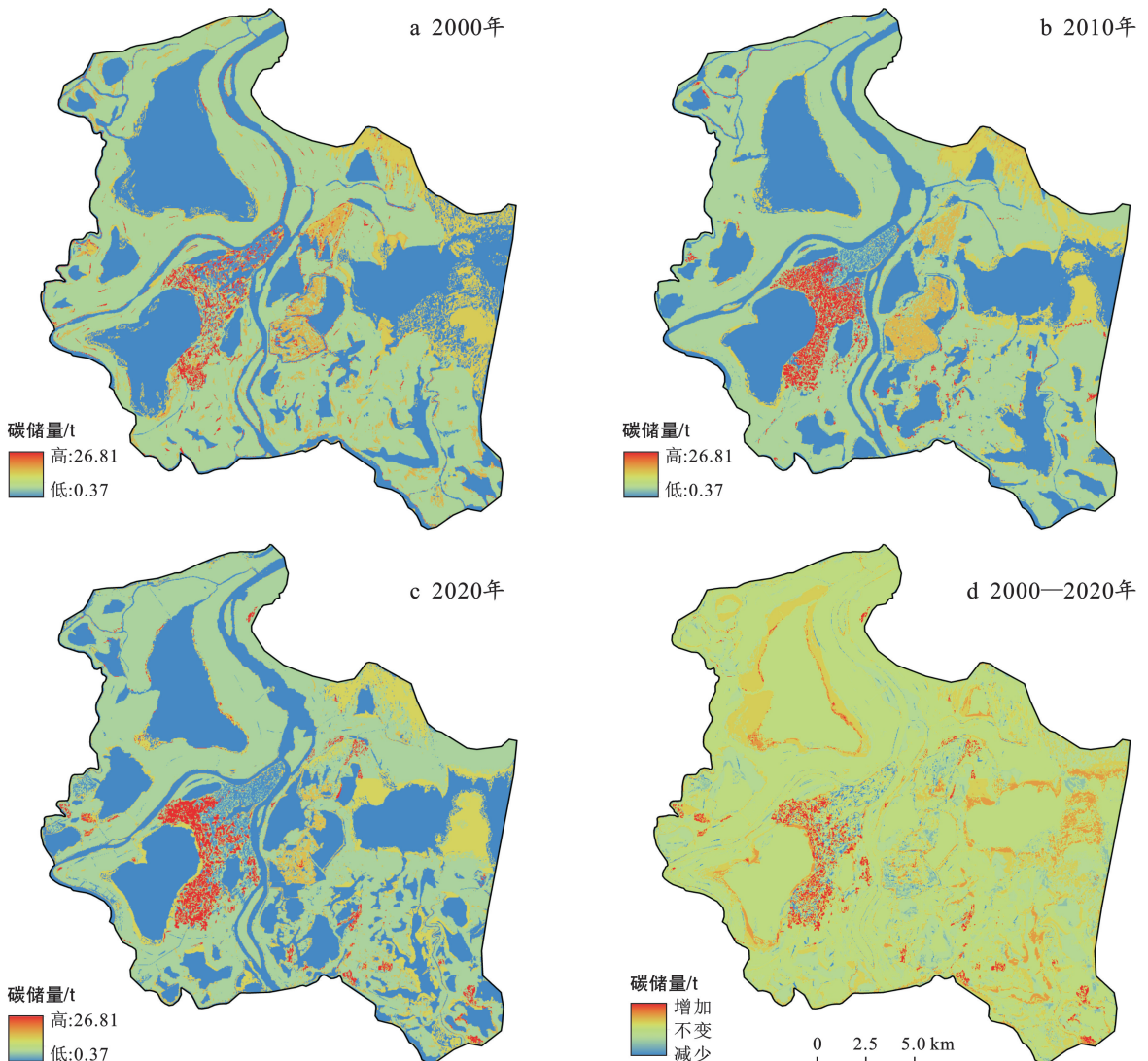


图 4 2000—2020 年潘阳湖地区碳储量空间分布及变化

Fig.4 Spatial distribution and variation of carbon stocks in Poyang Lake region during 2000—2020

