

引用格式:张赫,黄雅哲,王睿,等.中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J].资源科学,2022,44(4):744-755.[Zhang H, Huang Y Z, Wang R, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 744-755.] DOI: 10.18402/resci.2022.04.08

中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变

张赫,黄雅哲,王睿,张建勋,彭竞仪

(天津大学建筑学院,天津 300072)

摘要:碳排放与经济发展的脱钩关系影响着碳减排目标的实现与经济增长模式的选择。本文基于Tapio脱钩模型与空间自相关,探究2002—2017年中国1741个县级行政单元碳排放与经济增长脱钩关系的时空演变特征与空间聚集格局,并运用马尔科夫模型在时空双重维度分析县域碳排放脱钩的空间趋同效应。研究发现:①县域碳排放脱钩关系以强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩为主,强脱钩聚集于东部沿海、南部沿海等地区,负脱钩数量逐渐增加且向东北及西北地区集中;②县域脱钩具有空间正相关性,空间分异特征在经历局部聚集、“东正西负”分异后,呈现“南正北负”的聚集与分异并存格局;③县域脱钩趋于稳定和向好发展,存在空间“俱乐部趋同”现象,大部地区呈现理想脱钩聚集,东北、西北呈现县域邻域均向下转移的团状聚集。因此,中国应聚焦县域碳排放与经济发展脱钩关系的状态不稳定与区域不均衡,落实差异化的控碳策略,扭转空间分异的脱钩格局。

关键词:县域;碳排放;脱钩关系;时空特征;空间自相关;马尔科夫链;中国

DOI: 10.18402/resci.2022.04.08

1 引言

全球气候变暖已成为影响经济、社会可持续发展的重要因素^[1],作为全球温室气体排放大国,中国2019年居全球CO₂排放首位,在欧、美、日等国3%~5%的碳减排趋势下,中国碳排放量仍逐年增加。为摆脱经济发展的同时碳排放日益增长的困境,2020年9月中国在联合国大会上宣布“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的目标。县域作为国家生态环境基底与基本经济单元,其碳排放量占全国总量的50%以上,经济总量在全国占比超过60%^[2]。在城镇化和工业化的驱动下,县域以环境资源承载力降低换取经济快速增长,开始出现能源结构失调、资源利用率过低、生态本底保护不足等问题。同时,县域作为中国统筹城乡碳氧平衡的关键层级和基本治理单元,其发展特征与大中城市具有一定差异。首先,县域经济增长大多依靠廉价劳

动力与自然资源成本,发展模式粗放是中国碳排放剧烈增长的重要动因之一;其次,大量工业、能源活动聚集于县域,经济发展对碳排放变化趋势具有更强的关联影响机制。从县域视角剖析中国碳排放与经济发展的关系,研究政策影响下二者脱钩关系的时空演进规律与空间关联效应,对引导中国差异化控碳减排、尽早实现碳达峰和碳中和具有现实意义。

经济的迅速发展加剧了能源消耗与环境负荷,促使碳排放量持续增加。发展阶段各异、经济水平参差的县域,大多通过发展高能耗产业获取经济效益,而资源密集型产业众多与产业结构比例失衡使其经济发展对碳排放的依赖性更强,厘清碳排放与经济发展的相互作用关系,逐步摆脱二者的强关联性,实现碳减排与经济增长的“双赢”是当下县域环境保护的最佳方案^[3,4]。在碳排放与经济发展关系

收稿日期:2021-10-10;修订日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52078328);国家重点研发计划项目(2018YFC0704701)。

作者简介:张赫,男,陕西汉中,副教授,博士生导师,研究方向为低碳城市规划、海岸带规划、智慧城市规划。E-mail: cczh2000@sina.com

通讯作者:王睿,女,天津人,助理研究员,主要研究方向为区域与城乡发展。E-mail: wangrui_1985@tju.edu.cn

2022年4月

的定量研究中,环境库兹尼茨曲线(EKC)理论认为二者存在倒U型关系^[5,6],Granger因果关系检验结果表明二者存在双向因果的协整关系^[7,8],但以上两种方法均基于碳排放与经济变化的同步变化描述二者的作用关系。当区域出现碳排放与经济发展非同步变化的现象时,脱钩理论开始被引入,反映二者同步耦合关系的逐渐破裂,并对其所处阶段进行更为详尽的有效划分和动态识别^[3,9,10]。

脱钩理论最初适用于研究经济发展与资源消费的关系^[11];2005年,Tapio基于OECD脱钩模型,构建了经济增长与交通运输量的脱钩模型,以“强”“扩张”“弱”“衰退”4种强度将脱钩分为8种状态^[12]。目前,国内外学者围绕经济发展与碳排放脱钩关系的研究主要集中在以下3个方面:①借助脱钩模型分析不同区域碳脱钩关系的时空特征,主要研究了地级市^[13]、多行业^[14-16]、多省份^[17-19]的脱钩指数与驱动因素;②分析碳脱钩关系的空间分异规律与聚类趋势^[10,20];③探讨基于脱钩理论的差别化碳减排目标与策略,从劳动与投资、生产与消费等视角针对特定区域提出控碳减排策略^[21,22]。

既有研究对中国省域、市域的碳脱钩研究较为深入,然而对于县域层级关注较少,碳脱钩理论在县域空间分异与交互影响的规律有待深化探索。一方面,县域由于地域条件和发展阶段的巨大差异,其碳排放与经济变化的变化特征,相较于省市,更具复杂性且非同步状态的多样性更强^[37,38],运用脱钩理论清晰刻画不同县域单元碳排放与经济发展之间的差异化耦合关系,有助于在县域层级开展差异化的控碳策略分析。另一方面,碳排放格局作为县域与邻域动态作用的共同结果,因跨界运输、边界扩张、产业合作等特征具有更明确的空间关联效应,探讨区域尺度下碳脱钩关系的外在空间交互规律及其内在驱动机制^[23],有助于针对某一类县域,提出适应区域协同发展需求的管控策略。

针对中国碳排放与经济发展关系问题,本文以县域为研究对象,在碳脱钩理论的基础上构建以下思路框架:首先,借助脱钩模型刻画县域碳排放与经济发展脱钩关系的时空特征;其次,利用空间自相关描述县域脱钩关系的空间聚集特征,分析脱钩关系在区域间的相互作用;最后,运用马尔科夫模

