

# 基于ESDA的小流域城市带碳足迹时空分布及影响因素分析

——以闽江流域经济带为例

陈 兰

北京农业职业学院, 北京

收稿日期: 2022年12月25日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

## 摘 要

为正确把握生态环境保护和经济发展的关系, 为构建闽江流域经济带提供理论依据, 以闽江流域33个县区为研究区域构建经济发展指数和碳足迹指标核算体系评价闽江流域的经济-生态系统, 通过空间自相关分析碳排放空间分异情况, 并基于GTWR模型分析碳足迹指数的影响因素。实证结果显示, 2012~2017年约有38%的区县RC值 > 1, 区域生态承载超过应承受的水平, 虽然总体上全域生态系统承载能力较强, 但呈现出弱化趋势; 碳足迹指数空间布局上呈现出多个热力值, 区域经济发展与碳排放存在空间分布的不平衡性; 农业活动、固定资产投资和能源消费是对碳足迹指数波动的主要贡献因素。因此, 在构造闽江经济带的过程中, 碳足迹水平较高的区域既要发展经济, 又要保护生态环境, 碳排放控制与碳汇吸收应同步进行; 流域范围内, 需推进低碳经济的发展模式, 应不断提升城镇化水平, 优化能源使用配置, 提升农业生产水平, 才能实现绿水青山。

## 关键词

ESDA, 流域, 碳足迹, GTWR模型

# Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of Carbon Footprints and Influencing Factors in Small Watershed Urban Belts Based on ESDA

—Taking the Minjiang River Basin Economic Belt as an Example

Lan Chen

## Abstract

In order to correctly grasp the relationship between ecological environmental protection and economic development and provide a theoretical basis for the construction of the Minjiang River Basin Economic Belt, the economic development index and carbon footprint index accounting system were constructed to evaluate the economic-ecological system of the Minjiang River Basin using 33 counties and districts in the Minjiang River Basin as the study area, analyze the spatial variation of carbon emissions through spatial autocorrelation, and analyze the influencing factors of the carbon footprint index based on the GTWR model. The empirical results show that about 38% of the districts and counties have RC values > 1 from 2012 to 2017, the regional ecological carrying capacity exceeds the level that should be borne, and although the overall carrying capacity of the region-wide ecosystem is strong, it shows a trend of weakening; the spatial layout of the carbon footprint index shows multiple heat values, and there is an imbalance in the spatial distribution of regional economic development and carbon emissions; agricultural activities, fixed asset investment and energy consumption are the main contributors to the fluctuation of the carbon footprint index. Therefore, in the process of constructing the Minjiang River Economic Zone, regions with high carbon footprint levels should both develop their economy and protect the ecological environment, and carbon emission control and carbon sink absorption should be carried out simultaneously; within the basin, the development model of the low-carbon economy needs to be promoted, and the level of urbanization should be continuously improved, the allocation of energy use should be optimized, and the level of agricultural productivity should be enhanced in order to achieve green water and green mountains.

## Keywords

ESDA, Watershed, Carbon Footprint, GWTR Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

闽江是福建省第一大河，是全省面积最大的流域，其主要流经南平、三明、福州三市以及宁德、泉州、龙岩的部分地区，是东南地区较为重要的小流域。闽江流域是福建省实施“山海协作”战略的重要组成部分，闽江流域上游是经济较不发达区域，同时承担着重要的生态功能；流域下游则是经济较为发达的福州市，各类业态经济丰富充实，是省内经济发展较为快速的区域。流域上下游在经济、环境等方面形成了关联密切、相互依存的山海协作格局；同时，在当前“双碳”目标的背景下，闽江流域作为拥有“国家中心城市”的重要流域，在生态保护、经济发展的角色上都起着极其重要的示范带动作用。

在经济高速发展的同时，生态环境问题开始显示出其重要性，福建省从 20 世纪 80 年代以来就长期重视流域治理，闽江流域的生态保育一直处于国内领先水平。但是对闽江流域的生态环境保护和经济发展仍处于探索阶段，目前，学界多数主要围绕生态补偿标准的制定[1]和生态格局保护两个方面进行讨论，

少数则从生态系统价值评估和能值变动的角度进行研究。在生态补偿标准的制定层面,林秀珠[2] [3]、兰紫橙[4]等采用机会成本和生态系统价值评估方法对闽江流域的生态补偿标准进行了构建和测算,建立了一套兼顾公平与效率的流域生态补偿机制。饶清华[2] [5] [6]等从机会成本、生态系统服务价值、水环境容量、帕累托改进等五个角度多篇论文对闽江流域的社会经济与生态环境进行了集中讨论,着眼于不同的视角分别建立了相应的生态补偿标准和结果,并有针对性地对生态环境保护、生态补偿模式、补偿资金筹措、利益兼顾等方面提出了相应的对策建议。韩凌芬[7]等则基于博弈论视角分析闽江流域生态补偿机制中流域上下游、政府横向、纵向间的利益相关,借此指出建立激励和约束融合机制是完善流域生态补偿机制的关键点。除了对建立标准化的生态补偿机制外,学者们还探讨了流域的生态保护与经济发展的关系,饶清华[8]等从经济发展、社会发展和环境保护的角度构建耦合协调评价指标体系,利用力学平衡模型,将闽江流域不同地区在不同时期内的耦合协调发展划分为环境保护滞后型、经济发展滞后型、社会发展滞后型,并针对不同滞后类型分别提出了改进方向;应凌霄[9]等在介绍闽江流域的生态环境特征基础上,通过梳理分析,根据区域生态功能的重要性和面临的主要生态环境问题,提出了构建“一江一带一区一屏”的闽江流域总体生态安全格局和监测、评价等一系列相应的工程措施。

综合来看,学界当前对于闽江流域生态格局的维护主要集中在利用经济手段维护的视角来开展,而对于流域生态系统的评价研究,特别是“碳”主题的研究较为稀缺;长久以来,如何将将在海峡西岸经济区的框架下的闽江流域经济带构建成类似长江和珠江的经济带类型,不仅是学界密切讨论的问题,也是政府关心的焦点。科学地建立闽江流域经济带,离不开对流域的经济系统和生态系统展开评估[10]。闽江流域经济带的形成,将有助于闽江经济走廊的开辟和建设。因此,本研究以闽江流域流经的6个地市共33个区县为研究对象,以2008~2017年为研究区间,构建经济发展指数和碳排放、碳足迹核算体系评价闽江流域的经济和生态系统,基于探索性空间数据分析方法(ESDA),首先通过空间自相关检验分析其碳足迹的时空差异与扩散效应,再通过时空地理加权回归(GTWR)对流域的碳足迹时空变换及其影响因素进行适当分析,以期能更好地评估闽江流域经济发展和生态保育的情况,为开展生态文明建设,推进建设闽江流域经济走廊提供科学参考。