## 2.2 鄱阳湖地区典型湿地碳储量驱动力分析

2.2.1 因子探测 本研究借助地理探测器模型分析鄱阳湖地区典型湿地碳储量变化的驱动因素,结果显示(表 6)不同的驱动因子对于碳储量变化的解释存在显著差异,碳储量变化受到经济、社会、自然等多方面因素影响。各自变量对碳储量变化的解释力大小依次为土地利用(0.728)>年均 NDVI(0.251)>高程(0.021 5)>坡度(0.020)>年均降水(0.011)>年均气温(0.010)>年均人口(0.007)>人类活动强度(0.004)>坡向(0.003),各因子显著性检验指数均低于 0.05,因子探测结果有效。其中土地利用的解释力在 70%以上,是碳储量变化的主导因素。其次是年均 NDVI,其解释力在 20%以上,是碳储量变化的重要影响因素。其余因子的解释力不显著,对碳储量变化的影响程度较小。

表 6 鄱阳湖地区碳储量空间分异驱动因子探测结果

Table 6 Detection results of driving factors of carbon storage spatial differentiation in Poyang Lake Region during 2000—2020

驱动因子	自变量	$q$ 统计值	$p$ 值	排序
土地利用	$x_1$	0.728 391	0.000 0	1
年均 NDVI	$x_2$	0.251 132	0.000 0	2
人类活动强度	$x_3$	0.003 502	0.008 2	8
高程	$x_4$	0.021 522	0.004 1	3
坡度	$x_5$	0.020 444	0.004 8	4
坡向	$x_6$	0.003 358	0.002 7	9
年均人口	$x_7$	0.007 755	0.009 4	7
年均气温	$x_8$	0.010 347	0.000 67	6
年均降水	$x_9$	0.010 542	0.001 6	5

2.2.2 交互探测 鄱阳湖地区典型湿地碳储量驱动因子的交互探测结果(图 5)显示,任意两个因子叠加

产生的交互作用均大于单个因子的影响,即碳储量空间转移是多种因子相互作用产生的综合效应。其中年均 NDVI 与土地利用、人类活动强度、高程、坡度、坡向、年均人口、年均气温、年均降水的交互作用呈现双因子增强,其余两个因子间均呈现非线性增强的交互作用结果。其中,主导驱动因子土地利用与其他因子交互作用均在 73%以上,两者交互对碳储量变化产生的影响最为显著。

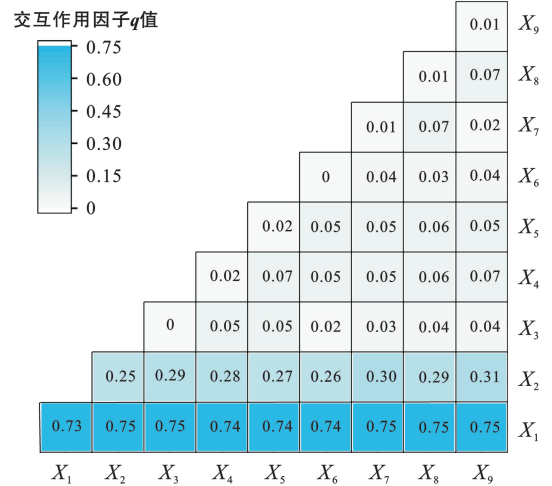


图 5 鄱阳湖地区碳储量空间分异驱动因子的交互作用探测结果

Fig.5 Interaction detection results of driving factors of carbon storage spatial differentiation in Poyang Lake region during 2000—2020

2.2.3 土地利用对碳储量变化的驱动力分析 地理探测器模型因子探测和交互探测单元的分析结果显示,土地利用在鄱阳湖地区典型湿地碳储量转移过程中发挥主导作用。本研究借助 InVEST 碳储计算模型,计算得到水域、建设用地、耕地、林地、沼泽草地、沼泽地这 6 种土地利用类型的碳储量(见表 7)。

