

【专栏导语】

为推动浙江省新型重点专业智库——宁波大学东海研究院(Ningbo University Donghai Institute)资源管理与海洋生态保护重点领域咨政能力建设,瞄准新时代地理科学学科前沿和国家海洋战略需求,进一步提升滨海地理学理论创新水平和国家发展战略支撑能力,在中国地理学会城市与区域管理专业委员会、中国系统工程学会船海系统工程专业委员会等机构支持下,宁波大学东海研究院先后于2023年6月、2024年4月主办(或联合主办)了首届、第二届“东海资源环境保育与区域发展论坛”。受《宁波大学学报(理工版)》邀请,也作为会议的研讨成果,我们组织了以“地理学与陆海资源环境可持续发展”为主题的专栏,以进一步推动滨海地理学学科建设的理论创新和实践探索,为东海乃至国家和全球海洋事业提供中国理念和实践经验。

(栏目主持人 马仁锋)

[illegible]

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1244

城市碳源碳汇的时空格局变化研究

——以宁波市为例

朱 强¹, 张志强¹, 马松根², 金 科³, 查芊郁⁴, 高 超^{3*}

(1.宁波市自然资源和规划大数据中心, 浙江 宁波 315100;

2.河南省驻马店水文水资源测报分中心,河南 驻马店 463000;

3. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 4. 东英吉利大学 环境科学学院, 英国 诺里奇 NR4 7TJ)

摘要:城市尺度的碳源碳汇核算及动态监测对实现碳中和发展路径至关重要。基于 2005—2020 年宁波市土地利用数据和相关统计数据,结合联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)碳排放核算法与 InVEST 模型的碳储量估算模块,分析宁波市碳源碳汇的时空格局变化特征,并提出了相应的碳平衡措施。研究结果表明:(1)2005 年以来宁波城市碳排放总量快速增加,在 2013 年达到峰值(7.70×10^9 t),总体维持在 6.75×10^9 t 左右;工业部门是最大碳排放源,占据了碳排放总量的 80%以上。(2)2005—2020 年宁波市碳储量先降后增,到 2010 年缩减了 0.10×10^9 t,至 2020 年又增加了 0.23×10^9 t,累计增汇 1.31×10^7 t;用地类型中,林地增汇效果最显著,耕地较差。(3)在空间净碳排放强度方面,宁波市核心区域的空间净碳排放强度增长更显著。建议宁波市通过优化产业与能源结构、调整城市建设布局、加强生态修复等措施来减源增汇,通过建立区域间的碳汇补偿机制,营造低碳协调的发展环境。

关键词: 碳源; 碳汇; 净碳排放强度; 时空格局

中图分类号: F299.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 04-0012-10

城市是减缓气候变化和实现可持续性发展的核心^[1]。21 世纪以来,大量人口和产业向城市聚集,城市已经成为国家发展和温室气体排放的主要区域^[2-3]。城市的经济产出占全球国内生产总值(GDP)的 80%、能源消耗占 60%~80%、碳排放占 75%^[4]。

作为世界上最大的发展中国家,中国的能源消耗量、碳排放量均居世界首位.此外,中国正在经历快速的城市化过程,土地利用变化剧烈,实现“双碳”目标任重道远^[5-7].因此,从城市尺度出发分析碳源碳汇的时空特征及其变化规律,可以推动区

收稿日期: 2023-12-29.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市自然资源与规划局项目 (ZJZC-223069-C)。

第一作者: 朱强, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 规划地理信息发展战略及相关政策. E-mail: 2586337441@qq.com

*通信作者: 高超, 博士/教授, 主要研究方向: 城市碳中和战略。E-mail: gaoqinchaol@163.com

域间的碳平衡, 为探寻可持续发展路径提供科学支撑。

近年来, 关于碳排放的研究主要集中在碳源碳汇核算、碳排放驱动力解析以及碳源碳汇耦合分析模拟等方面^[8]。在碳源核算方面, 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的部门方法可以基于不同部门、不同能源类型核算碳排放量, 能够有效分析碳排放量结构的时间变化特征^[9-11]。如周晟吕等^[12]利用工业、交通、商业等部门的终端能源消费数据, 全面评估了上海市崇明岛的能源消费和碳源状况。在碳汇核算方面, 蓄积量法、生物量法以及模型模拟法是碳汇核算的主要方法^[13-15]。其中, InVEST模型由于其数据需求量少、运行速度快等优点被广泛应用于碳汇核算的研究^[16]。如吴佩君等^[17]基于 InVEST 模型和元胞自动机模型分析了广东省 1980—2014 年的碳储量变化, 探究了城市扩张对碳汇缩减的影响机制。在碳排放驱动力解析方面, 学者多考虑区域土地利用变化、能源消费结构、人口规模及社会经济发展水平等因素。如孙艳伟等^[18]基于 STIRPAT 扩展模型, 分析了舟山市的人均 GDP、能源消费量以及城市化水平等驱动因子对城市碳排放的影响。在碳源碳汇耦合分析方面, 诸多学者进行了深入探究。如胡欢等^[19]基于 2000—2013 年河北省的社会统计数据, 结合 IPCC 碳排放核算法, 从碳源、碳汇和净碳源视角分析了河北省碳排放的时空变化特征。

以往研究多侧重省域尺度的碳源碳汇时空格局的变化, 对城市尺度碳源碳汇核算及其区域间差异研究相对匮乏。此外, 碳汇核算多集中于单一来源, 对整体生态系统的全面评估不足。鉴于此, 从区域差异较小的城市尺度实施分解碳源、增加碳汇等措施具有更强的适用性。

