

DOI: 10.20103/j.stxb.202304100723

赵佳文, 晁云舒, 肖兰, 闫思嘉, 游巍斌, 徐道炜, 巫丽芸. 海岛碳排放核算与时空特征——以东山岛为例. 生态学报, 2024, 44(6): 2216-2227.

Zhao J W, Chao Y S, Xiao L, Yan S J, You W B, Xu D W, Wu L Y. Calculation of carbon emission and its spatio-temporal characteristics in Dongshan Island, Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2216-2227.

## 海岛碳排放核算与时空特征 ——以东山岛为例

赵佳文<sup>1,3</sup>, 晁云舒<sup>1,3</sup>, 肖兰<sup>4,5</sup>, 闫思嘉<sup>1,3</sup>, 游巍斌<sup>2,3</sup>, 徐道炜<sup>2</sup>, 巫丽芸<sup>2,3,\*</sup>

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建农林大学菌草与生态学院, 福州 350002

3 福建省南方森林资源与环境工程技术研究中心, 福州 350002

4 自然资源部海岛研究中心, 平潭 350400

5 福建省海岛资源生态监测与保护利用重点实验室, 平潭 350400

**摘要:** 把握地区碳信息发展动态是开展区域碳平衡规划的科学基础。以统计年鉴数据为基础, 对东山岛 2012—2021 年整体及各产业的直接碳排放量进行核算, 同时, 将产业与土地利用结合, 分析其空间表现形态, 运用核密度分析和克里金法分析碳排放源的空间影响, 采用高斯烟羽模型对工业点源的碳排放扩散进行空间模拟, 通过渔网和人口修正的方法分析海岛碳排放的空间分异, 以此探讨海岛碳排放的空间分布和空间影响特征。结果显示, 工业是东山岛的首要碳排放源, 2021 年工业碳排放量的大幅下降表明能源种类的转换对于工业碳减排具有重要作用; 渔业碳排放量总体占比 25% 左右, 是海岛地区不容忽视的碳排放源之一。在空间分布方面, 东山岛综合碳排放的空间分布呈“点状聚集, 面状扩散”的基本特征, 工业碳排放对周围地区的影响最大, 往往形成以工业碳排放源点为中心的碳排放热点核心区, 其次碳排放量较高的地区为人口聚集区, 丘陵区的碳排放量最低, 不同土地利用类型之间形成碳排放的交叉过渡区。最后, 本文从碳排放空间影响的视角出发, 根据不同形态的碳排放源提出“包围”、“伴随”和“介入”的碳汇空间规划策略, 这对区域的低碳规划具有一定参考意义。

**关键词:** 海岛; 东山岛; 克里金法; 高斯烟羽模型; 时空特征

## Calculation of carbon emission and its spatio-temporal characteristics in Dongshan Island, Fujian Province

ZHAO Jiawen<sup>1,3</sup>, CHAO Yunshu<sup>1,3</sup>, XIAO Lan<sup>4,5</sup>, YAN Sijia<sup>1,3</sup>, YOU Weibin<sup>2,3</sup>, XU Daowei<sup>2</sup>, WU Liyun<sup>2,3,\*</sup>

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 College of Juncao Science and Ecology, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China

3 Fujian Southern Forest Resources and Environmental Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350002, China

4 Island Research Center, Ministry of Natural Resources, Pingtan 350400, China

5 Fujian Key Laboratory of Island Monitoring and Ecological Development, Pingtan 350400, China

**Abstract:** Grasping the development dynamics of regional carbon information is the scientific basis for carrying out regional carbon balance planning. Based on the statistical yearbook data, the direct carbon emissions of Dongshan Island, Fujian Province as a whole and each industry from 2012—2021 were calculated. At the same time, industries and land use were combined to analyze their spatial patterns. Kernel Density analysis and the Kriging method were applied to analyze the spatial influence of carbon emission sources. The Gaussian plume model was used to spatially simulate the carbon emission

基金项目: 福建农林大学林学高峰学科建设项目 (72202200205); 福建省海岛资源生态监测与保护利用重点实验室开放基金 (2022ZD04)

收稿日期: 2023-04-10; 网络出版日期: 2023-12-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lywu2001@163.com

dispersion of industrial point sources. The spatial differentiation of carbon emission of the Dongshan island was analyzed by the method of fishing nets and population correction, in order to explore the spatial distribution and spatial influence characteristics of carbon emission on the Island. The results showed that industry was the primary source of carbon emissions. The significant decrease of industrial carbon emissions in 2021 indicated that the conversion of energy types played an important role in industrial carbon emission reduction. The overall share of carbon emissions from fisheries was about 25%, which was one of the sources of carbon emissions that could not be ignored in the Island area. The spatial distribution of integrated carbon emissions on Dongshan Island had the basic characteristics of “point-like aggregation and surface-like diffusion”. The industrial carbon emissions had the greatest impact on the surrounding areas, often forming a core area of carbon emission hotspots centered on the industrial carbon emission source points. This was followed by areas with higher carbon emissions as population gathering areas, hilly areas with the lowest carbon emissions. A cross-transition zone of carbon emissions was formed between different land use types. Finally, from the perspective of spatial impact of carbon emission, this paper proposed the spatial planning strategies of “encircling”, “accompanying”, and “intervening” carbon sinks according to different forms of carbon emission sources, which could serve as a reference for regional low carbon planning.

**Key Words:** sea island; Dongshan Island; Kriging; Gaussian plume model; spatial and temporal characteristics

全球气候变化已成为当前不容忽视的重要议题。煤炭、石油和天然气等化石燃料的燃烧是迄今为止造成全球气候变化的最主要原因,占全球温室气体排放的 75%以上,占有二氧化碳排放的近 90%。海岛是一类特殊的地域单元,拥有特有的经济模式和生态特征。它依托于海洋生物和矿物资源发展的海洋渔业和海洋工业,都形成了海岛独特的产业结构,带来特有的碳排放特征。特定的人类活动轨迹作用于相对独立的海岛空间,形成独特的碳排放空间特征,并自成系统。海岛生态系统的脆弱性必然导致其自然碳汇能力较弱,为减少碳外溢,向低碳经济转型是海洋经济为主导的海岛系统的必然选择。那么准确了解海岛碳排放时空动态特征成为所有碳问题研究的科学基础。