型量化县域脱钩关系的内在扩张规律与外在趋同效应,进一步探讨邻域对县域脱钩的影响作用,以期为县域脱钩研究提供有益补充,并基于脱钩理论为中国县域碳排放提供差异化治理策略。

2 研究区、数据与方法

2.1 研究区域

中国现行行政区划中县级行政单位包括地级市市辖区、县级市、县、自治县、旗、自治旗、林区、特区8类,考虑到地级市市辖区以及部分特区与其余几类在经济发展水平与碳排放产生机理方面差距较大^[24],故本文对地级市市辖区和特区不作具体讨论。由于西藏自治区、港澳台地区及其他少数县域数据缺失,最终选择县级市、县、自治县、旗、自治旗、林区共6类1741个县级行政单位作为研究区域。

2.2 数据来源

中国县域碳排放数据来源于《中国县级碳排放及陆地植被固碳数据1997—2017》^[25]。考虑到2000年前后中国县级行政区划发生变动,且经济数据缺失较多,造成整体数据不可比,又因为碳排放与经济发展存在滞后^[26],脱钩效应往往以5~10年作为时间尺度,故本文剔除1997年,以2002年作为研究基年;以碳排放数据可获取的最新年份2017年为研究末年,加入2007年和2012年两个节点,形成2002、2007、2012、2017年共4个时间节点,从3个时期(2002—2007年、2007—2012年、2012—2017年)分析各阶段脱钩弹性与脱钩状态。基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS两类夜间灯光数据估算得到2002、2007、2012、2017年县域碳排放量。中国县域地区生产总值数据来源于2003、2008、2013年《中国区域经济统计年鉴》,2013、2018年《中国县域统计年鉴》及相关地市统计公报等。中国省级、县(市)级行政边界数据来源于国家基础地理信息中心1:400万数据库。

2.3 研究方法

2.2.1 脱钩效应分析

碳排放脱钩是CO₂排放与经济发展之间的关系逐渐被减弱直至被彻底打破的理想过程^[27],即在经济持续增长的前提下,碳排放量持平乃至逐渐降低。为保证脱钩关系更为精准和稳定,本文选择

Tapio 脱钩指数模型,通过 GDP 与碳排放总量两个变量,构建碳排放总量与经济发展的脱钩表达式:

$$T_{(C,G)} = \frac{\% \Delta CE}{\% \Delta GDP} = \frac{(CE_t - CE_{t-1})/CE_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP_{t-1}} \quad (1)$$

式中: $T_{(C,G)}$ 表示碳排放与经济发展之间的脱钩弹性; $\% \Delta CE$ 和 $\% \Delta GDP$ 分别表示碳排放和经济发展在末期相对于基期的变化率; CE 表示碳排放总量; GDP 表示经济发展水平; $t-1$ 与 t 分别表示基期与末期。在 Tapio 脱钩模型的基础上,将脱钩状态分为 8 类(表 1),其中强脱钩为最理想状态,强负脱钩为最不理想状态。

2.2.2 空间相关性分析

空间自相关主要用于衡量事物某一属性的空间聚集特征^[28],一般分为全局自相关与局部自相关。

(1) 全局自相关

全局自相关用于研究事物属性的整体空间关联程度及其显著性强弱,选取 Moran's I 研判县域碳排放脱钩是否存在空间聚集特征,计算公式如下:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中: Global Moran's I 表示全局自相关指数, n 表示县域样本量; y 表示县域的碳排放脱钩状态; y_i 、 y_j 分别表示第 i 和 j 个县域的碳排放脱钩状态; \bar{y} 表示 y 的均值; W_{ij} 表示县域 i 和 j 的空间权重矩阵。本文采用邻接原则构建空间权重矩阵,即当 i 县域与 j 县域相邻时, $W_{ij} = 1$; 否则 $W_{ij} = 0$; 当 $i=j$ 时, $W_{ij} = 0$ 。

Global Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, Moran's I 指数大于 0,表示县域碳排放脱钩状态的空间分布呈正相关, Moran's I 指数越趋近于 1 表示正相关性越强,即空间邻近或邻接县域碳脱钩状态具有极强的相似性;反之, Moran's I 指数小于 0,表示空间分布呈负相关; Moran's I 指数等于 0 表示不存在空间相关性。

(2) 局部自相关

局部自相关用于进一步分析该属性的局部空间异质性,识别高值或低值要素的空间聚类,分析某点与周边点在该属性上的聚类模式^[29],包括 HH 聚类(高值被高值包围)、LL 聚类(低值被低值包围)、LH 聚类(低值被高值包围)、HL 聚类(高值被低值包围)及无明显聚类模式。本文运用 Local Moran's I 识别碳脱钩的空间聚类规律,量化研究中国县域碳脱钩空间格局的演进特征,计算公式为:

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中: Local Moran's I 表示局部自相关指数; m 表示与县域 i 相邻接的县域个数;其余变量同上。如果 Local Moran's I 指数大于 0,表示该县与相邻县具有相同的理想或不理想脱钩状态,空间集群表现为 HH 聚类和 LL 聚类;如果 Local Moran's I 指数小于 0,表示该县与相邻县脱钩状态存在差异,空间集群表现为 LH 聚类和 HL 聚类。

2.2.3 空间马尔科夫模型

(1) 传统马尔科夫链

马尔科夫链是一种时间和状态均为离散的马

表 1 脱钩弹性与脱钩状态

Table 1 Decoupling elasticity and decoupling state

状态	环境压力增长率/%	经济驱动增长率/%	脱钩弹性	脱钩状态特征
脱钩	强脱钩	< 0	> 0	$T < 0$ 经济水平提高,碳排放量不断削减,最为理想
	弱脱钩	> 0	> 0	$0 \leq T < 0.8$ 经济水平增长速度大于碳排放量增长速度
	衰退脱钩	< 0	< 0	$T > 1.2$ 经济水平衰退速度小于碳排放量削减速度
连结	增长连结	> 0	> 0	$0.8 \leq T \leq 1.2$ 经济水平与碳排放量增长速度相当
	衰退连结	< 0	< 0	$0.8 \leq T \leq 1.2$ 经济水平与碳排放量衰退速度相当
负脱钩	扩张负脱钩	> 0	> 0	$T > 1.2$ 经济水平增长速度小于碳排放量增长速度
	弱负脱钩	< 0	< 0	$0 \leq T < 0.8$ 经济水平衰退速度大于碳排放量削减速度
	强负脱钩	> 0	< 0	$T < 0$ 经济水平衰退,碳排放量不断增长,最不理想