表 7 2000—2020 年鄱阳湖地区典型湿地各类用地碳储量转移结果

Table 7 Carbon storage transfer Table of typical wetland land types in Poyang Lake region during 2000—2020

年份	碳储量/t					
	水域	建设用地	耕地	林地	沼泽草地	沼泽地
2000	61 117	6 787	246 466	284 534	1 407 414	413 337
2010	57 238	8 245	175 480	318 445	1 463 266	459 554
2020	60 718	13 288	259 081	343 001	1 335 025	448 768

其中,碳储量最高的用地类型是沼泽草地,2000,2010,2020 年鄱阳湖地区典型湿地范围内沼泽草地碳储量分别  $1.41 \times 10^6$ ,  $1.46 \times 10^6$ ,  $1.34 \times 10^6$  t,占同年研究区碳储总量的 58.17%,58.95%,54.27%,是该区域最为重要的碳库;沼泽地、林地、耕地的碳储量相对较少,三者与同年研究区碳储总量的比例均在 10%~20%之间,但三者的变化趋势有较明显的区

别,沼泽地的碳储量呈现“先增后减”,耕地碳储量呈现“先减后增”,林地呈现递增趋势,3 种类型用地是研究区较为重要的碳库;建设用地和水域的碳储量最少,与同年研究区碳储总量的比例均在 0%~3%范围内,对于鄱阳湖地区典型湿地固碳能力的贡献度较低。本研究发现,沼泽草地、沼泽地、林地、耕地是研究区的重要碳库,对鄱阳湖地区典型湿地碳储量转移

的贡献度依次降低。结合土地利用变化情况分析,碳密度较高的沼泽草地出现退化以及碳密度较低的建设用地面积增加,是研究区碳储总量变化的主要影响因素。

### 2.3 自然发展情景和生态保护情景下的碳储量预测

本文探究生态保护政策对碳储量变化的影响,分别预测了鄱阳湖地区典型湿地2030年自然发展情景( $Q_1$ )和生态保护情景( $Q_2$ )下的碳储量。研究结果显示,自然发展情景( $Q_1$ )下的鄱阳湖地区典型湿地

2030年碳储量为 $202.18 \times 10^4$  t,相较于2020年碳储量下降了 $4.38 \times 10^5$  t;生态保护情景( $Q_2$ )下鄱阳湖地区典型湿地碳储量为 $2.43 \times 10^6$  t,相较于2020年碳储量下降了 $2.67 \times 10^4$  t。在空间格局上,两种情景的碳储量分布均呈现“中部、东北部碳储量较高”的特征。相较于自然发展情景下2030年的碳储量,生态保护情景下碳储量略高,且分布较为集中,反映了相较于自然发展情景模式,生态保护情境更有利于碳储量增加(图6)。