关于区域碳排放在全球<sup>[1]</sup>、国家<sup>[2]</sup>、省际<sup>[3]</sup>、主体功能区<sup>[4]</sup>、县市<sup>[5]</sup>、格网<sup>[6]</sup>等尺度均有较多的研究,多从土地利用<sup>[7]</sup>、产业<sup>[8-11]</sup>、能源<sup>[12]</sup>等单一视角出发,碳排放空间方面的研究如城市间碳排放差异<sup>[13]</sup>、碳收支<sup>[14]</sup>及碳溢出<sup>[15]</sup>等问题多集中在较大的研究范围,缺乏对县级小尺度区域内部碳排放的综合核算及其空间分异研究。目前国内外关于海岛碳排放的相关研究仅有少量案例可供参考, Camilleri-Fenech 等<sup>[16]</sup>关注小岛屿的废物管理过程中的碳问题,国内偏向关注海岛产业碳排放核算<sup>[17-18]</sup>以及运用模型对海岛地区碳排放影响因素进行研究<sup>[19-21]</sup>。因此,对于海岛碳排放的核算及其空间分布研究十分不充分。

本文以县级海岛东山岛为研究区,对其 2012—2021 共 10 年间各产业的直接碳排放量进行总体核算,同时,将产业碳排放与土地利用结合,构建海岛碳排放源的空间结构。考虑到夜间灯光数据反演方法<sup>[22-23]</sup>在小尺度区域应用中分辨率不足的问题,本文通过核密度分析、克里金法、高斯烟羽模型、渔网等方法对海岛碳排放空间分布和影响特征进行分析,希望探讨东山岛不同产业的碳排放时间变化特征,并探索不同空间形态的碳排放源呈现的空间特征,模拟其对周围所产生的空间影响,并最终掌握东山岛综合碳排放时空分布特征,为今后海岛区域碳收支平衡研究的空间规划提供科学基础。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

东山岛隶属于福建省漳州市东山县,面积 220km<sup>2</sup>,是福建省第二大岛,中国第七大岛,是东南沿海县级岛屿的典型代表。其位置介于福建厦门和广东汕头之间,东濒台湾海峡,为福建、广东、台湾三省交接地带,地理位置重要。东山岛地处亚热带季风气候区,水热条件优良,但多大风天气,生态环境脆弱,地貌结构相对简单,

土壤类型中风沙土比例较大,植被以人工次生林为主,林分结构单一,森林覆盖率为 27.9%。东山岛区位及土地利用如图 1 所示。

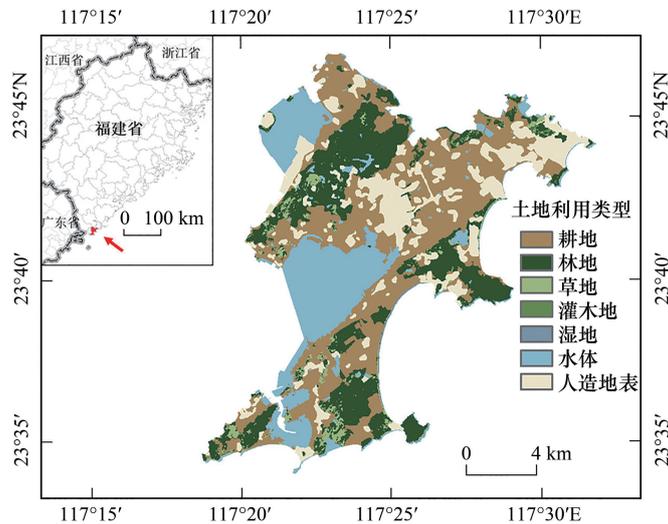


图 1 东山岛区位和土地利用图

Fig.1 Location and land use map of Dongshan Island

东山县辖一个国家级经济技术开发区和 7 个镇级人民政府,第七次全国人口普查数据为 219511 人,人口及各类产业集中分布于主岛东山岛。东山岛三次产业结构以第二产业为主,其中的规模工业为玻璃建材和水产品加工业,拥有全国最大的优质硅砂生产基地;其东南海域是著名的闽南渔场和粤东渔场交汇处,因此,东山岛海水养殖产业发展良好,水产品养殖面积 7598ha,已成为全国最大的鲍鱼养殖基地;滨海旅游资源丰富,旅游业是第三产业的主要发展方向,根据《东山城乡总体规划(2011—2030 年)》,东山县总体发展目标为国际旅游海岛。

## 1.2 数据来源

东山岛底图来自国家基础地理信息中心官方网站公众版 1:25 万矢量地图数据,新图号为 f50c001003。工厂相关数据来自爱企查 APP,利用百度地图拾取坐标系统获取其坐标;道路数据来自 OpenStreetMap 网站 (<https://www.openstreetmap.org/>);土地利用数据来自 GlobeLand30 网站 (<http://globallandcover.com/>),提取其中耕地、水体、近海水域和人造地表 4 种土地利用类型作为碳排放源地;人口数据来自 Worldpop (<https://www.worldpop.org/>) 网站。能源消费数据与各产业的经济数据来自 2012—2021 年东山统计年鉴及漳州市统计年鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 碳排放源梳理与碳排放核算

对东山岛碳排放源进行调查,选定合适的碳排放核算方法,通过碳排放量的整体核算为碳排放空间特征分析提供数据基础。为便于追踪排放源,本文所计算的均为直接碳排放,文中所提到的碳排放亦均指直接碳排放。作为人居海岛,东山岛的碳排放主要来自人类活动过程中能源消耗所产生的碳排放,而产业是人类活动的集中体现,因此选定产业的能源消耗数据作为区域碳排放计算的基础。根据《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017),结合东山统计年鉴数据对东山岛碳排放源进行梳理,东山岛碳排放主要来自农业、畜牧业、渔业、工业、建筑业、交通运输仓储和邮政业以及住宿和餐饮业,对各产业生产和运行过程中的直接碳排放量进行核算。

### 2.1.1 第二、三产业碳排放核算

参考国家发展和改革委员会发布的《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,燃料燃烧二氧化碳排放量主要基于分品种的化石燃料燃烧量、单位燃料的含碳量和碳氧化率计算得到,因此第二、三产业碳排放的计算公式为:

$$C = \sum_i \left( AD_i \times CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12} \right) + AD_{\text{电}} \times \theta \quad (1)$$

式中,  $C$  为各类化石能源燃烧碳排放总量;  $i$  为化石能源的种类;  $AD_i$  为化石燃料  $i$  的消费量, 固体燃料以 t 为单位, 气体燃料以万  $\text{m}^3$  为单位;  $CC_i$  为化石燃料  $i$  的含碳量;  $OF_i$  为化石燃料  $i$  的碳氧化率。以电力消耗数据对建筑业与住宿和餐饮业的直接碳排放量进行核算。各类化石燃料的排放因子数据参照《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》, 电力碳排放因子参照生态环境部文件 2018 年福建省电网平均  $\text{CO}_2$  排放因子, 取值  $0.3910\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 。

