碳中和背景下闽台两地碳平衡的时空分异及影响因素对比研究

张发梓[1,2], 杨祎诺[1,2], 谢永顺[1,2], 王 强[1,2],
李一楠[1,2], 张 欣[1,2], 徐茹玲[1,2], 黄雪婷[1,2], 安枭旭[1,2], 许思哲[1,2]
(1.福建师范大学 地理研究所, 福建 福州 350117;
2.福建师范大学 地理科学学院/碳中和未来技术学院, 福建 福州 350117)

摘 要: [目的] 在"双碳"战略目标引领下,开展闽台两地碳平衡的协同对比研究,为区域碳汇格局分异机制及推动跨区域碳中和协同治理提供科学指导。[方法] 基于闽台两地2003—2023年县域尺度数据,运用标准差椭圆模型、地理探测器等方法比较了闽台两地碳平衡的时空分异特征及影响因素。[结果] ①2003—2023年闽台碳排放与碳吸收时空格局分化明显。在碳排放方面,福建省呈"东南部高,西北部低",总量持续上升;台湾省呈"西部高,东部低",总量先升后降。在碳吸收方面,福建省总量先降后升;台湾省呈"中东部高,西岸低"分布。②在碳平衡方面,福建省呈稳定的"西北部高,东南部低"梯度,空间主轴为西南-东北向且重心持续北移,约70%县区碳平衡比下降。台湾省则为"东强西弱"特征,空间主轴东西贯穿且重心持续东移,东部贡献超60%碳汇增量。③单因子探测显示,闽台碳平衡均以NDVI为核心驱动。台湾省由自然要素主导,坡度(0.78)、降水(0.76)解释力突出。[结论] 福建省呈现更强的人类活动耦合特征,人口密度(0.62)成为第二大因子。交互作用揭示福建省以NDVI与降水的线性协同增强为主(0.95),体现水分对植被碳汇的直接效应;台湾省以NDVI与气温的非线性增强最为突出(0.98),反映植被对温度的高度敏感。人类活动影响方面,台湾省经济社会因子呈更复杂的非线性放大效应,福建省则为相对均衡的人地耦合关系。

关键词: 碳平衡; 时空分异; 标准差椭圆模型; 地理探测器; 闽台融合
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0323-12 **中图分类号:** X24, X171.1

文献参数: 张发梓, 杨祎诺, 谢永顺, 等.碳中和背景下闽台两地碳平衡的时空分异及影响因素对比研究[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 323-334. Zhang Fazi, Yang Yinuo, Xie Yongshun, et al. Comparative study on spatiotemporal differentiation of carbon balance and its influencing factors in Fujian Province and Taiwan Province under background of carbon neutrality [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):323-334.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.029 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.029**

Comparative study on spatiotemporal differentiation of carbon balance and its influencing factors in Fujian Province and Taiwan Province under background of carbon neutrality

Zhang Fazi[1,2], Yang Yinuo[1,2], Xie Yongshun[1,2], Wang Qiang[1,2],
Li Yinan[1,2], Zhang Xin[1,2], Xu Ruling[1,2], Huang Xueting[1,2], An Xiaoxu[1,2], Xu Sizhe[1,2]
(1.*Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350117, *China*; 2.*School of Geographical Sciences / School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350117, *China*)

Abstract: [Objective] Under the guidance of "dual carbon" goals, a collaborative comparative analysis of carbon balance in Fujian Province and Taiwan Province was conducted in order to provide scientific guidance for understanding the differentiation mechanisms of regional carbon sink patterns and promoting cross-regional

收稿日期:2026-03-14 **修回日期:**2026-04-06 **采用日期:**2026-04-11
资助项目:国家自然科学基金项目"'东数西算'视域下新能源开发对大数据产业空间结构的重塑过程、作用机理及优化调适"(42471191);国家自然科学基金青年项目"关系视角下全球海运碳排放空间组织结构及预测"(42401199);福建省科学技术厅公益类竞争性项目"碳达峰碳中和目标下区域国土空间开发和协同发展研究"(2023R1039)
第一作者:张发梓(1992—),男(汉族),福建省三明市人,博士研究生,研究方向为国土空间规划与能源地理。Email:qbx20240159@yjs.fjnu.edu.cn。
通信作者:王强(1982—),男(汉族),河北省邯郸市人,博士,教授,博士生导师,主要从事国土空间规划与能源地理。Email:wangq@fjnu.edu.cn。

collaborative governance for carbon neutrality. [Methods] Based on county-level data from Fujian Province and Taiwan Province from 2003 to 2023, this study compared the spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of carbon balance using standard deviational ellipse analysis, GeoDetector, and other methods. [Results] ① From 2003 to 2023, the spatiotemporal patterns of carbon emissions and absorption in Fujian and Taiwan exhibited significant differentiation. In terms of carbon emissions, Fujian showed a spatial pattern of "high in the southeast and low in the northwest," with a continuous upward trend in total emissions, while Taiwan featured a pattern of "high in the west and low in the east," with total emissions initially increasing and then declining. Regarding carbon absorption, Fujian's total absorption showed an initial decrease followed by an increase, whereas Taiwan exhibited a spatial pattern of "high in the central and eastern regions and low in the west coast." ② In terms of carbon balance, Fujian exhibited a stable gradient of "high in the northwest and low in the southeast," with the spatial axis oriented southwest-northeast and the center of gravity continuously shifting northward. Approximately 70% of its counties and districts experienced a decline in the carbon balance ratio. Taiwan, by contrast, displayed a pattern of "strong in the east and weak in the west," with the spatial axis spanning east-west and the center of gravity persistently moving eastward. The eastern region contributed over 60% of the total increase in carbon sinks. ③ Single-factor detection revealed that NDVI was the core driver of carbon balance in both Fujian and Taiwan. In Taiwan, carbon balance was predominantly governed by natural factors, with slope gradient (0.78) and precipitation (0.76) exhibiting strong explanatory power. [Conclusion] Fujian displays more pronounced human activity coupling characteristics, with population density (0.62) emerging as the second most influential factor. Interaction analysis further reveals that Fujian is mainly characterized by a linear synergistic enhancement between NDVI and precipitation (0.95), reflecting the direct effect of moisture on vegetation carbon sinks. Taiwan exhibits the most prominent nonlinear enhancement between NDVI and temperature (0.98), indicating the high sensitivity of vegetation to temperature. Regarding human activity impacts, Taiwan's socioeconomic factors demonstrate more complex nonlinear amplification effects, whereas Fujian exhibits a relatively balanced human-land coupling relationship.