本研究通过 IPCC 碳排放核算法与 InVEST 模型, 以宁波市为例, 全面分析城市碳源碳汇的时空格局变化规律, 以期为进一步科学认识土地利用变化和碳源碳汇的耦合关系, 为指导城市可持续发展提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

宁波市(120°55′~122°16′E, 28°51′~30°33′N)位

于浙江省东北部, 下辖鄞州、海曙、江北、镇海等 6 个区与宁海、余姚等 4 个县、市, 是中国华东地区重要的工商业城市。2023 年宁波市年规模以上工业企业实现销售产值 23 873.3 亿元, 对 GDP 增长贡献率 55.3%。作为中国东部重要的港口城市、长江三角洲南翼经济枢纽, 宁波市的经济迅猛, 石化、能源和制造业等高能耗产业发达, 实现“碳达峰”和“碳中和”目标的压力大。其中鄞州区与慈溪市分别具有最高的总产值与工业产值, 达到 2 803.3 亿元与 2 382.6 亿元。此外, 宁波市还具有森林碳储量丰富、人口密集、土地利用变化大等特点。因此, 选择宁波市作为研究区对整个东部沿海城市的国土空间规划与低碳发展建设有着较强的指导意义。

1.2 研究数据

研究选取 2005—2020 年宁波市土地利用、各部门能源消费以及社会经济等数据。其中土地利用数据来源于宁波市自然资源局提供的 3 次全国土地调查结果, 数据分辨率为 10 m×10 m, 土地类型包含耕地、园地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等自然、半自然土地。各部门能源消费数据、GDP、工业增加值、固废处置量、交通工具保有量、农作物产量等社会经济数据均来源于 2005—2020 年《浙江省统计年鉴》和《宁波市统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 碳源核算方法

本研究依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[20], 以工业能源、交通能源、城乡居民生活能源、商业能源、城市废弃物处理、农业生产等 6 大要素为核心, 对宁波市历年不同部门不同种类的能源碳排放量进行核算, 具体计算公式为:

$$G_{\text{Tot}} = \sum_j E_j \times F_j,$$

式中: G_{Tot} 为总碳排放量, 万 t; E_j 为第 j 类能源的消费量, 万 t(按标准煤计算); F_j 为参考 IPCC 标准采用的第 j 种能源的排放系数。

能源消费种类以原煤、原油以及天然气等 17 个类别为主, 将各能源的实际消耗量转化为标准煤量, 并按照《中国能源统计年鉴》中的各项能源标准煤折算系数(表 1)进行计算。

表 1 不同能源类型碳的排放因子

能源类型	折标准煤系数	排放因子
原煤	0.71	1.98
洗精煤	0.90	2.49
其他洗煤	0.28	0.79
型煤	0.97	1.72
焦炉煤气	0.97	3.02
天然气	1.33	21.8
液化天然气	1.71	2.84
原油	1.43	3.10
汽油	1.47	3.18
煤油	1.47	3.15
柴油	1.50	3.20
燃料油	1.43	3.13
液化石油气	1.71	2.98
其他油制品	1.43	2.95
热力	0.03	0.26
电力	0.12	9.26

1.3.2 碳汇核算方法

InVEST 模型由美国斯坦福大学与世界自然基金会共同开发，主要用于评估不同生态系统的服务功能。本研究运用其中的碳储量模块来分析宁波市的生态系统碳储量变化。该模块的工作原理是将各地类的碳密度与面积输入模型来计算生态系统的碳储量。

在生态系统中，碳储量资源主要由地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡凋萎有机物碳组成。按照不同土地利用类型的碳密度乘以对应地类面积，即可以计算出总的碳储量，具体计算公式为：

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}},$$

表 2 宁波市不同土地利用类型的碳密度

土地类型	地上碳密度/ (t·hm ⁻²)	地下碳密度/ (t·hm ⁻²)	土壤碳密度/ (t·hm ⁻²)	死亡有机物碳密度/ (t·hm ⁻²)	文献来源
耕地	15.8	40.3	54.2	5.0	[21-24]
林地	75.0	59.2	122.3	17.6	[21-24]
草地	17.7	44.2	49.9	10.0	[21-24]
水域	2.9	13.2	26.4	0	[25]
建设用地	0.8	9.2	26.8	0	[26]
未利用地	7.3	11.5	40.9	0	[27-28]
园地	10.0	3.0	90.0	1.0	[27-28]

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i,$$

式中： i 为某种土地利用类型； C_i 为土地利用类型 i 的总碳密度； $C_{i\text{-above}}$ 为土地利用类型 i 地上植被的碳密度； $C_{i\text{-below}}$ 为土地利用类型 i 地下生物的碳密度； $C_{i\text{-soil}}$ 为土地利用类型 i 土壤中有机质的碳密度； $C_{i\text{-dead}}$ 为土地利用类型 i 死亡凋萎有机物的碳密度； C_{total} 为总的碳储量； S_i 为土地利用类型 i 的总面积； n 为土地利用类型的总数。

通过文献法收集江浙地区或周边省份的碳密度数据，为减少不同来源数据的不确定性，采用均值法修正宁波市不同土地利用类型的碳密度(表 2)。碳汇量是从环境中吸收或移除碳排放的量，与碳储量相同，均可以用于描述碳汇的性质特征。因此，本研究将所选年份(2010 年和 2020 年)的碳储量减去基准年(2005 年)的碳储量，其计算结果可以较为全面地反映研究区域所有土地利用类型在不同时间尺度的碳汇情况^[20]。