### 2.1.2 交通碳排放核算

东山岛交通运输方式以公路为主, 由于交通能源消耗的数据难以获得, 因此使用标准煤算法<sup>[24]</sup>测度其交通碳排放, 计算公式为:

$$C_{ij} = \text{GDP}_{ij} \times \gamma_{ij} \times EF \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中,  $C_{ij}$ 、 $\text{GDP}_{ij}$ 、 $\gamma_{ij}$  分别是第  $i$  个研究单元第  $j$  年的碳排放总量、GDP 总量和 GDP 能耗系数;  $EF$  值采用国家发改委能源研究所的推荐值  $0.67\text{t/tce}$ ,  $44/12$  为  $\text{CO}_2$  与 C 的分子量之比。

### 2.1.3 农牧业碳排放核算

种植业碳排放是指农业生产过程中农业物资使用与农田土壤产生的碳排放, 畜牧业碳排放主要包括反刍动物肠道发酵与粪便处理过程中产生的  $\text{N}_2\text{O}$  与  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[25]</sup>, 具体计算公式为:

$$C = C_{\text{res}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{animal}} \quad (3)$$

式中,  $C$  为东山岛农牧业总碳排放 (t);  $C_{\text{res}}$  为农业物资投入产生的碳排放;  $C_{\text{soil}}$  为农田土壤产生的碳排放;  $C_{\text{animal}}$  为畜禽养殖产生的碳排放。

$$C_{\text{res}} = \sum_{i=1} L_i \times \theta_i \quad (4)$$

$$C_{\text{soil}} = \sum_{i=1} Q_i \times \mu_i \quad (5)$$

$$C_{\text{animal}} = C_{\text{CH}_4} + C_{\text{N}_2\text{O}} = \sum_{i=1} N_i \times \alpha_i + \sum_{i=1} N_i \times \beta_i \quad (6)$$

式中,  $L_i$  为第  $i$  类农资使用量 (kg),  $\theta_i$  为  $i$  类农资的碳排放系数;  $Q_i$  为  $i$  类农田土壤面积 ( $\text{hm}^2$ ),  $\mu_i$  为  $i$  类农田土壤  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  碳源因子排放系数经转化成标准碳后的碳排放系数;  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  表示第  $i$  类牲畜所对应的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  碳排放系数。本文所计算的均为  $\text{CO}_2$  的排放量, 故将计算结果乘以  $44/12$  以将 C 转换为  $\text{CO}_2$ , 同时根据 2007 年 IPCC 发布的第四次评估报告进行置换,  $1\text{tCH}_4$  产生的温室气体等同于  $25\text{tCO}_2$ ,  $1\text{tN}_2\text{O}$  产生的温室气体等同于  $298\text{tCO}_2$ 。

### 2.1.4 渔业碳排放核算

渔业碳排放主要包括海洋捕捞和养殖两个生产过程中  $\text{CO}_2$  的排放, 结合相关参考文献<sup>[26-27]</sup>, 构建东山岛渔业碳排放计算架构, 如下:

$$C = C_{\text{fish}} + C_{\text{cul}} \quad (7)$$

式中,  $C$  为东山岛渔业总体碳排放;  $C_{\text{fish}}$  表示海洋捕捞产生的碳排放量;  $C_{\text{cul}}$  表示水产养殖设施能源消耗所产生的碳排放量。

$$C_{\text{fish}} = P \times \varepsilon \times CC_{\text{柴}} \times OF_{\text{柴}} \times \frac{44}{12} \quad (8)$$

$$C_{\text{cul}} = (\text{CON}_1 + \text{CON}_2) \times e_{\text{电}} \quad (9)$$

式中,  $P$  为渔船功率(kw);  $\varepsilon$  为渔船油耗转换系数( $\text{t}/\text{kw}$ );  $CC_{\text{柴}}$  为柴油的含碳量( $\text{GJ}/\text{t}$ );  $OF_{\text{柴}}$  为柴油的碳氧化率( $\text{kg}/\text{GJ}$ )。  $\text{CON}_1$  为增氧机的年耗电量(kwh);  $\text{CON}_2$  为水泵的年耗电量(kwh);  $e_{\text{电}}$  为电力的碳排放系数。渔船油耗转换系数参照农业部印发的《国内机动渔船油价补助用油量测算参考标准》进行计算。

$$\text{CON}_1 = S \times 0.8 \times \sigma \times h_1 \quad (10)$$

$$\text{CON}_2 = \frac{(S \times a \times w \times h_2 + C)}{60} \quad (11)$$

式中,  $S$  为养殖面积(a); 设使用增氧机的养殖面积为 80%;  $\sigma$  为每亩养殖面积的耗电量( $\text{kw}/\text{a}$ );  $h_1$  为每年增氧机的使用时间(h);  $a$  为平均水深, 取值为 1.5m;  $w$  为补水率, 取值为 2%;  $h_2$  为水泵使用时间(h);  $C$  为水体( $\text{m}^3$ )。

## 2.2 碳排放的空间分布特征及空间影响研究

为便于分析区域碳排放的空间分布特征以及呈现出更好的空间可视化效果, 基于数据的可获得性, 同时考虑疫情影响, 为更能体现常年状况, 本文以疫情前的 2019 年数据为例, 对碳排放源的空间分异、空间影响及扩散进行分析。

### 2.2.1 碳排放源的空间结构分析

将产业碳排放源与土地利用类型相结合, 采用点线面三种空间表达形态反映碳排放源的空间结构。工业表现为点状, 交通表现为线状, 农畜业、渔业、建筑业、住宿和餐饮业表现为面状, 具体对应关系如表 1。

点状排放源: 结合东山统计年鉴与爱企查 APP, 筛选出 100 个规模以上企业名单, 并利用百度地图拾取坐标系获取其坐标, 将其落位到东山岛底图上。

线状排放源: 以东山岛现有的道路系统作为交通碳排放源, 按照 OpenStreetMap 数据中的道路分类情况, 东山岛共包含 11 种道路类型。

面状排放源: 东山岛渔业集中分布于近海水域, 参照实际养殖面积, 以岛屿海岸线为基础外推, 其面积对应实际养殖面积, 最终确定由岸线向外划定 500m 缓冲区, 以缓冲区内的水体和近海水域作为渔业碳排放源地。农畜业、建筑业、住宿和餐饮业则通过土地利用类型图中相对应用地类型获取。

