

基于InVEST和GIS模型的广西北部湾沿海地区碳储量 时空演变研究

周姣娣^{1,2}, 鲁栋梁², 许玉萍³, 梁生康⁴, 黄 鹄²

(1.广西大学 海洋学院, 广西 南宁 530004; 2.北部湾大学 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室, 广西 钦州 535011; 3.北部湾大学 经济管理学院, 广西 钦州 535011; 4.中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 山东 青岛 266100)

摘要: 本文基于 InVEST 和 GIS 模型探究了 2000—2020 年广西北部湾沿海地区碳储量时空演变格局, 结果表明: (1) 2000—2020 年, 不同土地利用类型发生了显著变化, 耕地面积减少了 5.94%, 建设用地面积增长了 103.58%, 林地面积增长了 1.2%, 20 年间土地转移面积增长了 13.65%。(2) 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的碳储量分别为 21.66×10^6 t、 21.71×10^6 t、 21.77×10^6 t、 21.67×10^6 t、 21.75×10^6 t, 呈现波动增长趋势, 累计增长 9.22×10^4 t。碳储量的变化主要受到不同土地类型之间相互转换的影响, 而林地则是主要的碳库。(3) 从全局空间相关性可知, 5 个时期碳储量呈现出一定的空间趋同集聚现象; 根据局部空间相关性可知, 高-高集聚区域占研究区域面积的 27%~38%, 主要分布在防城港十万大山区和钦州五峰山周边, 低-低集聚区域占研究区域面积的 5.5%~8.9%, 主要分布于人口众多、建设用地面积大的钦州、北海、防城港主城区。该研究结果可以为落实国家“双碳”战略目标、测算现有的碳储量和碳汇量, 以及促进早日实现碳达峰和碳中和提供数据支撑。

关键词: InVEST 模型; 碳储量; 时空变化; 北部湾沿海地区

中图分类号: P74 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2024)05-0715-08

Study on carbon storage space-time evolution in the coastal area of Guangxi Beibu Gulf based on InVEST and GIS model

ZHOU Jiaodi^{1,2}, LU Dongliang², XU Yuping³, LIANG Shengkang⁴, HUANG Hu²

(1.School of Ocean Science, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Marine Environment Change and Disaster in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 3.College of Economics and Management, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 4.Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In the paper, based on InVEST and GIS models, we explore the spatial-temporal evolution pattern of carbon storage in the coastal area of Beibu Gulf in Guangxi from 2000 to 2020. The results show that: (1) During 2000-2020, the land use type will change dramatically, and the cultivated land area will decrease by 5.94%, Construction land area increased by 103.58%, the change of forest area was d relatively small, only

收稿日期: 2023-08-18, 修订日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41966002); 广西重点研发项目 (桂科 AB21076016); 广西自然科学基金项目 (2021GXNSFDA075004); 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室开放基金 (2020KF02)

作者简介: 周姣娣 (1989—), 湖南武冈人, 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事海岸带生态系统变化及碳储量空间转化研究, E-mail: Zhoujodie@bbgu.edu.cn

通信作者: 黄 鹄 (1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事海岸带环境演变的相关研究, E-mail: mrhuanghu@126.com

increasing by 1.2%. Over the past 20 years, 13.65% of the land has been transferred. (2) The carbon reserves in the study area in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020 were 21.66×10^6 t, 21.71×10^6 t, 21.77×10^6 t, 21.67×10^6 t and 21.75×10^6 t, respectively, showing a band growth trend. The total increase is 9.22×10^4 t. The main factor in the variation of carbon storage is the conversion between different land types, with forested land being the most important carbon store in the study area. (3) From the perspective of global spatial correlation, carbon storage in the five periods showed a certain spatial convergence and agglomeration phenomenon. From the local spatial correlation, it can be seen that high-high clustering areas account for 27% to 38% of the research area, mainly distributed in the 100000 Dashan area of Fangchenggang and the surrounding area of Wufeng mountain in Qinzhou. The low-low agglomeration area accounts for 5.5% to 8.9% of the research area, mainly distributed in the towns of Qinzhou, Beihai and Fangchenggang city, with large population and large construction land area. The results provide data support for the implementation of the national “dual carbon” strategy, the measurement of existing carbon stocks and carbon sinks, and the promotion of carbon peaking and carbon neutrality.