2022年4月

尔科夫过程,是分析某类要素俱乐部趋同效应进而判断其空间格局的有效手段之一^[30,31]。马尔科夫链通常将连续的数据离散化,根据需要划分成 k 种类型,通过计算各类型的概率分布及变化,逼近地理现象的演变过程^[32]。

本文通过构建马尔科夫转移概率矩阵反映县域碳脱钩状态的时间演变特征。考虑到8种脱钩状态在代入马尔科夫模型时自由度过大难以通过检验,故将1741个县域的碳脱钩状态按照Tapio脱钩指数模型划分成“负脱钩”(强负脱钩、弱负脱钩、扩张负脱钩)、“连结”(衰退连结、增长连结)、“脱钩”(衰退脱钩、弱脱钩、强脱钩)3个等级(表1),分别用 $k=1, 2, 3$ 表示, k 越大表示该县脱钩状态越理想。根据脱钩状态的上升、不变和下降来判断碳脱钩的转变方向。本文将 t 年碳脱钩状态的概率分布表示为 $1 \times k$ 的状态概率向量 $E_t = [E_{1,t}, E_{2,t}, \dots, E_{k,t}]$,将不同年份的县域碳脱钩状态转移表示为 $k \times k$ 的马尔科夫转移概率矩阵 E_{pq} ,计算公式为:

$$E_{pq} = \frac{n_{pq}}{n_p} \quad (4)$$

式中: E_{pq} 表示 t 年 p 脱钩状态县在 $t+d$ 年转变成 q 状态的概率; n_{pq} 表示 t 年 p 状态转变为 $t+d$ 年 q 状态的县域数量总和; n_p 表示研究时段内所有年份 p 状态县域数量总和。矩阵需满足两个条件:

$$0 \leq E_{pq} \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{q=1}^n E_{pq} = 1 \quad (6)$$

(2)空间马尔科夫链

空间马尔科夫链在传统马尔科夫链的基础上引入“空间滞后”概念,补足了传统马尔科夫链对区域相互作用的忽略^[33]。县域碳排放因地理资源差异在空间上呈现非均匀分布状态,经济发展也与周围环境密切相关,可见碳脱钩在地理空间中存在区域相关性和依赖性^[34]。

本文通过在不同滞后条件下构建空间马尔科夫转移概率矩阵反映县域碳脱钩状态的空间演变特征。将矩阵分解为 k 个 $k \times k$ 的条件转移矩阵, $E_{pq}(k)$ 表示以县域 t 年的空间滞后类型 k 为条件,在 $t+d$ 年转变为 q 状态的空间转移概率。

空间滞后类型用空间滞后值表示,即该县邻接县碳脱钩状态类型的空间加权平均值,计算公式为:

$$Lag = \sum_q W_{ij} Y_q \quad (7)$$

式中: Lag 为空间滞后值; Y_q 为邻接县域的碳脱钩状态类型; W_{ij} 为县域 i 的空间权重矩阵,本文采用邻接原则构建空间权重矩阵。

3 结果与分析

3.1 中国县域碳排放与经济发展脱钩关系分析

中国县域的社会发展阶段与经济增长模式将直接影响碳排放产生机理与增长速率,导致碳排放脱钩状态及其空间分布的差异化。县域碳排放与经济脱钩状态在时间序列上演变显著,不同状态的县域数量分布也趋于多样化(表2)。整体而言,3个时期内二者间的脱钩关系主要表现为强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩3种状态。弱脱钩县域数量呈“先增长后降低”的波动变化,三期弱脱钩数量增

表2 2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态变化

Table 2 Changes in the decoupling state of carbon emissions at the county level in China, 2002–2017

脱钩状态	2002—2007年(一期)		2007—2012年(二期)		2012—2017年(三期)	
	县数量/个	比例/%	县数量/个	比例/%	县数量/个	比例/%
强脱钩	—	—	—	—	654	37.39
弱脱钩	944	53.70	1513	85.82	823	47.06
衰退脱钩	—	—	—	—	22	1.26
增长连结	446	25.37	139	7.88	37	2.12
衰退连结	—	—	—	—	5	0.29
扩张负脱钩	359	20.42	94	5.34	49	2.80
弱负脱钩	—	—	—	—	94	5.37
强负脱钩	9	0.51	17	0.96	65	3.72

加伴随着弱脱钩数量、扩展负脱钩数量逐渐减少,而强负脱钩、弱负脱钩县域数量逐渐增多,且由全域分布逐渐转为在陕青宁新等西北地区及黑龙江、辽中南等东北地区团状聚集(图1)。

2002—2007年,全国以弱脱钩状态为主,少数县域处于负脱钩范畴,聚集分布在新疆西部、青海南部、宁夏南部等西北地区,内蒙古东北、黑龙江西北等东北地区,四川西北等西南地区。2007—2012年,黑龙江西北、吉林中部、内蒙古东北等东北地区,青海南部等西北地区以及华中、华东部分地区由强负脱钩逐渐转为相对理想的弱脱钩,全国整体趋向理想脱钩演进,但甘肃南部、四川南部、云南西北等胡焕庸线西端县域处于相对停滞的强负脱钩状态,广西中部县域由弱脱钩转为负脱钩,呈现显著的脱钩倒退。2012—2017年,华东、华中、华南地区保持弱脱钩不变或前进至强脱钩状态,四川西部、云南北部等西南地区由负脱钩转向强、弱脱钩。但脱钩态势在西北、东北地区略显萎靡,青海、甘肃中部、内蒙古大部等西北地区,黑龙江东北及西北、辽宁大部等东北地区由弱脱钩倒退为负脱钩并逐渐演变为大面积团状聚集。

总体来看,县域多种脱钩类型共存的特征突出且将持续存在,强、弱脱钩为全国主导脱钩方向,这与孙俊杰^[35]、左发伟^[36]、潘竞虎^[13]等学者在省域、市域层面上“全国整体以弱脱钩为主”的研究结果基本一致,但基于县域视角分析得出的“东北、西北地