表 1 区域碳排放源的空间架构

Table 1 Spatial architecture of regional carbon emission sources

空间表达形式 Spatial expression	产业 Industry	土地利用类型 Land use type
点 Point	工业	工业区
线 Line	交通	交通线
面 Polygon	农畜业	耕地
	渔业	水体+近海水域
	建筑业	人造地表
	住宿和餐饮业	

### 2.2.2 碳排放的空间影响分析

碳排放对周围区域的影响符合距离衰减原理, 碳排放源地周围影响最大, 距离越远影响则越小。同时, 碳排放源的不同形态对周围产生的影响不同。不考虑其他影响气体扩散的因素时, 工业碳排放源以工厂烟囱为圆点向四周扩散, 碳排放量越大, 影响的半径范围就越大; 汽车在道路上行驶, 形成交通线状的碳排放源, 延伸扩展的范围更广; 同一土地利用类型的面排放源具有相似性, 同时其内部碳排放具有不均衡性。

为探究碳排放空间影响, 本文采用核密度分析或地统计插值分析方法分别对点、线和面碳排放源的空间分布进行分析。核密度分析方法是指使用核函数根据点或折线要素计算每单位面积的量值以将各个点或折线拟合为光滑锥状表面的方法, 用于计算要素在其周围邻域中的密度。运用核密度法对碳排放的点源和线源

进行空间影响分析。地统计插值方法是指运用统计方法和数学方法,基于现有样本数据生成表面和评估预测的不确定性的方法。克里金法在研究空气质量区域分布特征中具有良好的整体插值精度<sup>[28]</sup>,因此采用克里金法对碳排放的面源空间分布进行插值分析,以分析其在空间上的影响。

### 2.2.3 综合碳排放的空间分布及差异分析

由于碳排放核算为总体核算,东山岛属于县级行政区,以行政边界或土地利用为空间分布的单元尺度难以体现其内部差异性,为缩小尺度、提高碳排放空间分布的精确性,采用渔网进行降尺度空间划分,使得碳排放空间分布的最小单元落到到每一个格网。结合东山岛面积大小与精度问题确定 100m×100m 的渔网大小。将点线面的碳排放数据分别转成格网尺度的面数据,三种格网面数据叠加汇总后得到东山岛格网尺度下的总体碳排放空间分布数据。

通过划分格网降尺度会导致同一土地利用类型内部的格网碳排放数值出现等同,难以体现其内部的空间差异状况,因此采用人口因素影响下的碳排放空间分布对其进行修正,以弥补同一土地利用类型内部格网数值平均化的问题。人口规模与碳排放总规模具有显著的正相关关系<sup>[29]</sup>,人口越密集的地区碳排放量越大,因此以每一格网内的人口数量为依据计算格网的碳排放量。运用协同克里金法,协同东山岛格网尺度与人口因素影响下的两个碳排放空间分布数据集进行插值分析,得到东山岛综合碳排放空间分布图并分析其空间差异。

### 2.2.4 工业碳排放源的空间扩散模拟

作为季风区海岛,风力在碳排放的扩散中起着非常重要的作用。为探究工业点源碳排在风力影响下的扩散状况,采用高斯烟羽模型对其向下风向扩散的距离及浓度状况进行模拟。参考相关文献<sup>[30]</sup>,关于 CO<sub>2</sub> 扩散做出如下假设:CO<sub>2</sub>源强均匀连续;风速均匀稳定,风向平直;烟羽中 CO<sub>2</sub>浓度在水平方向和垂直方向都遵循高斯分布;CO<sub>2</sub>在扩散过程中质量守恒。具体高斯烟羽模型方程为:

$$c(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\bar{\mu}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (12)$$

式中,  $c$  为污染物浓度(kg/m<sup>3</sup>),  $Q$  为源强(kg/s),  $\bar{\mu}$  为泄露高度的平均风速(m/s),  $y$ 、 $z$  分别为用浓度标准偏差表示的  $y$  轴及  $z$  轴上的扩散参数,  $H$  为泄露有效高度(m)。相关的风速、云量等气候数据来自 weatherspark 网站(<https://weatherspark.com/>),采用经过修正的 Pasquill 稳定度分级法,通过查表的方式获得大气稳定度等级和扩散系数,运用 MATLAB 进行计算仿真。

## 3 结果与分析

### 3.1 碳排放量核算结果分析

以能源、电力等数据为基础,对东山岛 2012—2021 共 10 年间工业、交通、农畜业、渔业、建筑业、住宿和餐饮业等产业的碳排放量进行核算,结果如表 2 所示。

表 2 2012—2021 年东山岛碳排放核算结果

Table 2 Carbon emission accounting results of Dongshan Island from 2012 to 2021

碳排放量/(10 <sup>4</sup> t) Carbon emission		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
点 Point	工业	71.59	91.18	98.81	102.34	104.37	88.78	94.16	108.32	100.62	61.30
线 Line	交通	7.29	8.17	9.02	8.80	8.24	8.33	4.73	4.82	6.61	7.11
面 Polygon	农畜业	5.22	5.26	5.31	4.96	4.98	5.02	4.66	4.41	4.35	4.94
	渔业	39.88	43.17	45.85	48.71	46.70	44.93	42.48	41.54	41.15	41.58
	建筑业、住宿和餐饮业	14.49	17.26	19.78	21.16	23.80	22.27	25.23	32.47	34.94	37.67
总 Sum		138.46	165.04	178.76	185.98	188.09	169.34	171.25	191.57	187.66	152.61

东山岛 2012—2021 十年间 CO<sub>2</sub> 排放总量为 1728.77 万 t, 从图 2 碳排放总量折线图可以看出, 年际变化趋势呈鞍型。2012 年总体碳排放量最低, 为 138.46 万 t, 2012 至 2016 年间碳排放总量逐年递增, 2017 年略有下降, 2019 年总体碳排放量增至最高, 达 191.57 万 t, 2019 至 2021 年碳排放量逐年下降, 其中 2021 年碳排放量相较上一年减少了 18.68%, 变化的直接原因来自工业碳排放的减少。工业能源消耗与产业发展、政府政策息息相关, 依托丰富的海上风能资源, 近年来福建省大力发展海上风电, 《东山县国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》提出要加快“电动”东山建设, 加快海上风电建设和光伏产业布局, 努力探索新型电力系统发展愿景, 这为区域能源低碳转型及“双碳”目标的实现提供了莫大的助力。