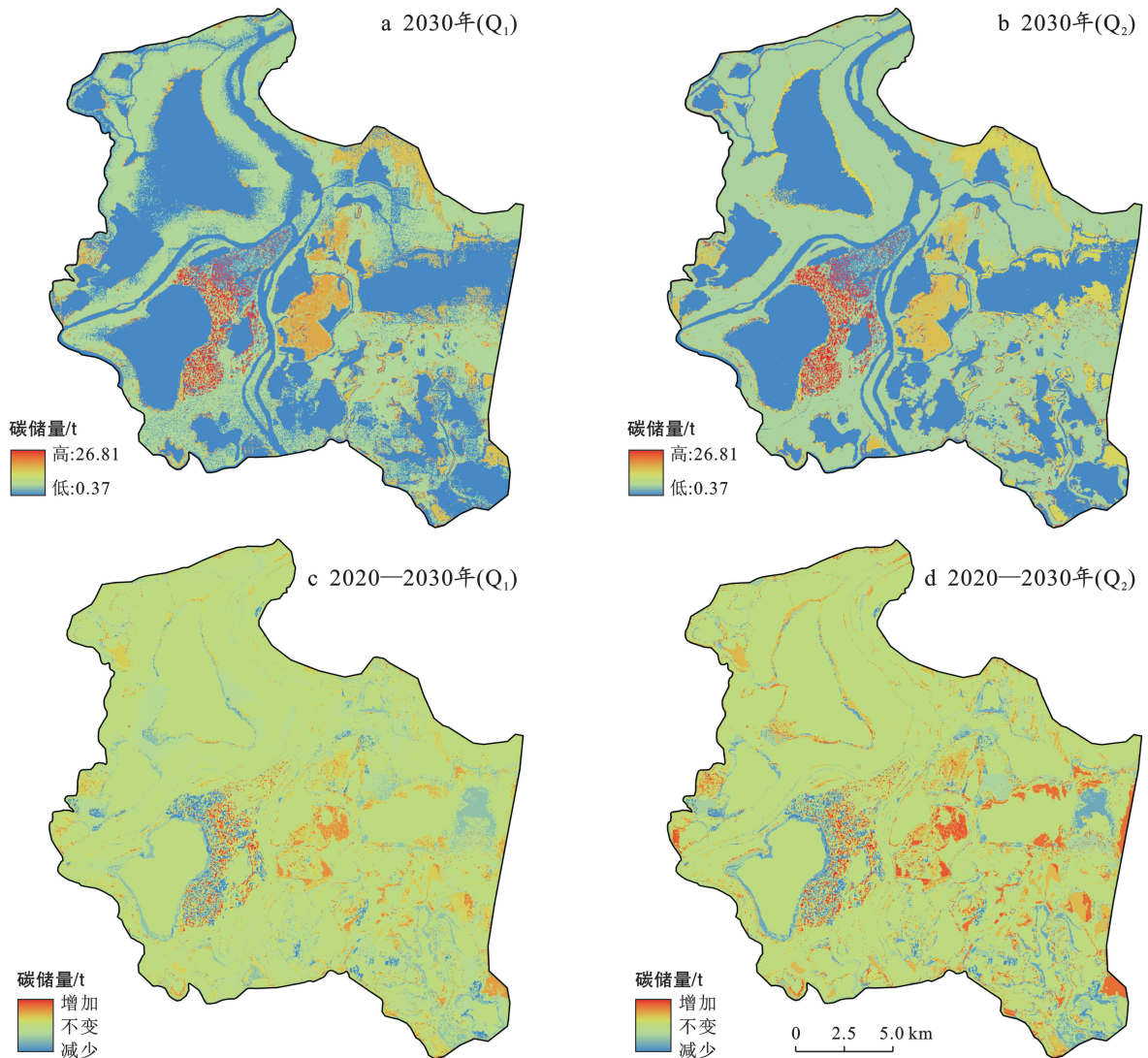


图6 自然发展情景( $Q_1$ )和生态保护情景( $Q_2$ )下的2030年鄱阳湖地区典型湿地碳储量空间分布及变化

Fig.6 Spatial distribution and change of carbon storage in 2030 under natural development scenario ( $Q_1$ ) and ecological protection scenario ( $Q_2$ ) in Poyang Lake region

两种情境下2020—2030年鄱阳湖地区典型湿地碳储量变化情况存在差异。自然发展情景下( $Q_1$ )碳储量减少区域的面积多集中在典型湿地的环湖沿岸沼泽地、东南部沼泽草地、中西部林地、北部沼泽草地,碳储量减少的区域面积较大,呈现散落分布的特征;生态保护( $Q_2$ )情景下碳储量较少的区域多集中

在环湖沿岸沼泽地、东南部沼泽草地、中西部林地,北部沼泽草地碳储量保持相对稳定,且集中成片,分布较为集中。两种情景下,碳储量增加区域在时空变化特征上存在异同。相同的是,碳储量增加的区域都分布在研究区的中部、东部及东南部;不同的是,生态保护情境( $Q_2$ )下的碳储量增加区域分布相对集中,呈



