

# 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应

潘竞虎<sup>1</sup>, 张永年<sup>1,2</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 兰州大学经济学院, 兰州 730000)

**摘要:** 利用DMSP-OLS夜间灯光数据和碳排放统计数据, 构建碳排放面板数据模型, 模拟了2000—2013年中国的碳排放量。运用探索性时空数据分析(ESTDA)框架体系, 从时空交互视角分析2001—2013年碳足迹的空间格局和时空依赖动态演化; 利用改进的Tapio脱钩模型对3个时间段336个地级单元环境碳负荷与经济增长之间的脱钩效应进行综合分析。研究表明: ① 2000—2013年, 中国的碳排放时空演变上既表现出稳中有进的总体特征, 也存在快速增长的阶段特征。② 碳足迹和碳赤字均呈逐年增长趋势, 年均增长率分别为4.82%和5.72%; 碳足迹和碳赤字整体北方大于南方, 不同的行政单元尺度下碳足迹和碳赤字空间异质性特征明显。各地级单元碳足迹变异系数逐步增大, 存在极为显著的空间自相关特征。③ LISA时间路径相对长度北方大于南方, 且呈由沿海地区向中西部地区递增的趋势; LISA时间路径弯曲度整体上则由沿海地区向内陆地区递减。④ 综合脱钩指数整体以弱脱钩型为主, 但弱脱钩型城市数量持续减少, 扩张连接、扩张负脱钩区域数量逐渐增多且向中西部及东北地区聚集分布; 全国平均脱钩弹性值逐步增长, 变异系数持续下降。

**关键词:** 能源碳足迹; 碳排放; 夜间灯光; 脱钩效应; 时空动态; 探索性时空数据分析

DOI: 10.11821/dlxb202101016

## 1 引言

20世纪80年代以来人为温室气体排放呈现持续增长的态势, 化石燃料燃烧和工业化过程所产生的CO<sub>2</sub>的比重达到78%左右<sup>[1]</sup>。减少CO<sub>2</sub>等温室气体排放, 推行绿色循环经济发展已成为国际社会应对和改善气候变化效应的重要共识。自1978年改革开放以来, 中国在保持经济快速增长的同时, 工业化和城市化也快速推进, 促使能源消费需求持续提升<sup>[2]</sup>。2009年国际能源署(IEA)报告显示, 中国的CO<sub>2</sub>排放总量在2007年超越美国居世界首位。面对国际上强大的碳减排压力, 中国政府在哥本哈根气候变化大会上承诺到2020年单位GDP碳排放量比2005年下降40%~45%, 在2015年的巴黎气候大会上, 则承诺将这一指标在2030年进一步降低60%~65%, 从而实现经济增长、资源消耗与碳排放的强脱钩。《BP世界能源统计年鉴(2019年)》数据显示, 2018年中国的CO<sub>2</sub>排放量增长了2.5%, 份额从2005年的20.9%上升至2018年的28%<sup>[3]</sup>。可见, 中国在减少CO<sub>2</sub>排放的同时还要保持经济增长, 面临着巨大挑战。由于中国各区域经济社会发展和能源消费结构存在很大差异, 因此科学准确地测算和分析不同区域碳排放的时空变化, 是制定符合区域自身特点的碳减排调控政策, 合理推进各地区减排进程的关键。

收稿日期: 2019-04-30; 修订日期: 2020-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661025, 42071216) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41661025; No.42071216]

作者简介: 潘竞虎(1974-), 男, 甘肃嘉峪关人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110011899M), 研究方向为空间经济分析。E-mail: panjh\_nwnu@nwnu.edu.cn

目前,学术界对于碳排放的研究多集中于碳排放量测算<sup>[4]</sup>、碳排放影响因素<sup>[5]</sup>、碳排放与经济发展及能源消耗的关系<sup>[6-7]</sup>、碳减排路径研究<sup>[8]</sup>等,却较少关注碳排放的源头<sup>[9]</sup>。引入碳足迹的概念,衡量碳排放在整个生命周期的活动过程,深入揭示人类活动对碳排放的影响,便于从源头上减少碳足迹,指导碳减排策略的制定,成为当前研究热点<sup>[10-11]</sup>。目前学术界对碳足迹概念未形成统一的共识,大致可归纳为两种看法:①将碳足迹定义为人类活动的碳排放量,即从社会系统的角度出发,以“碳重量”为衡量单位<sup>[12]</sup>;②认为碳足迹是生态足迹的组成部分,也就是用于吸收化石燃料燃烧产生的CO<sub>2</sub>所需要的生态承载力,即从自然—社会系统的视角出发,以“碳面积”为衡量单位<sup>[13]</sup>。本文采用全球足迹网络(Global Footprint Network, GFN)的定义<sup>[13]</sup>,即碳足迹是指通过光合作用吸收由化石燃料燃烧所产生的CO<sub>2</sub>所需要的生产性土地(植被)面积。国外对碳足迹的研究覆盖面广且内容丰富,从研究内容看,集中在碳足迹的概念内涵<sup>[7]</sup>、计算方法<sup>[14]</sup>、案例应用<sup>[15]</sup>等方面;从计算方法来看,可分为以过程分析为基础的“自下而上”法和以投入产出分析为基础的“自上而下”法<sup>[16]</sup>;从研究尺度看,涵盖个体<sup>[17]</sup>、家庭<sup>[18]</sup>、企业<sup>[19]</sup>、行业<sup>[20]</sup>、城市<sup>[21]</sup>、区域<sup>[22]</sup>、国家<sup>[23]</sup>等不同尺度。国内碳足迹研究多为国外研究的跟进,部分学者从不同产业角度<sup>[24]</sup>、或对牧区<sup>[25]</sup>、都市区<sup>[26]</sup>等单一案例的碳足迹进行了测度分析。国内碳足迹研究整体上尚处于探索阶段,已有研究多属于某个具体区域、微观尺度上的案例研究,而对于中观和宏观尺度以及区域分异的碳足迹研究较为欠缺。此外,学者们在碳足迹计算方法、数据源、碳排放源选取、碳排放系数等诸方面均有所差异,碳排放和碳足迹的计算结果往往差异很大。现有研究主要以省域为统计分析单元,市级或更小尺度的数据缺失较多,研究结果更无法真正落到空间格网上。

本文基于DMSP-OLS夜间灯光数据、MODIS-NDVI、MODIS-EVI产品、高分辨率遥感影像数据、地理矢量基础数据和经济统计数据等基础数据,在对遥感基础数据完成预处理的基础上,利用面板数据模型建立夜间灯光数值与能源消耗碳排放统计量之间的定量关系方程,模拟了2000—2013年中国碳排放量及其空间分布。在此基础上,引入MODIS-NPP产品,采用探索性时空数据分析方法(Exploratory Spatio-temporal Data Analysis, ESTDA)从自然—社会二元系统视角分析碳足迹的时空格局及路径演变特征,进一步以地级及以上城市为基础单元,采用脱钩理论深入分析城市环境碳负荷与经济成长的关系,以期碳减排目标的精准落地和制定差别化的碳减排措施提供政策参考。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

2000—2013年DMSP-OLS稳定夜间灯光数据获取自美国国家环境信息中心网站(National Centers for Environmental Information, NCEI),数据下载地址为<http://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>。夜间灯光数据空间分辨率为30",灰度值范围为0~63。本文在借鉴前人<sup>[27-28]</sup>提出的通过EVI指数对夜间灯光影像降低饱和度的方法,分别构建了比值型、增强型和改进型降饱和指数,对DMSP-OLS影像进行去饱和处理。采用突变检测法进行最佳阈值的确定,以北京、西安、深圳3个城市作为提取最佳阈值的样本城市,利用Matlab软件编写代码,提取城市建成区分割的最佳阈值。篇幅所限,详细处理过程见参考文献<sup>[27-29]</sup>。

碳排放统计数据来源于中国碳排放数据库CEAD(<http://www.ceads.net/>)。该数据库由中、英、美、欧多国研究机构共同建立,并编纂完成,包括国家—省区—城市(部

分)等多尺度和长时间序列(1997—2015年)的能源及CO<sub>2</sub>排放清单,该清单数据库包括14种工业过程和17种能源类型的CO<sub>2</sub>排放数据。

2000—2013年NDVI、EVI数据(MOD13A2)和NPP数据(MOD17A3)获取自美国国家航空航天局(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),数据的空间分辨率为1km,合成方式为16 d合成产品,时间为夏秋季(5—9月),通过影像镶嵌、裁剪、投影转换等处理,得到月数据。利用最大值合成法,将月数据合成为年数据,以消除部分异常值引起的误差。NPP数据为年际数据,空间分辨率1 km。2001—2013年土地利用数据产品(MCD12Q2)获取自NASA(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>),空间分辨率为1 km,采用第一类国际地圈生物圈计划(IGB)全球植被分类方案,从土地覆盖类型中提取含有植被的类型作为生产性土地。