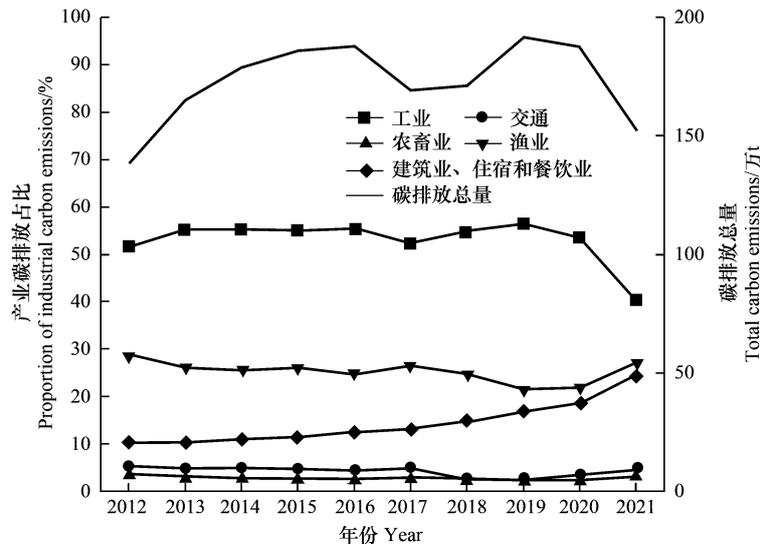


图 2 2012—2021 年东山岛碳排放总量及各产业碳排放占比

Fig.2 The total carbon emissions of Dongshan Island and the proportion of carbon emissions of various industries from 2012 to 2021

从各产业碳排放量来看, 工业是东山岛的首要碳排放源, 这与小岛屿国家的能源主导增长假说相一致<sup>[31]</sup>。工业在碳减排方面具有极大的潜力。2012—2016 年, 工业碳排放量呈稳步增长状态, 总体占比保持在 55% 左右, 2019 年工业碳排放量 108.32 万 t, 总体占比 56.54%, 达历年最高, 2021 年规模以上企业不再使用石油焦, 东山岛工业碳排放总体占比降至 40.17%, 由此可见能源消费种类的转换对于工业碳减排具有重要作用。渔业碳排放量的总体占比为 25% 左右, 作为东山岛最为重要的第一产业, 渔业碳排放也是海岛地区不容忽视的碳源之一, 其中约 88% 的碳排放来自海洋捕捞的油耗。建筑业、住宿和餐饮业碳排放呈递增趋势, 总体占比几乎逐年提高, 这与东山岛建筑、房地产以及旅游等产业的发展息息相关。东山岛交通碳排放量在总体碳排放中占比很低, 主要原因在于岛屿面积小且交通运输以公路为主, 总体交通体量小, 而高铁东山岛站的修建势必会增加交通碳排放, 因此应当提前做好高铁站能耗系统的低碳规划, 优化建设投入和高铁园区的最优运行策略。受地形等因素影响, 东山岛耕地面积少, 农畜业难以大规模发展, 因此农畜业碳排放一直处于较低水平且总体占比稳定。

### 3.2 空间特征分析

#### 3.2.1 碳排放源点的空间特征分析

东山岛以小微型企业为主, 大型企业数量少。运用自然断点法将 100 个规模以上的企业按照碳排放水平由低到高分为 6 个等级, 其中有 55 个企业属于第 1 等级, 数量最多, 第 5 等级包括 3 个企业, 第 6 等级包括 1 个企业, 因此企业间的碳排放量分布具有高度集中的特点。加之工厂区位的集聚, 工业碳排在空间分布上表现为集中分布于企业集聚地。由图 3 可以看到, 东山岛工业的碳排放主要聚集在岛屿中部腹地与东北部地区, 其他地区有零散分布, 这与工厂的布局和规模密切相关。岛屿中部为西埔镇地区, 西埔镇是东山县政府所

在地,同时东山经济技术开发区也布局于此,2020年人口普查数据显示,西埔镇人口约占总人口的30.1%,由此可见人口密集劳动力充足,且地势相对平坦开阔利于工厂的建造。东北部工厂多分布在沿海地区,以水产、食品产业居多,东山岛最大的玻璃工厂也布局于此。水产品加工是渔业关联产业,因此靠近渔港码头的地理位置有利于保证产品质量、提高运输时效性和减少运输成本。玻璃厂的沿海区位为原料与产品的运送提供了极为便利的海运条件,同时便于工业取水与污水处理。

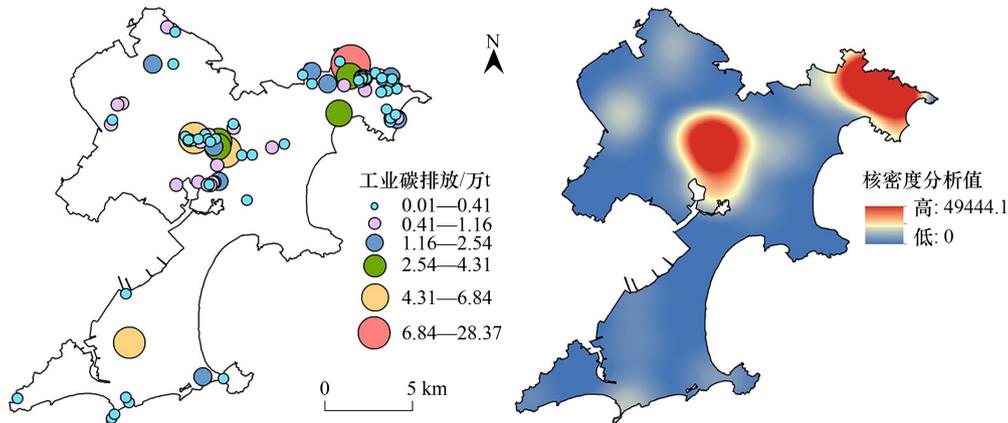


图3 工业碳排放分布及其核密度分析

Fig.3 Distribution of industrial carbon emissions and it's kernel density estimate

由核密度分析图可以看到,东山岛形成了中部和东北部两个工业碳排放核心区。中部地区因处岛屿腹地,碳排放辐射影响范围更广,而东北部沿海地区碳排放的辐射范围部分位于海上,因此受不同季节风力因素的影响,碳排放影响也具有较大的季节差异性。