Key words: InVEST models; carbon storage; temporal and spatial variation; coastal area of Beibu Gulf

近年来,随着全球气候变暖、自然灾害频繁和能源危机等环境问题加剧,如何减少碳排放,增加碳汇和碳储量已成为全球关注的焦点^[1-3]。我国学界对碳排放、碳汇和碳储量方面的研究越来越关注^[4]。2020年,中国在联合国大会上向全世界承诺力争于2030年前实现碳达峰,争取在2060年前实现碳中和^[5]。为了更好地实现“双碳”战略目标,加快推进全球碳循环平衡与稳定已成为迫在眉睫的任务。落实“双碳”战略目标离不开固碳,据统计,全球陆地和海洋的碳吸收量分别为2.12 PgC和2.53 PgC^[6],其中陆地植物通过光合作用固定CO₂的过程称为“绿碳”,海洋活动及海洋生物吸收CO₂并将其固定、储存在海洋中的过程称为“蓝碳”。沿海地区是气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区,蕴藏着巨大的碳库,在区域和全球尺度上的碳循环和能量流动中发挥着至关重要的作用^[3]。广西北部湾沿海地区自然资源丰富,生物多样性,但随着人类活动不断增强,土地覆盖类型发生变化,围垦填海导致原生滨海湿地不断消失,对陆地生态系统碳储量及生态系统服务功能造成严重威胁。因此,研究广西北部湾沿海地区陆地生态系统碳储量的长尺度时空变化,对于促进我国西部沿海地区经济协调发展和生态系统安全具有重要的现实意义。

诸多学者对碳储量问题展开了广泛的研究,涉及方方面面。早期研究侧重于森林调查、土壤资源调查、实地测量和遥感数据,评估陆地生

态系统碳储量及其在区域和全球范围内的变化趋势^[7-9]。相关研究表明,不同区域的土壤和森林碳密度存在差异,因此测算碳储量的结果也存在差异。实地测量等方法相对简单,但精度要求较高,仅适用于较小区域,难以反映动态变化的碳储量需求^[10-12]。随着研究的不断深入,我们开始将重点聚焦于模型预测和评估大范围的碳储量,包括全球、国家、行政区划和保护区不同尺度下的碳储量变化^[13-17]。关于土地利用类型变化对碳储量影响的研究,目前主要采用InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型^[18-20],该模型具有操作简单、参数设置灵活、准确度高等特点,适用于通过土地利用类型变化来估算碳储量的影响研究,但鲜有将其用于研究北部湾沿海地区陆地生态系统碳储量变化的报道。

因此,本文以广西北部湾沿海地区(钦州、北海、防城港)为研究对象,以2000年、2005年、2010年、2015年和2020年共5期土地利用数据为基础,分析北部湾沿海地区2000—2020年土地利用变化过程。计算了2000—2020年广西北部湾沿海地区碳储量的变化数据,并定量分析了生态系统碳储量的分布和变化特征。进而利用Arcgis10.8空间自相关分析研究了广西北部湾沿海地区碳储量的空间分布相关性,分别从全局和局部空间自相关角度对其空间格局进一步探析,尝试剖析其时空格局演变的关键因素,为广西北部湾碳循环收支平衡、区域生态环境可持续发

展、土地利用规划及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

广西北部湾沿海地区位于中国沿海南端(20°26'N—22°41'N, 107°28'E—109°47'E), 由钦州、北海、防城港三市组成(图1)。该区域面积约 20127 km², 海岸线长约 1595 km, 总人口约 624 万人, 是我国大西南陆海新通道的出海口, 也是中国沿海地区新布局的现代化港口群、产业群和建设高质量宜居城市的重要区域。沿海海域岛屿众多, 约有 624 个, 形状各异, 分别位于珍珠港湾、大风江、涠洲岛等海域。该区域属于典型亚热带海洋性季风气候, 日照充足, 雨水充沛, 年均气温为 23.36 °C, 年均降水量为 1903.70 mm。地貌类型多样, 以丘陵、山地、滩涂为主。沿海地区河流水系发达, 主要入海河流包括茅岭江、南流江、防城河、北仑河和江平江等。

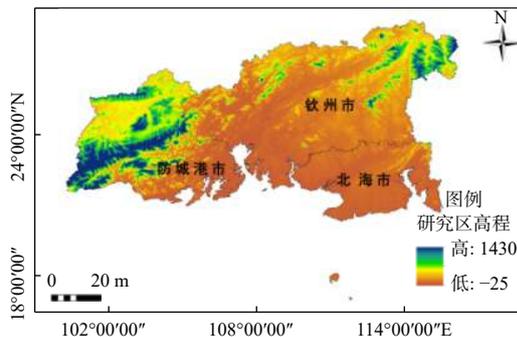


图1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用数据

数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所研发的空间分辨率为 30 m×30 m 全国土地利用遥感监测矢量数据库(<http://www.resdc.cn>)。本文选取 2000—2020 年具有代表性和有效性较高的土地利用类型数据, 每 5 年为 1 期(2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年), 共分为 5 期, 转换投影坐标系为 WGS1984, 并根据广西北部湾经济区行政边界裁剪了研究区。DEM 数据来自空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>), 并根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—