Keywords: carbon balance; spatiotemporal differentiation; standard deviational ellipse model; GeoDetector; Fujian-Taiwan integration

人类活动正深刻改变着全球气候系统和生态格局,由此加剧的温室效应严重影响了人类可持续发展[1]。为应对气候变化,多国相继提出碳中和战略目标,作为全球最大的碳排放国,中国于2020年承诺2060年前实现碳中和[2]。碳源碳汇作为地球系统关键环节,其动态变化不仅直接影响全球气候变化、生物多样性维持,还与城市化进程、土地利用转型深度耦合[3]。因此,维持碳平衡是生态系统气候调节服务的核心体现,其功能提升既是应对全球变暖的关键路径,也是推动碳中和目标实现的重要基础[4]。

碳平衡(carbon balance)指生态系统碳输入与输出的动态均衡状态,是全球气候变化研究的核心议题之一[5],一般通过碳排放和碳吸收之间的关系进行表征。科学诊断不同区域的碳盈亏状况,进而精准施策以优化区域碳平衡,已成为推动"碳达峰碳中和"目标实现的关键路径[4]。国内外学者在碳源碳汇核算的基础上,对碳平衡开展了系统性研究。早期阶段,碳平衡研究的核心关注在于理解大气与生物圈之间的碳交换过程,并分别解析碳源排放与碳汇吸收的独立贡献[6]。近年来,研究重点逐渐从源、汇的独立分析转向二者交互作用的动态解析。目前主流方法包括净值法与系数法,净值法通过碳排放与碳汇的差值刻画绝对差异[7],系数法则以二者比值表征相对差异[8],二者共同构成了相关研究的方法论基础。鉴于系数法在城市间横向比较中具有更优的适用性[9],本研究以其为核心构建碳平衡指数,用以评估区域碳平衡水平。在研究尺度上,现有成果已覆盖省域[10]、经济带[11]、市域[12]或单个区域等[13]多个层面,为理解碳平衡的时空分异奠定了基础。总体而言,现有碳平衡研究已取得一定进展,但既有成果多聚焦于单一区域案例分析[14],难以区分自然本底与社会经济因素对碳平衡的各自作用;少数跨区域比较研究,又往往在自然条件差异显著的地区展开,导致自然本底的差异掩盖了社会经济因素的真实影响。因此,在自然本底相似性的前提下,探究不同的社会经济发展路径如何塑造碳平衡,成为一个亟待回答的科学问题。

国家《关于支持福建探索海峡两岸融合发展新

路的实施意见》明确提出建设两岸融合发展示范区[15],重点推动福建省与台湾省(以下简称“闽台”)在碳汇监测等领域的深度合作,探索生态共保与绿色发展新模式。在此背景下,闽台两地构成研究碳平衡的理想“准自然试验”。一方面,两地自然本底高度相似——同属亚热带季风气候,以山地丘陵为主,森林覆盖率均超60%[16];另一方面,两地处于不同发展阶段——福建省正处于工业化后期,台湾省已进入后工业化社会。这种“同源异路”的发展轨迹,使得闽台对比能够揭示碳平衡格局随发展阶段演变的规律。通过比较两地的时空分异与驱动机制,可识别碳平衡从快速工业化阶段向后工业化阶段演进的一般性特征,为研判福建碳平衡的未来走向提供参考。既有研究已关注闽台国土空间格局[17]与村落布局[18]对比,但对两地碳平衡特征的系统性探讨尚属空白。因此,开展闽台碳平衡对比研究,既是构建两岸协同减排机制的科学基础,也是支撑融合发展示范区建设的现实需要。鉴于此,本研究基于闽台两地2003—2023年县域尺度数据,运用标准差椭圆模型等方法系统比较闽台两地碳平衡的时空分异特征,并借助地理探测器探究其驱动机制的差异,旨在揭示相似自然本底下碳平衡格局随社会经济发展路径演变的规律,以期为两岸融合发展示范区的碳中和协同治理提供科学参考。

1　研究区域与数据

1.1　研究区概况

福建省和台湾省被称为“闽台”,两地隔台湾海峡相望,具有深厚的历史文化联系。两地在行政架构、地形地貌及经济阶段呈差异性特征。在地理格局上,福建省(1.24×10^5 km^2)辖9个地级市,53市县,台湾省(3.60×10^4 km^2)设6直辖市及14市县(不含马祖、金门县及附属岛屿)。两地均以山地丘陵地貌为主(福建省比例为90%,台湾省比例为67%),同属亚热带季风气候,但福建省地势呈西北-东南梯度,台湾则为中央山脉辐射结构。在社会经济方面,2023年数据显示,福建省处于工业化后期,人均生产总值12.99万元;台湾地区处于后工业化阶段,人均生产总值约22.90万元,后者人均产值约为前者的1.76倍,两地经济能级存在明显差距。

1.2　数据来源

本研究数据主要包括:①2001—2020年逐年植被净初级生产力(NPP)与归一化植被指数(NDVI)数据分别源自美国国家航空航天局(NASA)发布的MOD17A3和MOD13Q1产品(http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/),空间分辨率为500 m,时间分辨率为1 a。土地利用数据源于中国科学院地理科学与资源研究所(http://www.resdc.cn),空间分辨率为1 km×1 km。将闽台的土地利用状况重新划分为6大类,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地。②DEM数据源于地理空间数据云平台,空间分辨率为30 m。降水、气温数据源于欧盟及欧洲中期天气预报中心等组织发布的ERA5-Land数据集。③福建省社会经济数据源于各区、县政府公开的统计年鉴和国民经济和社会发展统计公报。台湾省县域尺度的社会经济数据获取较为困难,本研究通过多渠道收集台湾省统计局网站、“行政院”主计总处、经济部等官方发布的公开数据,并结合相关统计年鉴,尽可能保证数据的完整性与可比性。以上数据统一投影至WGS_1984_UTM_Zone_49N投影坐标系,并统一重采样至500 m空间分辨率。

2　研究方法

2.1　碳排放数据处理

碳排放数据核算主要采用全球环境研究中心(Center for Global Environmental Research, CGER)发布的全球CO_2排放栅格数据,该数据集为分辨率1 km×1 km的年度栅格数据,是基于多源卫星遥感与地面排放清单融合反演,涵盖化石燃料燃烧、水泥生产和天然气燃烧等主要人为碳排放源[19]。相比传统统计年鉴的碳排放核算,具有更高的空间分辨率和时空一致性,适用于跨区域、长时序的碳排放空间格局比较研究。最终,结合中国行政边界数据提取闽台两地2003,2013和2023年的县级尺度CO_2排放数据。

2.2　碳吸收估算

碳吸收以净生态系统生产力(net ecosystem production, NEP)表征,是指生态系统通过光合作用固定的有机碳总量,扣除植物自身呼吸和土壤异养呼吸后的净碳积累量,是区域尺度碳汇估算的常用指标。计算公式为

$$\mathrm{NEP}=\mathrm{NPP}-R_h \tag{1}$$

式中:NEP表征净生态系统生产力[以C计,g/(m^2·a)];NPP为植被净初级生产力[以C计,g/(m^2·a)];R_h为土壤微生物呼吸量[以C计,g/(m^2·a)]。当NEP大于0时,表示植被吸收的量大于排放量,生态系统表现为碳汇[20]。

相较于仅考虑植被碳固定的NPP,NEP能够更完整地反映生态系统与大气之间的净碳交换,是碳平衡研究中广泛采用的核心指标,具有机理清晰、参数可获取性强的优点[14]。

2.3 碳平衡能力测算

碳生态承载系数(ESC)表示区域碳吸收空间与碳排放空间的比值[10],该指标反映区域碳吸收对碳排放总量的消纳能力,代表碳平衡能力强弱,计算公式为

$$ESC=\frac{CA_{ij}}{\sum_{ij}CA_{ij}}\Big/\frac{CE_{ij}}{\sum_{ij}CE_{ij}} \quad (2)$$

式中:如果ESC>1,表明碳吸收能力较强,碳平衡能力较强;反之,碳平衡能力较弱。

2.4 标准差椭圆模型

标准差椭圆是一种空间统计方法,主要用于描述地理要素空间分布的方向性、离散程度与重心迁移趋势[21]。本研究以闽台各县区碳平衡比值为权重,分别计算2003,2013和2023年两省碳平衡比的标准差椭圆,椭圆方位角用于刻画高值区的主轴方向,而重心坐标的动态变化则揭示空间迁移轨迹,并对比3期椭圆的重心位置,定量刻画两地碳平衡空间格局的稳定程度与演变特征。具体计算公式详见文献[22]。

