

上海浦东新区碳储量变化影响因素分析

刁梦妮¹, 韩震^{1,2*}, 杭君³

(1. 上海海洋大学海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海航天空间技术有限公司, 上海 201109)

摘要:采用 InVEST 模型估算浦东新区 2000 年、2010 年和 2020 年的碳储量, 基于地理探测器对碳储量变化的影响因素进行分析。结果表明, 研究期间浦东新区碳储量先增后减, 在空间上表现为东部增多、中部减少、西部不变; 土地利用程度是碳储量变化的主要影响因素, 土壤类型和年均降水量是重要影响因素, 双因子的交互影响力高于单因子; 当高程范围为 0 m ~ 7 m、坡度 > 10.13°、无坡向、土壤类型为滨海盐土、年均温度为 16.25 °C ~ 16.31 °C、年均降水量为 1 132.41 mm ~ 1 150.02 mm、土地利用程度为 200 ~ 268.24、人口密度为 1.76 万人/km² ~ 3.32 万人/km²、GDP 为 291 799.79 万元/km² ~ 644 331.46 万元/km² 时, 浦东新区的碳储量增长最高。

关键词:碳储量; InVEST 模型; 地理探测器; 影响因素; 浦东新区

中图分类号: X171.1 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2024)02-0074-05

Analysis of Influencing Factors of Carbon Storage Change in Pudong New Area of Shanghai

DIAO Mengni¹, HAN Zhen^{1,2*}, HANG Jun³

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Shanghai Engineering Research Center for Estuary Marine Mapping, Shanghai 201306, China;
3. Shanghai Aerospace Technology Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

Abstract: The InVEST model was used to estimate carbon storage in Pudong New Area in 2000, 2010, and 2020. The influencing factors on carbon storage changes were analyzed by geographic detectors. The results indicated that during the study period, carbon storage in Pudong New Area increased first and then decreased. In terms of spatial distribution, carbon storage increased in the east, decreased in the middle and remained unchanged in the west. The degree of land use was the main influencing factor of carbon storage change. Soil type and mean annual precipitation were the important influencing factors. The interaction influence of two factors was higher than that of one. When the elevation range was 0 m ~ 7 m, the slope was greater than 10.13°, there was no slope direction, the soil type was coastal saline soil, the mean annual temperature was 16.25 °C ~ 16.31 °C, the mean annual precipitation was 1 132.41 mm ~ 1 150.02 mm, the land use degree was 200 ~ 268.24, the population density was 17 600 people/km² ~ 33 200 people/km², and the GDP was 2 917 997 900 yuan/km² ~ 6 443 314 600 yuan/km², the carbon storage in Pudong New Area increased the most.

Key words: Carbon storage; InVEST model; Geodetector; Influencing factors; Pudong New Area

碳储量及其变化是碳库功能的一个重要指标, 及时有效地评估碳储量, 分析碳储量变化, 对区域碳循环与碳源/汇研究、减缓气候变暖、维持区域可持续发展和实现我国“双碳”目标具有一定意义。碳储量及其变化受到自然环境和人类活动多方面

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2024-02-28

基金项目: 上海市海洋局科研专项基金资助项目(沪海科 2019-03)

作者简介: 刁梦妮(1997—), 女, 河南商丘人, 硕士, 研究方向为海岸带遥感。

* 通信作者: 韩震 E-mail: zhhan@shou.edu.cn

的影响^[1-3]。土地利用变化和城市化是碳储量变化的重要影响因素,有学者通过不同土地利用类型之间的面积变化及转移计算碳储量的增益和损失,分析土地利用变化和城市化对碳储量变化的影响^[4-6],也有学者利用圈层同心圆和线性拟合方法量化城市化对碳储量变化的影响^[7]。有研究综合考虑自然环境和人类活动对碳储量及其变化的影响^[8-9],也有研究探讨自然环境和人类活动对碳储量变化的交互作用^[10-11]。

浦东新区近年来经济飞速发展,在自然环境和人类活动的多种因素影响下,其碳储量正在发生着显著的变化,而当前关于海岸带城市碳储量及其变化的研究则多集中在江苏^[12]、山东^[13]及海南^[14]等地,上海市也缺少针对浦东新区的研究。今基于 2000—2020 年间多时相遥感影像数据,使用 InVEST 模型对研究区的碳储量进行估算,分析其时空变化特征,并利用地理探测器对研究区碳储量变化的影响因素进行分析,以期对研究区碳汇能力提升提供支撑。