区呈现负脱钩集聚特征”,与学者“脱钩状态无明显空间聚集”的结论有一定差异。结合县域实际发展情况分析发现,东北、西北因所处经济区差异呈现负脱钩状态的原因各异。东北综合经济区内以辽中南工业基地为中心呈现负脱钩聚集特征,主要因为工业转型困难。大量县域过度依赖煤炭等资源优势发展传统工业来带动经济增长,但面对当前资源日渐枯竭的困境,难以尽快完成产业集约转型。东北地区长期以牺牲环境为代价的粗放发展模式,导致经济发展与生态保护的同步加剧。西北综合经济区内大范围的负脱钩聚集主要是由于经济基础薄弱。大部分县域因地域限制仍处于经济发展初期,优越的资源禀赋促使县域大多选择二产作为支柱产业,然而工业化的快速推进促使能源需求不断攀升,高能耗产业持续扩张为县域控碳减排施加了巨大压力,导致经济发展与碳排放难以实现理想脱钩。为摆脱脱钩状态各经济区差距拉大以及西北、东北地区脱钩倒退的逆境,应以县域差异化治理为目标,探索针对性的控碳模式。

3.2 中国县域碳脱钩空间分异特征

3.2.1 全局自相关分析

空间邻接因素在一定程度上影响着县域碳排放与经济发展脱钩状态的空间分布。计算2002—2017年中国县域的Moran's *I*指数发现:2002—2017年中国县域碳脱钩的Moran's *I*指数均为正值,均通过99%的显著性检验,*z*得分均大于2.5800

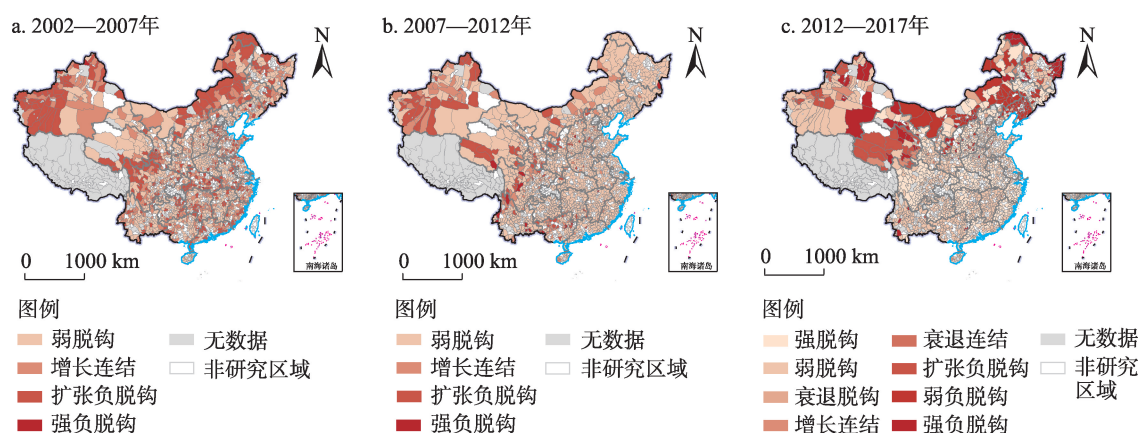


图1 2002—2017年中国县域碳排放脱钩效应空间格局

Figure 1 Spatial pattern of carbon emission decoupling effect at the county level in China, 2002–2017

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作,底图边界无修改。

2022年4月

(表3),表明县域碳脱钩存在显著的全局空间正相关性,且呈现空间集聚特征。3个时期内Moran's I 指数均值为0.1233,空间正相关程度相对较弱,虽然二期有所衰减,但与一期相比,三期仍呈增长状态,表明随着时间演进,县域碳排放脱钩状态的空间聚集程度逐渐增强。

3.2.2 局部自相关分析

为直观反映中国县域碳排放与经济发展脱钩关系的空间聚集特征,绘制3个时期内县域碳脱钩的局部空间自相关图(图2)。中国县域碳脱钩状态

的空间显著性以正相关为主,正相关特征随时间推移愈发突出。聚集态势呈现高值和低值聚集的特点,LH与HL聚类区域因溢出效应散布在HH及LL聚类周边。高值与低值聚集县域数量均呈波动变化(表4),但空间分异特征愈发显著,脱钩聚集格局由“东正西负”逐渐转为“南正北负”。

2002—2007年,HH聚集在陕、晋、鲁、豫等黄河中下游地区,少量分布在黔西南、滇东南等长江上游地区,理想脱钩县域沿黄河、长江等水系集聚。LL聚集在新疆西部、青海东部等西北地区以及内蒙古中东、黑龙江西北等东北地区。2007—2012年,HH聚集沿长江流域向东、中部发展,蔓延至贵州、湖南、湖北、江西、福建等地,且在黑吉辽等东北地区出现大量理想脱钩聚集。LL仅在新疆西南、云南北部等西部地区小范围聚集。2012—2017年,HH聚集由东部蔓延至南部,呈现连片增长趋势。LL由西北地区少量聚集转向青海、内蒙古西部、辽中南、黑龙江东北及西北等北部地区大范围聚集。

表3 2002—2017年中国县域碳排放脱钩的

Moran's I 指数

Table 3 Moran's I Index of carbon emission decoupling at the county level in China, 2002–2017

年份	Moran's I	p 值	z 得分
2002—2007年	0.1109	0.0000	28.6775
2007—2012年	0.0681	0.0000	17.7170
2012—2017年	0.1908	0.0000	49.0908

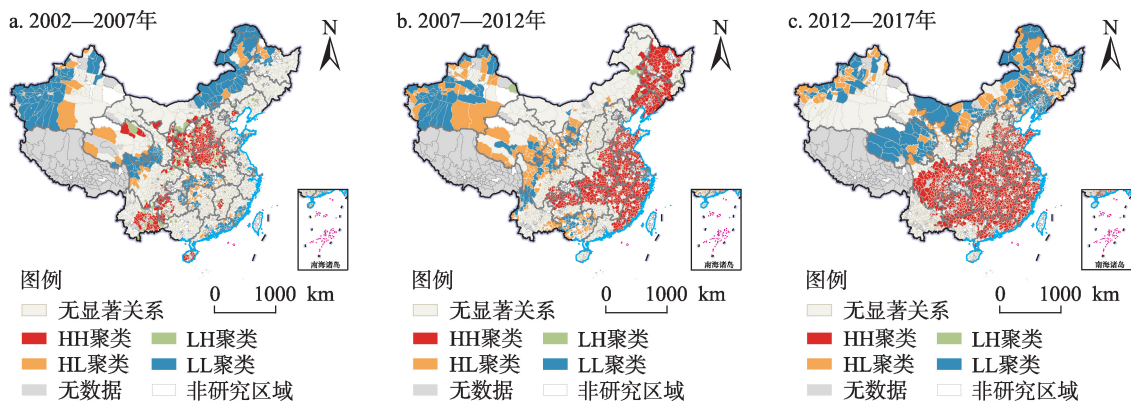


图2 2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态的局部空间自相关分析图

Figure 2 Local spatial autocorrelation analysis of carbon emission decoupling at the county level in China, 2002–2017