2.5 地理探测器

地理探测器是一种用于分析要素空间分异特征并探测其背后驱动因素的模型方法[23]。该方法在统计上不要求变量服从特定分布,且能避免多变量共线性问题,在因果推断中不易受到变量内生性干扰[24]。它包括因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互探测器等4个主要探测器。本研究选用因子探测和交互探测器来探究闽台两地碳平衡压力的影响因素及其影响程度。

2.5.1 因子探测

该方法用于分析不同自变量x对碳平衡空间分异的解释程度。通过计算各因子对应的q值来度量其解释力,计算公式为

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum N_h\sigma_h^2 \quad (3)$$

式中:q值范围为0~1,q值越大,表明该因子对闽台碳平衡空间分异的贡献越强,反之则越弱。

2.5.2 交互探测

该方法用于分析不同风险因子之间的相互作用关系,通过衡量两个因子x_1和x_2共同作用时对碳平衡空间分异的解释力,判断其交互效应属于增强、减弱还是相互独立[25]。因子之间的协同关系如表1所示。

为了系统比较闽台两地影响碳平衡的关键因素,本研究结合既有文献,从自然环境与社会经济两个维度选取2023年闽台两地的相关指标。自然地理因素:降水(x_1)和气温(x_2)是控制植被生长和碳汇能力的关键气候因子,直接影响生态系统生产力[20];NDVI(x_3)表征植被覆盖度和生长状况,是区域碳汇能力的直接指示因子[14];坡度(x_4)通过影响地表径流、土壤水分和人类活动可达性,间接制约土地利用方式和碳汇空间分布[17]。社会经济因素:GDP(x_5)反映区域经济发展水平,与能源消费和碳排放密切相关[11];人口密度(x_6)表征人类活动强度,高密度区通常伴随较高的碳排放和土地利用压力[10];第二产业占GDP比重(x_7)衡量工业化水平,高能耗产业集中的地区碳排放强度较高;土地利用类型(x_8)直接决定了碳源(建设用地)与碳汇(林地、耕地)的空间配置。在综合考虑数据可获性与共线性检验结果(VIF<10)的基础上,最终确定8项影响因素,并采用自然断点法将其划分为6类进行探测分析。

表1 交互作用探测类型

Table 1 Types of interaction detection

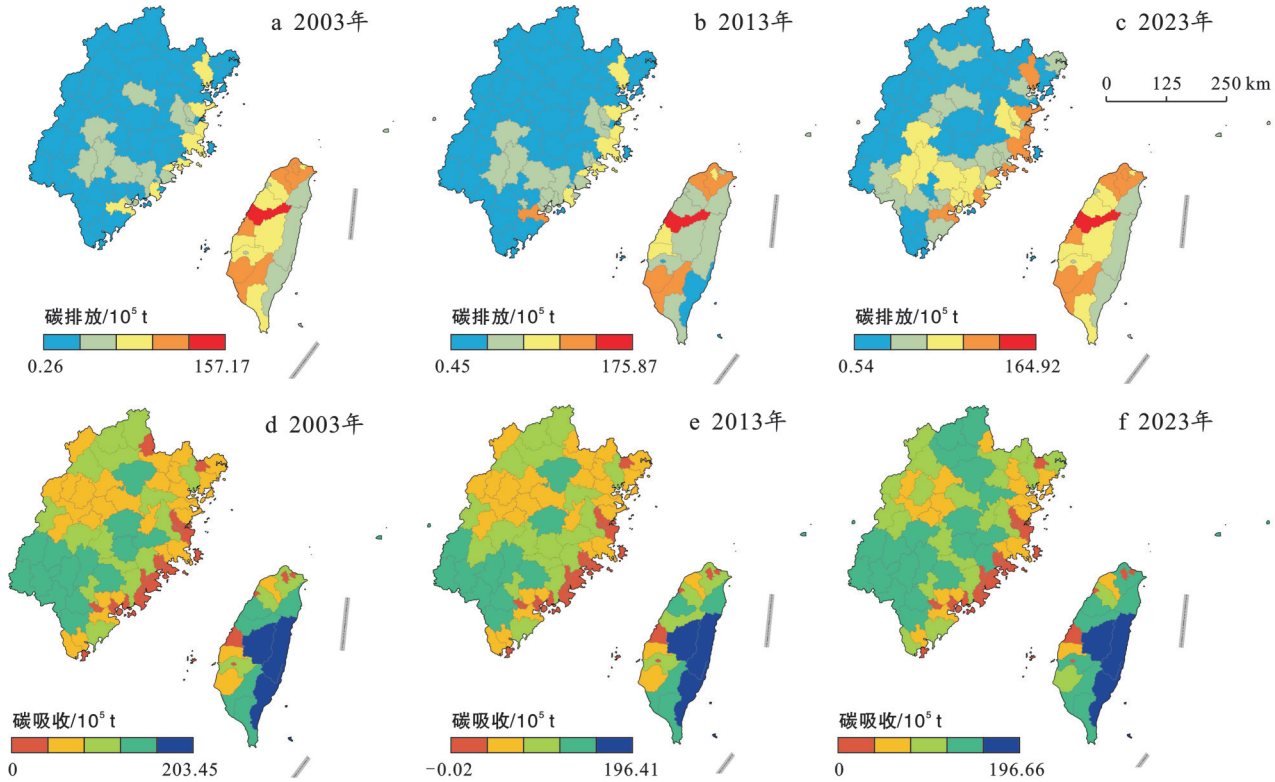
交互作用	判断模式
非线性减弱	$q(x_1\cap x_2)<\min[q(x_1),q(x_2)]$
单线性减弱	$\min[q(x_1),q(x_2)]<q(x_1\cap x_2)<\max[q(x_1),q(x_2)]$
双线性增强	$q(x_1\cap x_2)>\max[q(x_1),q(x_2)]$
相互独立	$q(x_1\cap x_2)=q(x_1)+q(x_2)$
非线性增强	$q(x_1\cap x_2)>q(x_1)+q(x_2)$

3 结果与分析

3.1 碳排放与碳吸收变化对比

2003—2023年期间,在碳排放方面(图1a—1c),福建省碳排放高值区主要集中于东南沿海地区,呈“东南部高,西北部低”的分布格局,总体上碳排放量呈上升趋势。2003年,高值区呈点状分布,峰值区出现在漳州市的龙海区(2.78×10^6 t)、莆田市的秀屿区(2.17×10^6 t)、泉州市的晋江市(1.41×10^6 t)、泉港区(1.25×10^6 t)等地区;2013年高峰值区出现在漳州市的龙海区,高达6.11×10^6 t,低值区主要分布于西北部地区;至2023年,碳排放高值区进一步扩大,以厦漳泉都市圈和福州都市圈为核心,向周围地区辐射。漳州市的龙海区增长至7.35×10^6 t,增幅达165%;福州的长乐(4.56×10^6 t)、泉州的晋江市(4.51×10^6 t)、莆田市的秀屿区(5.53×10^6 t)等地区成为高碳排放中心。与此同时,福建省碳排放低值区逐渐收缩。同期,台湾省碳排放呈“西部高,东部低”的分布格局,总体上碳排放量呈“先升后降”的趋势。2003年碳排放高值区为台中市(1.57×10^7 t)、高雄市(5.91×10^6 t)与新北市(4.83×10^6 t)次之;2013年高值区为台中市(1.76×10^7 t)、高雄市(6.57×10^6 t)、

新北市(5.69×10⁶ t)台南市(5.67×10⁶ t);至2023年,主要高值区碳排放量出现下降趋势,如台中市降至1.65×10⁷ t,高雄市降至6.23×10⁶ t,台南市降至5.31×10⁶ t。



注:基于自然资源部标准地图服务系统审图号GS(2024)0650号标准地图制作。地图边界无修改。下同。

图1　闽台两地2003,2013和2023年碳排放与碳吸收的空间格局

Fig.1　Spatial patterns of carbon emissions and carbon sequestration in Fujian and Taiwan in 2003, 2013 and 2023