现区域片状分布,相较于自然发展情景,生态保护情景下碳储量增加的数量和速率也相对较高。

## 3 讨论

### 3.1 湿地生态系统碳储量转移的影响因素

现有研究认为湿地生态系统碳储量转移受到地理因素<sup>[26]</sup>、气候环境因素<sup>[27]</sup>、人类活动等<sup>[28]</sup>影响。地理因素与气候条件通过影响土壤固碳和地下生物分解,对区域碳储量产生影响。土壤有机质是碳储量的先天来源<sup>[29]</sup>,坡度、坡向、高程等地理因素通过影响土壤母质的结构特征<sup>[30]</sup>,影响了土壤有机质的碳储能力;气温、降水等气候因素通过影响地表植被类型和其生产能力<sup>[31]</sup>,对地表植被的固碳能力产生影响;同时,气候条件影响区域的土壤水热条件和微生物活性<sup>[32]</sup>,进而影响了微生物的转化与分解,是区域碳储量变化的重要影响因素。本研究在分析碳储量变化驱动力过程中发现:在以沼泽湿地为主的生态环境中,气候与地形条件对碳储量的解释力较低。本文选择地区年均降水量作为气候驱动因素的主要指标,研究区 2000—2020 年其变化幅度相对较小,对碳储量变化的响应作用较不明显。结合湿地生态系统功能的相关研究<sup>[33]</sup>,鄱阳湖地区沼泽湿地水分通过蒸发作用会以降水形式回到周围地区,具有调节区域小气候的作用,削弱了该区域气候因素对碳储量的影响力度。另外,鄱阳湖地区高程与坡度变化不明显,无法形成较强的解释力。

人类活动也是影响土壤碳储量的主要因素之一,包括退耕还林<sup>[34]</sup>、围湖造田<sup>[35]</sup>、过度放牧<sup>[36]</sup>、湿地围垦等<sup>[37]</sup>一系列改变土地利用方式的人为手段。土地利用方式改变直接影响植被覆盖、土壤有机质、土壤结构,对土壤固碳能力、植被固碳能力和微生物分解转化有机质能力产生直接影响。本研究发现土地利用是鄱阳湖地区典型湿地碳储量转移的主导因素,其中草地是最主要的碳库,碳储量对草地退化有着明显的响应机制。本研究结合实地调查情况,分析认为草地开垦等土地利用方式改变了原有生态系统物质循环,影响有机碳输入来源和转化速率,造成土壤有机质含量下降和地表植被覆盖度降低,从而导致区域碳储能力下降。

### 3.2 碳储量对不同发展情景的响应机制

本研究基于 2000—2020 年土地利用变化趋势,使用 GeoSOS-FLUS 模型对鄱阳湖地区典型湿地 2030 年土地利用状况进行多情景预测,在模型模拟过程中选取 10 个驱动因素,借助神经网络算法(ANN),经过多次迭代测试获取较为准确的模拟参

数,以提高模型预测精度。但土地利用变化的实际情况较为复杂,仍有部分要素(如土壤侵蚀和植被覆盖因素)未考虑,今后将进一步研究。在土地利用情景预测的基础上,分别估算了 2030 年鄱阳湖地区典型湿地自然发展情景和生态保护情景下的碳储量变化,研究结果显示不同发展情景下的碳储量变化幅度存在明显差异。自然发展情景下,碳储量保持下降趋势,2030 年自然发展情景下的碳储量预测值为  $2.02 \times 10^6$  t,相较于 2020 年下降了 17.81%,下降幅度较为明显。生态保护情景下,碳储量存在小幅度下降,2030 年生态保护情景下的碳储量预测值为  $2.43 \times 10^6$  t,相较于 2020 年下降了 1.09%,下降速度较慢。研究区土地利用结构基于 2000—2020 年变化规律继续演化,用地类型交错分布,沼泽草地不断退化,建设用地持续扩张,导致碳储量持续下降。生态保护情景下,强化用地管控,加强沼泽草地资源保护,一定程度上促使其他类型土地向沼泽草地转化,提高了区域生态环境质量,保障鄱阳湖地区典型湿地的固碳能力。同时,限制了建设用地的无序扩张,对建设用地占用沼泽草地、耕地、林地的行为严格把控,在确保生产、生态空间得到有效保护的前提下,合理安排生活空间,构建“生产、生态、生活”良性发展的空间格局。生态保护情景下,碳储量减少区域比例降低,环湖沿岸沼泽地、东南部沼泽草地、中西部林地、北部沼泽草地退化趋势得到有效控制。生态保护情景下,碳储量增加区域比例增加,研究区中部建设用地面积得到控制、东部沼泽地及东南部沼泽草地面积缓慢增加。碳储量减少区紧缩和碳储量增加区扩张同步演变,有效控制了鄱阳湖地区典型湿地碳储量急剧下降的趋势,区域固碳能力逐步得到恢复。