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作,底图边界无修改。

表4 2002—2017年中国县域碳排放脱钩局部自相关聚集状态变化

Table 4 Changes of local autocorrelation clusters of decoupling carbon emissions at the county level in China, 2002–2017

聚类状态	2002—2007年(一期)		2007—2012年(二期)		2012—2017年(三期)	
	县数量/个	比例/%	县数量/个	比例/%	县数量/个	比例/%
HH 聚类	352	20.02	699	39.65	1019	58.26
HL 聚类	78	4.44	172	9.76	147	8.40
LH 聚类	114	6.48	29	1.64	28	1.60
LL 聚类	231	13.14	123	6.98	198	11.32
无显著关系	983	55.92	740	41.97	357	20.41

总体来看,2002—2017年中国县域碳脱钩状态的空间聚集趋势随时间演进愈发显著,一期理想脱钩沿黄河、长江等水系聚集,存在小范围聚集差异;二期开始表现为东北、东部沿海等地区理想脱钩,西北、西南地区负脱钩的团状聚集特征;三期逐步形成西南、南部沿海等地区理想脱钩,东北、西北等地区负脱钩的连片聚集格局。县域脱钩状态空间聚集特征的变化,与各时期各经济区差异化的控碳政策、不断改变的外部经济环境有较为显著的同步性关联。例如“东北老工业基地振兴战略”提出了“优化经济结构、构建现代产业体系”“做强支柱产业、培育潜力产业”等政策,充分带动了二期东北综合经济区由负脱钩聚集到理想脱钩聚集的格局转变;“中部崛起”及“一带一路”倡议提出“全面提高对外开放水平”“设施联通、贸易畅通、资金融通”等多项区域经济政策,在其影响下,东部沿海、南部沿海、长江中游三大经济区碳脱钩格局由一期无显著关系逐渐转为三期显著的理想脱钩连片聚集。未来控碳重点应聚焦区域间碳排放脱钩的不均衡状态,进一步研究宏观政策对脱钩格局的影响,尤其针对东北、西北地区负脱钩聚集的特征,通过差异化的引导政策扭转如今脱钩状态空间分异格局,保持经济平稳增长,逐步缩小东北、西北两大经济区与其余经济区的脱钩差距。

3.3 中国县域碳排放脱钩关系趋同特征

3.3.1 县域碳排放脱钩关系趋同的时间演变特征

利用马尔科夫链原理,构建2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态的马尔科夫转移概率矩阵(表5中后3列为矩阵元素),对角线上元素表示脱钩类型未改变的概率,非对角线上元素表示脱钩状态在不同类型间转移的概率,向上转移表示县域从非理想脱钩状态转向理想脱钩状态,反之,向下转移表

示县域从理想脱钩状态转向非理想脱钩状态。可以发现:①中国县域碳排放脱钩稳定性不显著。仅“脱钩”一种类型对角线上概率大于非对角线概率,表明县域在实现碳排放与经济发展“脱钩”前呈多种状态交替现象,步入“脱钩”状态后维持稳定。②县域脱钩转移以向上转移为主。向上转移包括两种,即由“连结”转向“脱钩”的逐级状态转移和由“负脱钩”转向“脱钩”的跳跃状态转移,两种情况发生概率均超过80.00%,表明县域脱钩趋向理想状态发展,因产业转型或能效提升,脱钩状态逐级或跳跃转移相对容易发生。③县域碳脱钩仅“脱钩”一种类型存在俱乐部趋同现象。初始阶段属于“脱钩”类型县域保持稳定的概率为87.61%,远大于向下转移概率,表明理想脱钩具备较强的内生演化特征。

3.3.2 县域碳排放脱钩关系趋同的空间转移特征

为客观描述县域碳排放与经济发展脱钩关系的空间趋同特征,将2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态转移情况空间可视化(图3),可以发现,中国县域碳排放脱钩关系以稳定和向上发展为主。状态维持稳定或向上转移1级县域分布广泛;状态发生跳跃式向上转移县域呈现小范围团状聚集,主要分布在内蒙古中东部、黑龙江中西部等东北地区,新疆中部及西南部等西北地区,四川西北等西南地区;状态向下转移县域聚集特征显著,主要分布在青海北部、内蒙古西部等西北地区以及黑龙江东北、辽宁中南等东北地区。

将2002—2017年县域及其邻域的碳脱钩状态转移情况空间可视化(图4),可以发现,碳脱钩状态的转移并非随机发生,相邻县域因发展基础相近与资源互补,碳脱钩多发生同向转移。县域邻域均向上转移的在西部、南部、东部呈现区域性团状聚集,主要分布在新疆西南、四川西南、云南北部等西部地区,山东南部、江苏北部等东部地区,广东东部、福建等南部地区;县域邻域均不变的在中部及南部地区呈现较大范围连片聚集;县域邻域均向下转移的在青海、内蒙古西部等西北地区以及辽中南、黑龙江等东北地区呈显著聚集。

从碳脱钩状态的时空转移来看,中国县域碳排放脱钩整体趋向稳定和向上发展,相邻县域因空间

表5 2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态马尔科夫概率矩阵

Table 5 Markov probability matrix of carbon emission decoupling at the county level in China, 2002–2017

$t/t+5$	n	负脱钩	连结	脱钩
负脱钩	461	0.0954	0.1020	0.8026
连结	576	0.0764	0.0694	0.8542
脱钩	2445	0.0871	0.0368	0.8761