在碳吸收方面(图1d—1f),福建省碳吸收总量在20 a间整体上呈"先降后升"的趋势,从2003年的3.31×10⁸ t降至2013年的3.09×10⁸ t,下降了2.27×10⁷ t降幅为6.86%,又增加至2023年的3.29×10⁸ t,增幅为6.78%。碳吸收高值区主要分布于西南、西北地区,例如,南平市的建瓯市、武夷山市,三明市的尤溪县,龙岩市的上杭县、武平县等县市。低值区分布于东南沿海地区,如厦门市的思明区、湖里区,福州市的鼓楼区、台江区,泉州市的鲤城区、石狮市、晋江市等区县。相比之下,台湾省碳吸收呈"中东高、西岸低"的空间分布格局。高值区主要分布于南投县、花莲县和台东县,碳吸收量常年显著领先;低值区则分布于西部沿海城市地区,如台北市、基隆市、新竹市、嘉义市和彰化县,其数值普遍低于1.00×10⁶ t。整体上台湾省碳吸收量出现了下降趋势,由2003年的1.33×10⁸ t下降至2023年的1.23×10⁸ t,净减少了6.70×10⁶ t,总体下降幅度为5.04%。其中,南投县碳吸收量从2.04×10⁷ t降至1.92×10⁷ t,降幅为5.14%,花莲县从2.03×10⁷ t降至1.97×10⁷ t,降幅为3.33%。从3期数据对比可见,福建碳排放的持续攀升与台湾的先升后降形成鲜明反差,福建碳排放总量持续上升,台湾则呈现先升后降的态势。福建碳吸收总量先降后升,台湾碳吸收总量总体呈下降趋势。

3.2　碳平衡时空变化对比

为了探讨闽台两地碳平衡能力的时空演变特征,本研究通过自然间断法将2003—2023年闽台两地碳平衡进行空间可视化。从2003,2013和2023年3个时点的对比来看,闽台两地碳平衡格局呈现"福建稳定,台湾极化"的显著分异(图2)。福建省的碳平衡格局在20 a间保持高度稳定,始终呈现"西北高-东南低"的空间梯度(图2a—2c)。寿宁、政和、周宁等闽东北山区县持续为高值核心区,厦门、泉州等东南沿海都市区则长期为低碳平衡区。标准差椭圆分析显示(图2d),其空间主轴稳定指向西南-东北方向,平均中心始终位于三明市附近。台湾省的碳平衡格局则呈现动态极化特征,2003年已现"东强西弱"雏形,至2023年进一步强化为断裂式空间分异。花莲、台东等东部县市碳平衡比持续飙升,台北、高雄等西部都会区则长期处于低位。标准差椭圆重心持续东移,表明东部碳汇增长正从空间上牵引全省格局重构。

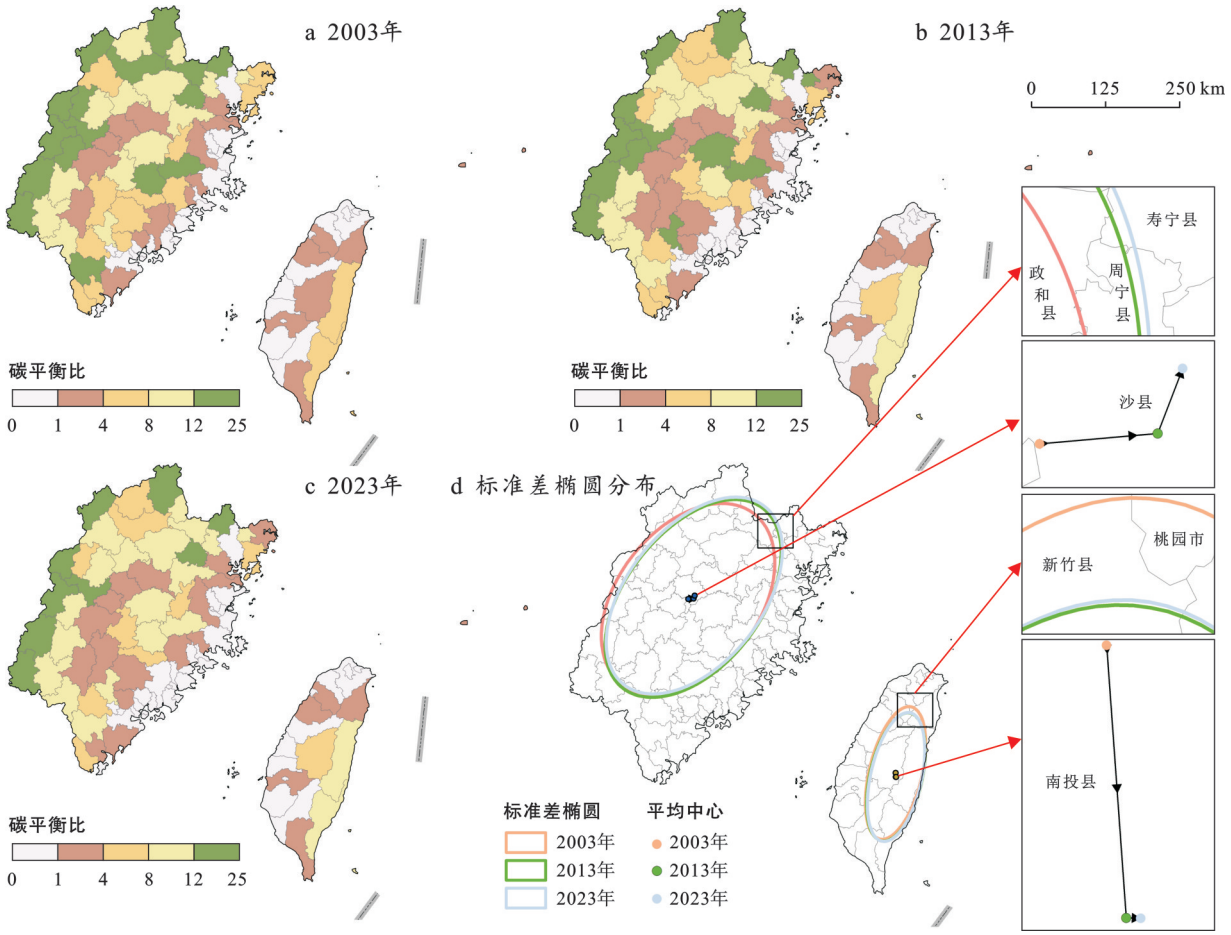


图 2 闽台两地 2003,2013 和 2023 年碳平衡比空间分布与标准差椭圆

Fig.2 Spatial distribution and standard deviation ellipse of carbon balance ratio between Fujian and Taiwan in 2003, 2013, and 2023

基于 2003,2013 和 2023 年碳平衡数据的对比分析,两省各地区碳平衡呈现显著差异(图 3)。福建省经历了系统性衰退,高达 70% 的县区碳平衡比持续下降,其中西北部关键碳汇区(如三明市)的碳平衡下滑最为明显(如宁化县从 46.5 降至 13.7);同时,东南沿海经济核心区(如厦门、泉州市)的碳汇功能几近归零,形成“高地失守、洼地陷落”的双重困境。反观台湾省(图 3J—3k),则依托东部生态极核(花莲、台东县碳平衡比翻倍增长至超 11)的强劲驱动,合计贡献了全省超 60% 的碳汇相对增量,但西部地区改善微弱,台北、台中、高雄等都会区的平均碳平衡比仅从 0.24 微升至 0.35,仍深陷低碳汇陷阱,东西部碳平衡比极差从 2003 年的 5.8 扩大至 2023 年的 11.5,导致“东强西弱”的极化格局加剧。