1 研究区概况与数据来源

上海市浦东新区 (E121°27'27" ~ E121°48'43", N30°53'20" ~ N31°23'22") 西靠黄浦江,东临长江入海口。浦东新区属于典型的东亚季风盛行区,冬季盛行西北季风,夏季盛行东南季风,年均气温为 16.3℃,年均降水量为 1 244.4 mm。

研究采用的数据主要包括土地利用数据、自然环境和人类活动数据。土地利用数据由 2000 年、2010 年、2020 年 3 期 Landsat 遥感影像监督分类得到,分辨率为 30 m, Kappa 系数均 > 0.92, 遥感影像数据在美国地质勘探局网站下载。土地利用分类为建设用地、耕地、草地、水域、未利用地、林地和填海用地。自然环境数据选取地形数据(包括高程、坡度和坡向),土壤类型和气象数据,分辨率为 1 000 m,来自中国科学院资源环境科学与数据中心。人类活动数据选取土地利用程度、人口密度和 GDP,分辨率为 1 000 m。土地利用程度表示人类对土地开发利用的水平 and 程度^[15],在土地利用的基础之上,参考文献[15-16]的方法和参数设置,计算土地利用程度综合指数。除土壤类型之外,自然环境和人类活动的所有数据均为数值型数据。由于地理探测器只能以类型数据为自变量,故要对数值型数据进行离散化处理。坡向以 ArcGIS

10.7 中坡向分析的结果进行分区,其他数据的离散化均采用自然断点法^[17]划分区间。

2 研究方法

利用 InVEST 模型,基于土地利用数据和碳密度数据,对研究区 2000 年、2010 年和 2020 年的碳储量进行估算,分析其碳储量变化,并利用地理探测器模型分析研究区自然环境和人类活动对碳储量变化的影响程度。

2.1 碳储量计算方法

InVEST 模型的 Carbon 模块将生态系统中的碳储量分为 4 个部分:地上碳库、地下碳库、死亡碳库和土壤碳库。由于死亡碳密度获取难度较大,暂不考虑此类碳库,只考虑地上碳库、地下碳库和土壤碳库。基于土地利用类型,结合各地类的面积和碳密度,可对区域的碳储量进行计算,见式(1)。

$$C_{total} = \sum_i^n (DC_{ai} + DC_{bi} + DC_{si}) \times A_i \quad (1)$$

式中: C_{total} 为区域总的碳储量; DC_{ai} 为第 i 类土地利用的地上碳密度; DC_{bi} 为第 i 类土地利用的地下碳密度; DC_{si} 为第 i 类土地利用的土壤碳密度; A_i 为第 i 类土地利用的面积; n 为土地利用类型数。

碳密度是利用 InVEST 模型准确测算区域碳储量的重要参数^[18]。各地类的碳密度主要参考已经发表的文献资料^[19-22],土壤碳密度、林地地上及地下碳密度为上海市的实测值,其他碳密度主要选取相邻地区的实测值。研究所采用的碳密度见表 1。

表 1 碳密度 g/hm^2
Table 1 Carbon density g/hm^2

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	0 cm ~ 20 cm 土壤碳密度
建设用地	2.5×10^6	4.51×10^6	3.32×10^7
耕地	1.31×10^7	2.49×10^6	3.44×10^7
草地	2.1×10^6	1.09×10^7	3.43×10^7
水域	0.6×10^6	0	1.72×10^7
未利用地	1.3×10^6	6.5×10^6	3.21×10^7
林地	4.78×10^7	9.94×10^6	3.47×10^7
填海用地	0	0	0

2.2 地理探测器

地理探测器是王劲峰等^[23-24]提出的用于探测空间分异性及其背后驱动力的一组统计学方法。今采用其中 3 种探测器(因子探测器、交互探测器

和风险探测器)对研究区碳储量变化的影响因子进行探测。

因子探测器:探测因子在多大程度上解释了因变量的空间分异,能够探测碳储量变化的因子贡献率,贡献率使用 q 值度量^[23],表达式见式(2)。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: q 为度量碳储量变化时空分布的指标,取值范围为 $0 \sim 1$; L 为总层数; N_h 、 N 分别为层 h 、全区的样本数; σ_h^2 、 σ^2 分别为层 h 、全区的样本方差。