1.3.3 空间净碳排放强度

空间净碳排放强度是指发生在单位面积上的碳排放，碳排放量与面积直接相关，具体计算公式为^[29]：

$$I_{kt} = (C_{kt\text{-source}} - C_{kt\text{-sink}}) / A_{kt},$$

式中： I 为空间净碳排放强度； k 为地区； t 为年份； $C_{\text{source}} - C_{\text{sink}}$ 为净碳排放量，其中 C_{source} 为碳排放量， C_{sink} 为碳汇量； A 为地块面积。

2 结果与分析

2.1 碳源时空格局

2.1.1 碳排放结构

图 1 为 2005—2020 年宁波市碳排放的变化。

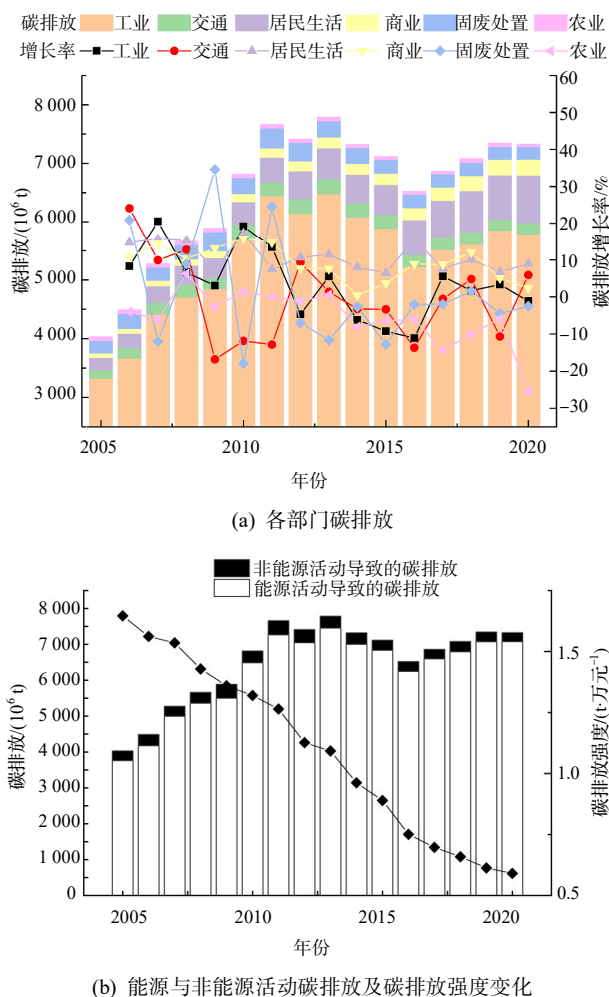


图1 2005—2020年宁波市碳排放的变化

从图1可见, 2005—2013年宁波市碳排放总量呈现快速增长趋势, 由2005年的 4.10×10^9 t增长到2013年的 7.70×10^9 t, 增长了约90%。2014—2020年碳排放总量与2013年相比小幅缩减, 总体维持在 6.70×10^9 t左右, 其中能源消费碳排放的变化是碳排放总量增长趋势变更的主导因素。

从各部门碳排放比例序列看, 研究期间工业部门碳排放占总碳排放中占比超过80%, 是碳源主体, 但是其碳排放增长速率呈现递减趋势。随着人口增长和居民生活消费水平的上升, 城乡居民生活用能所导致的碳排放占比逐年增长, 年增长率达到10.1%。交通能源、固废处置、商业用能、农业活动等部门产生的碳排放占比均低于5%, 且除商业用能外皆呈现逐年减少趋势。

2.1.2 宁波市碳排放时空分布

(1) 宁波市市区地带以及周边4个县、市在人

口数量、能源消费量与城市建设程度等方面均存在显著差异, 导致宁波市碳排放规模及强度出现明显的空间异质性(图2)。在碳排放总量方面, 宁波市区地带碳排放量占据总量的一半以上, 受高碳锁定效应影响明显, 未来减排压力较大。研究期间, 宁波市整体碳排放量小幅增加, 慈溪市年均增幅最大, 达到3.30%, 其次为余姚市和市区地带, 增