3.3 影响因素对比

3.3.1 单因子探测

深入对比闽台两地碳平衡的主要影响因素(表 2),所有影响因子均对碳平衡产生显著影响($p<0.05$)。自然因子与人类活动共同驱动闽台两地碳平衡变化,但两省主导因素存在显著差异,各因素对闽台两地碳平衡的解释力排序如下,福建省:NDVI(0.84)>人口密度(0.62)>坡度(0.57)>年均气温(0.48)>年均降水(0.42)>GDP(0.23)>土地利用类型(0.21)>产业结构(0.17)。台湾省:NDVI(0.94)>坡度(0.78)>年均降水(0.76)>人口密度(0.62)>年均气温(0.60)>产业结构(0.40)>土地利用类型(0.23)>GDP(0.10)。首先,两地的 NDVI 的解释力最强,均超过 0.80,分别为 84.4% 和 94.0%,NDVI 是闽台两地碳平衡空间分异的主要影响因子,表明植被覆盖是两地碳汇功能的核心因素。其次,台湾省的碳平衡格局主要受自然水热与地形条件控制,年均降水(0.76)与坡度(0.78)的解释力仅次于 NDVI;而福建省则显示出更强的人类活动耦合特征,人口密度(q=0.62)成为第二大解释因子,超越坡度等自然要素。表明提升植被覆盖是两省增强碳汇能力的根本路径,但台湾省需重点关注降水资源分布与地形配置的自然约束,福建省则需在生态建设中格外重视人口分布与土地利用带来的人为压力。

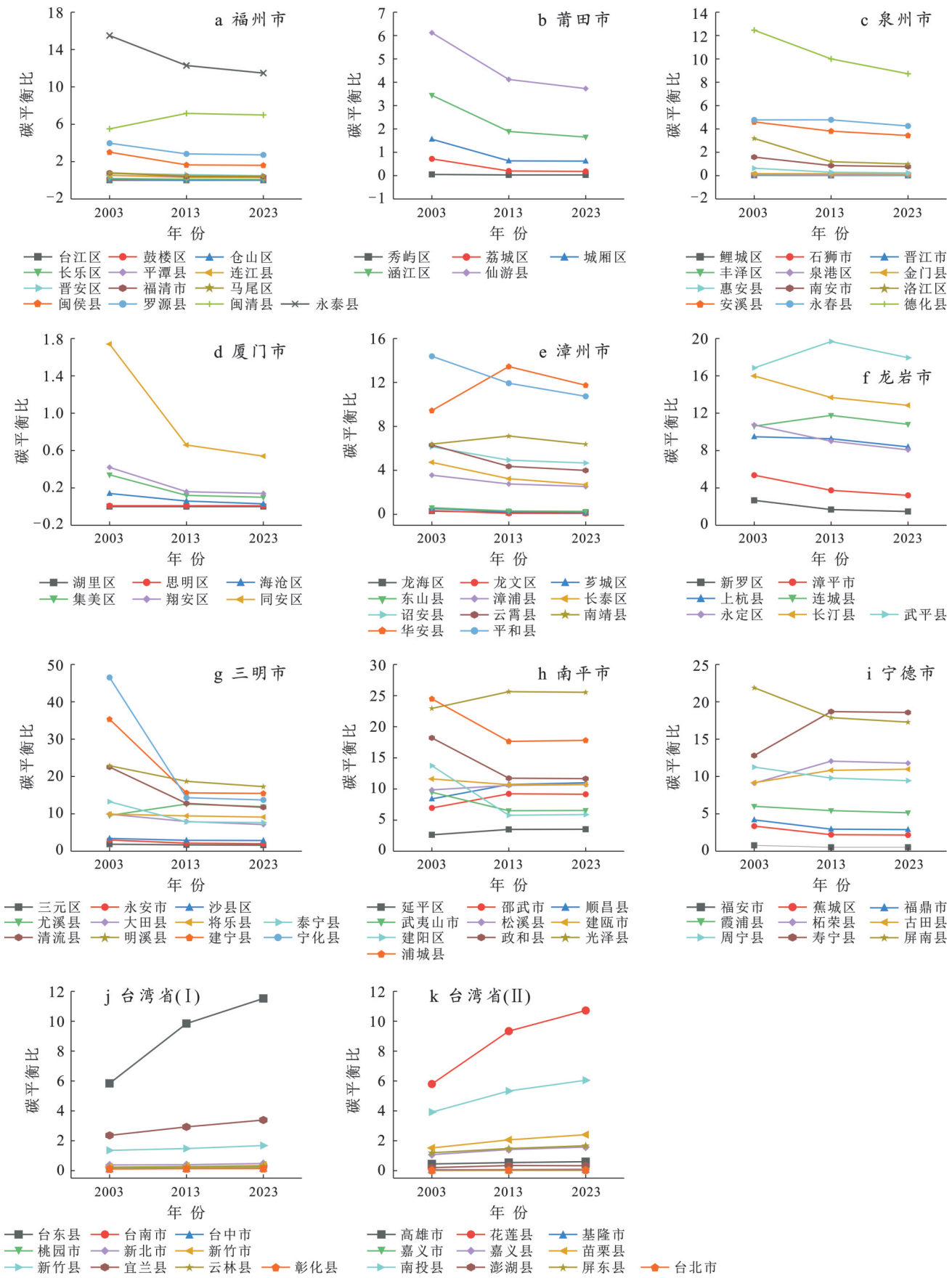


图 3　闽台两地各区县 2003,2013 和 2023 年的碳平衡数值

Fig.3　Carbon balance ratios of districts and counties in Fujian and Taiwan in 2003, 2013, and 2023

表 2 闽台地区碳平衡空间分异驱动因子单因子探测结果

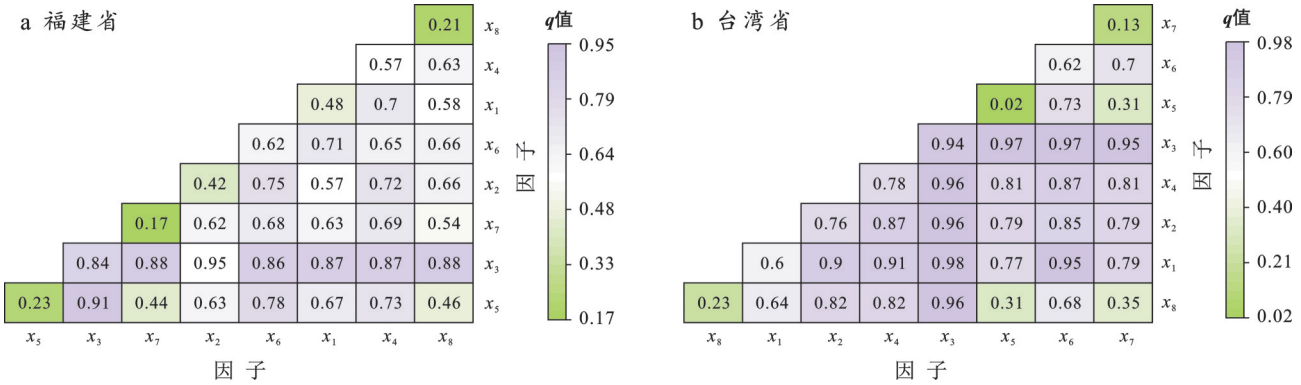
Table 2 Results of single-factor detection for driving factors of spatial differentiation of carbon balance in Fujian and Taiwan