交互探测器:探测因子在两两交互作用下对因变量解释力的变化情况,可以探测因子在交互作用下是否会增强或者减弱对碳储量变化的影响。通过对比两个因子交互的 q 值 $q(X1 \cap X2)$ 与两个单因子 q 值 $q(X1)$ 、 $q(X2)$ 的最小值、最大值和相加值之间的大小关系,来判断双因子交互的类型。当 $q(X1 \cap X2) < \text{Min}[q(X1), q(X2)]$ 时,为非线性减弱;当 $\text{Min}[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \text{Max}[q(X1), q(X2)]$ 时,为单因子非线性减弱;当 $q(X1 \cap X2) > \text{Max}[q(X1), q(X2)]$ 时,为双因子增强;当 $q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$ 时,为独立;当 $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$ 时,为非线性增强。

风险探测器:计算因子不同子区间的属性均值,并判断两个子区间的属性均值是否有显著差异,可用于评价各因子不同区间对碳储量变化的适宜性程度。

3 结果与讨论

3.1 碳储量变化分析

研究区 2000—2020 年的碳储量总体上呈现出先增加后减少的趋势。2000 年、2010 年、2020 年的碳储量分别为 5.95×10^6 Mg、 6.28×10^6 Mg、 6.19×10^6 Mg。2000 年研究区中部碳储量较高,西部较少,东部最少;2010 年,研究区东部的碳储量相对更高一些,西部和中部的碳储量稍低,碳储量的最高值出现在西部;2020 年研究区域的东部碳储量较西部和中部的碳储量高一些,碳储量的最高值也是在西部。使用 ArcGIS 10.7 软件中的栅格计算器工具将 2020 年的碳储量栅格与 2000 年的碳储量栅格做差,得到 2000—2020 年碳储量变化情况。为明确研究区 2000—2020 年碳储量变化情

况,对 2000—2020 年碳储量变化进行分类,碳储量变化值 < 0 即减少,碳储量变化值为 0 即不变,碳储量变化值 > 0 即增加,结果见图 1。由图 1 可见,2000—2020 年研究区碳储量增加的区域面积为 233.99 km^2 ,主要集中在东部及西部的部分地区,在中部有零星的分布;碳储量保持不变的区域面积为 706.61 km^2 ,在中、西部都有分布,西部比较集中;碳储量减少的区域面积为 487.45 km^2 ,主要分布在中部,比较分散。

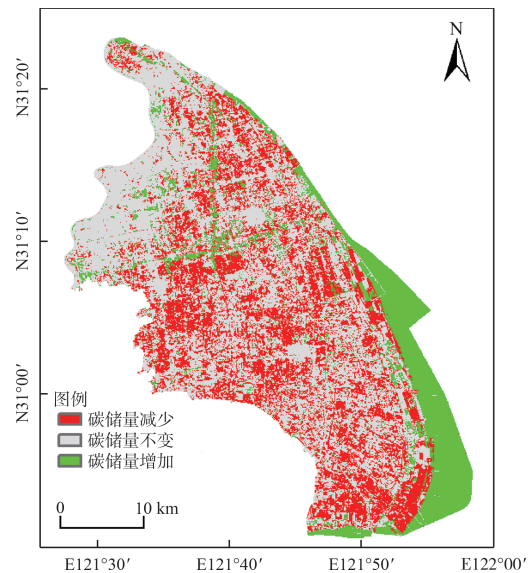


图 1 2000—2020 年碳储量变化类型

Fig. 1 Change types of carbon storage from 2000 to 2020

3.2 碳储量变化影响因素分析

采用 $1\ 000 \text{ m} \times 1\ 000 \text{ m}$ 的等距离采样点,提取碳储量变化值与影响因子分区,分析各因子对碳储量变化的影响,对于个别因子中缺少采样点的分区,生成随机点进行补充,以上操作在 ArcGIS 10.7 软件中实现。

3.2.1 单因子对碳储量变化的影响

根据因子探测结果,8 个因子对碳储量变化有显著影响(显著性水平 $P < 0.001$),影响力从大到小分别为土地利用程度、土壤类型、年均降水量、年均温度、坡向、坡度、GDP 和高程。土地利用程度(0.247)和土壤类型(0.212)对碳储量变化的影响力在 20%以上,影响力较强;年均降水量(0.178)对碳储量变化的影响力在 10%以上,影响力稍弱;年均温度(0.068)、坡向(0.040)、坡度(0.017)、GDP(0.016)和高程(0.013)对碳储量变化的影响力在