高分辨率遥感影像来源于谷歌地球,空间分辨率为7 m,与夜间灯光数据提取的建成区面积进行对比验证提取精度。社会经济统计指标来源于《中国区域经济统计年鉴》(2001—2014年)和《中国城市统计年鉴》(2001—2014年)。西藏自治区和港澳台地区由于数据缺失,未包括在分析之列。各行政区界线、城市位置等获取自国家基础地理信息中心1:400万数据库和基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站(<http://bzdt.nasg.gov.cn/>)下载的审图号为GS(2016)2885号标准地图制作。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 面板数据模型** 面板数据能够综合利用样本在横截面和时间序列上两个维度的信息,建立多维方向的计量模型。相较于普通的回归模型,面板数据模型增加了数据的自由度,减少了共线性问题,在动态过程和效应的识别与测量方面具有不可比拟的优势。表达式为<sup>[30]</sup>:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_i x_{it} + u_{it}, \quad x_{it} = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{kt})^T \quad (1)$$

式中:  $x_{it}$  为  $1 \times k$  的自变量;  $\alpha_i$  表示常数项;  $\beta_i$  为  $1 \times k$  的系数变量;  $u_{it}$  为横截面  $i$  和时间  $t$  的随机误差项;  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ 。

通过面板数据构建的模型一般包括3种类型:混合回归模型、固定效应模型和随机效应模型,在利用面板数据进行分析时,3种不同模型的具体选择应用主要通过  $F$  检验实现,若  $F$  检验接受原假设,则认为数据模型的不同个体截距项和斜率系数均相同,则选择混合回归模型,反之则选择固定效应模型或随机效应模型,利用 Hausman 检验的结果来区分固定效应模型和随机效应模型的选择。若 Hausman 检验结果表明个体效应与回归变量相关,则选择固定效应模型,反之则选择随机效应模型。利用面板数据进行变量之间的模拟建模主要包括4个步骤:①单位根的检验,②协整检验,③面板数据模型的选择,④面板回归模型的构建,各类检验及计量统计公式详见参考文献<sup>[31]</sup>。

**2.2.2 碳足迹和碳赤字研究方法** 本文基于自然生态系统和社会经济系统视角对碳足迹进行测算。引入NPP数据作为生态系统碳吸收的指标,从土地利用数据产品中提取出生产性土地(植被)的面积,从而构建碳足迹计量模型<sup>[32-33]</sup>:

$$CF_{it} = \frac{CT_{it}}{NPP_{it}} \times S_{it} \quad (2)$$

$$\Delta CF_{it} = CF_{it} - S_{it} \quad (3)$$

式中:  $CF_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年的碳足迹 ( $\text{km}^2$ );  $CT_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年能源消费的碳排放 ( $\text{Pg C/a}$ );  $S_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年的生产性土地面积 ( $\text{km}^2$ );  $NPP_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年的总净初级生产力 ( $\text{Pg C/a}$ )。如果区域生态系统的碳吸收能力无法满足吸收该区域能源消耗所排放的CO<sub>2</sub>,就会出现碳赤字 ( $\Delta CF_{it} > 0$ ),反映出该区域经济增长和生态环境保护之间不协调、不可持续;反之,则为碳盈余。



**2.2.3 探索性时空数据分析(ESTDA)** 目前,有关空间效应的分析已成为揭示区域发展不平衡和收敛的有效手段,对于地理事物的综合过程和格局分析可以有效地解读。但是,现有对于地理变量的空间格局的差异与演化特征的实证研究更多地度量截面表征,将时间过程与空间格局割裂开来,从而忽略了时间和空间要素的耦合与连续。因此,在现有的探索性空间分析(ESDA)框架中,应同时整合空间和时间因素。Rey等<sup>[34]</sup>提出的探索性时空数据分析(ESTDA)方法,在传统的ESDA分析框架中将时间和空间进行有效地整合,实现时空交互分析。本文借助ESTDA系统综合分析碳足迹在全局空间和局部空间上的格局分异和时间上的演化特征。

ESTDA是一系列空间数据分析方法和技术的集合,以空间关联的时空演进测度为核心,通过对事物或现象空间分布格局变迁的时间过程描述与可视化,发现空间集聚和空间分异,其主要研究方法包括全局空间自相关指数(Global Moran's  $I$ )、局部空间自相关指数(LISA)、LISA散点图、LISA时空迁跃、空间马尔科夫链等。通过Moran's  $I$ 指数衡量分析碳足迹要素在整个区域的空间特征,判断对碳足迹的分布是否存在潜在相互依赖性。LISA时间路径是融入时间维度,实现LISA坐标在Moran散点图中动态迁移。通过地级单元碳足迹的属性值和空间滞后值随时间的成对移动,对应解释地级单元碳足迹在区域局部层面的时空交互变化以及时空差异动态性特征,从而实现局部空间依赖由“瞬时场景”向“交互动态场景”的连续表达。其几何特征主要包括相对长度( $\Gamma_i$ )和弯曲度( $\Delta_i$ )等,二者的表达式分别为<sup>[35]</sup>:

$$\Gamma_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (4)$$

$$\Delta_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,1}, L_{i,T})} \quad (5)$$

式中: $T$ 为时间序列的间隔; $n$ 为地级单元数量; $L_{i,t}$ 为 $t$ 年 $i$ 地级市LISA坐标位置(碳足迹标准化值,碳足迹空间滞后量),即 $(y_{i,t}, y_{L_{i,t}})$ ;  $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$ 为地级市 $i$ 在 $t$ 到 $t+1$ 年间坐标移动距离。如果 $i$ 地级市在研究时间范围内坐标移动的长度大于全国平均值,则该地级市 $\Gamma_i$ 大于1,  $\Gamma_i$ 值越大表明 $i$ 地级市碳足迹的局部空间依赖关系和空间结构表现得更加动态,反之亦然。 $\Delta_i$ 越大,表明LISA时间路径曲折程度越弯曲,即 $i$ 地级市受邻域空间作用(溢出/极化)越大,  $i$ 地级市具有更加波动的碳足迹过程和空间依赖演化过程,反之,则受到的影响越小。

LISA时空跃迁方法反映局部空间关联类型在时间范围的转换过程。时空跃迁主要由4种类型组成,①类型Ⅰ表示地级市单元自身与相邻地级市未发生空间关联形态的转移,即为转移矩阵对角线类型;②类型Ⅱ表示地级市单元自身跃迁,但是邻域不变;③类型Ⅲ地级市单元自身不变,但其邻域发生了跃迁;④类型Ⅳ表示地级市单元自身与邻域都发生了跃迁。由已知的跃迁类型情况,可以计算得出碳足迹Moran's  $I$ 的空间稳定性,表达式为<sup>[34]</sup>:

$$S_i = \frac{F_{0,t}}{n} \quad (6)$$

式中: $F_{0,t}$ 表示在0类型在 $t$ 时段范围内发生跃迁的地级单元的数量; $n$ 为所有可能发生跃迁的地级单元数量。

**2.2.4 脱钩效应分析** 脱钩 (Decoupling) 这一术语出自于物理学, 表示两个或多个物理量之间的关系中断和脱离<sup>[36]</sup>。后被引入经济学领域, 研究经济增长与资源消耗或环境污染之间的耦合关系, 综合反映了资源环境压力变化对于经济变化的敏感程度。目前多数的研究均采用在特定的时间段内碳排放增长对 GDP 增长的弹性响应, 本文引入碳排放和碳足迹压力指标来综合测度与经济增长的弹性变化情况, 其中碳排放和碳足迹压力作为环境负荷变量, GDP 表示经济驱动力变量。考虑到区域碳吸收能力的差异, 引入“碳足迹压力”这一变量 (定义为区域陆地生态系统能源消费碳排放总量与区域碳吸收能力之比)<sup>[10]</sup>, 可以更加全面和综合地测度人类的经济活动和资源环境之间的耦合关系以及影响程度。以 Tapio 脱钩模型为基础, 构建如下脱钩模型<sup>[36]</sup>:

$$CBI_{it} = \frac{CT_{it}}{NPP_{it}} \quad (7)$$

$$e = \frac{(\delta CO_2 / CO_2 + \delta CBI / CBI) / 2}{\delta GDP / GDP} \quad (8)$$

式中:  $CBI_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年碳足迹压力指数;  $CT_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年能源消费产生的碳排放总量,  $NPP_{it}$  为  $i$  区域  $t$  年对碳的吸收量即碳吸收能力。  $e$  表示脱钩弹性;  $\delta CO_2$ 、 $\delta CBI$ 、 $\delta GDP$  分别表示  $CO_2$ 、碳足迹压力和 GDP 起始年至末端年之间的增长量。根据脱钩弹性值的大小, 将脱钩状态细分为强脱钩、弱脱钩、弱负脱钩、强负脱钩、扩张性负脱钩、扩张性连接、衰退脱钩、衰退连接 8 种状态, 具体等级划分标准与弹性值详见文献<sup>[37-38]</sup>。