影响因子	福建省		台湾省	
	q值	排序	q值	排序
年均气温	0.48	4	0.60	5
年均降水	0.42	5	0.76	3
NDVI	0.84	1	0.94	1
坡度	0.57	3	0.78	2
GDP	0.23	6	0.10	8
人口密度	0.62	2	0.62	4
产业结构	0.17	8	0.40	6
土地利用类型	0.21	7	0.23	7

整体上，社会经济因子（GDP、产业结构）的解释力普遍较弱，进一步印证了自然要素在塑造区域碳平衡空间格局中的主导性。

3.3.2 交互因子探测

进一步探究因子对碳平衡的解释力是增强还是减弱，通过地理探测器的交互作用分析，揭示了两省碳平衡驱动机制的共性与差异（图 4）。两省均表现出 NDVI 与其他因子的强烈协同增强效应，但作用类型与主导路径显著不同。福建省以“双线性增强”作用为主，其中 NDVI 与降水的协同最为关键（0.95），表现为水分对植被碳汇的线性强化机制；而台湾省则以“非线性增强”效应更为突出，尤以 NDVI 与气温的交互最强（0.98），说明植被碳过程对温度变化具有敏感的非线性响应。在人类活动影响方面，人口密度与 NDVI 在两省均呈稳定协同（台湾 0.97，福建 0.86），但台湾的 GDP、产业比例等经济社会因子表现出更复杂的非线性增强特征（如 NDVI∩GDP 的 0.97），反映其人类活动以更强的放大效应介入碳平衡系统；福建省则呈现相对均衡的人文-自然耦合格局。综上所述，两省的碳汇提升均需坚持“植被为本、协同调控”路径，但福建应重点优化水资源配置以释放植被固碳潜力，台湾则须关注气候变暖下植被-气温的协同放大风险，并统筹产业布局与生态本底的互动关系。



注：x_1为降水；x_2为气温；x_3为NDVI；x_4为坡度；x_5为GDP；x_6为人口密度；x_7为第二产业占GDP比重；x_8为土地利用类型。

图 4 闽台地区碳平衡空间分异驱动因子交互作用探测结果

Fig.4 Results of interaction factor detection for driving factors of spatial differentiation of carbon balance in Fujian and Taiwan

4 讨 论

在相似的自然本底下，闽台碳平衡呈现显著的空间分异与机制差异。这种分异实质上是自然本底与人类活动共同作用的结果。首先，在碳排放方面，福建省的碳排放总量呈现高速增长态势，从约 2.86×10^6 t 攀升至 7.15×10^6 t，20 a 增长了近 1 倍。这一趋势与福建快速的工业化与城镇化进程密切相关，2003—2023 年福建 GDP 从 602 亿元增至 5.44 万亿元，经济快速增长驱动了能源需求的大幅上升；加之沿海地区集中了全省主要的火力发电厂（如可门电厂、湄洲湾电厂等）和高耗能产业，使得高碳排放区域高度集中于福州、泉州、厦门等东南沿海城市群，这一空间格局与张圆圆等[26]的研究较为一致。为验证 CGER 数据的可靠性，将福建省 CGER 数据与《中国能源统计年鉴》公布的能源碳排放数据进行省级拟合对比（图 5），两者相关性较高（$R^2>0.98$）。由于《中国能源统计年鉴》未发布台湾省县域碳排放数据，无法支撑闽台对比分析。为了保持两地数据口径一致，故本研究统一采用可覆盖闽台两地县域的 CGER 栅格数据；反观台湾省，碳排放呈波动下降趋势，已进入排放平台期[27]。台湾碳排放的空间格局以台中市为最高，这与台中火力发电厂的存在直接相关。该电厂是台湾最大的燃煤电厂，仅此一处设

施的年碳排放量就超过 3.00×10^7 t。值得注意的是,台湾在非核化后,火力发电比例提升至76%(其中燃气66%,燃煤34%),电力结构的碳锁定效应导致部分县市排放强度居高不下,但从总体趋势看,通过产业升级和能源转型,已实现碳排放的达峰和缓慢下降。这种排放格局说明,台湾碳排放的高度集中是由大型点源设施(如电厂、炼钢厂)的空间布局决定的[28],而非人口规模。

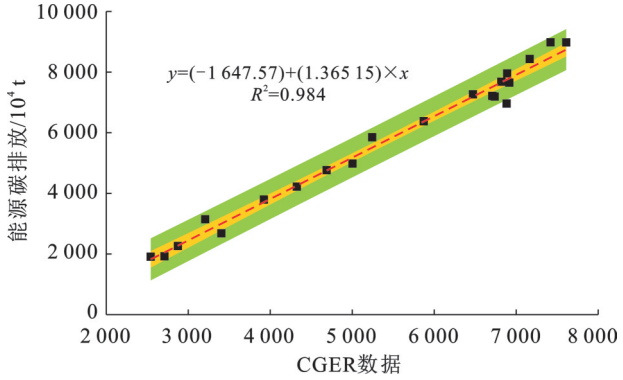


图 5　福建省能源碳排放与全球环境研究中心(CGER)数据拟合

Fig.5　Fitting of energy carbon emissions and CGER data in Fujian Province

碳吸收方面,本研究采用净生态系统生产力作为闽台两地碳汇表征,为验证其合理性,将估算结果与已有研究对比。翁升恒等[29]基于森林清查数据估算的福建省森林NEP显示,闽西北山区NEP值最高、东南沿海较低,与本研究空间分布一致;Chen等[30]基于遥感模型估算的台湾森林碳汇格局显示,高值区集中于花莲、台东等县,与本研究结果吻合。相较于传统森林清查法,本研究采用的遥感模型(CASA)具有空间连续、可揭示县域尺度分异特征的优点。闽台两地均呈现“山区高,沿海低”的空间分布。福建省碳吸收总量呈先降后升态势,闽西北内陆山区(如武夷山脉、戴云山脉)凭借极高的森林覆盖率,成为稳定的碳汇核心区[31]。福建省通过“生态省”建设、集体林权改革等生态修复工程,显著提升了山区森林质量与固碳能力,驱动了碳汇总量的增长。台湾省碳吸收则呈高位稳态,高值区集中于花莲县、南投县等东部及中部山区。但由于开发历史早,土地利用模式已趋于稳定[32],碳汇变化以自然波动为主,呈现“不显著增加”特征。碳平衡方面,福建呈现稳定的“西北高-东南低”梯度,高值区集中于闽东北山区,低值区分布于东南沿海都市区。这一格局与福建“西北山、东南海”的自然地理格局高度吻合,同时也反映了经济发展的空间分异。沿海地区集聚了全省主要的人口(泉州、福州、厦门3市常住人口占全省近50%)、工业和碳排放源,导致碳平衡被系统性削弱。福建碳平衡比均值20 a累计下降近30%,其主要原因在于碳排放的快速增长(增长约2.5倍),而非碳吸收能力的衰减(碳吸收总量基本稳定)。因此,福建碳平衡恶化的核心矛盾是“经济增长驱动的碳排放激增”。台湾则呈现“东强西弱”的动态极化特征。东部花莲、台东等县市碳平衡比持续增长,得益于该地区以林业和旅游业为主的经济结构、较低的人口密度,以及中央山脉对生态空间的天然保护[33];而西部台中、高雄、台北等都会区,因集中了大部分的火力发电、钢铁、石化等高耗能产业,加之人口高度密集,碳平衡比长期处于低位。这一格局反映了后工业化阶段碳汇功能向东部山地高度集中的“生态孤岛”现象,东西部碳平衡比极差从5.8扩大至11.5,需破解东部碳汇贡献与西部受益主体错位的“东西失衡”困境。其次,地理探测器结果表明,闽台两地碳平衡空间分异既受共同的主导因子支配,也呈现出显著的地域性驱动差异。首先,植被覆盖是两地碳汇功能的核心控制因素,这与前人的研究一致[29]。NDVI在福建(q=0.84)与台湾(q=0.94)均位居首位,且与其他因子的交互作用均表现为协同增强(如福建NDVI∩降水达0.95,台湾NDVI∩气温达0.98),这印证了提升植被覆盖与质量是增强区域碳汇能力的根本路径。其次,两省的主导驱动模式存在明显分化:福建省表现为“人文-自然耦合”特征,人口密度(q=0.62)超越自然因子成为第二大解释力指标,表明人类活动强度对福建碳平衡格局具有重要塑造作用;而台湾省则呈现“自然本底约束”特征,坡度(q=0.78)与降水(q=0.76)的解释力显著高于社会经济因子,反映其碳平衡格局深受地形与水资源配置的先天制约。值得注意的是,两省的GDP与产业结构等社会经济因子单因子解释力均较弱(福建分别为0.23,0.17;台湾分别为0.10,0.40),但在交互探测中却表现出与NDVI的强非线性增强效应(如台湾NDVI∩GDP达0.97),显示出人类活动并非以独立方式,而是通过与自然要素的耦合作用介入碳平衡系统[34]。最后,基于闽台碳平衡的比较分析,台湾作为已完成工业化转型的地区,其演变特征可为福建提供前瞻性参考。从碳排放看,福建目前仍处上升期,预计2030年前后有望进入平台期并逐步下降;从碳吸收看,福建森林覆盖率已居全国首位,碳吸收能力提升空间有限,未来将趋于稳定;从碳平衡格局看,若沿海碳排放持续增长而西北碳汇得不到有效保护,福建可能重蹈台湾“生态孤岛”的