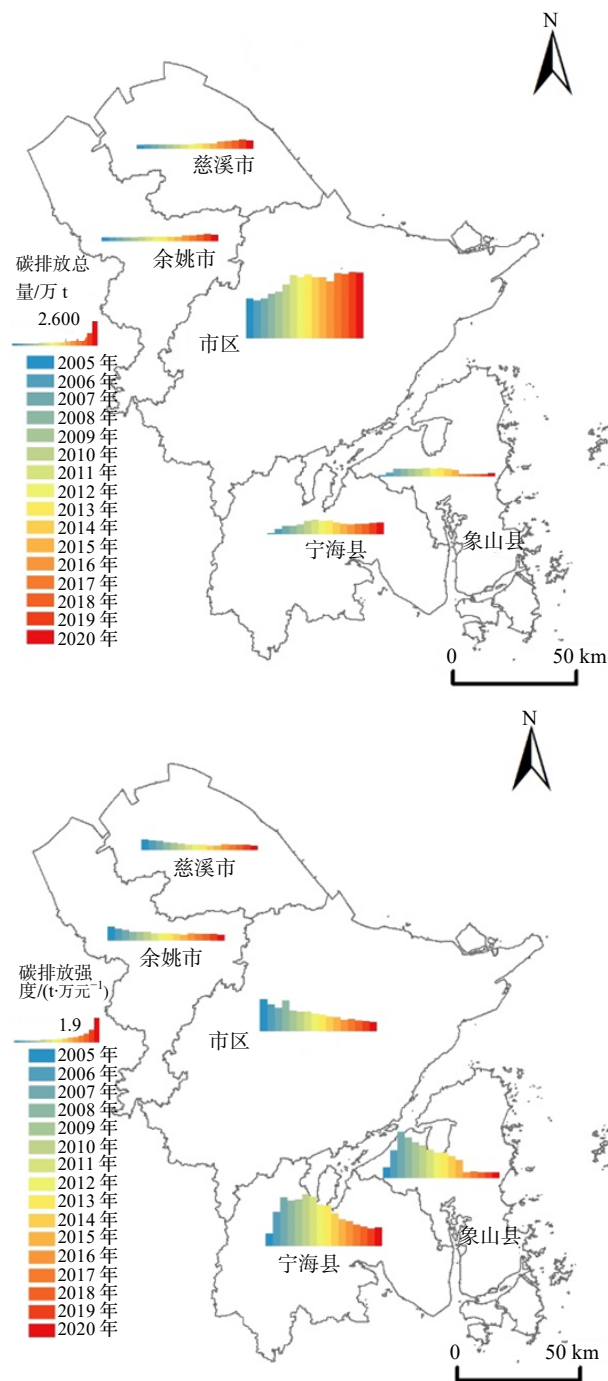


图2 2005—2020年宁波市碳排放总量时空变化

幅分别为 2.70% 和 2.01%。象山县的增长速度最慢, 2015 年就出现了下降趋势。

(2) 在碳排放强度方面, 宁波市的碳排放强度整体呈现由南到北递减趋势, 这与宁波市产业结构和社会经济发展状况相关性较高。研究期间宁波市各区域碳排放强度总体均呈现下降趋势, 其中位于南部的宁海县、象山县的碳排放强度先快速增长后急剧缩减, 变化较为剧烈, 而位于北部(余姚市、慈溪市)与中部(宁波市区地带)的碳排放强度变化则相对平缓, 呈现缓慢缩减趋势。

2.2 碳汇时空格局

2.2.1 碳储量结构及时空分布格局

研究期间宁波市碳储量呈现先降后增趋势。2005—2010 年碳储量减少了 0.10×10^9 t, 年均下降 0.37%, 到 2020 年增加 0.23×10^9 t, 年均增幅 0.43%, 整体碳储量增加 0.13×10^9 t, 年均增幅 0.16% (表 3)。

(1) 从不同土地利用类型的碳储量看, 林地占总碳储量中占比最大, 且其比例还在不断增加, 由 2005 年的 64% 增加到 2020 年的 70%, 年均增幅为 2.81×10^6 t; 其次为耕地, 但是其占比呈现下降趋势, 由 2005 年的 23% 下降到 2020 年的 13%, 年均降幅为 3.11×10^6 t; 其他生态用地(草地、水域及园地)的碳储量占比较低; 非生态用地(建设用地和未利用地)碳储量较为稳定, 介于 4%~5%。

(2) 从不同碳库的碳储量看, 土壤碳库碳储量是总碳储量增长的主要贡献者, 占据了增量的 67%; 其次为地上碳库与死亡有机物碳储量, 而地下碳库的碳储量则在不断缩减, 研究期间累计减少了 2.78×10^6 t。

(3) 从不同地理区域的碳储量分布格局看, 研究期间宁波市整体碳储量小幅上升, 空间分布基本维持“西高东低、南高北低、中部向四周递减”的格局(图 3)。西、南部地区的碳储量保护现状有所改善, 该地区为四明山余脉, 通过生态修复可以有效增加森林碳储量。东部以及北部地区的碳储量保护情况则相对较差。形成此现象的原因主要是该区域以建设用地为主, 能源消耗与人类活动较为剧烈。

2.2.2 碳汇结构及时空分布格局

2005—2020 年, 宁波市碳汇呈现先降后增趋势, 多年累计增加碳汇 1.31×10^7 t。其中 2005—2010 年碳汇呈现下降趋势, 2010 年碳汇总量仅有 -1.86×10^6 t, 年均下降 2.01%, 而至 2020 年碳汇总量上升至 0.87×10^6 t, 年均增幅为 3.98% (表 4)。

(1) 从不同土地利用类型的碳汇看, 林地对碳汇量增长贡献最大, 林地碳汇由 1.05×10^6 t 增加到 2.18×10^6 t, 占据总碳汇增长的 39%; 其次为园地与草地的碳汇, 分别占据总碳汇增长的 33% 与 18%。而耕地则是唯一出现碳亏损的地类, 2010—2020 年共缩减碳汇 1.78×10^6 t。

(2) 从不同碳库的碳汇量看, 4 大碳库的碳汇均为正增长, 其中土壤碳汇增加最为明显, 占据总碳汇增长的 66%; 其次为地上与地下碳库的碳汇, 死亡有机物碳汇变化最小, 仅占碳汇增长量的 3%。