本文能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应的分析框架如图 1 所示。

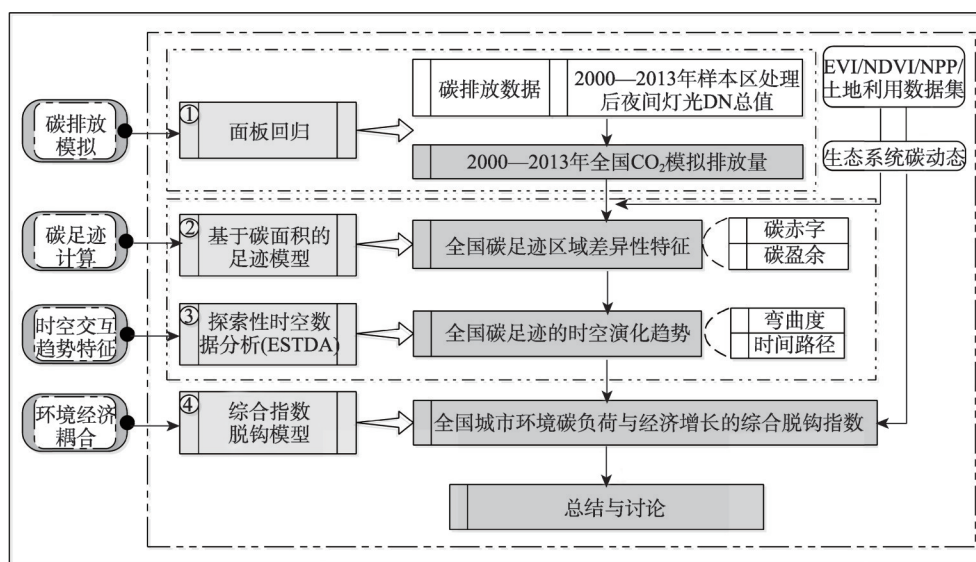


图 1 能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应分析框架

Fig. 1 The analysis framework of spatio-temporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect

### 3 结果分析

#### 3.1 碳排放时空分布模拟结果

以中部地区各省域作为模型建立样本区, 将选取的样本区构建的模型参数与经过系统校正后的夜间灯光数据影像利用面板模型在栅格尺度上模拟全国范围的碳排放。采用

LL 检验(相同根)和IPS 检验方法(不同根)来评估面板数据的平稳性。对所有数据进行自然对数变换,以避免异方差和非平稳性现象,检验结果表明,在1%的显著性水平下面板  $t$  非参数统计量(Panel PP-Statistic)、面板  $t$  参数统计量(Panel ADF-Statistic)、组间  $t$  非参数统计量(Group PP-Statistic)、组间  $t$  参数统计量(Group ADF-Statistic)等各检验统计量和概率值均支持  $\ln NTL$ (夜间灯光值)与  $\ln TCO_2$  存在一个长期均衡的协整关系方程,回归方程的残差是平稳的,因此可以进行面板回归方程的拟合。模型的选择通过  $F$  检验和 Hausman 检验进行,检验结果显示, $F$  检验拒绝原假设。Hausman 检验则显示,采用变系数模型时的  $P$  值为 0.421,说明固定效应模式不适合,采用随机效应模型更加合适。因此,利用省域范围内建成区夜间灯光的总和与对应城市  $CO_2$  排放量的统计数据构建随机效应模型,模型的  $P$  值小于 0.001,在 0.01 水平上显著相关, $R^2$  达到 0.874。模型结构为:

$$\ln TCO_2 = 0.36 \ln NTL + 2.73 \quad (9)$$

全国 2000—2013 年碳排放模拟空间分布如图 2 所示。将 2002 年、2007 年、2012 年作为检验年份,利用 3 个年份上的碳排放模拟数据,结合北京、青海、新疆等省级单元和长沙、福州、昆明、上饶等地级城市的碳排放统计数据(共 28 个验证样本)进行精度验证,发现模拟值较好地反映了统计碳排放的分布规律情况,模拟值和统计碳排放值具有明显的线性关系,决定系数  $R^2$  值在 3 个时期分别为 0.893、0.955、0.951。

### 3.2 碳足迹空间格局

本文尝试从自然—社会系统的视角出发引入碳足迹来分析吸收化石燃料燃烧排放的  $CO_2$  所需的生态承载力。由于自然生态系统碳吸收的承载能力存在地域的差异性,当碳排放量超越当地自然生态系统所承载的最大容量时,也就是出现碳赤字时,表明其自然—社会系统是非耦合协调发展的。

**3.2.1 全国尺度** 2001—2013 年中国碳足迹和碳赤字均呈逐年增长趋势(图 3),2001 年中国碳足迹面积为  $1.476 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,而陆地系统生产性土地(植被)面积为  $0.613 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,碳赤字面积为  $0.863 \times 10^7 \text{ km}^2$ ;2013 年中国碳足迹面积为  $3.808 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,碳赤字面积达到  $3.181 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,其中碳足迹年均增长率为 4.82%,碳赤字年均增长率为 5.72%;2008 年以后,碳足迹和碳赤字增长速率较前期更为明显。碳足迹多年平均值为  $2.232 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,碳赤字多年平均值为  $1.609 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,全国碳足迹和碳赤字水平均在 2009 年后超过多年平均值。碳足迹的持续增长和碳赤字的不断扩大,说明中国碳循环系统的碳承载力处于超负荷状态,能源消费碳排放不能够被陆地生态系统生产性土地所吸收,从而导致碳循环系统压力过度,处于不可持续的状态。

**3.2.2 省级尺度** 将碳足迹计算结果按标准差分级法分为 5 类并制图(图 4),2001 年碳足迹较大的区域主要集中分布于华北平原和山东半岛以及广东省,其中山东省碳足迹面积最大( $145 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),碳足迹较小的区域集中于西南和华南丘陵,其中海南省碳足迹最小,为  $3.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2007 年碳足迹较大区域逐渐向东北移动,内蒙古成为碳足迹最大的省区( $225 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),新疆碳足迹表现出极其显著的增长趋势。2013 年内蒙古和新疆成为碳足迹“发酵型”增长区域,两地区碳足迹之和为  $860 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,表现出严重的区域差异和不平衡。碳足迹年均增长率最高的省份是青海省(5.65%),其次为内蒙古(5.62%)和新疆(5.60%),中西部地区成为高增长的主要集中地。而山西、天津、河北等能源高消耗、高排放的省市,碳足迹呈低速增长。