覆辙。综上所述，福建碳平衡的未来走向取决于碳排放达峰时间与西北碳汇的保护成效，政策重心应置于碳排放控制与产业绿色转型。

5 结 论

（1）闽台两地的碳排放与碳吸收呈现不同的时空格局。碳排放上，福建呈“东南高，西北低”分布，总量持续上升；台湾则为“西部高，东部低”，总量呈先升后降趋势。碳吸收上，福建省总量呈先降后升；台湾则呈“中东高，西岸低”的空间分布。

（2）在碳平衡空间格局与演变路径上，福建呈稳定的“西北高—东南低”梯度，重心向东北方向移动，约70%县区碳平衡比下降，呈系统性衰退。台湾呈“东强西弱”的动态极化特征，重心持续东移，东部贡献超60%碳汇增量，但东西部极差扩大，极化加剧。

（3）地理探测器显示，闽台两省碳平衡均以NDVI为核心驱动（福建0.84，台湾0.94）。福建呈“人文-自然耦合”特征，人口密度（0.62）为第二大因子，NDVI与降水线性协同（0.95）增强为主；台湾省以自然要素为主导，坡度（0.78）和降水（0.76）解释力突出；NDVI与气温非线性（0.98）增强突出，经济社会因子呈现更复杂的非线性放大效应。

（4）基于对比研究，两地自然本底相似但社会经济发展水平不同，形成了福建需遏制衰退、台湾需破解极化的互补性特征，为两岸碳中和协同治理提供了科学基础。建议构建以下协同策略：①监测协同。针对福建的碳汇衰退区（如三明）与台湾的碳汇增长区（如花莲）的此消彼长特征，在两省高碳汇区（福建尤溪县、台湾南投县）与高碳排放区（福建石狮市、台湾台南市）布局一体化监测网络，推动数据共享。②空间协同。针对福建高地失守与台湾东西失衡，在闽东北、台湾东部等高碳汇山区协同强化森林管护，实现生态共保；在闽东南沿海、台湾西部等高碳排放区协同推进低碳转型，实现低碳共治。③机制协同。福建借鉴台湾生态保育的适应性管理经验，台湾参考福建产业绿色转型的制度实践，共同研发与推广森林经营、碳汇计量等关键技术，开展合作示范。

参考文献（References）

[1] Friedlingstein P, Le Quéré C, O’Sullivan M, et al. Emerging climate impact on carbon sinks in a consolidated carbon budget [J]. Nature, 2026, 649(8095): 98-103.

[2] 王强，党牛，蒋子龙，等.碳中和背景下能源转型研究综述与展望[J].地理学报，2025，80(3)：586-604.
Wang Qiang, Dang Niu, Jiang Zilong, et al. A review and outlook on energy transition research in the context of carbon neutrality [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(3): 586-604.

[3] 张鹏岩，杨丹，刘宇，等.基于复合生态系统视角的土地利用变化碳源/汇效应研究进展[J].生态学报，2025，45(5)：2058-2073.
Zhang Pengyan, Yang Dan, Liu Yu, et al. Carbon source/sink effect of land use change from the perspective of composite ecosystem: Progress and review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2058-2073.

[4] 张艳，杜钰，吕韬.基于社会网络分析的土地利用碳收支与碳平衡分区：以渭河流域84个区县为例[J].中国土地科学，2025，39(8)：114-126.
Zhang Yan, Du Yu, Lv Tao. Carbon budget and carbon balance zoning of land use based on social network analysis: A case of 84 counties in the Weihe River basin [J]. China Land Science, 2025, 39(8): 114-126.

[5] Kolchugina Tatyanap, Vinson Teds, 朱志辉. 俄罗斯森林在全球碳平衡中的作用[J]. AMBIO-人类环境杂志，1995，24(5)：258-264.
Kolchugina Tatyanap, Vinson Teds, Zhu Zhihui. The role of Russian forests in global carbon balance [J]. AMBIO-A Journal of the Human Environment, 1995, 24(5): 258-264.

[6] Houghton R A. Balancing the global carbon budget [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35: 313-347.

[7] Luo Kui, Wang Hongwei, Ma Chen, et al. Carbon sinks and carbon emissions balance of land use transition in Xinjiang, China: Differences and compensation [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 22456.

[8] 吉佳宇，谢志祥，赵荣钦，等.基于碳收支格局及其转换态势的区域碳失衡风险分析[J].环境科学，2024，45(11)：6365-6377.
Ji Jiayu, Xie Zhixiang, Zhao Rongqin, et al. Risk analysis of regional carbon imbalance based on carbon budget pattern and its transformation trend [J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6365-6377.

[9] Deng Yuliang, Huang Min, Gong Daohong, et al. Carbon balance dynamic evolution and simulation coupling economic development and ecological protection: A case study of Jiangxi Province at county scale from 2000—2030 [J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(1): 2448572.

[10] 李竹，王兆峰，吴卫，等.碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系[J].自然资源学报，2022，37(12)：3136-3152.
Li Zhu, Wang Zhaofeng, Wu Wei, et al. The relationship between China’s provincial carbon balance capacity and urbanization under carbon neutrality target [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12): 3136-3152.

[11] 陈姜全,张轲,李效顺,等.长江经济带碳源汇核算及碳平衡分区调控:践行“共抓大保护、不搞大开发”理念[J].自然资源学报,2025,40(12):3370-3393.
Chen Jiangquan, Zhang Ke, Li Xiaoshun, et al. Accounting of carbon source/sink and the zoning regulation of carbon balance in the Yangtze River economic belt: Practice the concept of “prioritizing ecological conservation over excessive development” [J]. Journal of Natural Resources, 2025,40(12):3370-3393.