## 2. 研究对象与数据

### 2.1. 数据来源

研究涉及的闽江流域的33个区县行政区划、水系流域空间分布shp矢量数据(图1)来源于中国科学院地理科学与资源研究所。各区县历年的经济、作物等指标数据来源于《福建年鉴》、各地市统计年鉴和国民经济公报,并使用ArcGIS10.6软件和Geoda软件对已经收集的数据进行可视化操作和空间分析。

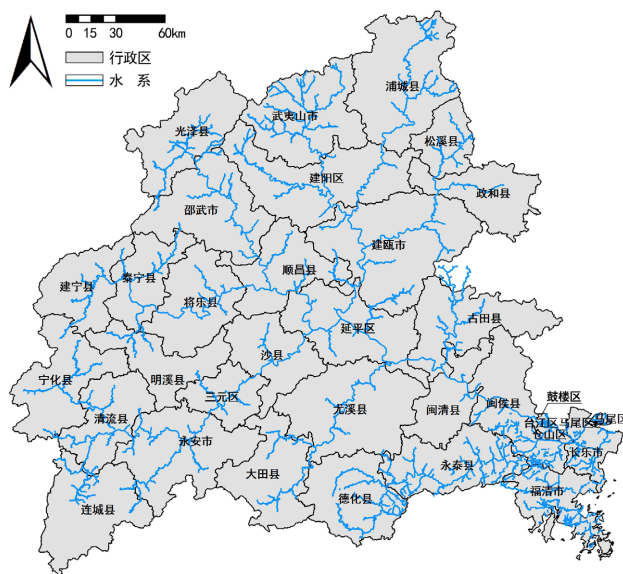
### 2.2. 经济发展指数及其运算

为了构建合理的指标用来测度流域内不同城市的经济发展程度,本文采用城市体检中最为常见的经济发展指数( $E_C$ )衡量闽江流域范围内各区县的经济发展水平,分别对2008年、2011年、2014年及2017年这4年期的人均GDP,流域内各区县的经济贡献情况进行纵向研究。

经济发展指数的表达式如下:

$$E_C = \frac{\text{gdp}_i}{P_i} \bigg/ \frac{\text{gdp}_{\text{域}}}{P_{\text{域}}} \quad (1)$$

式(1)中, $E_C$ 表示各县域的经济指数,  $\text{gdp}_i$ 表示第*i*个县域的当年的国民生产总值;  $P_i$ 表示第*i*县域的人口数(以各年常住人口数计算),  $\text{gdp}_{\text{域}}$ 和  $P_{\text{域}}$ 分别表示闽江流域区域的GDP总值与总人口数。



**Figure 1.** The administrative and water system distribution of 33 districts and counties in the Minjiang River Basin  
**图 1.** 闽江流域 33 个区县行政及水系分布

若  $E_C < 1$ ，则说明该县域的人均 GDP 水平低于区域平均水平，经济发展水平相对较低，速度缓慢；若  $E_C = 1$ ，表明该县域的人均 GDP 水平与区域平均水平一致，经济发展较为稳定；若  $E_C > 1$ ，表明该县域的人均 GDP 大于区域平均水平，经济效率相对较高，经济发展良好。在剖析流域内经济发展平衡性的过程中，各县域经济发展指数分布越集中则表明区域发展越平衡，越分散则发展越不平衡。因此，若  $E_C > 1$  与  $E_C < 1$  的县域数量相近， $E_C > 1$  的县域数量趋近于总数量的 50%，则认为区域发展是平衡的，反之则发展不平衡。

### 2.3. 碳排放量核算及其数据来源

生态文明视角下，低碳经济越来越成为经济发展的主旋律，高耗能高破坏的传统经济发展模式不仅不适用于山清水秀的闽江流域，也使得城市在经济发展过程中付出环境成本。目前对碳足迹的定义主要由两种：一是指某种经济活动引起的直接(间接)的  $CO_2$  排放量或温室气体转化的  $CO_2$  等价物排放量，即碳排放量(t) [11]；二是指使用化石燃料排放的  $CO_2$  所需的生产性土地面积，即碳排放的占地面积( $hm^2$ ) [12]，本文中所采用的碳足迹核算主要是第二种碳足迹定义。

由于福州市在 2011 年才成立能源统计处，故本文选取 2012~2017 年这 6 年的数据，用碳足迹核算并评价闽江流域 33 个区县的生态系统状况。

#### 2.3.1. 碳排放指数及量的计算

温室气体的累积主要来自于碳排放，而碳排放的主体来源有两个：一是土地利用的方式，诸如农业和林业自身所产生的碳排放和进行的碳吸收；二是因人类生产生活活动过程中所产生的碳排放量，这其中包括了人类、牲畜和使用化石燃料所产生的排放。

以  $C_a$  表示区域内的碳吸收量，则有

$$C_a = C_f F + \sum_i C_e Q = C_f F + \sum_i C_e Y / \alpha \tag{2}$$

式(2)中， $C_f$  为单位面积( $m^2$ )内林地每年平均吸收的二氧化碳容量(取值  $C_f = 0.6 \text{ g/m}^2$ )， $F$  为林地的土

地利用面积,  $C_e$  为  $i$  类农作物每增加一个单位的产量所进行的碳吸收量,  $Q$  为  $i$  类农作物的生物产量,  $Y$  为  $i$  类农作物的经济产量,  $\alpha$  为  $i$  类农作物的经济系数。基于 IPCC 已经公布的数据和相关文献的整理资料可得福建主要农作物经济系数( $\alpha$ )和碳吸收率( $C_e$ )如表 1 所示:

**Table 1.** Economic coefficient ( $\alpha$ ) and carbon uptake rate ( $C_e$ ) of major crops

**表 1.** 主要农作物经济系数( $\alpha$ )和碳吸收率( $C_e$ )

作物类别	作物名称	$\alpha$	$C_e$
粮食作物	水稻	0.45	0.4144
	薯类	0.70	0.4226
经济作物	麻类	0.10	0.4500
	油类	0.25	0.4500
	烟草	0.55	0.4500
	甘蔗	0.50	0.4500
园艺作物	蔬菜	0.30	0.4500

基于人类、牲畜以及燃料燃烧这 3 个排放主体, 二氧化碳排放量( $M_c$ )计算公式如下:

$$M_c = M_{人} + M_{畜} + M_{燃} \quad (3)$$

由于数据获取难度和地域性的生产生活特点, 本文选取的牲畜种类为大型牲畜和家禽为主, 并以年底的总出栏数为核算标准, 年排放量以 365 天计算。同理, 按照地域性生产生活和能源消耗特点, 在考察能源消耗所产生的碳排放方面, 只选取煤炭、汽油、柴油、天然气等四种碳排放主体。基于 IPCC 已经公布的数据, 三个碳排放主体的二氧化碳排放因子如表 2 所示:

**Table 2.** Carbon emitters and CO<sub>2</sub> emission factors

**表 2.** 碳排放主体及 CO<sub>2</sub> 排放因子

排放主体类别	主体名称	碳排放因子(t/TJ)
人类	人类(kg, 人·日)	0.9
牲畜	牛(kg, 头·日)	11.0
	羊(kg, 匹·日)	2.1
	猪(kg, 头·日)	2.1
	家禽(kg, 羽·日)	0.1
燃料	煤炭	0.8
	石油	0.6
	天然气	0.4