2022年4月

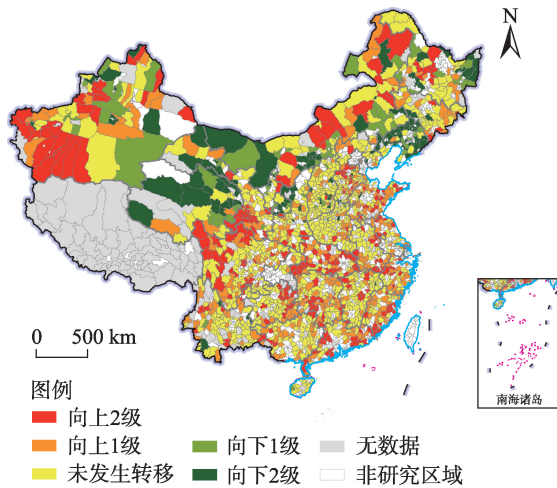


图3 2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态转变空间格局分布图

Figure 3 Spatial pattern of carbon emission decoupling transition at the county level in China, 2002–2017

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作,底图边界无修改。

联动趋于同向发展;但北方地区,依托大西北和东北两大综合经济区,以蒙西和辽中南为区域核心,形成了碳脱钩“向下转移—邻域向下转移”团状聚集格局。2002—2017年间,两区经济因传统工业基地的由盛转衰,经历了“跃增—放缓—衰退”多个阶段,其粗放的发展模式导致碳排放持续增长;又因为工业基地在产业方面的辐射带动作用,导致两经济区内大部分县域脱钩类型“由正转负”,脱钩状态日渐式微。为避免东北和西北两大经济区脱钩状态继续萎靡,应重视传统工业的高效转型,加强东北、西北地区与京津冀等邻近地区的低碳产业协同,实现环境友好型集约发展。

3.3.3 县域碳排放脱钩关系俱乐部趋同的空间解释

为进一步分析县域碳脱钩状态转移的空间联动效应,解释“俱乐部趋同”的空间特征,本文基于传统马尔科夫概率转移矩阵,以各时期脱钩状态为空间滞后条件,构建空间马尔科夫概率转移矩阵(表6中的后3列为矩阵元素)。结果显示,理想脱钩邻域(即表6中邻域为“脱钩”空间滞后类型)对县域有正向拉动作用,促使县域及邻域发生同向向上转移,在空间上呈现理想脱钩聚集,进而形成空间意义上的“俱乐部趋同”。当县域与理想脱钩县域为邻时,其向上转移概率将增大,反之,其向上转移

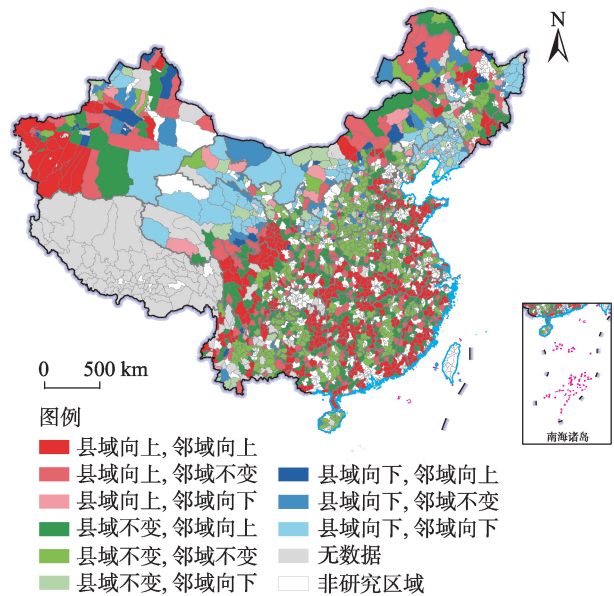


图4 2002—2017年中国县域碳排放状态转变及邻域状态转变空间格局分布图

Figure 4 Spatial pattern of carbon emission change at the county and neighborhood levels in China, 2002–2017

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号标准地图制作,底图边界无修改。

将受到一定抑制。以“负脱钩”状态(即表6第2列中县域碳脱钩状态为“负脱钩”)为例,在“负脱钩”“连结”“脱钩”3种邻域环境中,“负脱钩”县域维持原有状态概率依次减小,而其向“脱钩”状态转移概率依次增大。

整体而言,理想脱钩县域多存在正向溢出效

表6 2002—2017年中国县域碳排放脱钩状态空间马尔科夫概率矩阵

Table 6 Markov probability matrix for decoupling state space of carbon emissions at the county level in China, 2002–2017

空间滞后类型 (邻域碳脱钩 状态)	$t/t+5$ (县域碳脱 钩状态)	n	负脱钩	连结	脱钩
负脱钩	负脱钩	91	0.1319	0.1538	0.7143
	连结	50	0.1800	0.0080	0.7400
	脱钩	54	0.0556	0.0556	0.8889
连结	负脱钩	275	0.0945	0.1055	0.8000
	连结	326	0.0675	0.0767	0.8558
	脱钩	592	0.0810	0.0659	0.8530
脱钩	负脱钩	95	0.0632	0.0421	0.8947
	连结	200	0.0650	0.0550	0.8800
	脱钩	1799	0.0901	0.0267	0.8833

应,驱动县域及邻域发生同向向上转移,呈现理想脱钩空间聚集特征。自“统筹区域发展战略”提出以来,县域由单一发展转向区域协同,在综合考虑中心辐射带动与地方比较优势的基础上,以浙江临安、福建闽侯、四川大邑、湖北仙桃、湖南邵阳等县域为核心,逐渐形成多个“理想脱钩俱乐部”,进而在杭州、福州、成都、武汉、长株潭等多个都市圈充分发挥出理想脱钩趋同效应。未来区域性经济政策与环保策略的制定,应准确把握并利用各都市圈或经济带中的“理想脱钩俱乐部”,找准“经济强县”与“环保强县”,激发脱钩极核的正向驱动作用,基于不同县的区域职能或产业分工达到“经济正增长—碳排放负增长”理想脱钩状态。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于脱钩模型与空间分析方法,对中国碳排放与经济发展脱钩关系的时空演变特征、空间聚集规律及空间趋同效应进行了分析,发现2002—2017年县域碳脱钩关系的变化趋势与既有省域、市域尺度研究结果基本一致,一定程度上验证了分析结果的合理性。但与省域、市域层面相比,县域脱钩类型更丰富,除弱脱钩、增长连结等主要状态外,衰退脱钩、弱负脱钩、强负脱钩等多种状态均有少量分布;而强、弱脱钩等理想脱钩比例相对降低,负脱钩比例相对增加;但发生脱钩状态转变的单元比例更高,状态等级跨越幅度更大,可见县域碳排放与经济发展的关联更加紧密,因此基于县域视角分析所得碳脱钩结果,在时间上存在脱钩类型多样化、状态波动更明显的变化特征,在空间上存在脱钩聚集机理更复杂、邻域转移趋同化的演变趋势。本文以县域为基本研究单元,分析中国县域碳脱钩关系及时空演进特征,主要结论如下:

(1)在脱钩时空特征方面,中国县域碳排放与经济发展的脱钩关系呈现多样化的演进趋势,整体以强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩为主。研究时期内脱钩县域数量及空间分布波动明显,华中、华东、华南部分县域脱钩类型由弱转强,强负脱钩和弱负脱钩县域数量逐渐增多,且由全国范围散布发展为在陕甘宁青等西北地区及辽中南等东北地区团状聚集分布。县域脱钩态势的差异与社会发展阶段、经

济增长模式、资源禀赋条件等多重因素密切相关。

(2)在空间聚集特征方面,中国县域碳排放脱钩关系具有显著的空间正相关性,且正相关程度逐年增强,呈现HH、LL县域聚集,HL、LH县域点状散布的特点。脱钩聚集格局一期呈现沿长江、黄河等水系局部聚集态势;二期逐渐形成东北、东部沿海等地区理想脱钩,西北、西南地区负脱钩的团状聚集格局;三期演变形成西南、南部沿海等地区理想脱钩,东北、西北等地区负脱钩的聚集与分异并存格局。引起县域脱钩状态空间聚集特征变化的主要原因为各阶段差异化的区域控碳策略与经济政策环境。

(3)在邻域趋同效应方面,中国县域碳排放脱钩关系趋于稳定和向好发展,在发展过程中实现向上转移概率较大。县域碳脱钩存在空间“俱乐部趋同”现象,且理想脱钩县域的正向溢出效应促进了相邻县域同向向上发展,在大部分区域呈现显著的理想脱钩空间聚集特征,但西北及东北地区呈现“向下转移—邻域向下转移”团状聚集格局,主要是由于其传统工业基地转型成效甚微,其辐射影响下的周边县域发展受限,形成了负向空间溢出效应。

4.2 政策建议

为进一步明确区域差异化控碳目标,促进控碳策略实施,逐步缩小县域碳排放脱钩差距,本文提出以下控碳建议:

(1)结合县域碳脱钩时空异质性与空间聚集性并存的特征,针对性制定控碳目标。中部及南部强、弱脱钩交替县域应以实现稳定强脱钩为目标,加快产业低碳转型,推进能源供给侧改革;吉林南部、辽宁中南等东北地区仍处于强负脱钩的县应以碳排放削减的强脱钩、衰退脱钩为目标,首要任务是高效率减碳,催化传统制造业的现代化转型,发展新兴服务产业与高端智能产业,提高能源效率。新青甘等西北负脱钩县应以经济增长的弱脱钩、增长连结为目标,核心是清洁化发展,在经济持续发展的基础上严控碳排放标准,限制高碳排放能源使用,发展风能、太阳能、生物能等清洁能源,逐步推动低碳工艺和技术革新。

(2)由于碳脱钩存在显著的空间聚集效应,控碳策略的制定应注重区域统筹协调与宏观政策引

2022年4月

导。在新疆西部、陕甘宁青、内辽吉等负脱钩聚集区形成区域联动机制与低碳共治模式,统筹规划、同步调整区域产业结构与能源效率。并通过一定的经济政策倾斜或环保奖励机制,提高负脱钩区域的对外开放水平与生态建设能力,加强其与中部、南部地区强脱钩县域绿色治理的合作交流,摆脱负脱钩聚集效应,实现高质量集约发展。

(3)考虑到脱钩的空间“俱乐部趋同”效应与空间溢出效应,控碳策略的实施应重视理想脱钩县域在区域内的控碳资源基础与辐射带动作用,促进低碳减排的优势互补与合理配额,联合邻近县域形成“主核心驱动—多卫星协同”的“控碳共同体”。负脱钩趋同化聚集的北方地区,尤其是东北地区应依托老工业基地的产业资源,把握京津冀等中部地区中高端创新资源共享的契机进行低碳协同,逐步实现传统产业低碳化转型。

受数据获取限制,本文仅完成中国约90%县域碳排放与经济脱钩关系分析,无数据县可能会在一定程度上影响脱钩时空格局。另外,本文分析得到的县域脱钩空间聚集程度较高,结合中国经济社会发展与地理差异,进一步明确脱钩聚集机理与驱动机制将是未来研究的重点。

参考文献(References):