(3) 从不同地理区域的碳汇分布格局看, 2010—2020 年宁波市的整体碳汇扭亏为盈, 固碳能力明显提升(图 4)。其中宁波市区地带的碳汇增长量占据碳汇总量增长的 59%, 其次为余姚市, 占约 26%。

表 3 2005—2020 年宁波市各土地类型碳储量变化

10^4 t

土地类型	地上碳储量	地下碳储量	土壤碳储量	死亡有机物碳储量	总碳储量
耕地	-649.20	-1 628.37	-2 183.72	-205.31	-4 666.60
林地	1 141.03	906.76	1 901.14	267.32	4 216.25
草地	-67.84	-155.25	-180.94	-5.27	-409.30
水域	93.27	311.64	629.43	8.32	1 042.66
建设用地	102.02	284.00	726.93	20.58	1 133.53
未利用地	-4.13	-6.20	-23.94	-0.04	-34.31
园地	9.03	9.47	7.18	2.15	27.83
总计	624.18	-277.95	876.08	87.76	1 310.07

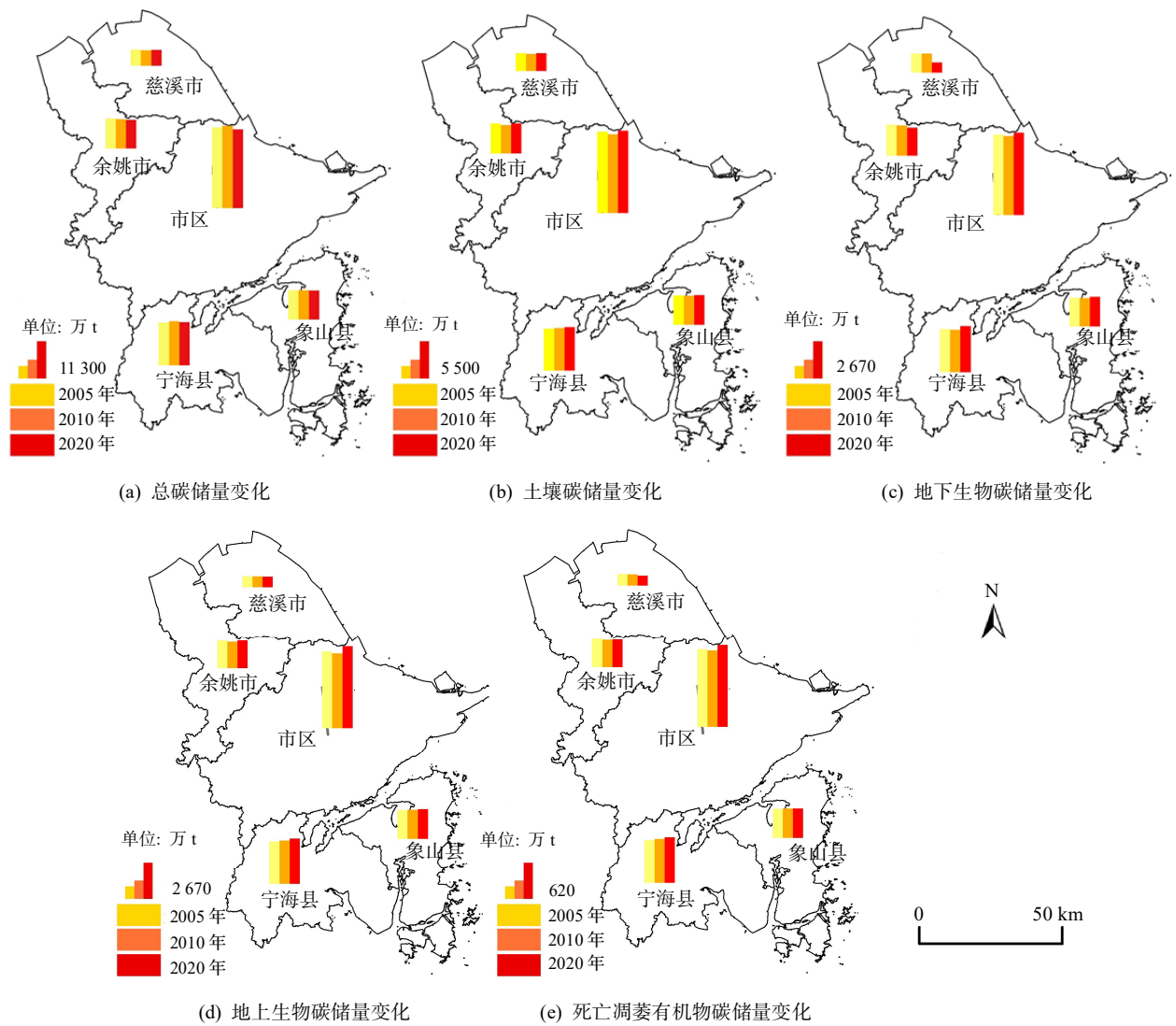


图 3 2005—2020 年宁波市碳储量变化

表 4 2010—2020 年宁波市各土地类型碳汇变化 10⁴ t

土地类型	地上碳汇	地下碳汇	土壤碳汇	死亡有机物碳汇	总碳汇
耕地	-24.08	-65.48	-80.61	-8.03	-178.18
林地	45.96	38.00	81.26	10.70	175.92
草地	13.46	32.42	37.49	0.90	84.27
水域	2.98	5.46	10.83	0.70	19.97
建设用地	6.59	4.47	5.37	1.64	18.07
未利用地	0.19	0.25	0.61	0.04	1.08
园地	16.44	8.41	125.53	2.14	152.52
总计	61.54	23.53	180.48	8.09	273.65