运用高斯烟羽模型对东北部地区工厂 CO<sub>2</sub>在风力作用下的扩散状况进行模拟,结果如图4所示。东山岛风向主要受季风和台湾海峡走向制约,10月至翌年3月,东山岛东北部地区盛行东北季风,平均风力6.04m/s;6—8月东北部地区盛行西南季风,平均风力4.08m/s,模拟结果如图4所示。由于东北季风的风速大于西南季风,因此东北季风影响下的扩散范围大于西南季风,左图下风向8000m距离处的y轴扩散距离600m左右,而右图同样距离处的y轴扩散距离约为400m;在扩散点源附近,左图中的CO<sub>2</sub>浓度低于右图,在下风向8000m距离处,左图的浓度高于右图,因此盛行东北季风的时节更有利于CO<sub>2</sub>的扩散。而东北季风的下风向为陆地,西南季风的下风向为海域,因此东北季风会增加陆地地区的CO<sub>2</sub>含量。

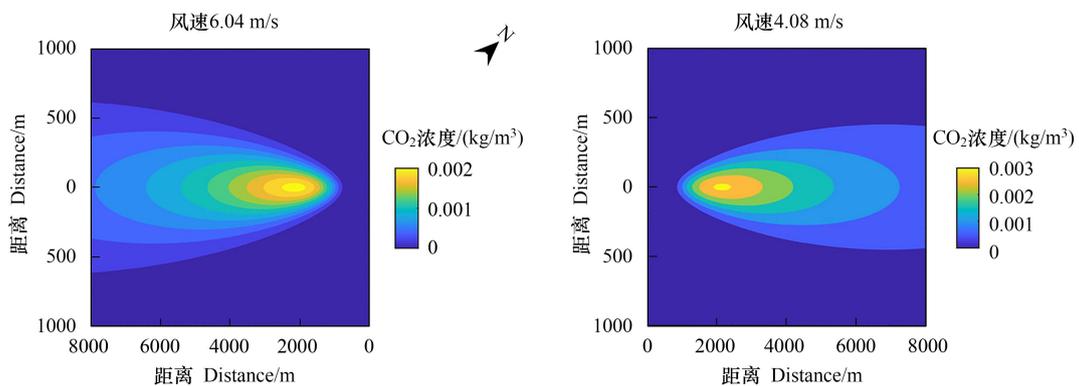


图4 CO<sub>2</sub>扩散模拟结果

Fig.4 CO<sub>2</sub> diffusion simulation results

### 3.2.2 碳排放线的空间特征分析

根据 OpenStreetMap Wiki 对各种道路类型的说明,结合我国《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)中道路等级划分标准,依据道路车流量确定不同类型的道路在交通碳排放分配中的比重。由图 5 可以看到,主要交通干线以及路网密集地区碳排放量更高;由核密度分析图可以看出,东山岛交通碳排放主要集中在中部地区,其次为东北部地区。中部碳排放最高的地区位于岛屿的中心位置,是东山岛重要的交通集散地,其碳排放量更高、影响范围也更大;东北部碳排放高区位于铜陵镇与康美镇的人口建筑物聚集区,也是热门旅游目的地,道路交通体系密集,人流量众多。两个高点之间有较为明显但偏向海岸的连接带,此处为旅游业重点开发区马銮湾和金銮湾所在地,基础设施建设力度大,大量酒店民宿集中此地;位于西北部的杏陈镇,由于靠近大陆一侧,是进出岛交通的必经之地,交通碳排放也相对较高。

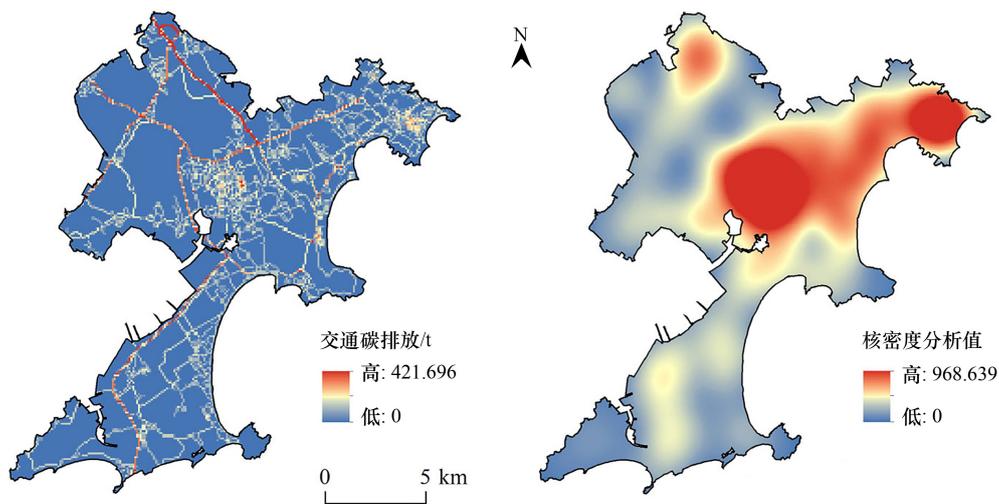


图 5 交通碳排放分布及其核密度分析

Fig.5 Distribution of traffic carbon emissions and it's kernel density

### 3.2.3 碳排放面的空间特征分析

图 6 为土地利用碳排放的空间分布图,其中人造地表的碳排放量最高,其次为水体和近海水域,林地草地和灌木地的直接碳排放量为零。采用普通克里金法对土地利用碳排放可能向周围的扩散进行插值分析,可以看到土地利用碳排放有东北、中部和西北三个明显的高值地区,其中东北部和中部地区均为房屋建筑集聚区,