## 2.4. 碳足迹估算

中国要实现 2030 年前碳达峰目标与 2060 年前碳中和的愿景, 面临着经济发展、工业化、城镇化对能源需求较高的难题。因此在未来的一段时期内, 中国的碳排放量仍属于上升期。对于各类经济活动的碳排放和碳吸收的总量进行核算对预测中国在实现碳达峰和碳中和愿景需要进行的任务有着重要的指导

和规划作用。故本文采用碳排放量和碳吸收量的差额来核算闽江流域经济带的区域生态系统碳排放总量,用以核算其碳足迹,碳排放总量(ECO)核算公式为:

$$ECO = M_C - C_a \quad (4)$$

由于碳足迹是指使用化石燃料排放的 CO<sub>2</sub> 所需的生产性土地面积,故而构建一个相对指标以核算闽江流域 33 个区县的碳足迹表征,用以描述闽江流域的生态系统情况。其相对指标构建公式为:

$$RC = \frac{ECO_i}{L_i} \bigg/ \frac{ECO_{域}}{L_{域}} \quad (5)$$

式(5)中,RC 为县域区域内的碳足迹指数,ECO<sub>i</sub>和 L<sub>i</sub>分别为第 i 县域的碳排放总量和土地面积,ECO<sub>域</sub>和 L<sub>域</sub>分别为闽江流域的总碳排放量与土地总面积。若 RC 值 < 1,则表明该县域的碳足迹指数较低,未达到闽江流域的区域碳排放的平均水平,生态功能相对较好,生态承载力水平较高;若 RC = 1,表明该县域刚好达到闽江流域的碳排放平均水平,生态功能一般;若 RC > 1,表明该县域的碳排放指数较高,碳排放量高于区域的总体平均水平,生态承载力较弱,需要在后期经济发展过程中进行适度调节。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 空间自相关检验

在分析流域的碳足迹时空变换之前,首先需要先检验闽江流域的碳足迹特征在时空分布上具有空间相关性(即是否存在聚集)。空间自相关性分析一般分为全局自相关和局部自相关分析,全局自相关研究总区域的空间自相关性,局部自相关则研究只关注一个或几个特定区域的聚类情况[11]。

#### 3.2. 时空地理加权回归模型(GTWR)

传统的地理加权回归模型主要基于截面数据进行分析,样本数据量有限,在分析过程中解释稳定性不足,不能很好的估计模型的参数;由于时空地理加权回归模型在地理加权回归的基础上引进了时间维度,保证和解决了时间和空间的非平衡稳定性问题[12],使得估计结果更加稳健有效,其模型具体如下[13]:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中:Y 和 X 分别代表解释变量和被解释变量;i 为研究区域的样本县区;u、v 为各县市的地理坐标;t 为时间年份; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$  为截距项; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$  为解释变量的待估参数; $\varepsilon_i$  为随机扰动项。

在进行回归之前,需要通过构造空间权重矩阵来实现空间权函数的选取,而时空地理加权回归模型则采用 Huang 等[13]所提出的高斯函数法是空权函数和时空距离进行计算,其具体计算公式如下两式所示:

$$d_{ij}^{ST} = \sqrt{\lambda \left[ (u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 \right] + \mu (t_i - t_j)^2} \quad (7)$$

$$w_{ij}^{ST} = \exp \left\{ - \left( \frac{\lambda \left[ (u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 \right] + \mu (t_i - t_j)^2}{b_{ST}^2} \right) \right\} \quad (8)$$

其中,i、j 代表研究区内不同的县市;参数 λ 和 μ 则是度量不相关系统中时空距离不同影响程度的比例因子。

借鉴 STIRPAT 扩展模型的指标设定, 考虑到城市化水平、经济发展水平、一二产业组成结构、能源消费强度等因素可能会对流域范围内的碳排放指数产生影响[14], 本文构建多元线性回归模型如下:

$$\ln C_{it} = \alpha_{it} + \sum_{k=1}^p \ln \beta_k (x_{it}) + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中, 是碳足迹指数为被解释变量以  $C_{it}$  表示, 解释变量分别为经济发展指数、固定资产投资额、人口规模、规模以上工业企业碳排放量、农业碳吸收量、农业从业人员数和全县本年度用电总额, 以  $X_{i,t}$  表示, 变量详情见表 3。由于鼓楼区和仓山区的能源统计处在合并后不再统计能源消费量且两区均无工业产业, 缺失值较多, 为保持数据不失真, 剔除掉鼓楼区和仓山区两区的变量数据, 仅对剩下 31 个区县进行统计分析和回归。

**Table 3.** Definition and descriptive statistics of relevant variables

**表 3.** 相关变量的定义及描述性统计

变量	原度量单位	均值	标准差	极小值	极大值
碳足迹指数	RC 值	1.025	1.919	-5.177	9.09
固定资产投资额(对数)	万元	4.938	0.839	2.833	6.917
农业从业人员(对数)	万人	10.193	0.892	8.842	12.254
全区县总用电量(对数)	千瓦时	9.613	1.302	7.107	13.361
人口规模(对数)	万人	3.302	0.602	2.313	4.871
经济发展指数(对数)	EC 值	-0.165	0.322	-0.952	0.859
农业碳吸收量(对数)	万吨	19.757	0.692	17.874	21.175
规模以上工业企业碳排放量	百吨	12.503	1.438	9.479	15.411

## 4. 实证结果与分析

### 4.1. 碳足迹指数时空分布特征

通过进一步计算 2012~2017 年闽江流域 33 个区县的碳足迹指数(RC), 运用 ArcGIS10.6 进行可视化分析得到其县域的碳足迹指数空间分布状况, 并通过横纵向角度对子区域的碳足迹分布状况进行分析(如图 2)。

在横向上, 2012 年鼓楼区的 RC 值最高, 碳足迹指数远高于闽江流域区域平均水平, 生态系统较为脆弱; 福州所属的台江区、长乐市、马尾区、仓山区和三明宁化县等 12 个县紧随其后, RC 值均在 1 以上, 为流域生态贡献负效应; 全域 33 个子区域中, 21 个区县的 RC 值小于 1, 生态承载力良好, 生态系统呈现正效应, 这些子区域的生态系统相对良好。与 2012 年的碳足迹指数相比, 其他 5 个年份碳足迹指数大于 1 的县域基本上稳定在以鼓楼区、台江区为首的部分区县中。从横向的数据变动来看, 区域经济发展碳足迹指数空间分布的不平衡性与社会发展非生态可持续性加重, 但总体上保证了区域上的稳定。