全国各省区生态供给(生产性土地面积)能力不尽相同,从而直接影响陆地生态碳吸收潜能,各省碳赤字的差异也是人类活动与区域生态供给能力综合作用的结果。



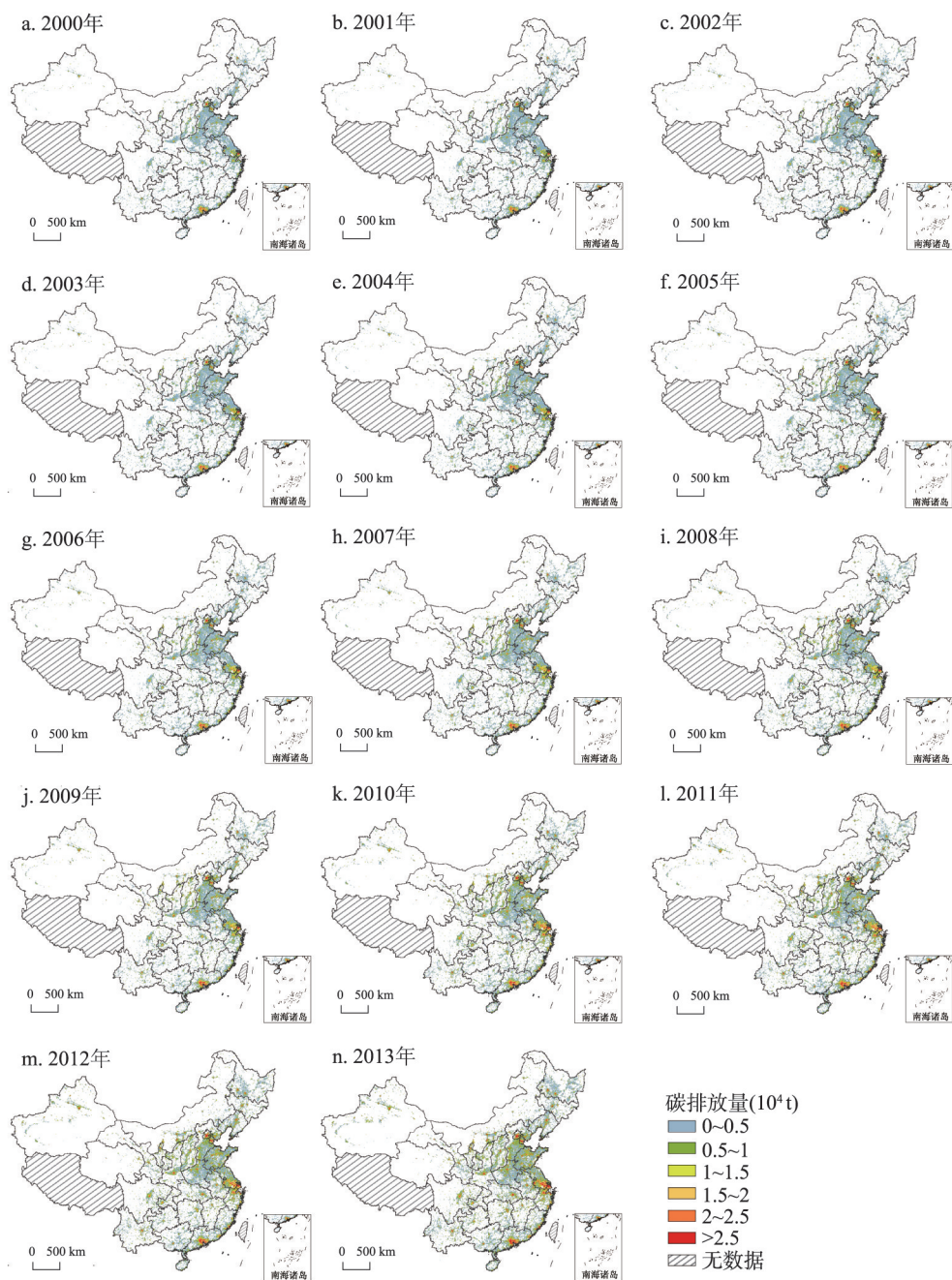


图2 2000—2013年中国碳排放量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of carbon emissions in China from 2000 to 2013

2001—2013年各省区碳赤字/盈余差异显著(图5), 2001年只有位于中西部的重庆、江西、湖南、广西、贵州、云南、四川、青海等8省区处于生态盈余状态, 区域生态环境承载能力较强, 能够有效地对碳排放进行吸收。碳赤字主要集中于京津冀、中原、珠三角和长三角等工业和资本密集型城市群, 山东省碳赤字最大( $131 \times 10^4 \text{ km}^2$ )。至2007年, 出现碳盈余的省份由8个减少到4个, 分别为贵州、云南、四川和青海, 其中青海碳

盈余最高 ( $29.5\times 10^4\text{ km}^2$ ), 山东依旧是碳赤字最大的省份, 碳赤字增长至  $174\times 10^4\text{ km}^2$ , 河北、内蒙古紧随其后。2013 年全国各省区均出现碳赤字, 青海和云南首次出现碳赤字, 内蒙古代替山东成为碳赤字最大省份 ( $363\times 10^4\text{ km}^2$ ), 中西部地区成为碳赤字的主要增长区。

**3.2.3 地级市尺度** 在不同的行政单元尺度下, 碳足迹/碳赤字所呈现的空间分布格局会随着尺度和分区效应而

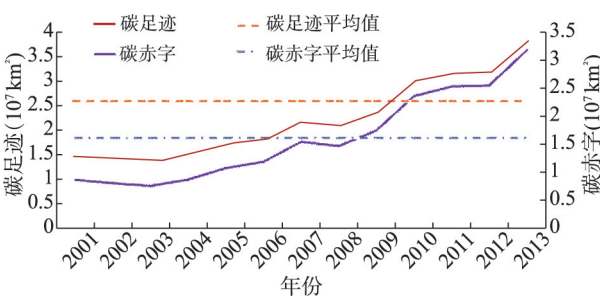


图3 2001—2013年中国碳足迹/碳赤字变化趋势  
Fig. 3 Variation trend of carbon footprint/carbon deficit in China from 2000 to 2013

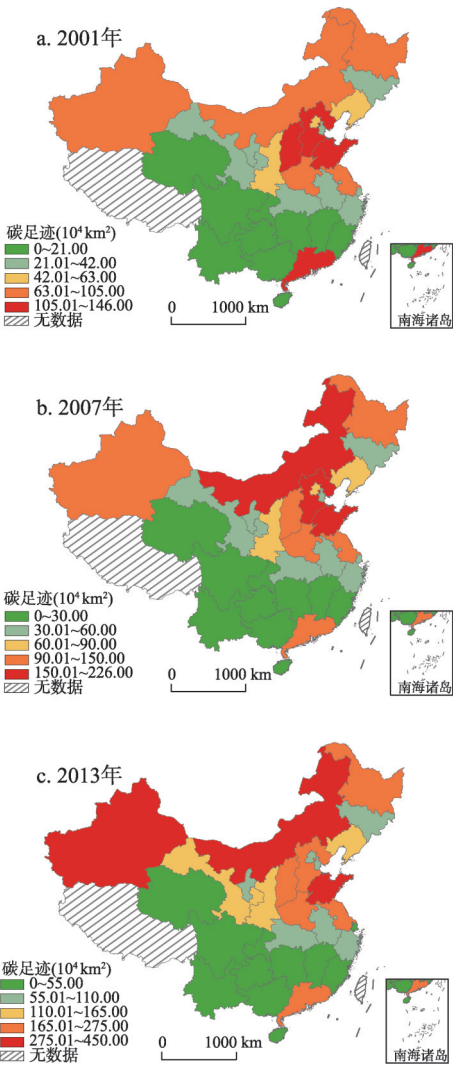


图4 2001年、2007年和2013年省级碳足迹变化趋势  
Fig. 4 Trends in carbon footprints at the provincial scale from 2001 to 2013

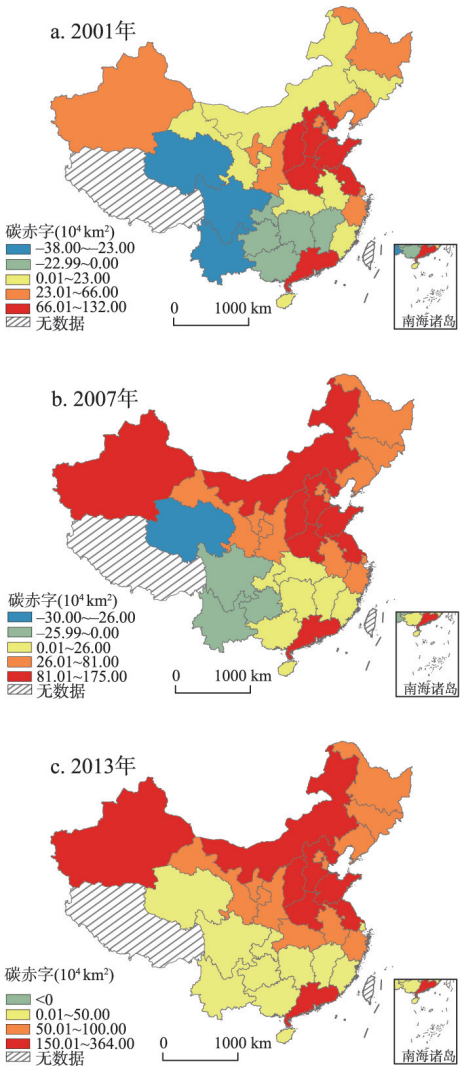


图5 2001年、2007年和2013年省级尺度碳赤字变化趋势  
Fig. 5 Trends in carbon deficit at the provincial scale from 2001 to 2013



不尽一致。地级及以上城市（下文简称地级单元）是中国行政管理体制中承上启下的中坚力量，也是区域经济发展的中心。因此，对于中国地级及以上城市的碳足迹/碳赤字的研究和分析能够实现不同尺度和分区下发展格局和趋势的判别，对于更精细尺度碳减排的精准定位和针对性措施具有一定的指示作用。本文分别计算2001年和2013年地级单元的碳足迹和碳赤字。将碳足迹计算结果按照标准差分级法分为5类（图6）。由图6可知，整体来看，2001年各地级单元碳足迹量差异明显，且在地理空间位置上呈显著的集聚格局。全国336个地级单元中，碳足迹的平均值为 $4.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，标准差为 $6.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中99个城市的碳足迹平均值超过全国地级市平均水平，主要分布于秦岭—淮河以北地区。碳足迹低水平城市共123个，较低和中等水平的城市分别为149个和40个，较高和高水平的城市分别为17个和7个。至2013年，地级单元碳足迹的平均值迅速增长至 $11.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，标准差为 $13.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。碳足迹平均值超过全国地级市平均水平的城市较2001年增加12个，中西部地区是主要增加区域。碳足迹低水平城市有132个，较低和中等水平的城市分别为137个和48个，较高和高水平的城市分别为7个和13个，碳足迹高水平城市数量增长明显，且由中部地区向西部地区转移。