2.3 空间净碳排放强度

空间净碳排放强度是指单位面积的碳排放，受能源碳排放影响较为明显。从图 5 可见，宁波市

区地带、慈溪市的空间净碳排放强度较大，而这部分

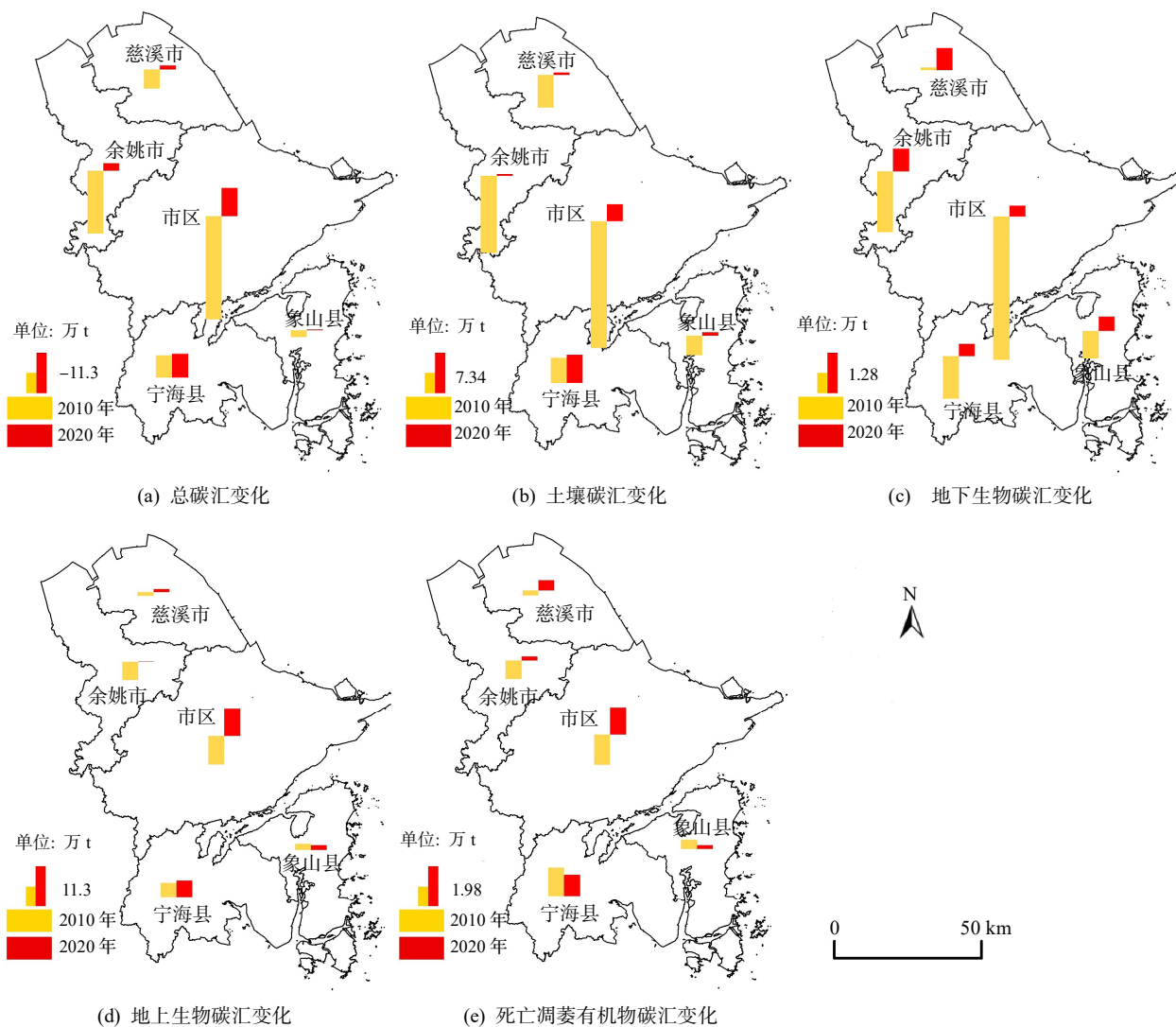
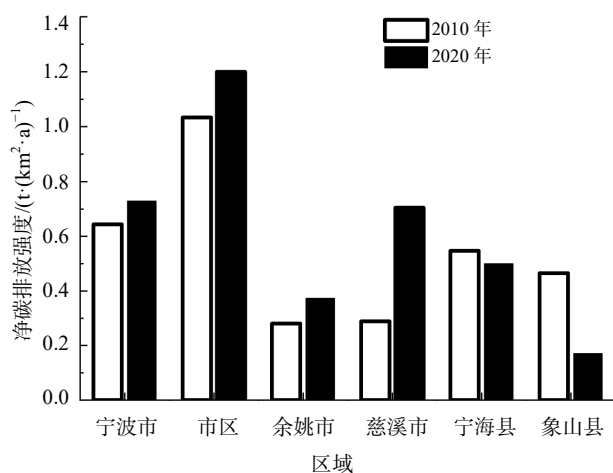