2017), 将研究区域分为耕地、林地(含红树林地)、草地、水域(含沿海滩涂、沼泽地)、建设用地和未利用地 6 种类型。

1.2.2 碳密度数据

将 InVEST 模型“碳储存和固存”模块在计算过程中进行简化, 假设某一土地利用类型的碳密度不随时间发生变化, 其可被视为常量。本研究的碳密度数据主要是通过查阅相关资料获取。不同学者的研究区域不同, 碳密度数据存在显著的差异。为了避免数据相差过大, 尽量选择同一作者且研究区域相同类型的碳密度数据进行横向对比。因此, 本文主要参考广西沿海地区和江苏省海岸带碳储量时空变化研究结果^[21-22], 通过归并和统计得出具体的不同土地利用类型的碳密度(表1)。

表1 广西北部湾沿海地区土地利用类型碳密度(t/ha)

Tab.1 Carbon density of land use types in coastal area of Beibu Gulf, Guangxi (t/ha)

| 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 |
|--------|-------|-------|--------|----------|
| 耕地 | 4.75 | 0.00 | 33.51 | 0.00 |
| 林地 | 49.60 | 24.97 | 128.67 | 1.99 |
| 草地 | 24.38 | 19.59 | 52.29 | 22.74 |
| 水域 | 2.45 | 0.62 | 80.11 | 0.10 |
| 建设用地 | 4.33 | 2.17 | 6.37 | 0.58 |
| 未利用地 | 28.73 | 14.39 | 317.82 | 2.40 |

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵主要是研究期初各土地利用类型的流向和期末各土地利用类型的来源变化情况, 便于更好地理解土地利用时空演变过程, 其计算公式如下:

$$C_{ixj} = 10A_{ixj}^k + A_{ixj}^{k+1} (i < 10, j < 10) \quad (1)$$

式中: C_{ixj} 为 k 时期到 $k+1$ 时期的土地利用变化; A_{ixj}^{k+1} 为 $k+1$ 时期土地利用类型; i 和 j 分别表示不同的土地利用类型; k 代表时间尺度, 以年为单位。

1.3.2 碳储量方法

本文利用 InVEST 3.11.0 模型中的“碳储存和固存”模块将生态系统碳储量划分为 4 个基

本碳库,分别为地上生物碳 C_{above} (土壤以上所有存活植物中的碳)、地下生物碳 C_{below} (植物活根系中的碳)、土壤碳 C_{soil} (矿质土壤和有机土壤中的有机碳)和死亡有机碳 C_{dead} (凋落物、枯木和垃圾中的碳)。碳储量计算公式如下:

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

式中: C_i 为 i 类土地利用类型的碳储量; $C_{i,above}$ 、 $C_{i,below}$ 、 $C_{i,soil}$ 和 $C_{i,dead}$ 分别为 i 类土地利用类型的地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳。

根据不同土地利用类型的碳密度和土地利用数据,计算区域内土地利用类型总碳储量:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: C_{total} 为区域生态系统总碳储量; C_i 为 i 类土地利用类型的碳储量; A_i 为土地利用类型总面积; n 为地类数。

1.3.3 碳储量空间自相关分析

空间自相关是检验空间分布邻近要素属性相关性的重要指标。正相关表示邻近单元间的属性变化呈现相同的趋势,而负相关则相反。为了分析广西北部湾沿海地区的碳储量在空间上的相关性,可使用全局空间自相关性指数 (Global Moran's I) 判断碳储量是否存在空间自相关;若存在,可使用局部空间自相关性指数 (Local Moran's I) 判断是哪一种类型的聚类;最后进行聚类和异常值分析,找出各类集聚的空间分布区域。

Global Moran's I 指数的值域为 $[-1, 1]$, $I > 0$ 表示正相关, $I < 0$ 表示负相关, $I = 0$ 则表示研究区内的各空间单元之间相互独立。 I 值越接

近 1, 表明研究对象的某些属性在空间分布上呈现越显著的集聚效应; I 值越接近 -1, 表明离散效应越明显。Global Moran's I 指数公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为区域 i 和 j 的观测值; \bar{x} 为所有空间单元观测值的均值; W_{ij} 为空间权重矩阵。

由于空间异质性普遍存在,全局观测指标难以有效地反映局部的细微差别,局部空间自相关可以进一步探索局部空间集聚。在空间位置 i 上, Local Moran's I 指数被定义为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: x_i 为区域 i 的观测值; W_{ij} 为空间权重矩阵。