将碳赤字计算结果以0为分割基准（界定碳赤字或碳盈余），按照标准差分级法分为5类（图7）。由图7可知，地级单元的碳赤字/碳盈余也表现出明显的空间地带性分异和集聚特征。在全国336个地级单元中，出现碳盈余的城市共121个，其中，玉树、呼伦贝尔、锡林郭勒、甘孜、阿坝等碳盈余量较大。出现碳赤字的城市共215个。北京、天

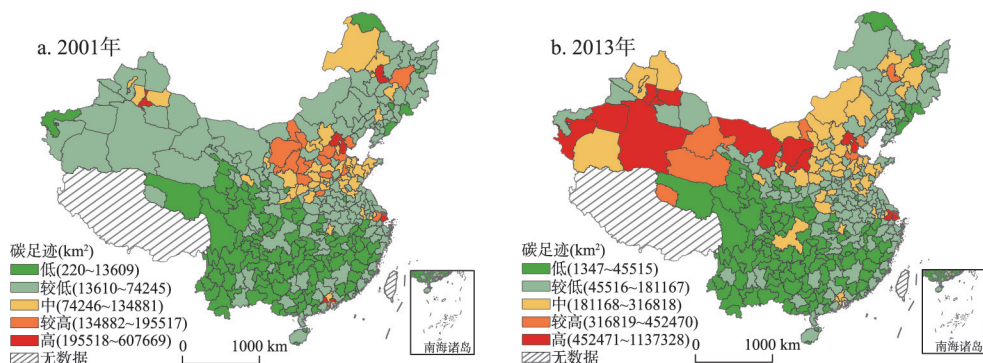


图6 2001年和2013年地级单元碳足迹分异格局

Fig. 6 Differentiation pattern of carbon footprint in prefecture-level cities of China from 2001 to 2013

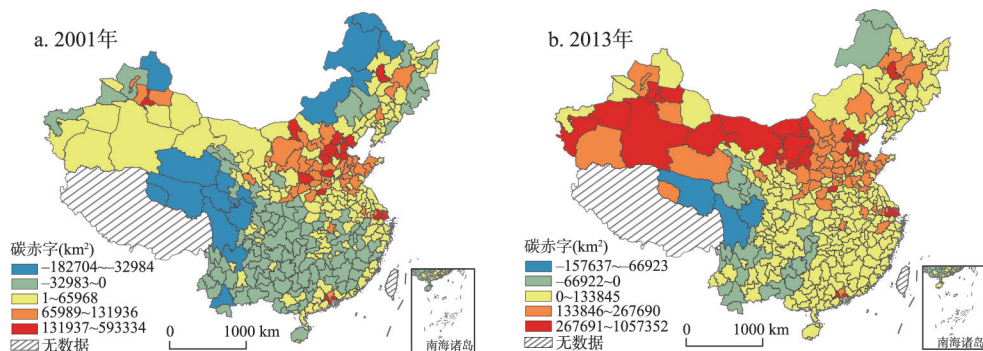


图7 2001年和2013年地级单元碳赤字分异格局

Fig. 7 Differentiation pattern of carbon deficit/carbon surplus in prefecture-level cities of China from 2001 to 2013

津、上海等资本—科技密集型城市和包头、沧州、邯郸等工业能源消耗型城市碳赤字位居前列。至2013年,各地级单元的碳赤字/碳盈余变化显著,碳盈余地级单元数量急剧下降,空间范围向西疾速收缩,相反,碳赤字范围逐步向西北蔓延,碳赤字较高的区域主要集中在连绵分布在35°N南北两侧。碳盈余地级单元数量由121个减少至31个,而碳赤字地级单元数量增长至305个。

### 3.3 碳足迹时空演化趋势

**3.3.1 整体格局演化趋势** 分别计算各地级单元的变异系数和全局 Moran's  $I$  指数来综合分析2001—2013年碳足迹的时空格局演化的趋势特征。变异系数呈先增长后下降再缓慢增长的“波浪型”趋势,在2003年达到最低值(0.789),后逐年增长,至2013年达到最大值(0.861)。利用GeoDa软件分别计算各年份地级单元的全局 Moran's  $I$  指数,在1%的显著水平下,统计量 $Z$ 值均大于2.58,全局 Moran's  $I$  指数多年平均值为0.491,表明地级单元碳足迹存在极为显著的空间自相关特征,即碳足迹较高的城市在空间上呈集聚特征,且周围城市碳足迹也较高,反之亦然。Moran's  $I$  指数增长至2002年的0.465后,2003年下降为0.433,之后逐步增长,至2013年增长至最大值0.544,反映出随着时间的推移,地级单元的碳足迹在空间上集聚特征越来越显著。

#### 3.3.2 局部空间格局演化趋势

(1) LISA 时间路径—相对长度。LISA 时间路径相对长度能够揭示时空视角下的局部空间依赖关系和空间结构的稳定性。本文以自然断点法为基础,结合人工分类(划分大于1的临界值,即大于全国平均值),将LISA 时间路径相对长度划分为7级。由图8可知,整体上LISA 时间路径相对长度北方大于南方,且呈由沿海地区向中西部地区递增的趋势,这说明中西部地区碳足迹的局部空间结构更加动态,而西南和东南等区域的局部空间结构较为稳定。LISA 时间路径相对长度较长的地区主要集中分布于京津冀、长三角核心城市以及天山北坡、呼包鄂榆、松嫩平原等地区。省会城市的相对长度在本省位居前列,在30个省会城市/直辖市中,LISA 时间路径相对长度平均值为1.831,有66.7%的省会城市/直辖市LISA 时间路径相对长度大于1。在336个地级单元中,LISA 时间路径相对长度大于1的地级城市有113个,北京、乌海、阿拉善等城市的LISA 时间路径相对长度超过3.5,而凉山、攀枝花、河池等的LISA 时间路径相对长度均在0.19以下。这种空间结构稳定性差异的存在能够为减排目标的重点防治和优化提供指示性的方向,空间结构稳定性更为动态的区域则需投入更多改革力度,在产业发展过程中加大淘汰落后产能力度,促进低碳循环经济的经营与推进。而空间结构相对稳定的区域则应该进一步推动低碳技术的创新和升级,加大清洁能源在生产生活中的应用力度,同时增强生态系统碳吸收能力,确保碳循环系统良性运转。

(2) LISA 时间路径—弯曲度。将LISA 时间路径弯曲度划分为7级,弯曲度值越大,表明碳足迹受邻域空间作用(溢出/极化)越大,其空间依赖具有较大的波动性。由图9可知,整体上LISA 时间路径弯曲度呈现由沿海地区向内陆地区递减的趋势,与相对长度

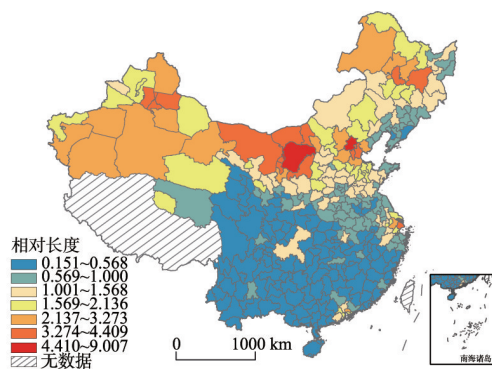


图8 2001—2013年中国碳足迹LISA时间路径相对长度

Fig. 8 The relative length of LISA time path of China's carbon footprint from 2001 to 2013

大致呈相反的分布格局。时间路径弯曲度平均值呈现出东北 (9.89) > 中部 (8.05) > 东部 (7.09) > 西部 (4.03) 的趋势。从区域尺度来看, 碳足迹 LISA 时间路径弯曲度较高的区域主要集中分布于大小兴安岭、东北中东部、淮北、武汉、湘南、东南沿海及雷州半岛等地, 反映出这些地区在空间依赖方向上波动性较大。碳足迹弯曲度较低的区域主要集中分布于西北、中原、华北、珠三角和西南地区, 反映出这些地区的空间依赖变迁过程相对稳定。在 336 个地级单元中, 各地级单元 LISA 时间路径弯曲度平均值为 6.231, 标准差为 8.544, 有 106 个地级单元的 LISA 时间路径弯曲度超越全国平均水平, 其中衡阳、杭州、绍兴 11 个城市大于 18。而嘉峪关、酒泉、张掖等 10 个城市的 LISA 时间路径弯曲度小于 2, 这些城市与周边邻域城市同时有着较高的碳足迹增长过程, 空间依赖的波动相互牵制与影响, 从而弯曲度较小。

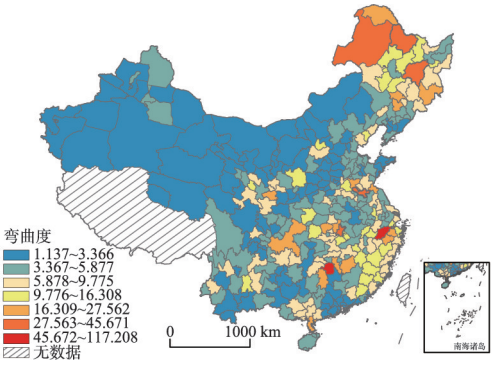


图9 2001—2013年中国碳足迹LISA时间路径弯曲度  
Fig. 9 The tortuosity of LISA time path of China's carbon footprint from 2001 to 2013