图4 2010—2020年宁波市总碳汇变化

图5 2010年和2020年宁波市净碳排放强度的空间分布
分区域也是宁波市城市化水平较高、能源活动较为

剧烈的区域。宁波市全域的空间净碳排放强度呈现较为明显的增长趋势，碳源的增长速率高于固碳速率，处于明显的碳亏损状态。其中，慈溪市为空间净碳排放强度增长趋势最强的地区，年增长率达到14.43%，高于宁波市全域的1.61%。宁海县与象山县的空间净碳排放强度则呈现负增长趋势，碳吸收量逐渐大于碳排放量。

2.4 核算结果对比

在进行碳源碳汇核算过程中存在一些不确定性因素，主要为核算方法不全面、排放系数可能存在误差以及数据缺失等。因此，本研究采用的基于IPCC核算方法可以有效地从整体上体现碳源和碳汇情况。在排放系数方面，以宁波地处的华东地区参数为主体，结合宁波市具体情况进行参数调整，

可以有效缩减误差。

此外,本研究的时间序列数据存在少许的缺失,采取线性内插的方式进行处理,能够减轻核算结果的不确定性。

与已有的研究数据对比,如傅素英等^[30]测算了2005—2010宁波市各类能源碳排放量的年增长为 4.30×10^5 t,与本研究宁波市同时间段碳排放的年增长结果 4.63×10^5 t具有较高的一致性(表5)。此外,李泽坤等^[31]和严志翰等^[32]以工业部门碳排放为主,核算了浙江省的碳排放情况,其计算结果与本研究计算的结果无显著差别。由此可知,本研究的核算结果具有较高的可信度,可以较全面地反映宁波市碳源碳汇的时空格局变化。

表5 碳排放量与文献结果对比 10^4 t

时间	本研究	文献[30]	文献[31]	文献[32]
2005年	4 032	3 650	4 656	4 045
2006年	4 489	3 950	—	—
2007年	5 274	4 430	—	—
2008年	5 661	5 475	—	—
2009年	5 886	5 751	—	—
2010年	6 815	6 231	6 289	6 913
2015年	7 118	—	—	7 676

3 结论与讨论

本研究基于宁波市2005—2020年时间序列土地利用数据和各行业部门相关统计数据,结合IPCC碳排放核算方法与InVEST模型的碳储量估算模块,核算了2005—2020年宁波碳源碳汇量与净碳排放强度,分析了碳源碳汇时空格局的变化特征及其各区域的差异,主要结论与建议如下:

(1)宁波市碳排放特征。研究期间宁波市碳排放呈现先快速增长后小幅缩减的变化特征,从2005年的 4.10×10^9 t增加到2013年的 7.70×10^9 t,其中80%以上的增长来自工业部门。空间上,各区域间碳排放总量与碳强度存在较大差异。宁波市市区地带具有最大的碳排放总量,且持续增长,而碳排放强度的高值区则位于宁海县和象山县,但是呈现显著的下降趋势。在过去20年间,虽然宁波市的主导产业已逐渐从传统制造业向数字化、智能

化转型,但是以炼焦石化为代表的重工业依然拥有巨大体量。鉴于此,需优化产业及能源结构,加速产业转型步伐,逐步实现产业与碳排放的“脱钩”;要调整城市道路布局,加强生态城市建设。着力于增加公路网与道路网密度,按照城市道路的低碳布局原则,对城镇路网进行重新规划,引导低碳出行。同时,通过在城市更新工程中增设公共绿地等开放式空间,探索建立含有“绿色折抵”功效的城市生态用地增存挂钩的制度。

(2)宁波市碳汇特征。2005—2020年宁波市碳储量呈现先降后增趋势,其中占比最大的2种土地类型是林地和耕地。在碳汇方面,宁波市2005—2020年累计增汇 1.31×10^7 t,碳汇增长的主要贡献者为林地,而耕地的碳汇量则在持续缩减。宁波市的碳汇空间格局稳定,以四明山余脉为核心形成了连续且范围广大的碳汇区,而宁波市北部平原地区的碳储量则呈现较为剧烈的下降趋势。因此,需要合理利用土地,严格保护耕地,通过优化农业空间布局来提高农业碳汇总量,同时着力降低农业生产中的碳投入,增强土壤的固碳效应,加强生态修复,提高森林碳汇能力。长期以来,宁波市城市化以及工业化进程给生态环境带来了沉重负担,因此可以通过管控用地、设立生态保护红线等方式提升生态空间的自我修复能力以及增强森林固碳能力。

(3)净碳排放特征。2005—2020年宁波市碳源碳汇的收支不平衡,整体上处于碳亏状态。在人类活动强烈的市区地带空间净碳排放强度水平较高,且呈现不断增长趋势,说明宁波市依然没能摆脱依赖能源消费拉动经济增长的桎梏,需要及时调整产业结构的分布。宁波市区、慈溪市净碳排放强度较高,而宁海县和象山县的碳汇则出现一定的盈余。因此,需要建立区域间的碳汇补偿机制,实施市场化减排增汇战略。宁波市各区域的经济发展与碳盈亏存在较大的空间异质性,需要由政府牵头建立合理的跨区域碳交易机制,推动各区域低碳协调发展。

参考文献:

- [1] WIEDMANN T, ALLEN C. City footprints and SDGs provide untapped potential for assessing city