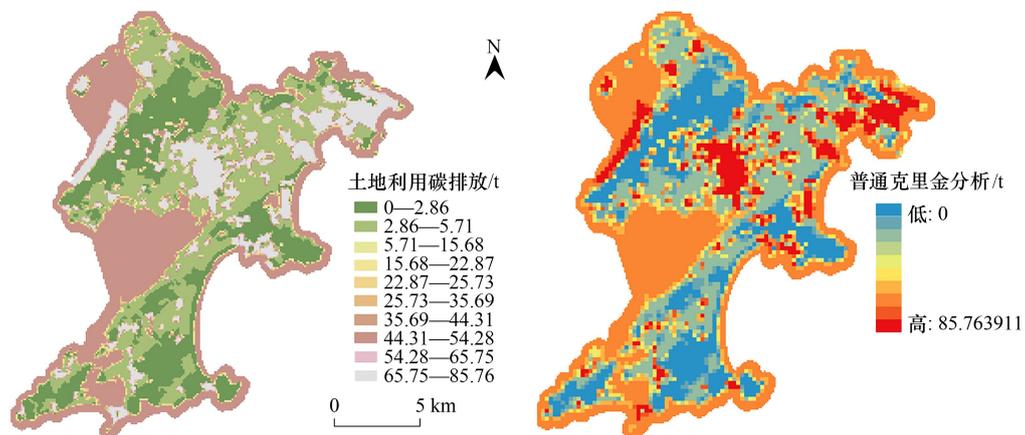


图 6 土地利用碳排放分布及其克里金分析

Fig.6 Distribution of land use carbon emissions and it's kriging analysis

西北部地区为盐田和工厂所在地,所对应的工业、建筑业与住宿和餐饮业均具有较高的碳排放水平。土地利用碳排放的分布与各土地利用类型的范围大致相同,但两者的边界并不完全一致,在不同土地利用类型的边界交叉处形成碳排放的交叉过渡区。如人造地表与林地相接处的碳排放值低于人造地表区域内部的碳排放值,这为空间上的区域碳减排提供思路。

### 3.2.4 综合碳排放空间特征分析

运用协同克里金法,协同东山岛格网尺度与人口因素影响下的两个碳排放空间分布数据集进行插值分析,得到综合碳排放空间分布图,如图 7 所示。由图可以看出,东山岛综合碳排放的空间分布呈现“点状聚集,面状扩散”的基本特征,即以工厂碳排放源点为中心形成碳排放热点核心区,以土地利用类型为基础由碳排放高值区向低值区扩散。碳排放量最高的地区集中在工厂附近,在图中体现为明显的热点核心区,这与工厂的高碳排放量与较少的占地面积具有直接相关性;其次的碳排放高值区为人口建筑物稠密的城镇村落聚集区,其中的建筑业、住宿和餐饮业碳排在总体碳排放中占据越来越重要的位置;近海水域的碳排放量也处于较高水平,主要原因是捕捞渔船的油耗产生了大量的碳排放;碳排放低值区为大帽山、赤山林场、苏峰山和西北部林区等丘陵地区,丘陵山区人类活动较少,植被的直接碳排放为零,同时会吸收大量的二氧化碳形成碳汇。

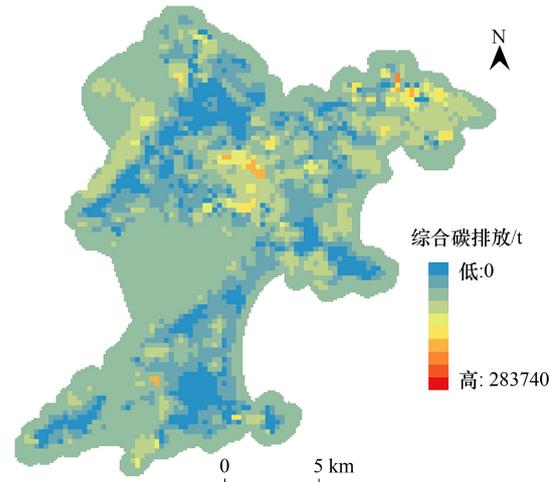


图 7 2019 年综合碳排放空间分布图

Fig.7 Spatial distribution map of comprehensive carbon emissions in 2019

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

以统计年鉴数据为基础对东山岛 2012—2021 年间碳排放量进行核算,将产业与土地利用结合对应,分析碳排放的空间表现形态,运用核密度分析、克里金法、高斯烟羽模型、划分渔网以及人口修正的方法探讨海岛碳排放的空间分布和空间影响特征。得到如下结论:

(1) 东山岛 2012—2021 十年间  $\text{CO}_2$  排放总量为 1728.77 万 t,其中 2012 年碳排放量最少,为 138.46 万 t,2019 年排放量最高,达 191.57 万 t,2021 年东山岛碳排放总量较前一年减少 18.68%,工业碳排放总体占比降至 40.17%。碳排放总量的年际变化趋势大致呈鞍型,后五年波动变化大,总体碳排放量变化的最主要原因来自工业碳排放量的增减。在“双碳”目标下,区域发展政策对区域碳排放具有重要的导向性。从产业碳排放来看,工业是东山岛的首要碳排放源,渔业作为海岛地区最为重要的第一产业,也是不容忽视的碳源之一,建筑业、住宿和餐饮业的碳排放逐年增加,在区域碳排放中占据愈加重要的位置。

(2) 从空间特征来看,东山岛综合碳排放的空间分布呈现“点状聚集,面状扩散”的基本特征。碳排放量最高的地区集中在工厂附近,其次碳排放高值区为人口建筑稠密的城镇村落集聚区,近海水域的碳排放量也处于较高水平;碳排放低值区为大帽山、赤山林场、苏峰山、和西北部林区等山地地区。从影响来看,由于工厂碳排放量大且占地面积较少,工业碳排对周围地区的影响最大,往往以工厂为中心形成碳排放的核心热点区;不同土地利用类型之间的影响呈现碳排放高值区向低值区扩散蔓延的趋势,在边界处形成碳排放的交叉过渡区。考虑风力因素对  $\text{CO}_2$  扩散的影响,东北季风风力更大,更有利于  $\text{CO}_2$  的扩散。

根据对东山岛的碳排放核算与时空特征的分析,可以为区域碳减排提供以下思路:

(1) 从源头上减少碳排放,发挥政策导向作用。建设区域微电网系统,优化能源配置,加快区域可再生能

源和清洁能源的开发和使用,这在建设初期需要大量的投入,单靠企业本身难以完成,因此需要政府统筹规划,同时可通过征收碳税等手段推进企业减少碳排放。

(2) 根据不同碳排放源的空间形态和空间影响,规划不同形态的碳吸收源。对于碳排放点源,采取“包围”策略,如围绕碳排放源点绿化植树;对于碳排放线源,采取“伴随”策略,沿线伴随扩展,即交通线两侧的绿化带行道树等;对于面排放源采取“介入”策略,增加不同土地利用类型的交叉,如建设小微绿地和“口袋公园”等。

## 4.2 讨论

本文以东山岛为例,对县域海岛的直接碳排放量进行核算并对其空间分布及空间影响特征进行分析,完善了县域海岛的碳排放核算框架,将县级区域的碳排放空间分布降至 100m 的格网尺度,同时根据不同形态的碳排放源所产生的不同影响,提出“包围”、“伴随”和“介入”的碳汇空间规划策略,这对区域的低碳规划具有一定参考意义。