(3) LISA 时空跃迁。LISA 时间路径揭示了各地级单元碳足迹局部空间自相关 LISA 坐标在 Moran 散点图中动态迁移趋势, 而 LISA 时空跃迁能够识别碳足迹局部空间关联类型的相互转移过程特征。由表 1 可知, 中国各地级单元局部城市空间关联格局保持较稳定。碳足迹 Moran's  $I$  的空间稳定性为 0.933, 表明 14 年间各地级单元局部空间关联未发生时空跃迁的概率为 93.3%, 反映出地级单元的时空跃迁表现出较强的路径锁定特征。4 种时空跃迁类型发生的概率类型 I (0.933) > 类型 III (0.038) > 类型 II (0.024) > 类型 IV (0.005), 即未发生空间关联形态转移的占主导地位, 空间关联类型转移不同程度呈现出跃迁惰性; 其次是类型 III, 周围邻域时空跃迁活动更为活跃, 而自身相对稳定; 时空跃迁概率最小的是类型 IV, 即城市自身与周边邻域城市空间关联转移都较为平静。在类型 I 型中空间关联跃迁概率最稳定的是 LL→LL (0.514); 在类型 II 型中空间关联跃迁概率最高的是 LH→HH (0.009), 反映出地级单元城市碳足迹空间关联由“洼地型”向“深压型”的转变, 部分碳足迹低水平城市受周边城市的拉动影响, 碳足迹水平也持续增强。空间关联跃迁概率最低的是 HL→LL (0.003), 高碳足迹城市向低碳足迹空间关联的转移概率很小, 说明多数城市在发展过程中依旧通过高能耗刺激和带动经济的繁荣, 在绿色低碳的经济体系改革投入力度相对欠缺。在类型 III 型中空间关联跃迁概率最高的是 LH→LL (0.033), 反映出在部分地区碳足迹的高压力有部分的缓解和释放, 但这种概率相比其他类型仍较低, 空间关联跃迁概率最低的是 HH→HL (0.003); 而在类型 IV 型中空间关联跃迁概率最高的是 LL→HH (0.033), 空间关联跃迁概率最低的是 LH→HL (0.000) 和 HL→LH (0.000)。

表 1 中国地级单元碳足迹时空跃迁矩阵

Tab. 1 Spatio-temporal transition matrices of carbon footprint of prefecture-level cities in China

$t/t+1$	HH(深压型)	LH(洼地型)	LL(浅压型)	HL(极化型)
HH(深压型)	类型 0(0.251)	类型 I(0.007)	类型 III(0.002)	类型 II(0.002)
LH(洼地型)	类型 I(0.009)	类型 0(0.121)	类型 II(0.013)	类型 III(0.000)
LL(浅压型)	类型 III(0.003)	类型 II(0.019)	类型 0(0.514)	类型 I(0.005)
HL(极化型)	类型 II(0.004)	类型 III(0.000)	类型 I(0.003)	类型 0(0.047)



### 3.4 综合脱钩指数测算结果及分析

利用改进的Tapio的脱钩指标及脱钩公式，计算中国336个地级及以上城市环境碳负荷（碳排放、碳足迹压力）与经济增长的综合脱钩指数，结合脱钩弹性的划分标准，分析2001年以来中国地级单元环境碳负荷的弹性特征。需要指出的是，研究期范围内不存在 $\Delta GDP < 0$ 的情况，故不存在强负脱钩、弱负脱钩、衰退脱钩、衰退连接等4种等级状态。由于经济增长与能源消费变化和碳循环吸收存在滞后关系，可以采用多年周期进行脱钩分析<sup>[39]</sup>，因此，本文从3个时期尺度（2001—2005年、2005—2009年、2009—2013年）分析各阶段的综合脱钩指数及脱钩状态（图10）。

由图10可知，中国城市环境碳负荷脱钩与经济增长效应状态在3个时期出现了明显的变化。整体而言，3个阶段的脱钩类型主要以弱脱钩、扩张连接、扩张负脱钩为主，扩张连接、扩张负脱钩区域数量逐渐增多且向中西部及东北地区聚集分布。具体来讲，2001—2005年（一期），全国主要以弱脱钩类型为主，有304个城市落在弱脱钩范畴，25个城市成为扩张连接型，4个城市为扩张负脱钩型，只有鹤壁、锦州两市为强脱钩型；全国平均脱钩弹性值为0.396，变异系数为1.214。2005—2009年（二期），扩张连接型脱钩状态变化较明显，由前一时期的25个上升至84个；弱脱钩型城市减少87个，扩张负脱钩型城市呈阶段性上升趋势，增加31个城市，变化趋势主要向西北地区城市邻域周边扩散和长江中上游南北两岸沿线城市的扩张。全国平均脱钩弹性值为0.795，变异系数为0.984，平均脱钩值较前期有所上升，变异系数呈下降趋势，说明人类经济活动对于生态环境的负外部性影响越来越大，而全国各地级市脱钩指数的差异程度也逐渐缩小。至2009—2013年（三期），扩张连接型城市数量持续增加，较前一阶段占比分别上升9.8%，扩张连接型和扩张负脱钩型主要向长江中上游两岸腹地、西北和东北地区集聚，由北向南呈“E”字型分布格局，较前期平均脱钩弹性值增加0.027，变异系数下降0.497。

表2是各时期不同脱钩类型城市的数量。从脱钩状态演变来看，一期和二期末未发生变化的地级单元有230个，其中弱脱钩型有225个，弱脱钩型在此时期为主要脱钩状态类型且较为稳定；发生变化的地级单元有106个，其中有32个城市由弱脱钩转换为扩张连接型，17个城市由弱脱钩向扩张负脱钩型转换，21个城市由扩张连接转换为弱脱钩型。在二期和三期两个时

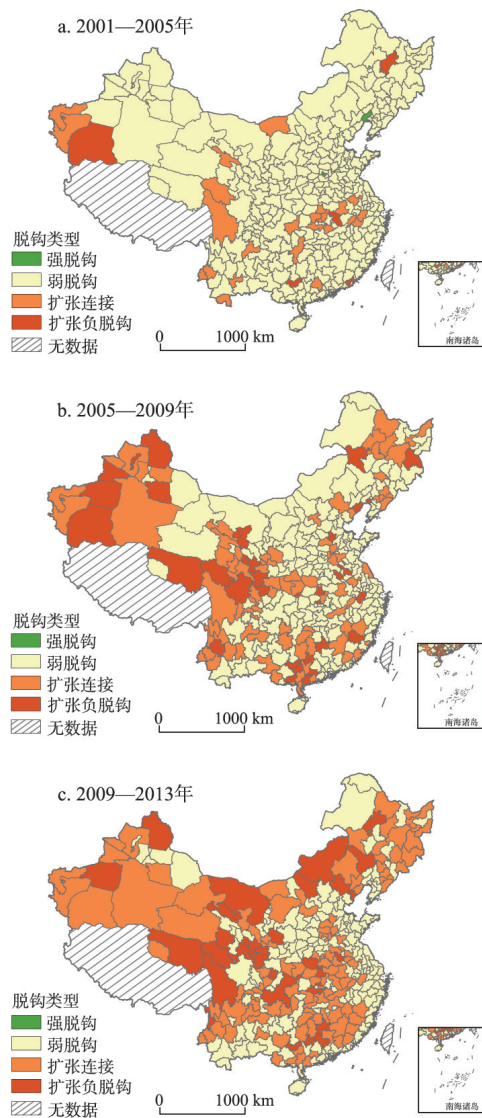


图10 2000—2013年中国环境碳负荷脱钩效应空间格局

Fig. 10 Spatial pattern of environmental carbon load decoupling effect in China from 2000 to 2013

期，未发生变化的地级单元为 197 个，其中弱脱钩型减少幅度最大，减少 41 个；发生变化的 163 个地级单元中，84 个城市由弱脱钩转换为扩张连接型，24 个城市由弱脱钩转换为扩张负脱钩型；10 个城市由扩张连接转换为弱脱钩型，6 个城市由扩张连接转换为扩张负脱钩型，13 个城市由扩张负脱钩型转换为扩张连接。总体来看，弱脱钩状态是中国经济增长与碳排放关系的共性特征，但不可忽视的是由弱脱钩向扩张连接、扩张负脱钩类型转化区域持续增加，而强脱钩类型区域寥寥，未来我国经济增长与能源碳排放不均衡发展趋势在一定时期仍将持续，这对于经济转型时期的中国经济发展和生态环境保护之间的协调提出了更严格的要求。

表 2 各时期不同脱钩类型城市数量(个)