2 结果与讨论

2.1 土地利用转移的时空变化特征

随着城市化进程和经济的快速发展,土地利用类型发生显著变化。2000—2020年,北部湾沿海地区约 13.65% 的土地发生了转移。从表 2 中的数据可以看出,耕地减少了 1610.68 km², 主要转出为林地 (1115.5 km²)。这主要是由于 1999 年国家大力推行“退耕还林”策略试点工作,并于 2002 年在全国范围内全面启动退耕还林工程。该工作为增加森林碳汇、应对气候变化、参与全球生态治理做出了重要贡献。20 年来,“退耕还林”工作已完成造林面积占同期全

表 2 2000—2020 年广西北部湾沿海地区土地利用转移矩阵 (km²)

Tab.2 Land use transfer matrix for the coastal area of Guangxi Beibu Gulf from 2000 to 2020 (km²)

| 土地类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 | 转出 |
|------|---------|---------|------|--------|--------|------|---------|
| 耕地 | 7982.43 | 1115.50 | 2.69 | 84.00 | 408.48 | 0.00 | 1610.68 |
| 林地 | 940.81 | 8769.15 | 2.48 | 8.98 | 50.26 | 0.00 | 1002.54 |
| 草地 | 2.28 | 0.79 | 4.94 | 0.05 | 0.19 | 0.00 | 3.32 |
| 水域 | 47.73 | 6.63 | 0.12 | 256.33 | 25.08 | 0.00 | 79.57 |
| 建设用地 | 50.34 | 0.32 | 0.08 | 0.72 | 366.16 | 0.00 | 51.46 |
| 未利用地 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 转入 | 1041.17 | 1123.24 | 5.37 | 93.75 | 484.02 | 0.00 | 2747.55 |

国林业重点生态工程造林总面积的 40.5%。在短时期内林草植被大幅度增长, 森林覆盖率平均提高 5%, 林草植被得到恢复, 生态状况显著改善, 为建设生态文明和美丽中国创造了良好条件。

耕地和林地之间相互转化导致林地净增长 174.7 km², 这有利于碳储量的增加。建设用地增长主要由耕地转入, 转入量为 408.48 km², 人口和经济快速增长加剧了建设用地规模, 不利于碳储量的增加。草地和水域面积变化不大, 转入量和转出量基本持平。未利用地在 20 年间面积较小, 土地转移均为 0, 因此未利用地可视为 20 年间未发生变化。

广西北部湾沿海地区土地类型转移的空间分布如图 2 所示, 20 年间向四周扩张并不显著。林地分布最广泛, 占土地总面积的 49.15%, 但 2000—2020 年的增长幅度较小(约 1.2%), 主要集中在研究区西南端的十万大山和东北端的五峰山; 耕地面积减少了约 5.94%, 呈全范围分布, 主要集中在北海市周边、灵山县和上思县的丘陵地区; 建设用地面积增长了 103.58%, 主要集中在钦州、北海、防城港主城区, 以及灵山县和浦北县, 与城市经济发展的范围基本一致; 水域主要分布在洪潮江水库、那板水库、凤亭河水库、南流江和钦江流域; 草地和未利用地的面积较小, 分布零散。