从纵向上看, 鼓楼区和台江区的碳足迹指数一直处于最高水平, 远超过流域范围内的平均水平, 存在明显的生态赤字, 生态负荷较大, 生态功能相对来说较差; 超过 1 的县域始终稳定在三明市区、光泽县、连城县、德化县、福州市区、长乐等几个主要县域, 生态功能较为薄弱; 从 2012~2017 年, 碳足迹水平超过 1 的县域数量从 2012 年的 12 个升至 2017 年的 13 个, 虽然中间有短暂波动下降, 但总体数量逼近县域总数的一半。总体来看, 闽江流域范围内的碳足迹空间分异较为稳定, 但空间分布较不均衡, 呈现点状开花的布局, 主要集中在工业发达、人口集中的县域。

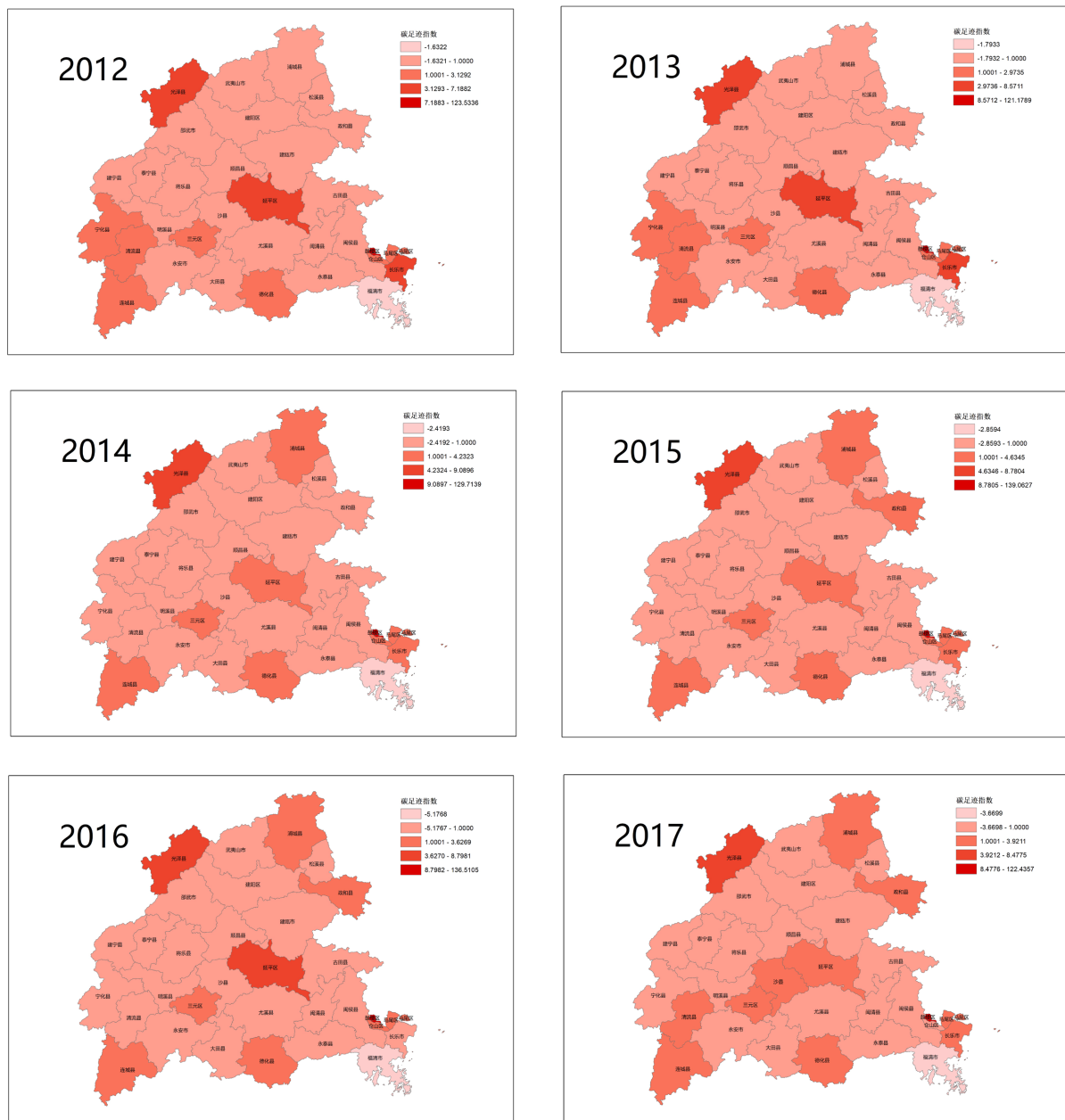


Figure 2. Spatial variation of carbon footprint index by districts and counties in the Minjiang River Basin, 2012~2017  
图 2. 2012~2017 年闽江流域各区县碳足迹指数空间分异图

#### 4.2. 流域的碳足迹指数空间自相关检验

由于福州市直至 2012 年才成立能源统计处, 所属的闽江流域部分县市缺失 2012 年以前的统计数据, 为了确保数据的真实准确性, 针对闽江流域县域碳足迹指数的空间自相关检验的研究时段为 2012~2017 年。

##### 4.2.1. 总体时空格局演化特征

为了分析 2012~2017 年 6 年间闽江流域碳足迹指数是否有在空间上的集聚并产生对周围城市的扩散效应, 本文应用 Geoda 软件计算了 2012~2017 年各县域碳足迹指数的 Global Moran's I 指数, 如表



4 所示。

**Table 4.** Global Moran's I index value of carbon footprint index of each county in the Minjiang River Basin from 2012 to 2017

**表 4.** 2012~2017 闽江流域各设区县碳足迹指数的 Global Moran's I 指数值

年份	Moran's I 指数 Moran's I index	预期值 Expectations index	z 得分 zscore	p 值 p-value	均值 Mean	标准差 sd
2012	0.3936	-0.0313	4.9733	0.001	-0.0314	0.0855
2013	0.3897	-0.0313	4.9272	0.001	-0.0315	0.0855
2014	0.3894	-0.0313	4.9254	0.001	-0.0315	0.0855
2015	0.3877	-0.0313	4.9162	0.001	-0.0314	0.0853
2016	0.3872	-0.0313	4.9236	0.001	-0.0317	0.0851
2017	0.3799	-0.0313	4.8367	0.004	-0.0318	0.0851

据表可知, 2012~2017 年各县域碳足迹指数的 Moran's I 指数均在 1% 水平上显著, 通过显著性检验, 表明闽江流域的碳足迹指数呈现正向空间自相关性; 且 Z 得分皆为正值且大于 2.58, 说明各县域的碳足迹指数高(低)与相邻县域表现出聚集模式, 全局自相关非常显著。2012~2017 年的 Moran's I 指数呈现下降的趋势, 表明从 2012 年以来, 闽江流域各设区市的空间自相关性直线下降, 呈现出聚集态势。从总体上看, 标准差和 Moran's I 指数变化不大, 说明闽江流域碳排放空间分布格局基本稳定。