Tab. 2 Number of different decoupling types cities in different periods

时期	强脱钩	弱脱钩	扩张连接	扩张负脱钩
一期(2001—2005 年)	2	304	25	4
二期(2005—2009 年)	0	217	84	35
三期(2009—2013 年)	0	184	117	35

4 结论与讨论

4.1 结论

利用 DMSP-OLS 夜间灯光数据和碳排放统计数据，构建面板数据模型，模拟了 2000—2013 年中国的碳排放量。运用探索性时空数据分析 (ESTDA) 框架体系，从时空交互视角分析 2001—2013 年碳足迹的空间格局和时空依赖动态演化；利用改进的 Tapio 脱钩模型对 3 个时间段 336 个地级单元环境碳负荷与经济增长之间的脱钩效应进行综合分析。得出结论如下：

(1) 2001—2013 年中国碳足迹和碳赤字均呈逐年增长趋势，碳足迹年均增长率为 4.82%，碳赤字年均增长率为 5.72%，碳足迹和碳赤字整体北方>南方，在不同的行政单元尺度下碳足迹和碳赤字空间异质性特征表现明显。碳赤字逐步向西北蔓延，在 35°N 南北两侧集中连绵分布，约有 82% 的国土出现碳赤字，区域生态系统碳平衡严重失调。

(2) 2001—2013 年碳足迹变异系数增大，各地级单元碳足迹全局 Moran's I 指数多年平均值为 0.491，存在极为显著的空间自相关特征。LISA 时间路径相对长度北方大于南方，且由沿海向中西部地区递增，而 LISA 时间路径弯曲度由沿海向内陆递减，东北、中部弯曲度较高，东部和西部弯曲度较低。

(3) 综合脱钩指数整体以弱脱钩型为主，但弱脱钩型城市数量持续减少，扩张连接、扩张负脱钩区域数量逐渐增多且向中西部及东北地区聚集分布。研究时段内脱钩类型演变剧烈。

4.2 讨论

寻求在不同时间和空间尺度上碳减排的优化路径是实现经济发展新常态下中国绿色低碳转型的近、中、远期目标的关键问题。小尺度上的空间差异对宏观经济的波动更为敏感，实现中国碳减排目标的国家任务必须分解到各区域<sup>[40]</sup>。因此，在实现碳减排目标过程中如何合理划分区域，识别出关键区，进而采取针对性的政策至关重要，而目前的研究显然对中国碳排放和碳足迹时空演进的关键过程探讨不足。本文研究发现，2001 年重庆、江西、湖南、广西、贵州、云南、四川、青海等 8 省市处于生态盈余状态，但到了 2007 年，出现碳盈余的省份减少到只有贵州、云南、四川和青海 4 个；2013 年全国各省区均出现碳赤字状态。2001—2013 年中国碳足迹和碳赤字均呈逐年增长趋势，碳足迹的增加会给中国低碳、绿色发展目标的实现带来压力和挑战，应在保持经济社会高质量

发展的状态下,逐步采取市场、行政、法律、技术等多种手段,提高能源利用效率,加快产业结构调整,优化能源消费结构。内蒙古、新疆等中西部能源富集和重化工基地的碳足迹较大且呈快速增长的态势,但考虑到这些区域的碳排放中很大程度是为沿海经济发达地区提供高碳产品所致,减排责任的区域分解还需要考虑碳排放空间转移的因素。

本文研究发现中国区域碳足迹存在显著正自相关的空间关联模式,区域碳足迹的变动趋势会受到其相临近区域碳足迹的影响,并且这种关联程度表现为持续增加的趋势,未来制定碳排放相关政策应该考虑这种关联关系,碳减排应加强区域分工合作,从宏观到微观,从区域到企业到个人,实现减排措施的“精准落地、精准减排”。此外,区域碳足迹呈现“集聚”与“分异”并存的时空演进特征,为实现降低碳排放强度的国际承诺减排目标,需加强对关键区域碳排放强度的有效监测与治理,加大碳排放的约束力度。

相比较通过统计年鉴数据换算得出的碳排放结果,本文使用的CEAD数据库兼有涵盖全面、时间跨度大、统计口径统一、可比性强和数据详实等优点,被国内外学者广泛采用<sup>[41-42]</sup>,该数据在本文中作为解释变量,与夜间灯光数据结合构建面板回归模型,实现了碳排放量的空间化。由于文中使用的长时间序列DMSP-OLS夜间灯光影像获取自不同的卫星平台传感器,DN值不稳定,不具有连续性和可比性,因此,本文对多夜间灯光影像进行了年内数据整合和年际数据连续性校正。受传感器辐射分辨率的限制,城市中心城区容易出现像元DN值过饱和的问题,致使市中心区域内部细致的灯光亮度差异无法得到正确的反映,区域差异被同质化。已有大量研究证明,夜间灯光像元DN值与对应区域植被指数像元值在空间上存在负相关关系<sup>[28]</sup>,本文利用EVI指数分别构建3种指数对原始夜间灯光数据进行了去饱和处理。另外,温室气体主要来源于传统化石能源的消耗,而城市地区是能源消耗的主要集中地和发展区域。因此,能否从夜间灯光数据中提取出高精度的城市建成区,直接决定着碳排放模拟结果的精度。本文采用突变检测法确定建成区分割的最佳阈值,提取出高精度的城市建成区信息,保证了模拟结果的可靠性。通过构建面板数据模型客观、系统地实现了对长时间序列碳排放的定量模拟,相较于传统的横截面数据模型,面板数据模型全面挖掘了样本信息,不仅体现了个体间的差异,而且描述了个体的动态演变状况,模拟结果的检验精度较高。从格网视角分析碳排放的时空分异格局与演变特征,可以有效地锁定碳源和碳减排重点任务区。利用改进后的脱钩Tapio模型和ESTDA技术,弥补了全国层面在地级市尺度对碳足迹格局时空演化分析和城市环境碳负荷与经济增长的综合脱钩关系认识的缺陷,为制定“共同但有区别”的碳减排调控政策提供可借鉴的依据。

本文使用的CEAD碳排放数据计算了17种化石燃料消耗所释放的CO<sub>2</sub>,该数据已得到广泛的认同,较之目前学术界普遍采用的通过统计数据计算的碳排放量,CEAD碳排放数据更加全面。但广义的碳排放途径不仅包括工业生产,还包括农业、土地利用等多领域的主体活动和人类行为。受限于数据获取和统计分析的困难,无法全面地计算出每种碳排放量,通过间接计算的排放量不可避免地与实际碳排放量存在差异。此外,由于DMSP-OLS影像的空间分辨率较低,影响了模拟结果的精细化表达,利用新一代更高分辨率的夜间灯光卫星数据(如NPP-VIIRS及珞珈一号卫星)进行碳排放估算,实现连续时间序列碳排放监测和分析将是下一步研究的重点。碳排放和碳足迹的过程是非常复杂的系统工程,驱动机制复杂,结合我国社会经济发展实际及区域的空间差异,合理的在中小尺度更精细化的驱动机制及其量化分析也将是下一步研究的重点方向。



## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1131-1148. [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.]
- [3] The petroleum corporation of BP. The BP statistical review of world energy published in 2019. (2019-06-20). <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. [BP 石油公司. BP 世界能源统计年鉴 (2019). (2019-06-20). <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.]
- [4] Lu W W, Chen C, Su M R, et al. Urban energy consumption and related carbon emission estimation: A study at the sector scale. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(4): 480-486.
- [5] Zhou X, Zhang M, Zhou M H, et al. A comparative study on decoupling relationship and influence factors between China's regional economic development and industrial energy-related carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 783-800.
- [6] Zhang Y J, Da Y B. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1255-1266.
- [7] Xiao H, Ma Z, Zhang P, et al. Study of the impact of energy consumption structure on carbon emission intensity in China from the perspective of spatial effects. *Natural Hazards*, 2019, 99(3): 1365-1380.
- [8] Zhou Di, Wu Zewen. Potentialities and paths of Chinese industrial carbon emission reduction. *China Environmental Science*, 2019, 39(3): 1306-1314. [周迪, 吴泽文. 中国工业碳减排潜力与路径研究. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 1306-1314.]
- [9] Wang Wei, Lin Jianyi, Cui Shenghui, et al. An overview of carbon footprint analysis. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(7): 71-78. [王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 碳足迹分析方法研究综述. *环境科学与技术*, 2010, 33(7): 71-78.]
- [10] Lu Junyu, Huang Xianjin, Chen Yi, et al. Spatiotemporal changes of carbon footprint based on energy consumption in China. *Geographical Research*, 2013, 32(2): 326-336. [卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析. *地理研究*, 2013, 32(2): 326-336.]
- [11] Zhang Qifeng, Fang Kai, Xu Ming, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 696-708. [张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 696-708.]
- [12] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [13] Wiedmann T, Minx J. A definition of carbon footprint. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 2007, 92(4): 193-195.
- [14] Mancini M S, Galli A, Niccolucci V, et al. Ecological footprint: Refining the carbon footprint calculation. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 390-403.
- [15] Rööf E, Karlsson H. Effect of eating seasonal on the carbon footprint of Swedish vegetable consumption. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59: 63-72.
- [16] Alvarez S, Sosa M, Rubio A. Product and corporate carbon footprint using the compound method based on financial accounts: The case of Osorio wind farms. *Applied Energy*, 2015, 139: 196-204.
- [17] Kenny T, Gray N F. A preliminary survey of household and personal carbon dioxide emissions in Ireland. *Environment International*, 2009, 35(2): 259-272.
- [18] Steen-Olsen K, Wood R, Hertwich E G. The carbon footprint of Norwegian household consumption 1999-2012. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(3): 582-592.
- [19] Adewale C, Reganold J P, Higgins S, et al. Agricultural carbon footprint is farm specific: Case study of two organic farms. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 795-805.
- [20] Cadarso M Á, Gómez N, López L A, et al. Quantifying Spanish tourism's carbon footprint: The contributions of residents and visitors: A longitudinal study. *Journal of Sustainable Tourism*, 2015, 23(6): 922-946.
- [21] Chen S Q, Chen B. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(8): 4498-4506.
- [22] Harris N L, Brown S, Hagen S C, et al. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science*, 2012, 336(6088): 1573-1576.