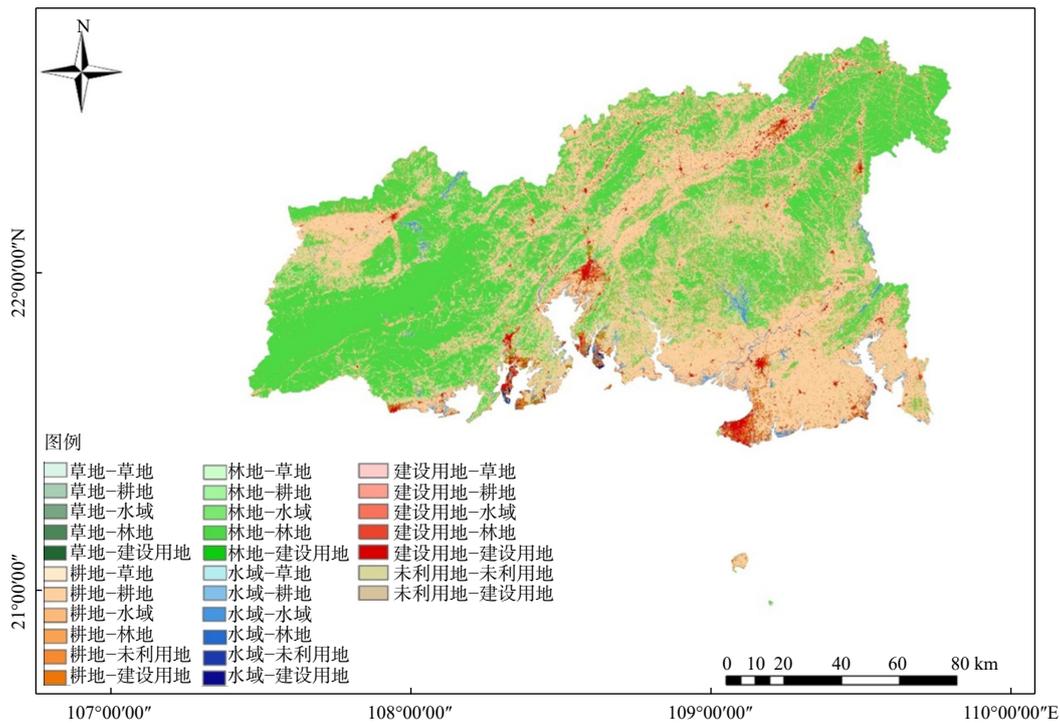


图 2 广西北部湾沿海地区土地类型转移空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land type transfer in Beibu Gulf coastal area of Guangxi

2.2 碳储量时空变化特征及空间相关分析

通过使用 InVEST 模型“碳储存和固存”模块, 估算了广西北部湾沿海地区 2000—2020 年的碳储量。由图 3 可知, 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的碳储量分别为 21.66×10^6 t、 21.71×10^6 t、 21.77×10^6 t、 21.67×10^6 t 和 21.75×10^6 t。碳储量整体呈波动式变化, 可分为 3 个阶段, 即增长—下降—增长, 累计增长量为

9.22×10^4 t。2000—2020 年, 土地利用类型空间分布和碳储量功能发生了变化, 碳储量持续升高, 生态系统服务功能不断增强。该结果与部分学者的研究一致。李曼等^[23]的研究表明, 1985—2010 年疏勒河流域的生态系统服务价值呈增加趋势。2000—2010 年碳储量增长 11.42×10^4 t, 增幅为 0.53%; 2010—2015 年碳储量减少了 10.68×10^4 t, 降幅为 0.49%, 其中, 林地在这 5 年间减少

了 41.64 km^2 , 而建设用地却增加了 182.79 km^2 ; 2015—2020 年碳储量增加了 $8.49 \times 10^4 \text{ t}$, 增幅为 0.39%。从 2000—2020 年广西北部湾沿海地区碳储量分布(图 4)可以看出, 2000—2020 年碳储量空间分布格局基本一致, 林地为主要的碳库, 约占区域总碳储量的 84%, 该结果与帕茹克·吾斯曼江等^[24]对昆明市碳储量的研究结果一致, 碳储量以林地为主, 占总碳储量的 50% 以上, 其次是耕地, 占比 14.27%, 水域占比 1.21%, 建设用地占比 0.47%, 草地占比 0.05%。未利用地因其面积小, 所产生的碳储量比值可忽略不计。

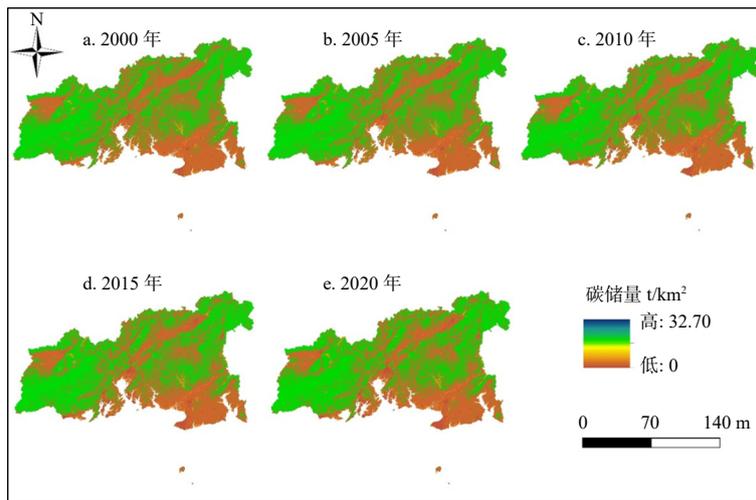


图 4 2000—2020 年广西北部湾沿海地区碳储量分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of carbon storage in the coastal area of Guangxi Beibu Gulf from 2000 to 2020

使用 Arcgis10.8 的空间统计工具对 5 个时期碳储量的 Global Moran's I 进行计算, 结果显示广西沿海地区碳储量存在全局空间相关性(图 5)。2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年, 广西沿海地区碳储量的 Global Moran's I 值均大于 0, 在 0.82 左右。这表明该地区碳储量的分布呈正空间自相关, 具有较显著的空间集聚效应。然而, 各区域碳储量的空间分布并未表现为完全的随机状态。该结果与张云倩等^[22]对江苏海岸带碳储量的研究结论一致, 即具有较高碳储量的空间区域之间相邻, 具有较低碳储量的空间区域之间也相邻, 相关性较强。年份之间无显著性差异($p > 0.05$), 表明 2000—2020 年空间相关性都保持在同一水平, 浮动较小。