#### 4.2.2. 局部时空格局演化特征

利用 ArcGIS10.6 软件的空间统计软件计算出碳足迹指数县域空间的  $G_i^*$  指数, 并采用自然断点法将  $G_i^*$  值由高到低分为 5 类: 碳足迹指数热点(99%置信)、碳足迹指数热点(95%置信)、不显著、碳足迹指数冷点(99%置信)、碳足迹指数冷点(95%置信)。2012~2017 年闽江流域各区县碳足迹指数空间格局局部聚集如表 5 所示。

整体上看, 6 年间县域碳足迹指数总体空间格局变化不大, 但部分区域存在变化。从表 5 可知 6 年间县域的碳足迹指数热点主要分布在鼓楼区、台江区; 冷点区域主要集中于德化县、永泰县, 并常年保持稳定。碳足迹指数不显著区域主要分布在其他各县域。综合分析可知, 闽江流域各设区县碳足迹热点程度有所下降, 并呈现出向东南沿海区域移动的趋势, 碳足迹指数有明显下降。

**Table 5.** Local spatial pattern of carbon footprint index of districted counties in Minjiang River Basin from 2012 to 2017

**表 5.** 2012~2017 闽江流域各设区县碳足迹指数局部空间格局

县域名称	热(冷)点置信度					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
连城县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
古田县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
德化县	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	不显著
鼓楼区(福州市)	95%	95%	95%	不显著	不显著	不显著
仓山区	-99%	-99%	-99%	-99%	-99%	-99%
台江区	95%	95%	95%	95%	95%	不显著

## Continued

马尾区	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
闽侯县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
永泰县	-95%	-95%	-95%	-99%	-99%	-95%
闽清县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
长乐区	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
福清市	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	-95%
三明市辖区	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
永安市	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
明溪县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
清流县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
宁化县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
建宁县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
泰宁县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
将乐县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
沙县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
尤溪县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
大田县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
延平区	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
邵武市	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
武夷山市	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
建瓯市	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
建阳区	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
顺昌县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
浦城县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
光泽县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
松溪县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
政和县	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著

## 4.3. 闽江流域经济带碳足迹影响因素分析

基于空间自相关性后,验证了碳足迹在时空上具有明显的非平稳特征,有可能是由于不同的影响因素对其造成的波动影响,因此本文基于2012~2017年6年的闽江流域经济带31个县区的面板数据,通过时空地理加权回归(GTWR)对流域范围内各县区的碳足迹指数影响因素进行参数检验。

### 4.3.1. GTWR 实证结果

在进行 GTWR 实证回归之前,通过 stata15.0 对各变量进行多重共线性检验,结果显示其 VIF 值均在 10 以内,没有明显的多重共线性的影响,可以开展后续的 GTWR 回归分析。基于香港大学黄波教授开发的 GTWR 插件和 ArcGIS10.6 软件,基于自动设置带宽和时空距离参数比值为 1,对影响碳足迹指数空间分布特征的影响因素开展 GTWR 回归分析。

在分别进行传统的普通最小二乘法(OLS)回归和 GTWR 回归后,我们基于 AIC 准则和拟合优度  $R^2$  评价模型的置信度,具体结果如表 6 所示。GTWR 模型的 AIC 为-512.1667,拟合优度  $R^2$  为 0.9879,相比于普通最小二乘法(OLS)提高了 0.7277,因此,相较于传统的普通最小二乘法,考虑了时空一致性的 GTWR 模型的解释力度相对来说更强,也验证了本文采用 GTWR 进行参数估计的合理性。

**Table 6.** Model evaluation metrics

**表 6.** 模型评价指标

模型	OLS	GTWR
AIC	729.2163	-512.1667
R2	0.2602	0.9879
AIC 变化量	0.0000	1241.3830
R2 变化量	0.0000	0.7277

通过 GTWR 模型对时空框架下各县区碳足迹指数分布的影响因素进行参数估计,得到各影响因素的描述统计结果如表 7 所示。由表 7 可知,反映能源消费、产业结构和城市发展水平的指标等因素的回归系数变异较大,需要从局部考虑碳足迹指数分布特征的时空异质性。

**Table 7.** Descriptive statistics of influencing factor regression coefficients

**表 7.** 影响因素回归系数描述统计

变量	中位数	均值	标准差	极小值	极大值
固定资产投资额	-0.841	-2.133	7.855	-36.009	26.818
农业从业人员	3.217	3.584	7.937	-14.204	31.199
全区县总用电额	-0.158	2.774	9.234	-10.067	40.236
人口规模	0.830	0.364	9.194	-30.678	21.379
经济发展指数	-0.071	0.036	5.244	-13.41	20.222
农业碳吸收	-2.701	-4.612	8.045	-34.064	12.783
规模以上工业企业碳排放量	1.988	1.786	4.401	-11.496	13.657

### 4.3.2. 各影响因素的时空演化特征

在对闽江流域不同时空范围内碳足迹影响因素运用 GTWR 模型进行分析后,得到了各影响因素局部角度对于碳足迹指数分布变化的贡献程度。为了合理分析各影响因素的系数随着时间上的演变趋势,绘制箱线图如图 3,具体到各要素分别为:

1) 固定资产投资在所考察的七个影响因素中对碳足迹指数的贡献是较为明显的,从总体的系数分布来看,固定资产投资在多数年份和地区对碳足迹指数的变化带来负向影响较为明显,且波动幅度大。随着经济发展水平的提升,基础设施活动日趋活跃,负向影响明显上升;这也证明,随着低碳目标提出和环保材料的大量使用,使得由于固定资产投资对碳排放得到一定程度的控制,碳足迹指数明显下降。