- [23] Wolfram P, Wiedmann T, Diesendorf M. Carbon footprint scenarios for renewable electricity in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 124: 236-245.
- [24] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048-1057. [赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048-1057.]
- [25] Zhao Y, Zhang Q, Li F Y. Patterns and drivers of household carbon footprint of the herdsmen in the typical steppe region of Inner Mongolia, China: A case study in Xilinhot City. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 408-416.
- [26] Zhang Yuehan, Zhang Pingyu. Energy consumption carbon footprint of metropolitan district of Changchun and Jilin, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(9): 1099-1105. [张约翰, 张平宇. 长吉都市区能源碳足迹测度及影响因素研究. *地理科学*, 2012, 32(9): 1099-1105.]
- [27] Pan Jinghu, Li Junfeng. Estimate and spatio-temporal dynamics of electricity consumption in China based on DMSP/OLS images. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 627-638. [潘竞虎, 李俊峰. 基于夜间灯光影像的中国电力消耗量估算及时空动态. *地理研究*, 2016, 35(4): 627-638.]
- [28] Zhuo Li, Zhang Xiaofan, Zheng Jing, et al. An EVI-based method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1339-1350. [卓莉, 张晓帆, 郑璟, 等. 基于 EVI 指数的 DMSP-OLS 夜间灯光数据去饱和方法. *地理学报*, 2015, 70(8): 1339-1350.]
- [29] Zhang Yongnian, Pan Jinghu. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1436-1446. [张永年, 潘竞虎. 基于 DMSP/OLS 数据的中国碳排放时空模拟与分异格局. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1436-1446.]
- [30] Chen Qiang. *Advanced Econometrics and Stata Applications*. Beijing: Higher Education Press, 2014. [陈强. 高级计量经济学及 Stata 应用. 北京: 高等教育出版社, 2014.]
- [31] Xu Jianjun, Xiong Deping, Wang Haohan. Panel cointegration test and causality analysis of the relationship between financial development and foreign trade in China. *Economic Geography*, 2008, 28(5): 784-789. [徐建军, 熊德平, 汪浩瀚. 中国金融发展与外贸关系的面板协整检验和因果分析. *经济地理*, 2008, 28(5): 784-789.]
- [32] Wu Wenjia, Jiang Jinliang, Gao Quanzhou, et al. Spatiotemporal patterns of carbon emission and carbon footprint in China during 2001-2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6722-6733. [吴文佳, 蒋金亮, 高全洲, 等. 2001—2009 年中国碳排放与碳足迹时空格局. *生态学报*, 2014, 34(22): 6722-6733.]
- [33] Jiang Jinliang, Xu Jiangang, Wu Wenjia, et al. Patterns and dynamics of China's human-nature carbon source-sink system. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(5): 757-768. [蒋金亮, 徐建刚, 吴文佳, 等. 中国人—地碳源汇系统空间格局演变及其特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(5): 757-768.]
- [34] Rey S J, Janikas M V. STARS: Space-time analysis of regional systems. *Geographical Analysis*, 2006, 38(1): 67-86.
- [35] Gao Changchun, Liu Xianzhao, Li Chaokui, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumption in China from 1995 to 2014. *Progress in Geography*, 2016, 35(6): 747-757. [高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态. *地理科学进展*, 2016, 35(6): 747-757.]
- [36] Wang Junhua, Li Xia. The effect of sector decoupling between China's industrial economic growth and carbon dioxide emissions. *Economic Geography*, 2015, 35(5): 105-110. [王君华, 李霞. 中国工业行业经济增长与 CO<sub>2</sub> 排放的脱钩效应. *经济地理*, 2015, 35(5): 105-110.]
- [37] Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105. [田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105.]
- [38] Wu Hong, Gu Shuzhong, Guan Xingliang, et al. Analysis on relationship between carbon emissions from fossil energy consumption and economic growth in China. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(3): 381-390. [武红, 谷树忠, 关兴良, 等. 中国化石能源消费碳排放与经济增长关系研究. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 381-390.]
- [39] Zhong Taiyang, Huang Xianjin, Wang Baiyuan. On the degrees of decoupling and re-coupling of economic growth and expansion of construction land in China from 2002 to 2007. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 18-31. [钟太洋, 黄贤金, 王柏源. 经济增长与建设用地扩张的脱钩分析. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 18-31.]
- [40] Zhao Guimei, Zhao Guiqin, Chen Lizhen, et al. Research on spatial and temporal evolution of carbon emission intensity and its transition mechanism in China. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(10): 84-93. [赵桂梅, 赵桂芹, 陈丽珍, 等. 中国碳排放强度的时空演进及跃迁机制. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(10): 84-93.]
- [41] Zhu Wenbo, Li Shuangcheng, Zhu Lianqi. Ecosystem service footprint flow and the influencing factors within provinces, China. *Geographical Research*, 2019, 38(2): 337-347. [朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素. *地理研究*, 2019, 38(2): 337-347.]
- [42] Guan D, Shan Y, Liu Z. CO<sub>2</sub> emissions from China's lime industry. *Applied Energy*, 2016, 166: 245-252.

## Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China

PAN Jinghu<sup>1</sup>, ZHANG Yongnian<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Economics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The global environment issue resulting from carbon emissions has aroused worldwide concern for governments, the public and scientific communities. A precise measurement of the time-resolved and spatial distribution characteristics of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and carbon footprint as well as its long-period evolution mechanism, can help clarify the relationship between environmental carbon load and economic growth, and are critical references to the formulation of scientific carbon emission reduction targets with reasonable and differential emission reduction policies. In this study, the mainland of China is taken as the research object. According to the quantitative correlations between DMSP-OLS nighttime light image data and carbon emission statistics, the carbon emission panel data model was simulated for China's carbon emissions in the period 2000-2013, and then the spatiotemporal evolving trend and spatial distribution characteristics of carbon emissions in the 14-year research period were discussed using Theil-Sen Median trend analysis and Mann-Kendall test method. Based on the framework of exploratory spatial-temporal data analysis (ESTDA), the spatial pattern and spatiotemporal dynamic evolution of carbon footprint from 2001 to 2013 were analyzed from the perspective of spatiotemporal interaction. In the three periods, the decoupling effect between environmental carbon load and economic growth of 336 prefecture-level cities were analyzed using the improved Tapio decoupling model. The results show that the overall carbon emissions in China had been on the rise from 2000 to 2013, in which the stable-slow rise type was dominant. China's carbon footprint and carbon deficit increased year by year, and the central and western regions became the focus of the growth of carbon footprint and carbon deficit from 2001 to 2013. At different administrative city scales, the spatial distribution pattern of carbon footprint and carbon deficit show obvious administrative orientated and spatial zonal differentiation characteristics. The annual average of global Moran's *I* index of each level unit is 0.491, which indicates that there is a significant spatial auto-correlation feature in the carbon footprint of China's prefecture-level units. The relative length of the LISA time path is greater in the north than in the south, and it tends to increase from the coastal areas to the central and western regions. The curvature of LISA time path decreases from coastal areas to inland areas on the whole. The curvature of northeast and central regions is higher, while that of eastern and western regions is lower. There is a different trend of the decoupling effect of environmental carbon load in China. Meanwhile the expansion-connection and expansion of negative decoupling regions continuously increased and spatially agglomerated, presenting an "E"-shaped distribution pattern from the north to the south. The national average decoupling elastic value is gradually increasing, while the coefficient of variation continues to decline, and the decoupling type has a significant evolution trend. Therefore, the unbalanced trend of economic growth and carbon emissions in China will continue for a certain period.

**Keywords:** carbon footprint; carbon emissions; nighttime light; decoupling effect; spatio-temporal dynamics; exploratory spatio-temporal data analysis