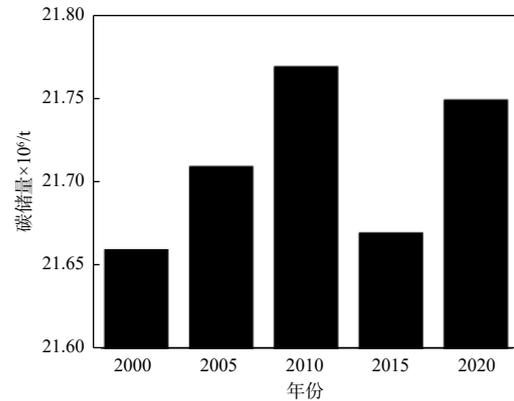


图 3 2000—2020 年广西北部湾沿海地区碳储量情况

Fig. 3 Carbon storage in the coastal area of Guangxi Beibu Gulf from 2000 to 2020

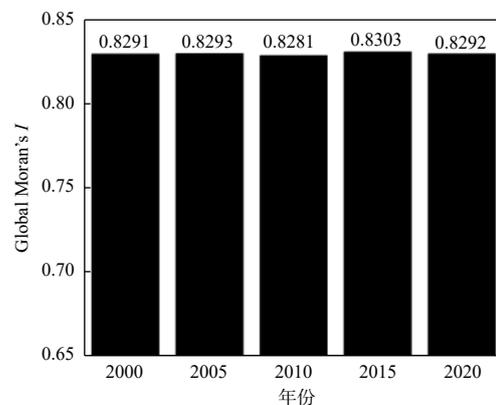


图 5 广西沿海地区 2000—2020 年碳储量 Global Moran's I 值

Fig. 5 Global Moran's I value of carbon storage in Guangxi coastal area from 2000 to 2020

为了进一步解析广西沿海地区碳储量局部变化特征, 利用 Arcgis10.8 制图软件与 Local Moran's *I* 指数相结合, 生成了碳储量局部空间自相关图, 如图 6 所示。高-高集聚区域是指自身和周围区域碳储量均较高的区域, 主要分布在防城港十万大山区和钦州五峰山周边, 高值集聚效应明显, 2000—2020 年, 高-高集聚区域占研究区域的 27%~38%, 以林地为主, 固碳能力强; 低-低集聚区域是指自身和周围区域的碳储量均较低的区域, 主要分布在人口众多、建设用地面积大的钦州、北海、防城港三市城镇, 储碳能力较弱; 低-低集聚区域的比例从 2000 年的

8.9% 降低到 2020 年的 5.5%, 范围不断缩小, 空间分布呈现一定的连续性; 高-低集聚区域是指自身碳储量较高但周围区域相对较低的区域, 主要分布在高-高集聚区域的邻近边缘区, 以小乡村和小城镇为主; 低-高集聚区域是指自身碳储量较低但周围区域较高的区域, 主要分布在不显著区域的边缘; 高-低集聚区域和低-高集聚区域的占比相对较小, 可忽略不计; 不显著区域在空间上存在不相关性, 各单元间相互独立, 以草地、水域和未利用地为主。2000—2020 年, 不显著区域占研究区域的 52%~66%, 面积较大。

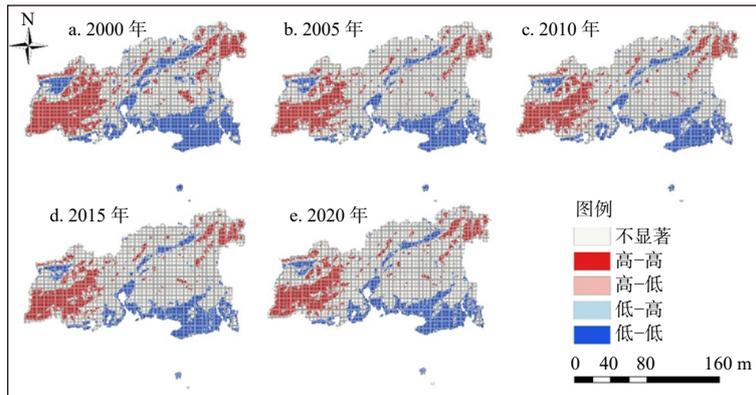


图 6 广西沿海地区碳储量聚类分布

Fig. 6 Cluster distribution of carbon storage in coastal area of Guangxi

2.3 土地利用类型变化对碳储量的影响

研究表明, 不同土地利用类型的碳储量对总碳储量的贡献大小顺序为: 林地>耕地>水域>建

设用地>草地>未利用地, 具体见表 3。2000—2020 年, 土地利用类型的转换导致了碳储量的变化, 在这 4 个时期耕地的碳储量都不同程度地减少

表 3 2000—2020 年土地利用类型数量与碳储量变化

Tab.3 Changes in the number of land use types and carbon stocks from 2000 to 2020