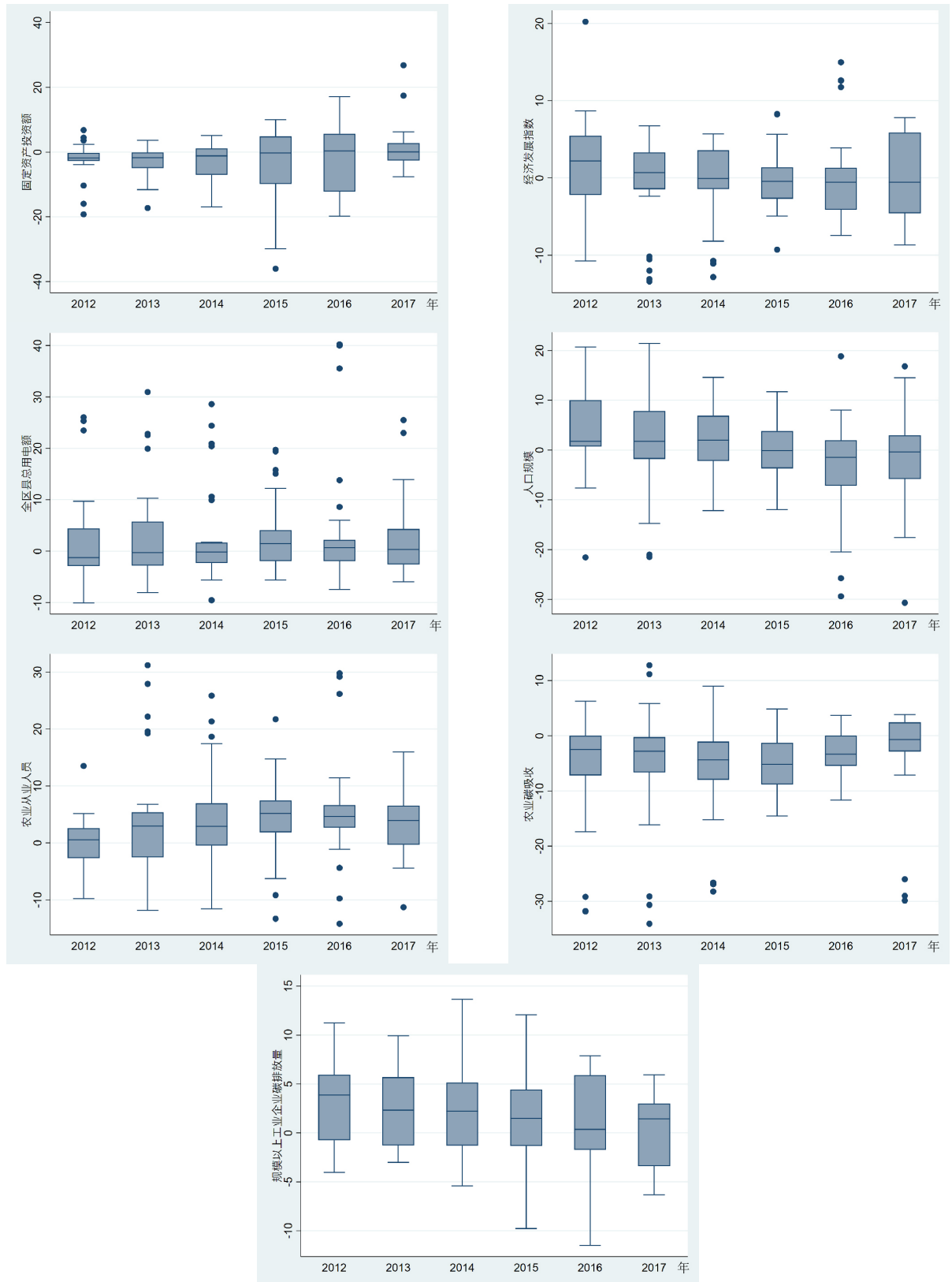


Figure 3. Time series variation trend of GTWR regression coefficients  
图 3. GTWR 回归系数的时间序列变化趋势

2) 经济发展指数对流域范围内大部分区县的影响为正向,但从回归系数的表现来看,由于经济发展水平差异较大,受增长极和城乡之间差异的双重推拉,回归系数在2015、2016年两年呈现一定程度的负向影响,极端值表现明显。总体来看,经济发展系数的变动减少了碳排放,影响了碳足迹指数的波动。

3) 作为衡量区域能源消费的电力用度,从数据上的表现来看,其离散程度较小,回归系数在时间上的变化较为平稳,持续为负向影响。虽然三明、宁德和福州部分显示承担闽北主要的工业建设,燃料(特别是火力发电来源)需求高,但经过了产业结构改革以后,能源形式已逐渐趋于绿色;加上福州作为区域发展的核心城市,城市建设规模急剧扩张,生活生产中对于能源的消费需求旺盛,尚待优化的能源消费结构也是其对碳足迹指数产生负向影响的关键因素所在。

4) 人口规模直接反映了城市的人口集聚程度,从系数的平均水平来看,与碳足迹指数之间的关系在研究期间为正,而随着时间插值的波动影响逐年变为负值。这说明,人口越往大城市聚集,其实越有利于碳减排和碳足迹指数的稳步变化;人口规模集中不仅提高了基础设施、能源、资源的综合利用率;同时,人口的集中和扩大,也摊薄了各种设施的建设成本,显著降低了碳排放,影响和降低了碳足迹指数水平。

5) 从农业从业人员的系数表现来看,农业从业人员在2012~2017年间均呈现正向的影响。农业从业人员占比直接反应了流域范围内各区县的农业土地利用方式对碳足迹指数所产生的正向影响,但影响程度非常微弱,这也与农业人口的快速流失有着密切联系,也恰好佐证了农业碳吸收在数据上的表现。

6) 作为碳汇的主要来源,闽江流域的农业碳吸收表现出非常明显的负向影响,且负向影响持续增加,极端值表现较为明显。这与闽江流域范围内各区县的农业生产由于城市化进程的加快和产业结构大幅调整朝着集约化和规模化的步伐迈进有关,使得农业作为碳汇应当发挥的作用,吸收了大量的碳排放。

7) 规模以上工业企业的碳排放量一直是碳足迹指数增加的主要来源,然而从目前的回归系数上看,在2012~2017年的研究期间,规模以上工业企业的碳排放量始终为负值,且波动、离散程度均较小,这与近年来工业产业结构调整和技术进步有着极大的关系;随着低效能企业的退出、新能源消费的兴起和部分工业转向高新产业、服务业,很大程度上使得能源强度明显下降,抑制了碳足迹指数的增加。

从以上七个影响因素的回归系数结果来看,闽江流域经济带的各城市间碳足迹指数在城市之间有着较强的引力,且随着地理位置的临近产生相互影响。

#### 4.3.3. 碳足迹影响因素空间异质性表现

在讨论了对碳足迹指数产生影响的各因素的时间演变趋势之后,只能从总体上看出在研究期间内的影响程度,为了更好的剖析各影响因素在空间上的异质性,则需要借助可视化表达来考察各影响因素回归系数在时空变化上的分布。各影响因素回归系数均进行了平均化处理,最大程度反映了其集中区间,具体时空变化分布情况如图4所示。

固定资产投资对流域范围内碳足迹指数的影响基本上分布在宁德、龙岩和沿海的福清、平潭和长乐,回归系数以负值居多。正向影响程度较高的集中在福州及其周边城市。随着经济水平的提高和城乡、城市间的经济发展差距越来越大,人口越来越往福州区域迁移,相应的固定资产投资和建设规模也逐渐加大了力度;相应的,周围的宁德、三明、龙岩等部分城市发展相对滞后,固定资产投资的投入规模小、时间晚,但随着“双山”理念的提出和绿色发展的理念的落实,建设过程中更多的利用了环保材料,有效的控制了碳排放的水平。

农业从业人员对碳足迹指数的影响回归系数跨度较大,从-7.675~13.907的区间均有分布,但影响主要以正向影响为主。农业从业人员的多寡及其对碳足迹指数的影响在闽江流域范围内呈现两极分化的趋势:以山区地形为主的南平、三明和部分宁德、福州所属的山区县范围内以正向影响为主,农业活动仍