- sustainability[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3758.
- [2] RAMASWAMI A, TONG K K, CANADELL J G, et al. Carbon analytics for net-zero emissions sustainable cities [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4:460-463.
- [3] 陈晓玲, 曾永年, 王慧敏. 区域土地利用总体规划碳效应分析: 以青海省海东市为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(增刊 1):31-34.
- [4] 赵荣钦, 黄贤金, 揣小伟. 中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(12):83-92.
- [5] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(6):804-812.
- [6] XIAO H J, DUAN Z Y, ZHOU Y, et al. CO₂ emission patterns in shrinking and growing cities: a case study of Northeast China and the Yangtze River Delta[J]. *Applied Energy*, 2019, 251:113384.
- [7] 陆大道. 中速增长: 中国经济的可持续发展[J]. *地理科学*, 2015, 35(10):1207-1219.
- [8] WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatiotemporal evolution of urban carbon emission performance in China and prediction of future trends[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(5):757-774.
- [9] 郑欣, 程久苗, 郑硕. 基于土地利用结构变化的芜湖市碳排放及其影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3):259-262, 268.
- [10] CHEN L C, GUAN X, LI H M, et al. Spatiotemporal patterns of carbon storage in forest ecosystems in Hunan Province, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 432:656-666.
- [11] GOMES E, INÁCIO M, BOGDZEVIČ K, et al. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: a review[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 781:146716.
- [12] 周晟吕, 胡静, 李立峰. 崇明岛中长期碳排放预测及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(4): 632-639.
- [13] 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 等. 城市能源利用碳足迹分析: 以厦门市为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(12):3782-3794.
- [14] LIANG Y J, LIU L J, HUANG J J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2):e0172494.
- [15] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(17):6161-6170.
- [16] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1):151-158.
- [17] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 22-28, 36.
- [18] 孙艳伟, 李加林, 李伟芳, 等. 海岛城市碳排放测度及其影响因素分析: 以浙江省舟山市为例[J]. *地理研究*, 2018, 37(5):1023-1033.
- [19] 胡欢, 章锦河, 熊杰, 等. 河北省碳源碳汇测算及碳减排压力分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(3):61-67.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[EB/OL]. [2023-10-10]. <https://www.doc88.com/p-4743539885141.html>.
- [21] CAI W B, PENG W T. Exploring spatiotemporal variation of carbon storage driven by land use policy in the Yangtze River Delta region[J]. *Land*, 2021, 10(11): 1120.
- [22] JACKSON R B, SCHENK H J, JOBBÁGY E G, et al. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):470-483.
- [23] WANG J Z, ZHANG Q, GOU T J, et al. Spatial-temporal changes of urban areas and terrestrial carbon storage in the Three Gorges Reservoir in China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95:343-352.
- [24] LI L, SONG Y, WEI X H, et al. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: a case study of Wuhan, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:106064.
- [25] FU Q, XU L L, ZHENG H Y, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon storage in response to urbanization: a case study in the Su-Xi-Chang region, China[J]. *Processes*, 2019, 7(11):836.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 刘业轩, 石晓丽, 史文娇. 福建省森林生态系统水源涵养服务评估: InVEST 模型与 meta 分析对比[J]. *生态学报*, 2021, 41(4):1349-1361.
- [29] 义白璐, 韩骥, 周翔, 等. 区域碳源碳汇的时空格局:

- 以长三角地区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 973-980.
- [30] 傅素英, 刘圣香. 基于 LMDI 模型的宁波市碳排放测算及影响因素分析[J]. 宁波大学学报(人文科学版), 2015, 28(2):77-81.
- [31] 李泽坤, 任丽燕, 马仁锋, 等. 基于效率视角的浙江省 2030 年碳排放配额分析[J]. 生态科学, 2020, 39(3):201-211.
- [32] 严志翰, 任丽燕, 刘永强, 等. 浙江省碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1427-1435.

Research on the spatiotemporal pattern changes of urban carbon sources and sinks: a case study of Ningbo

ZHU Qiang¹, ZHANG Zhiqiang¹, MA Songgen², JIN Ke³, ZHA Qianyu⁴, GAO Chao³

(1.Ningbo Natural Resources and Planning Big Data Center, Ningbo 315100, China;

2.Zhumadian Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Zhumadian 463000, China;

3.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

4.School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, United Kingdom)

Abstract: Accounting and dynamic monitoring of carbon sources and sinks in cities are indispensable for realizing carbon-neutral development paths. Based on the time series of LUCC data and statistical data of various sectors in Ningbo from 2005 to 2020, this paper uses the IPCC carbon accounting method and the InVEST model to dynamically analyze the characteristics of changes in the spatial and temporal patterns of urban carbon sources and sinks in Ningbo since 2005, in an attempt to reveal its regional differences and carbon surplus. The results show that: (1) Since 2005, Ningbo's total carbon emissions have increased rapidly, which reached 7.70×10^9 t in 2013, and then declined slightly, remained at around 6.75×10^9 t overall; among them, the industrial sector is the largest source of carbon emissions, accounting for more than 80% of the total carbon emissions. (2) Between 2005 and 2020, Ningbo's carbon stock first declined and then increased, by 2010, it had decreased by 0.10×10^9 t, and by 2020, it had increased by 0.23×10^9 t, with a cumulative increase of 1.31×10^7 t; among land types, forest land has the most significant effect in increasing sinks, while arable land is less effective. (3) The spatial net carbon emission intensity has been growing faster in the core area of Ningbo than that in the peripheral areas. The Ningbo government should take measures to reduce carbon sources and increase carbon sinks, and promote the coordinated development of low carbon in all regions through the establishment of an inter-regional carbon sink compensation mechanism.

Key words: carbon source; carbon sink; net carbon emission intensity; spatial and temporal patterns

(责任编辑 史小丽)