## 4 结论

本文使用 InVEST 和 GeoSOS-FLUS 模型,研究了鄱阳湖地区典型湿地 2000—2030 年的碳储量时空变化特征;通过构建林地、沼泽草地、水域的转入转出限制,设定了自然发展情景和生态保护情景,分析了不同情景对碳储量转移的影响;并结合土地利用变化状况展开驱动力分析,得出以下结论:

(1) 鄱阳湖地区典型湿地碳储量集中分布于研究区的中西部、东北部、中部和东部地区,2000,2010,2020 年碳储总量分别为  $2.42 \times 10^6$ ,  $2.48 \times 10^6$ ,  $2.46 \times 10^6$  t。2000—2020 年,呈现“先增后降”的时间变化特征,保持“中西部、东北、中部、东部较高,北部、西部、西南部较低”的空间分布特征。研究表明,鄱阳湖地区典型湿地的碳储量总值整体较高,但受到自然和人为因素的干

扰湿地的固碳能力存在明显波动并出现下降趋势。

(2) 鄱阳湖地区典型湿地碳储量与土地利用之间存在较强的正向关联性。研究显示,沼泽草地、沼泽地、林地、耕地碳储量占总碳储量的比值依次降低,是区域最为重要的碳库。结合土地利用转移和碳储量变化展开分析,沼泽草地面积减少,建设用地面积增加是导致区域碳储量增加区面积逐渐减少的主要原因。

(3) 合理的生态保护政策可以有效地保障湿地的固碳能力。自然发展情景下,预测出区域2030年碳储量为 $2.02 \times 10^6$  t;生态保护情景下,预测出区域2030年碳储量为 $2.43 \times 10^6$  t。合理地限制林地、沼泽草地、水域的转出,减少生态用地的退化,可以有效地遏制湿地碳储量的下降趋势,增强鄱阳湖地区典型湿地的固碳能力。