[12] 邓宇亮,黄敏,龚道宏,等.中国市域碳收支与碳平衡时空演变及驱动因素[J/OL]. 环境科学,2026:1-21. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509187
Deng Yuliang, Huang Min, Gong Daohong, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon budget and carbon balance in Chinese cities [J/OL]. Environmental Science, 2026:1-21. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509187

[13] 尚文博,刘艳中,张祚,等.城市形态对碳平衡压力的影响机制及空间优化:以湖北省为例[J/OL].环境科学,2026:1-17. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509336
Shang Wenbo, Liu Yanzhong, Zhang Zuo, et al. Impact mechanism of urban form on carbon balance pressure and spatial optimization: A case study of Hubei Province [J/OL]. Environmental Science, 2026: 1-17. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509336

[14] 方晓烽,高睿伯,滕淦,等.骆马湖流域净生态系统生产力时空分异特征及驱动因子[J].环境科学,2025,46(12):7806-7818.
Fang Xiaofeng, Gao Ruibo, Teng Gan, et al. Characterization of spatial and temporal variability of net ecosystem productivity and driving factors in the Luoma Lake basin [J]. Environmental Science, 2025,46(12): 7806-7818.

[15] 任之煌,韦素琼,游小珺,等.关系经济地理学视角下的两岸经济融合研究评述[J].亚热带资源与环境学报,2024,19(3):102-110.
Ren Zhihuang, Wei Suqiong, You Xiaojun, et al. Review on cross-strait economic integration from the perspective of relational economic geography [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2024,19(3):102-110.

[16] 王强,伍世代,李婷婷,等.闽台能源消费变化与驱动力对比研究[J].地理科学,2012,32(6):702-710.
Wang Qiang, Wu Shidai, Li Tingting, et al. A comparative analysis of changes in energy consumption of Fujian and Taiwan and their driving factors [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012,32(6):702-710.

[17] 魏伟,张苗,尹力,等.近40 a闽台两地国土空间格局演化特征及影响要素的差异解析[J].世界地理研究,2025, 34(10):105-121.
Wei wei, Zhang miao, Yin li, et al. An analysis of the differences in evolution characteristics and influencing factors of the regional spatial pattern between Fujian and Taiwan over the past 40 Years [J]. World Regional Studies, 2025,34(10):105-121.

[18] 赵亚琛,张兵华,黄婧婧,等.血缘关系影响下闽台同名村空间布局特征研究[J].地理研究,2024,43(7):1790-1808.
Zhao Yachen, Zhang Binghua, Huang Jingjing, et al. The spatial layout characteristics of villages with the same name in Fujian and Taiwan under the influence of “blood relationship” [J]. Geographical Research, 2024, 43(7):1790-1808.

[19] 温泽华,陈雨琦,李远航,等.京津冀地区县域碳排放时空变化及其影响因素[J/OL].环境科学,2025:1-25. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509114
Wen Zehua, Chen Yuqi, Li Yuanhang, et al. Spatio-temporal variations and influencing factors of carbon emissions in counties of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J/OL]. Environmental Science, 2025: 1-25. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202509114

[20] 李慧,魏兴萍.重庆市功能区碳源/汇时空演变及其影响因素[J].环境科学,2026,47(4):2343-2358.
Li Hui, Wei Xingping. Spatial-temporal evolution of carbon source/sink and its influencing factors in Chongqing functional area [J]. Environmental Science, 2026, 47(4):2343-2358.

[21] 信珂莹,苏凤环,郭晓军,等.巴基斯坦洪涝灾害时空分布特征及其影响因素[J].水土保持通报,2025,45(5):316-325.
Xin Keying, Su Fenghuan, Guo Xiaojun, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing factors of flood disasters in Pakistan [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(5):316-325.

[22] 傅慧珊,李加林,刘永超,等.长三角城市群水环境治理效率的区域差异及动态演进[J].中国环境科学,2026,46(3):1747-1763.
Fu Huishan, Li Jialin, Liu Yongchao, et al. Regional variations and the dynamic evolution of water environment governance efficiency in the Yangtze River delta urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1747-1763.

[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.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[24] Feng Qun, Qin Li, Gao Yuan. Spatial differences in carbon emission efficiency of China's construction industry and influencing factors [J]. Energy and Buildings,

2026,352:116852.

[25] 张信伟,王丽霞,杨耘,等.渭河流域碳源/碳汇时空格局演变及多因子驱动机制分析[J].环境科学,2026,47(5):3155-3165.
Zhang Xinwei, Wang Lixia, Yang Yun, et al. Spatio-temporal evolution of carbon sources/sinks and analysis of multi-factor driving mechanisms in the Weihe River basin [J]. Environmental Science, 2026,47(5):3155-3165.

[26] 张圆圆,陈方媛,许翔,等.基于县域尺度的福建省土地利用碳排放效应分析[J].环境科学研究,2023,36(7):1446-1456.
Zhang Yuanyuan, Chen Fangyuan, Xu Xiang, et al. Investigation on county-scale carbon emission effect of land use in Fujian Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(7):1446-1456.

[27] 曹小衡,陈子充.海峡两岸碳排放关联效应与低碳化合作路径研究[J].厦门大学学报(哲学社会科学版),2024,74(3):79-90.
Cao Xiaoheng, Chen Zichong. A study on cross-strait carbon emission linkage effect and low-carbon cooperation path [J]. Journal of Xiamen University (Arts & Social Sciences), 2024,74(3):79-90.

[28] 张传国,洪琴.海峡两岸贸易隐含碳排放问题研究[J].国际贸易问题,2013,(5):104-114.
Zhang Chuan Guo, Hong Qin. Research on Carbon emissions embodied in Trade between China mainland and Taiwan [J]. Journal of International Trade, 2013,(5):104-114.

[29] 翁升恒,张玉琴,姜冬昕,等.福建省森林植被NEP时空变化及影响因子分析[J].生态环境学报,2023,32(5):845-856.
Weng Shengheng, Zhang Yuqin, Jiang Dongxin, et al. Spatio-temporal changes and attribution analysis of net ecosystem productivity in forest ecosystem in Fujian Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(5):845-856.

[30] Chen Yiying, Huang Wei, Cheng Chaotzuen, et al. Simulation of the impact of environmental disturbances on forest biomass in Taiwan [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(3): e2021JG006519.

[31] Chen Gui, Peng Qingxia, Fan Qiaohong, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of carbon storage at the county scale in China based on a gray multi-objective optimization-patch-level land use simulation-integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs-optimal parameter-based geographical detector model: Taking the Daiyun mountain's rim as an example [J]. Land, 2025,14(1):14.

[32] 谭敏.文化再生:我国台湾地区的乡村文化复兴实践[J].福建论坛,2018(8):75-80.
Tan Min. Cultural regeneration: The practice of rural cultural rejuvenation in Taiwan Province, China [J]. Fujian Tribune, 2018(8):75-80.

[33] Lin Baozhi, Liu Zhifei, Eglinton T I, et al. Island-wide variation in provenance of riverine sedimentary organic carbon: A case study from Taiwan [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020,539:116238.

[34] Laskar A H, Lin Liching, Jiang Xun, et al. Distribution of CO_2 in western Pacific, studied using isotope data made in Taiwan, OCO-2 satellite retrievals, and carbon tracker products [J]. Earth and Space Science, 2018,5(11):827-842.

(上接第114页)

[29] Yan Rui, Zhang Xiaoping, Yan Shengjun, et al. Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 6(1):13-22.

[30] Zhao Guangju, Gao Peng, Tian Peng, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2020,185:104284.

[31] Zheng Haiyan, Miao Chiyuan, Jiao Juying, et al. Complex relationships between water discharge and sediment concentration across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2021,596:126078.

[32] Jia Lu, Yu Kunxia, Li Zhanbin, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load [J]. Catena, 2022,210:105931.

[33] Ma Tianle, Liu Baoyuan, He Liang, et al. Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years [J]. Geoderma, 2024,443:116837.