| 年份 | 类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|------|-----------------------|---------|---------|-------|--------|--------|------|
| 2000 | 面积/km ² | 9593.11 | 9771.69 | 8.26 | 335.90 | 417.62 | 0.01 |
| | 碳储量/10 ⁶ t | 3.30 | 18.05 | 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.00 |
| 2005 | 面积/km ² | 9460.79 | 9809.61 | 8.45 | 353.16 | 494.55 | 0.01 |
| | 碳储量/10 ⁶ t | 3.25 | 18.12 | 0.01 | 0.26 | 0.06 | 0.00 |
| 2010 | 面积/km ² | 9317.69 | 9863.87 | 8.95 | 361.07 | 574.97 | 0.01 |
| | 碳储量/10 ⁶ t | 3.21 | 18.22 | 0.01 | 0.27 | 0.07 | 0.00 |
| 2015 | 面积/km ² | 9185.63 | 9822.23 | 9.54 | 351.40 | 757.76 | 0.01 |
| | 碳储量/10 ⁶ t | 3.16 | 18.14 | 0.01 | 0.26 | 0.09 | 0.00 |
| 2020 | 面积/km ² | 9023.60 | 9892.39 | 10.31 | 350.08 | 850.18 | 0.01 |
| | 碳储量/10 ⁶ t | 3.10 | 18.27 | 0.01 | 0.26 | 0.10 | 0.00 |

(图7)。2015—2020年,耕地减少了 162.03 km^2 ,而20年间耕地转出为建设用地和水域,导致碳储量损失了 $19.59\times 10^4\text{ t}$ 。林地具有较强的固碳能力,其碳储量在所有土地利用类型中居于首位,林地的转入者主要是耕地(1115.5 km^2),转出者主要是耕地(940.81 km^2)和建设用地(50.26 km^2)。同时,林地的转入量大于转出量,导致2000—2020年碳储量增加了 $22.29\times 10^4\text{ t}$ 。草地和建设用地都有不同程度地增加,其中草地碳储量增加了 $0.22\times 10^4\text{ t}$,建设用地碳储量增加了 $5.23\times 10^4\text{ t}$ 。未利用地的碳密度在土地利用类型中最高,但其面积较小,碳储量增加量较低。总体来说,碳储量发生变化的主要因素是不同地类之间的相互转换。

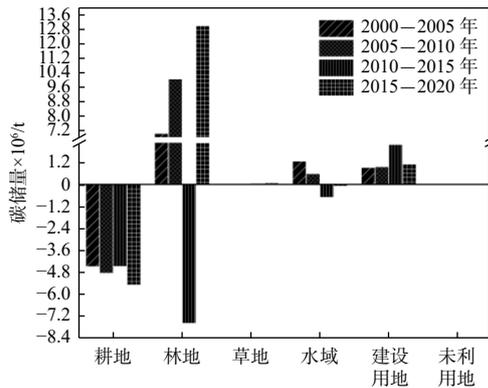


图7 不同时间段土地利用类型的碳储量的变化

Fig. 7 Changes of land use types carbon stocks in different time periods

3 结论

(1)2000—2020年,广西北部湾沿海地区的土地利用类型发生了剧烈变化,其中耕地面积大幅度减少了 569.51 km^2 ,建设用地面积增加了 432.56 km^2 。20年间土地转移面积增长了13.65%,耕地转出量最大,林地转入量最大。

(2)研究区域2000年、2005年、2010年、2015年、2020年的碳储量分别为 $21.66\times 10^6\text{ t}$ 、 $21.71\times 10^6\text{ t}$ 、 $21.77\times 10^6\text{ t}$ 、 $21.67\times 10^6\text{ t}$ 、 $21.75\times 10^6\text{ t}$,呈现“锯齿上升”的趋势,累计增加了 $9.22\times 10^4\text{ t}$ 。碳储量发生变化的主要因素是不同