#### [参 考 文 献]

- [1] Rubio-Loyola J, Paul-Fils W R S. Applied machine learning in industry 4.0: Case-study research in predictive models for black carbon emissions [J]. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2022,22(10):3947.
- [2] 刘泽森,黄贤金,卢学鹤,等.共享社会经济路径下中国碳中和路径预测[J].*地理学报*,2022,77(9):2189-2201.
- [3] Meena S K, Dwivedi B S, Meena M C, et al. Effect of nutrient management on soil carbon quantities, qualities, and stock under rice-wheat production system [J]. *Agriculture*, 2022,12(11):1822.
- [4] Tai Haoyu, Xia Yonghua, Yan Min, et al. Construction of artificial forest point clouds by laser SLAM technology and estimation of carbon storage [J]. *Applied Sciences*, 2022,12(21):10838.
- [5] Walter K, Don A, Tiemeyer B, et al. Determining soil bulk density for carbon stock calculations: A systematic method comparison [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016,80(3):579-591.
- [6] 戴子熠,廖丽蓉,梁嘉慧,等.1988—2018年广西北海红树林蓝碳储量变化分析[J].*海洋环境科学*,2022,41(1):8-15.
- [7] 王祖华,刘红梅,关庆伟,等.南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011,35(4):18-22.
- [8] 邓喆,丁文广,蒲晓婷,等.基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].*水土保持通报*,2022,42(3):324-334.
- [9] Nave L E, Domke G M, Hofmeister K L, et al. Reforestation can sequester two petagrams of carbon in US topsoils in a century [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018,115(11):2776-2781.
- [10] 纪昌品,张晓平.鄱阳湖不同湿地植物群落光合碳储量及分配[J].*水土保持研究*,2022,29(3):121-127.
- [11] Gemitzi A, Albarakat R, Kratouna F, et al. Land cover and vegetation carbon stock changes in Greece: A 29-year assessment based on CORINE and Landsat land cover data [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,786:147408.
- [12] Aguilar F X, Sudekum H, McGarvey R, et al. Impacts of the US southeast wood pellet industry on local forest carbon stocks [J]. *Scientific Reports*, 2022,12(1):19449.
- [13] 李甜甜.鄱阳湖生态经济区农田植被碳储量与碳密度分析[J].*时代农机*,2016,43(3):145-146.
- [14] 张琛悦,赵霞,辛玉春,等.青海省草地生态系统碳储量及其分布特征[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022,58(2):286-292.
- [15] Hu Bisong, Zou Lin, Qi Shuhua, et al. Evaluating the vulnerability of Siberian crane habitats and the influences of water level intervals in Poyang Lake wetland, China [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(12):2774.
- [16] Xia Yang, Fang Chaoyang, Lin Hui, et al. Spatiotemporal evolution of wetland eco-hydrological connectivity in the Poyang Lake area based on long time-series remote sensing images [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23):4812.
- [17] He Linqian, Liu Qian, Wang Decai, et al. Estimation of soil organic carbon storage based on digital soil mapping technique [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2):591-600.
- [18] 张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J].*中国环境科学*,2022,42(6):2799-2809.
- [19] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].*中国科学(D辑:地球科学)*,2003,33(1):72-80.
- [20] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等.江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J].*资源科学*,2011,33(10):1932-1939.
- [21] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].*地理学报*,2019,74(3):446-459.
- [22] Kumar A, Kumar M. Estimation of biomass and soil carbon stock in the hydroelectric catchment of India and its implementation to climate change [J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2022,41(7):642-657.
- [23] 吴振华,俞钦平,王亚蓓,等.景区扩容影响下的桂林市土地利用情景模拟与预测[J].*水土保持通报*,2022,42(5):131-139.
- [24] Das Milon, Chandra Nath Panna, Reang Demsai, et al. Tree diversity and the improved estimate of carbon storage for traditional agroforestry systems in North East India [J]. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 2020,8(4):154-159.

- [25] Dai Erfu, Wang Yahui. Attribution analysis for water yield service based on the geographical detector method: A case study of the Hengduan Mountain region [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020,30(6):1005-1020.
- [26] Taran M, Ahirwal J, Deb S, et al. Variability of carbon stored in inland freshwater wetland in Northeast India [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,859:160384.
- [27] Griffiths L N, Mitsch W J. Estimating the effects of a hurricane on carbon storage in mangrove wetlands in Southwest Florida [J]. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2021,10(8):1749.
- [28] Aitali R, Snoussi M, Kolker A S, et al. Effects of land use/land cover changes on carbon storage in North African coastal wetlands [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022,10(3):364.
- [29] Slessarev E W, Chadwick O A, Sokol N W, et al. Rock weathering controls the potential for soil carbon storage at a continental scale [J]. *Biogeochemistry*, 2022,157(1):1-13.
- [30] Bacar T S, Cheng Yiben, Wang Yunqi, et al. The effect of vegetation restoration in soil organic carbon storage [J]. *Open Journal of Soil Science*, 2022,12(9):427-445.
- [31] Schweizer S A, Mueller C W, Höschen C, et al. The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence [J]. *Biogeochemistry*, 2021,156(3):401-420.
- [32] 申霞,王鹏,王为攀,等.滨海盐沼净碳汇能力研究方法综述[J].*生态学杂志*,2022,41(4):792-803.
- [33] 熊彩云,张学玲,肖复明,等.鄱阳湖湿地生态系统服务功能变化及其对策分析[J].*人民长江*,2011,42(9):28-32.
- [34] 李若玮,叶冲冲,王毅,等.基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J].*草地学报*,2021,29(S1):43-51.
- [35] 徐凯健,谢锦升,曾宏达,等.生态恢复条件下典型红壤侵蚀区马尾松林碳储量时空变化与驱动力分析[J].*中国水土保持科学*,2016,14(1):89-96.
- [36] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测:以广东省为例[J].*中国环境科学*,2022,42(10):4827-4839.
- [37] 邵壮,陈然,赵晶,等.基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J].*生态学报*,2022,42(23):9456-9469.