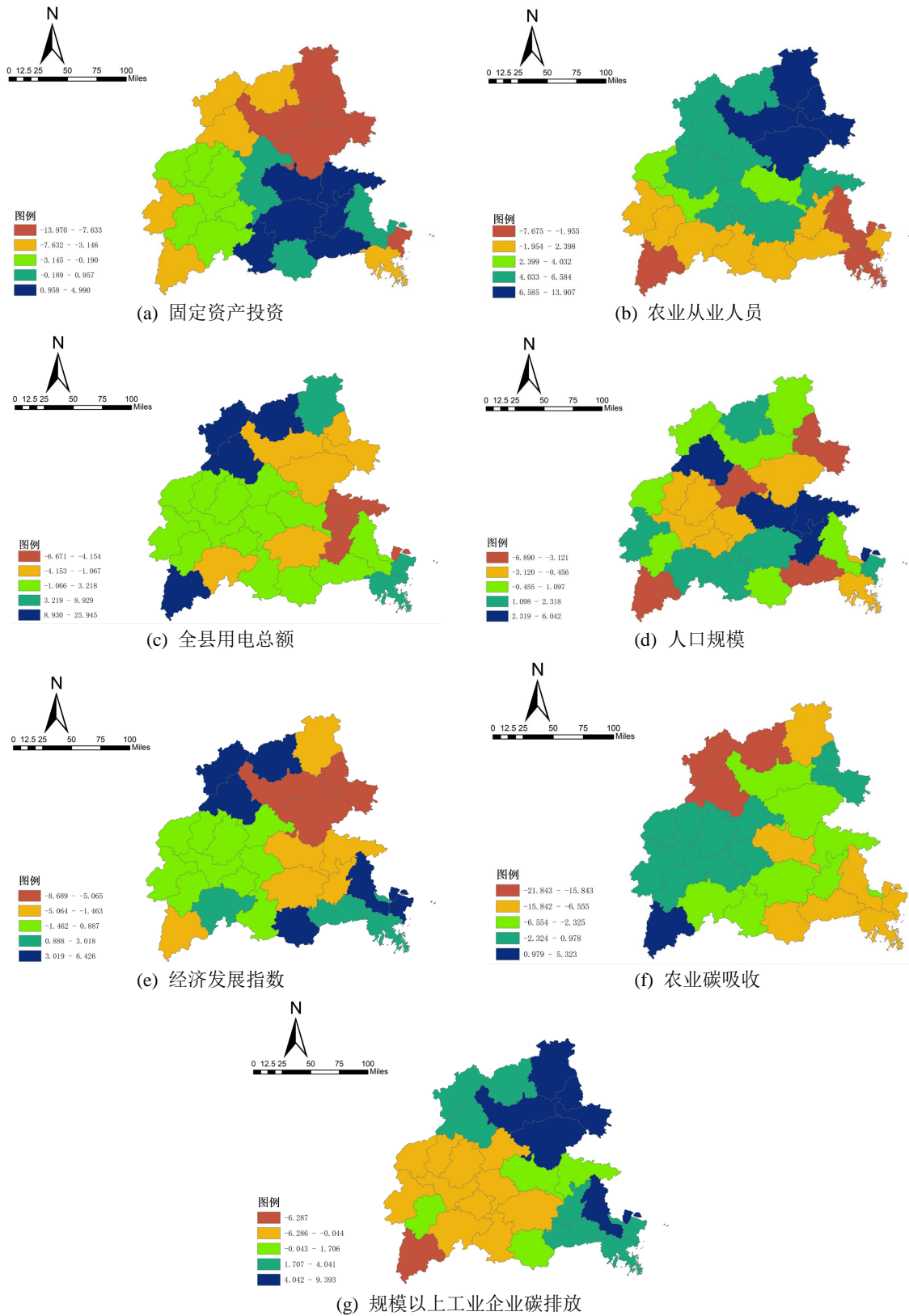


Figure 4. Distribution of influencing factors of carbon footprint index in Minjiang River Basin  
图 4. 闽江流域碳足迹指数影响因素系数分布

然相对活跃,农业从业人员相对较多;而靠近泉州、福州的三明和福州部分县市,由于经济上受到“虹吸”效应的拉力,农业从业人员可能在研究期间出现明显的减少,加之福州主要城区县范围内的农业活动已经较少,农产品供应主要来自周边城市,使得其农业从业人员的回归系数以负效应为主,使得该地区的碳足迹指数收到了显著的抑制。

从能源消费视角来看,流域范围内各县用电总额对碳足迹指数影响的回归系数以负向为主,尽管最高达到了 25.945,最低只有-6.671,但除南平的光泽、邵武和连城仍然留有部分传统工业和采矿业影响到了碳排放的控制和碳足迹指数的降低,绝大多数县区由于能源结构的转变,用电总额对碳足迹指数的影响已经得到了明显的控制,总体上呈现较为均衡的状态。

人口规模对碳足迹指数回归系数呈现正态分布,大小在-6.890~6.042 之间。时空异质性的表现上人口集聚特征明显,三明市主要城区、宁德古田县和福州主要城镇区县呈现负向的抑制效应;但同时人口规模对碳排放回归系数的影响在时空上的分布较为均匀,呈现多核心-扩散的形态,可能随着地理距离的扩大逐步减小,因而使得碳足迹指数增加。

经济发展指数在流域范围内的绝大多数区县对碳足迹指数都呈现负向影响,只有部分在“十二五”规划期间经济逐渐崛起较为明显的县市(指连江、光泽和邵武、武夷山市等四个区县)呈现正向影响,后发优势所带来的经济腾飞一定程度上提高了所在区县的碳足迹指数;此外,经济发展指数回归系数为负和在正负之间浮动的区县(以三明市为代表)则在研究期间的经济发展都较为平稳,对碳足迹的影响程度相对较低,波动程度不强。

农业作为主要的碳汇来源,农业碳吸收在除连城县以外的区域均对碳足迹指数产生抑制效应,其中,抑制效应最为明显的是南平的邵武、光泽和武夷山市,也是闽江流域范围内较有农业发展特色的县市,三个县分别以肉牛肉兔养殖、肉鸡养殖和茶叶种植为农业支柱产业。总体上来看,农业碳吸收对碳足迹指数的影响是较为均衡的。而作为主要的碳源,规模以上工业企业对碳足迹指数的正向影响则突出在新工业崛起的宁德市和福州市,两个市分别作为闽江流域新兴的工业发展引擎和传统的工业重镇,以新能源电池制造和化工、纺织为主要特色,需要在未来的发展过程中推进产业结构优化,实现数字赋能、环保减碳。

## 5. 结论

本研究将处于闽江流域范围的 33 个县区作为研究对象,通过构建经济发展指数和碳足迹指数核算体系的经济与生态系统,基于探索性空间数据分析方法(ESDA),分析流域的碳足迹的时空演变特征及其影响因素进行适当分析,具体结论如下:

1) 从 2008 到 2017 年,经济发展指数大于 1 的区县数量呈现下滑的趋势,流域范围内总体上表现出倒退的态势;经济发展水平在时间节点上的表现出动力不足的情况。在空间分布上,闽江流域全域经济的带动,主要是以沿海的福州各区县和三明市的沙县、尤溪县和三元区来承担。6 年期碳排放指数全局  $Moran's I > 0$ , 表示空间正相关性,空间聚集效果有下降的趋势,全局自相关性非常显著。局部  $Moran's I$  统计量分析结果表明,碳排放指数空间集聚区域主要分布在鼓楼区、台江区、长乐区、福清市以及德化县、永泰县,空间集聚表现较为稳定,变动不大。碳足迹指数空间分布格局上,2012~2017 年 6 年期中始终是以鼓楼区、台江区的碳足迹表现最突出,且呈现空间不平衡的态势。全域 33 个子区域中,近 36% 的区县的 RC 值  $> 1$ ,表明这些子区域碳足迹水平高于区域平均水平,生态承载力较弱,生态系统呈负效应;虽然总体上全域呈现出了生态正效应的格局,区域发展在目前看来是生态可持续的,但存在着恶化的态势。

2) 从碳足迹指数影响因素的回归系数看,对碳足迹指数影响程度最大的是农业碳吸收和农业从业人

员的规模，其次是全县用电总额、固定资产投资和规模以上工业企业碳排放。这说明，农业活动的活跃程度、能源消费结构和工业发展模式，在闽江流域已经拥有较大的森林覆盖率的前提下，是影响流域碳足迹指数的关键影响因素，政策上可以通过调节这些因素来实现碳减排。

3) 从影响因素的时间序列来看，经济发展、能源消费和产业结构转型和农业碳排放与碳足迹指数之间的关系均未反映明显的环境“库兹涅茨”曲线的倒U型关系，可能因为研究时间的年份样本不足以支撑。但这也进一步反映，在未来很长一段时间内，闽江流域范围的区县仍然有较大的经济增长空间。而从影响因素的回归系数的空间异质性情况来看，固定资产投资、经济发展指数、农业从业人员规模和农业碳吸收对碳足迹指数的影响在空间上的异质性表达较为突出。从这四个影响因素的指标上也可以看出闽江流域的经济发展“山海特征”明显，具有明显的区位分工，可以反映出城乡统筹的差距、城市与城市之间的经济差距成为造成碳足迹指数波动的显著影响之一；而从能源消费结构、规模以上工业企业碳排放回归系数在固定的县市回归系数较为突出，也反映出在经济发展和转型的阶段过程中，对于落后县市的引领、政策倾斜和结构改革，仍然刻不容缓；最后，从人口规模所表现出的圈层结构来看，闽江流域经济带的已经形成了明显的“多核心-扩散”的圈层结构，这验证杜能的“区位论”，也证明了福州和闽北闽西城市实施“山海合作”已经有了初步成效。

## 6. 建议

从流域的碳足迹时空分布及影响因素分析综合来看，在构造闽江经济带的过程中，既要发展经济，又要保护生态环境，碳排放控制与碳汇吸收应同步进行，应该作出如下改进：

### 1) 提升基础公共服务设施建设和城镇化水平

为使得经济发展实现生态可持续，需要在保证合理的经济增速的条件下，一是要加大对基础公共服务设施的建设，不仅吸纳更多的流动人口形成人口集聚效应，提高资源的综合利用率，同时通过基础设施投资建设带动经济社会发展，同时又能摊薄成本，实现资源利用的帕累托最优；二是在人口集聚的基础上提升流域范围内各县市的城镇化水平，利用好“山海合作”所形成的圈层结构，各区县发挥自身比较优势发展特色经济。

### 2) 持续改善能源消费结构，优化落后产业生产方式

从目前来看，流域范围的各县市都已经很大程度上优化了能源使用配置和能源消费结构，但仍应该在现有基础上，持续改善城市能源消费结构，并将传统工业、采矿业的能源使用配置调整过来，建议应通过数字赋能、新能源利用等多种形式持续优化产业生产方式，减少化石能源使用所产生的碳排放，同时也能降低成本，实现城市经济和工业经济发展提质增效。

### 3) 提升农业生产力水平，增强碳汇吸收能力

农业作为除林业以外主要的碳汇来源，发展和提升农业生产水平，能够很好减少区域的碳排放量。因此，在生产模式仍然不够集约高效的县市，应通过政策优惠、补贴激励和农技推广的形式，因地制宜的提升农业现代化生产水平，同时也通过农业现代化水平提高推动劳动力转移和非农就业，更好的抑制碳排放规模。

## 参考文献

- [1] 邱宇, 陈英姿, 饶清华, 林秀珠, 陈文花. 基于排污权的闽江流域跨界生态补偿研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2839-2847.
- [2] 饶清华, 林秀珠, 邱宇, 陈芳. 基于机会成本的闽江流域生态补偿标准研究. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 655-662.
- [3] 林秀珠, 李小斌, 李家兵, 饶清华. 基于机会成本和生态系统服务价值的闽江流域生态补偿标准研究. 水土保持



- 研究, 2017, 24(2): 314-319.
- [4] 兰紫橙, 贾岚, 程煜. 闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系. 生态学报, 2020, 40(12): 3909-3920.
- [5] 饶清华, 林秀珠. 基于水环境容量的闽江流域跨界生态补偿标准研究. 中国农村水利水电, 2017(11): 73-77+82.
- [6] 饶清华, 颜梦佳, 林秀珠, 邱宇, 许丽忠. 基于帕累托改进的闽江流域生态补偿标准研究. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1235-1241.
- [7] 韩凌芬, 胡熠, 黎元生. 基于博弈论视角的闽江流域生态补偿机制分析. 中国水利, 2009(11): 10-12.
- [8] 饶清华, 林秀珠, 李家兵, 陈琪, 陈文花. 流域社会经济与水环境质量耦合协调度分析. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1784-1792.
- [9] 应凌霄, 王军, 周妍. 闽江流域生态安全格局及其生态保护修复措施. 生态学报, 2019, 39(23): 8857-8866.  
<https://doi.org/10.5846/stxb201905291106>
- [10] 李雪松, 龙湘雪, 齐晓旭. 长江经济带城市经济-社会-环境耦合协调发展的动态演化与分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 505-516.
- [11] 毛先成, 黄继先, 邓吉秋, 等. 空间分析建模与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 124.
- [12] 张精, 方埝, 魏锦达, 林佳壕, 陈培彬, 朱朝枝. 基于碳足迹的安徽省农田生态系统碳源/汇时空差异[J]. 福建农业学报, 2021, 36(1): 78-90.
- [13] Huang, B., Wu, B. and Barry, M. (2010) Geographically and Temporally Weighted Regression for Modeling Spatio-Temporal Variation in House Prices. *International Journal of Geographical Information Science*, **24**, 383-401.  
<https://doi.org/10.1080/13658810802672469>
- [14] 沈杨, 汪聪聪, 高超, 丁镭. 基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 329-342.