10%以下,影响力较弱,尤其是高程,对碳储量变化的影响力最弱。土地利用程度是研究区域碳储量变化的主要影响因子,其次是土壤类型、年均降水量,人口密度(显著性水平 $P < 0.05$)对碳储量变化的影响力并不特别显著。

3.2.2 双因子对碳储量变化的交互影响

双因子探测通过计算两个因子交互的 q 值,得到因子交互作用下对碳储量变化的影响力。双因子交互探测的 q 值见图 2。

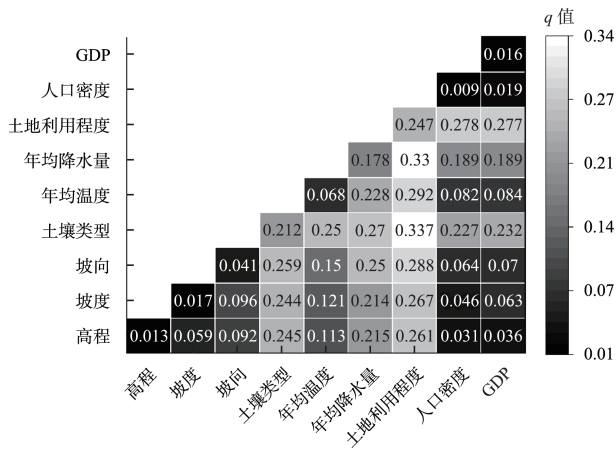


图 2 交互探测结果

Fig. 2 Results of interactive detection

由图 2 可见,各因子和其他因子交互的 q 值比单因子的 q 值更大,说明单因子在两两交互作用下对碳储量变化的影响力增强。土地利用程度与土壤类型、土地利用程度与年均降水量在交互作用下对碳储量变化的影响力提升到 30% 以上,土地利用程度、土壤类型和年均降水量是影响碳储量变化

的重要因素。在所有的因子交互中,GDP 和人口密度与除土地利用程度、土壤类型和年均降水量之外的其他因子之间的交互影响力均在 10% 以下,说明研究区域人类活动弱于自然环境对碳储量变化的影响。研究区双因子交互类型为非线性增强和双因子增强。

3.2.3 碳储量变化因子适宜性范围

风险探测计算影响因子不同分区的碳储量变化均值,并判断每个分区的碳储量变化均值差异性是否显著,结果见表 2。由表 2 可知,在高程分区为 1 时,对应的高程范围为 0 m ~ 7 m,碳储量变化均值最高,为 0.406 Mg。在坡度分区为 5 时,对应坡度 $> 10.13^\circ$,碳储量均值最高,为 0.975 Mg。研究区的碳储量变化均值与坡向分区没有明显的关系,在坡向分区为 1 时,对应坡向的区间为无坡向,达到最高值 1.269 Mg。土壤类型分区中,碳储量均值最高的是分区 4,为滨海盐土,碳储量变化均值为 1.394 Mg;碳储量变化均值在年均气温分区为 5 时最高,对应平均气温范围为 $16.25^\circ\text{C} \sim 16.31^\circ\text{C}$,碳储量变化均值为 1.203 Mg,碳储量变化均值呈现出随着年均温度增高而增加的趋势。碳储量变化均值随着年均降水量的增高而降低,在年均降水量分区为 1 时最高,对应年均降水量的范围为 1132.41 mm ~ 1150.02 mm,碳储量变化均值为 1.861 Mg。碳储量变化均值随着土地利用程度的提高逐渐降低,最高值在土地利用程度的第 1 个分区,对应土地利用程度范围为 200 ~ 268.24,碳储量变化均值为 2.414 Mg。碳储量变化均值最高值出现在人口密度的第 5 分区和 GDP 的第 4 分区,碳储量变化均值分别为 1.01 Mg 和 0.673 Mg。