地类之间的相互转换。林地为主要的碳库,占碳总量的84%。

(3)从全局空间相关性的相关角度来看,5个时期的碳储量呈现一定的空间趋同集聚现象。自2000年以来,空间集聚呈现波段式变化,空间集聚趋势不断增强;从局部空间相关性来看,高—高集聚区域占研究区域的27%~38%,主要分布在防城港十万大山区和钦州五峰山周边,低—低集聚区域占研究区域的5.5%~8.9%,主要分布于人口众多、建设用地面积大的钦州、北海、防城港三市城镇。

参考文献:

- [1] SULTANOVA R, ODINTSOV G, MARTYNOVA M, et al. Assessment of Carbon Reserves and Biomass of Forest Ecosystems in the Southern Urals[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2023, 17(2): 26.
- [2] KANG J N, WEI Y M, LIU L C, et al. Observing technology reserves of carbon capture and storage via patent data: Paving the way for carbon neutral[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 171: 120933.
- [3] XUE J F, YAN J. Deducing Leading Factors of Spatial Distribution of Carbon Reserves in Nanjing Metropolitan Area Based on Random Forest Model[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022: 3013620.
- [4] LI W, AN C L, LU C. The assessment framework of provincial carbon emission driving factors: an empirical analysis of Hebei Province[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 637/638: 91-103.
- [5] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 国务院公报, 2020.
- [6] WU C Y, ZHANG X Y, GUO L F, et al. An inversion model based on GEOS-Chem for estimating global and China's terrestrial carbon fluxes in 2019[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023, 14(1): 49-61.
- [7] SCHLESINGER W H. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery[M]/ TRABALKA J R, REICHLER D E. The changing carbon cycle: A global analysis. New York, NY: Springer, 1986: 194-220.
- [8] XU L, YU G R, HE N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 49-66.

(下转第732页)

- [27] 孙晶, 刘长安, 刘玉安, 等. 辽东湾滨海湿地现状遥感调查[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(8): 74-77.
- [28] YAN X L, HU Y M, CHANG Y, et al. Monitoring wetland changes both outside and inside reclamation areas for coastal management of the Northern Liaodong Bay, China[J]. *Wetlands*, 2017, 37(5): 885-897.
- [29] 李加林, 田鹏, 邵姝遥, 等. 中国东海区大陆海岸线数据集(1990—2015)[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2019, 3(3): 252-258.
- [30] 曾江宁. 中国海洋保护区[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [31] 刘峻峰. 中国海洋渔业资源时空演化分析——基于捕捞产量视角[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [32] 国家海洋局. 2006—2010中国海洋统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2006-2010.
- [33] 王丽华, 王峰. 辽河口湿地资源与环境承载力分析及其可持续利用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(3): 58-61.
- [34] 闫晓露, 钟敬秋, 韩增林, 等. 近40年辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观演替特征及驱动力分析[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1155-1165.
- [35] 侯永丽, 单良. 辽宁沿海经济带海洋产业结构及竞争力评价研究[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(1): 94-101.

(本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 722 页)

- [9] BHAT J A, IQBAL K, KUMAR M, et al. Carbon stock of trees along an elevational gradient in temperate forests of Kedarnath Wildlife Sanctuary[J]. *Forest Science and Practice*, 2013, 15(2): 137-143.
- [10] JOHNSON D W. Effects of forest management on soil carbon storage[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64(1/2): 83-120.
- [11] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(01): 13-16.
- [12] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA[J]. *Environmental pollution*, 2002, 116(3): 381-389.
- [13] MA L, HURTT G, TANG H, et al. Spatial heterogeneity of global forest aboveground carbon stocks and fluxes constrained by spaceborne lidar data and mechanistic modeling[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(12): 3378-3394.
- [14] NI J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate[J]. *Climatic Change*, 2013, 119(3/4): 905-917.
- [15] 陈雅慧, 张树刚, 张钊. 乐清湾盐沼湿地有机碳密度及碳储量估算[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(01): 38-45.
- [16] LIANG Y J, HASHIMOTO S, LIU L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106939.
- [17] LI X T, JIA B Q, LI F, et al. Effects of multi-scale structure of blue-green space on urban forest carbon density: Beijing, China case study[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 883: 163682.
- [18] LI X, LIU Z S, LI S J, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use impacts on habitat quality in Tianjin based on the PLUS model coupled with the InVEST model[J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6923.
- [19] 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, 396.
- [20] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(06): 1896-1906.
- [21] 朱鹏飞. 基于InVEST模型的广西沿海地区土地利用/覆被变化的生态效应研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2018.
- [22] 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(03): 100-105, 111.
- [23] 李曼, 张洁, 李园园. 1985年~2010年疏勒河流域生态系统服务价值评估[J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(03): 56-61.
- [24] 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J/OL]. *环境科学*: 1-18. (2023-08-10) <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.2023.02060>.

(本文编辑: 胡莹莹)