(上接第 184 页)

- [5] 李龙,吴大放,王芳,等.中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究:以佛山市为例[J].*生态学报*,2020,40(24):9023-9036.
- [6] 薛建春,曹力博.2001—2020 年包头市土地利用转型演变特征与生态安全影响[J].*水土保持通报*,2022,42(1):273-282.
- [7] 陕永杰,魏绍康,苗圆,等.基于 PSR-TOPSIS 模型的“晋陕豫黄河金三角”地区土地生态安全评价[J].*生态经济*,2022,38(7):205-211.
- [8] Chai Ji, Wang Zhanqi, Yu Chen. Analysis for the interaction relationship between urbanization and ecological security: A case study in Wuhan City circle of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021,18(24):13187.
- [9] 刘志有,曲秀武,魏冉,等.生态文明视角下的伊犁河谷绿洲土地生态安全评价及障碍因子诊断[J].*水土保持通报*,2022,42(1):137-143.
- [10] 赵书虹,白梦,阮梦枝,等.云南省旅游资源与生态安全协调发展的时空演化特征及障碍因子分析[J].*地理科学*,2021,41(3):493-503.
- [11] 王飞.广西兴边富民行动的实施效果评估:基于自然实验的面板数据分析[J].*广西社会科学*,2014(3):19-23.
- [12] 梁双陆,兰黎娜,杨孟禹.中国兴边富民行动促进边境地区经济增长了吗?:边境地区 136 个县的“准自然实验”分析[J].*广西民族研究*,2021(4):160-170.
- [13] 周民良.“一带一路”背景下创新体制机制推动兴边富民进程[J].*甘肃社会科学*,2016(1):67-71.
- [14] 萧子扬.兴边富民行动与乡村振兴战略的内在逻辑关系及有机衔接路径研究[J].*广西民族研究*,2020(2):129-138.
- [15] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].*自然资源学报*,2015,30(8):1243-1254.
- [16] 高长波,陈新庚,韦朝海,等.区域生态安全:概念及评价理论基础[J].*生态环境*,2006,15(1):169-174.
- [17] 芮亚玲,李巧云.基于改进 PSR 模型的洞庭湖区生态安全评价及主要影响因素分析[J].*农业现代化研究*,2021,42(1):132-141.
- [18] 陈俊歌,林树高.西南边境地区兴边富民进程与生态文明建设交互关系的时空格局[J].*生态经济*,2022,38(7):220-229.
- [19] 杨秀敏,耿静,徐游,等.基于 TOPSIS 模型的海南岛土地综合承载力时空变化及障碍度诊断[J].*生态学报*,2022,42(22):9324-9334.
- [20] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].*自然资源学报*,2021,36(3):793-810.
- [21] 杨亮洁,张小鸿,潘竟虎,等.成渝城市群城镇化与生态环境耦合协调及交互影响[J].*应用生态学报*,2021,32(3):993-1004.
- [22] 钟锦玲,周兴,李文辉.广西高质量发展与土地资源可持续利用的耦合协调性[J].*水土保持通报*,2021,41(3):247-257.