表 2 不同因子分区与碳储量变化均值

Table 2 Different factor partitions and mean change of carbon storage

因子	各分区碳储量变化均值								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
高程	0.406	0.019	0.128	0.044	0.347				
坡度	0.150	0.058	0.704	0	0.975				
坡向	1.269	-0.060	-0.065	0.203	0.023	0.194	0.081	-0.008	0.201
土壤类型	-0.295	0.017	0.793	1.394	-0.227	0	0.098		
年均气温	0.016	-0.055	-0.022	0.312	1.203				
年均降水量	1.861	0.405	-0.087	-0.308	-0.076				
土地利用程度	2.414	1.853	0.172	-0.151	-0.266				
人口密度	0.293	0.052	-0.037	0	1.010				
GDP	0.342	0.019	-0.091	0.673	0				

4 结语

2000年、2010年和2020年浦东新区的碳储量整体上呈现出先增加后减少的趋势,在空间上表现为东部增多、中部减少、西部保持不变。因子探测的结果表明,土地利用程度是浦东新区碳储量变化的主要影响因素,土壤类型和年均降水量是重要影响因素。根据风险探测的结果,碳储量变化均值随着土地利用程度的提高逐渐降低;当土壤类型为滨海盐土时,碳储量增长最多;碳储量变化均值随着年均降水量的增高而降低。研究采用已有研究的碳密度参数分析快速发展的海岸带生态系统的碳储量变化,具有一定的不确定性,且数值型影响因子离散化方法单一。今后的研究中须提高碳储量的测算精度,并探讨影响因子采用不同离散化方法对碳储量变化的影响。

[参考文献]

- [1] 张萌萌,刘梦云,常庆瑞,等. 1985—2015年陕西黄土台塬表层土壤有机碳空间分布[J]. 自然资源学报,2018,33(11):2032-2045.
- [2] WARD R D. Carbon sequestration and storage in Norwegian Arctic coastal wetlands: Impacts of climate change[J]. Science of the Total Environment,2020,748:141343.
- [3] 郭春梅,卞晨航,孟冲,等. 天津生态城低碳体验中心碳排放及减碳潜力研究[J]. 环境监测管理与技术,2022,34(2):7-11.
- [4] 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.
- [5] 鱼冠雄,海新权,杨鑫. 泾河流域生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 环境监测管理与技术,2023,35(5):33-38.
- [6] RAFAEL H G, ARTURO R L, CLEMENTINA G. Assessing and modeling the impact of land use and changes in land cover related to carbon storage in a western basin in Mexico[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment,2019,13:318-327.
- [7] 安佑志,张庆军. 快速城市化对上海地区植被和土壤碳储量时空变化的影响研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(8):152-155.
- [8] 马逸麟,鄢海满,彭晓玫,等. 江西省鄱阳湖及周边经济区土壤有机碳储量分布特征[J]. 岩矿测试,2014,33(2):246-255.
- [9] 刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
- [10] 王晓,于兵,李继红. 土地利用和土地覆被变化对土壤有机碳密度及碳储量变化的影响——以黑龙江省大庆市为例[J]. 东北林业大学学报,2021,49(11):76-83.
- [11] JULIA S, ERICH T, DAGMAR R, et al. Effects of land use and climate on carbon and nitrogen pool partitioning in European mountain grasslands[J]. Science of the Total Environment,2022,822:153380.
- [12] 张云倩,张晓祥,陈振杰,等. 基于InVEST模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究,2016,23(3):100-105.
- [13] 隋玉正,孙大鹏,李淑娟,等. 碳储存变化背景下东营市海岸带生态系统保护修复[J]. 生态学报,2021,41(20):8112-8123.
- [14] 段璇瑜,龚文峰,孙雨欣,等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. 水土保持通报,2022,42(5):301-311.
- [15] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报,1997,12(2):10-16.
- [16] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应[J]. 生态学报,2013,33(8):2565-2576.
- [17] 张若婧,陈跃红,张晓祥,等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. 地理与地理信息科学,2021,37(4):72-80.
- [18] 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.
- [19] 王丹妮. 基于上海市土地利用方式变化下的土壤有机碳储量核算研究[J]. 上海国土资源,2021,42(3):1-6.
- [20] 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.
- [21] 李瑾璞,夏少霞,于秀波,等. 基于InVEST模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(7):854-861.
- [22] 黄玫,季劲钧,曹明奎,等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报,2006,26(12):4156-4163.
- [23] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.
- [24] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science,2010,24(1):107-127.