但本研究也存在以下不足之处:首先,受数据获取限制,工业碳排放在碳排放源点间进行空间分配时仅依据工厂规模的大小进行,认为规模越大、所消耗的能源越多、碳排放量越高,结果可能存在一定误差,同时,由于地区能源品质差异、机组燃烧效率不同等原因,能源的碳排放因子与地区实际可能有一定出入;其次,研究中采用人口分布数据对碳排放进行空间格网修正,但人口对渔业碳排放的空间分布并不产生影响,因此渔业碳排放的内部差异性并未得到很好的体现;最后,CO<sub>2</sub>在大气中的扩散受多方因素的影响,本文所采取的高斯烟羽扩散模型仅考虑了固定源强在不同风力作用下的扩散情况<sup>[32]</sup>。

未来可加强对工厂碳排放量的实地监测,逐步修正地区碳排放因子,完善小尺度区域的碳排放核算体系,通过设置碳排放空间监测站点等方法提高小尺度区域分析的准确性。此外,东山岛正积极推进国际旅游岛建设,旅游业是东山岛重要的第三产业,后续可对岛内旅游业碳排放进行专门核算与分析。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Steining K W, Lininger C, Meyer L H, Muñoz P, Schinko T. Multiple carbon accounting to support just and effective climate policies. *Nature Climate Change*, 2016, 6(1): 35-41.
- [ 2 ] Shuai C Y, Shen L Y, Jiao L D, Wu Y, Tan Y T. Identifying key impact factors on carbon emission: Evidences from panel and time-series data of 125 countries from 1990 to 2011. *Applied Energy*, 2017, 187(6): 310-325.
- [ 3 ] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局. *生态学报*, 2020, 40(2): 447-458.
- [ 4 ] 王正, 周侃, 樊杰. 西部地区县域碳排放核算及主体功能区解析——以四川省为例. *生态学报*, 2022, 42(21): 8664-8674.
- [ 5 ] 宋旭, 贾俊松, 陈春滢, 陈皆红. 江西省能耗碳排放时空特征、脱钩关系及其驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(20): 7451-7463.
- [ 6 ] 王丹, 荆延德, 韩善梅, 高明秀. 基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9604-9614.
- [ 7 ] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [ 8 ] 邵桂兰, 侯涵涵, 李晨. 我国沿海地区海洋渔业碳排放时空分异研究——基于省际数据的 ESDA 分析. *山东财经大学学报*, 2018, 30(1): 27-34.
- [ 9 ] 郑博福, 梁涵, 万炜, 刘忠, 朱锦奇, 吴之见. 江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 70-80.
- [ 10 ] 刘军, 问鼎, 童响, 马勇. 基于碳排放核算的中国区域旅游业生态效率测度及比较研究. *生态学报*, 2019, 39(6): 1979-1992.
- [ 11 ] 曾晓莹, 邱荣祖, 林丹婷, 侯秀英, 张兰怡, 胡喜生. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4304-4313.
- [ 12 ] 刘贤赵, 高长春, 宋炎, 张勇, 宿庆, 田艳林. 湖南市域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2476-2487.
- [ 13 ] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究. *地理科学*, 2021, 41(11): 1917-1924.
- [ 14 ] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 秦耀辰, 刘英, 丁明磊, 焦士兴. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区. *地理学报*, 2014, 69(10): 1425-1437.
- [ 15 ] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.
- [ 16 ] Camilleri-Fenech M, Oliver-Solà J, Farreny R, Gabarrell X. Where do islands put their waste? - A material flow and carbon footprint analysis of municipal waste management in the Maltese Islands. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195(27): 1609-1619.

- [17] 王信, 于涵, 施雨, 张沂颀. 基于多要素耦合的舟山农业空间低碳评估与规划. 同济大学学报: 自然科学版, 2022, 50(2): 168-177.
- [18] Pu W, Mi T A. On estimating transportation energy consumption and carbon dioxide emissions from off-shore island tourism—a case study of Haikou city, China. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(6): 472-479.
- [19] Cai W Q, Song X M, Zhang P F, Xin Z C, Zhou Y, Wang Y T, Wei W D. Carbon emissions and driving forces of an island economy: a case study of Chongming Island, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254(13): 120028.
- [20] 刘锴, 卞扬, 王一尧, 刘桂春, 张耀光. 海岛地区海洋碳汇量核算及碳排放影响因素研究——以辽宁省长海县为例. *资源开发与市场*, 2019, 35(5): 632-637.
- [21] 孙艳伟, 李加林, 李伟芳, 马仁锋. 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. *地理研究*, 2018, 37(5): 1023-1033.
- [22] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [23] 贾涛, 杨仕浩, 李欣, 鄢鹏高, 喻雪松, 罗希, 陈凯. 武汉居民建筑物碳排放反演计算和时空分析. *地球信息科学学报*, 2020, 22(5): 1063-1072.
- [24] 候勃, 岳文泽, 王腾飞. 中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素——以上海市为例. *经济地理*, 2020, 40(9): 82-90.
- [25] 张义琼. 近 29 年来德阳市农牧业碳排放估算及脱钩关系研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- [26] 岳冬冬, 王鲁民, 王茜, 周雨思. 我国海洋捕捞渔业温室气体排放量估算与效率分析. *山西农业科学*, 2013, 41(8): 873-876.
- [27] 徐皓, 刘晃, 张建华, 倪琦, 沈建, 蒋励. 我国渔业能源消耗测算. *中国水产*, 2007(11): 74-76, 78.
- [28] 丁卉, 余志, 徐伟嘉, 曹生现, 李红霞, 刘永红. 3 种区域空气质量空间插值方法对比研究. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 309-315.
- [29] 周健, 王淑婧, 高琴, 张晓微. 人口特征、经济增长与碳排放的关系研究. *武汉大学学报: 哲学社会科学版*, 2015, 68(2): 94-101.
- [30] 付金宇, 李颖. 基于高斯烟羽模型的船舶尾气扩散研究. *海洋通报*, 2018, 37(2): 235-240.
- [31] Yorucu V, Varoglu D E. Empirical investigation of relationships between energy consumption, industrial production, CO<sub>2</sub> emissions, and economic growth: the case of small island states. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(12): 14228-14236.
- [32] 易俊华, 许泉立. GIS 环境下基于高斯烟羽模型的大气点源污染扩散模拟研究. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45(8): 73-76, 84.