- [1] Yi Y C, Ma S S, Guan W J, et al. An empirical study on the relationship between urban spatial form and CO₂ in Chinese cities[J]. Sustainability, 2017, DOI: 10.3390/su9040672.
- [2] 王睿, 张赫, 冯兰萌. 中国县域规模结构对居民生活碳排放的影响关系研究: 关键要素及代表性指标[J]. 现代城市研究, 2021, (2): 126–132. [Wang R, Zhang H, Feng L M. Impact of China's county scale and structure on household carbon emissions: Key elements and representative indicators[J]. Modern Urban Research, 2021, (2): 126–132.]
- [3] 刘志红, 曹俊文. 碳排放强度与经济增长的关系: 基于数量脱钩的实证研究[J]. 经济问题探索, 2017, (11): 141–147. [Liu Z H, Cao J W. The relationship between carbon intensity and economic growth: An empirical study based on quantitative decoupling[J]. Inquiry into Economic Issues, 2017, (11): 141–147.]
- [4] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 710–721. [Han M Y, Liu W D, Xie Y T, et al. Regional disparity and decoupling evolution of China's carbon emissions by province[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 710–721.]
- [5] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 593–606. [Peng H S, Guo L J, Zhang J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource–environmental pressure[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 593–606.]
- [6] Dong K Y, Sun R J, Jiang H D, et al. CO₂ emissions, economic growth, and the environmental Kuznets curve in China: What roles can nuclear energy and renewable energy play?[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 51–63.
- [7] Liu Y S, Yan B, Zhou Y. Urbanization, economic growth, and carbon dioxide emissions in China: A panel cointegration and causality analysis[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(2): 131–152.
- [8] 王谋. 世界排放大国CO₂排放和GDP的格兰杰因果分析及其对国际气候治理的影响和意义[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 303–309. [Wang M. A Granger causality analysis between GDP and CO₂ emissions by major emitters and implications for international climate governance[J]. Climate Change Research, 2018, 14(3): 303–309.]
- [9] 岳立, 宋雅琼, 江铃峰. “一带一路”国家能源利用效率评价及其与经济增长脱钩分析[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 834–846. [Yue L, Song Y Q, Jiang L F. National energy efficiency of countries in the “Belt and Road” region and its decoupling from economic growth[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 834–846.]
- [10] 武娜, 沈镭, 钟帅, 等. 晋陕蒙地区经济增长与碳排放时空耦合关系[J]. 经济地理, 2019, 39(9): 17–23. [Wu N, Shen L, Zhong S, et al. Spatio-temporal coupling relationship between economic growth and carbon emission in Shanxi–Shaanxi–Inner Mongolia [J]. Economic Geography, 2019, 39(9): 17–23.]
- [11] Camara M. Determinants of production-based and consumption-based CO₂ emissions: A comparative analysis[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2020, 67(1): 22–47.
- [12] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137–151.
- [13] 潘竟虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 206–222. [Pan J H, Zhang Y N. Spatio-temporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 206–222.]
- [14] Du Q, Zhou J, Pan T, et al. Relationship of carbon emissions and economic growth in China's construction industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220(5): 99–109.
- [15] 翁钢民, 李聪慧, 潘越, 等. 中国旅游业碳排放脱钩效应及影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(2): 114–120. [Weng G M, Li C H, Pan Y, et al. Decoupling effect and influencing factors of carbon emissions in China's tourism industry[J]. Ge-

- ography and Geo-Information Science, 2021, 37(2): 114–120.]
- [16] 王君华, 李霞. 中国工业行业经济增长与CO₂排放的脱钩效应[J]. 经济地理, 2015, 35(5): 105–110. [Wang J H, Li X. The effect of sector decoupling between China's industrial economic growth and carbon dioxide emissions[J]. Economic Geography, 2015, 35(5): 105–110.]
- [17] 张中秋, 胡宝清, 韦金洪. 广西土地整治碳排放影响因素及脱钩效益分析: 基于LMDI模型[J]. 生态经济, 2020, 36(1): 47–55. [Zhang Z Q, Hu B Q, Wei J H. Analysis factors on carbon emission of land consolidation and analysis of their decoupling effects in Guangxi: Based on LMDI model[J]. Ecological Economy, 2020, 36(1): 47–55.]
- [18] Liu X, Li S L. A comparison analysis of the decoupling carbon emissions from economic growth in three industries of Heilongjiang province in China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(46): 65200–65215.
- [19] Zhao M M, Li R R. Decoupling and decomposition analysis of carbon emissions from economic output in Chinese Guangdong Province: A sector perspective[J]. Energy & Environment, 2018, 29(4): 543–555.
- [20] 程慧, 徐琼, 郭尧琦. 中国旅游业碳排放脱钩的空间异质性及其驱动因素[J]. 华东经济管理, 2020, 34(3): 86–93. [Cheng H, Xu Q, Guo Y Q. Spatial heterogeneity of carbon emission decoupling in China's tourism industry and its driving factors[J]. East China Economic Management, 2020, 34(3): 86–93.]
- [21] Wang Q, Jiang R. Is carbon emission growth decoupled from economic growth in emerging countries? New insights from labor and investment effects[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119188.
- [22] 罗芳, 郭艺, 魏文栋. 长江经济带碳排放与经济增长的脱钩关系: 基于生产侧和消费侧视角[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1364–1373. [Luo F, Guo Y, Wei W D. Decoupling analysis between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt: Production and consumption perspectives[J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1364–1373.]
- [23] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学, 2021, 41(8): 1324–1335. [Mo H B, Wang S J. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(8): 1324–1335.]
- [24] Zhang H, Peng J Y, Yu D, et al. Carbon emission governance zones at the county level to promote sustainable development[J]. Land, 2021, DOI: 10.3390/land10020197.
- [25] Chen J D, Gao M, Cheng S L, et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997–2017[J]. Scientific Data, 2020, DOI: 10.1038/s41597-020-00736-3.
- [26] 严太华, 胡尧. 基于资源脱钩视角的资源型城市分类[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2172–2181. [Yan T H, Hu Y. Classification of resource-based cities from the perspective of resource decoupling[J]. Resources Science, 2019, 41(12): 2172–2181.]
- [27] Song Y, Sun J J, Zhang M, et al. Using the Tapio-Z decoupling model to evaluate the decoupling status of China's CO₂ emissions at provincial level and its dynamic trend[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2020, 52: 120–129.
- [28] 叶青清, 张德彪, 曹隽隽. 基于修正引力图谱分析的城市空间关联结构分析: 以湖北省为例[J]. 城市发展研究, 2021, 28(5): 24–28. [Ye Q Q, Zhang D S, Cao J J. Correlation analysis of urban spatial structure based on modified gravity mapping model: A case study of Hubei Province[J]. Urban Development Studies, 2021, 28(5): 24–28.]
- [29] 张佳瑜, 李建华, 余海龙, 等. 宁夏小城镇空间分布特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 56–63. [Zhang J Y, Li J H, Yu H L, et al. Spatial distribution characteristics of small towns in Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(7): 56–63.]
- [30] Tsionas E G. Another look at regional convergence in Greece[J]. Regional Studies, 2002, 36(6): 603–609.
- [31] 闫涛, 张晓平, 陈浩, 等. 2001–2016年中国地级以上城市经济的区域差异演变[J]. 经济地理, 2019, 39(12): 11–20. [Yan T, Zhang X P, Chen H, et al. Evolution of regional differences in urban economic development in China from 2001 to 2016[J]. Economic Geography, 2019, 39(12): 11–20.]
- [32] 胡森林, 焦世泰, 张晓奇. 中国城市旅游发展的时空演化及影响因素: 基于动态空间马尔科夫链模型的分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 854–865. [Hu S L, Jiao S T, Zhang X Q. Spatio-temporal evolution and influencing factors of China's tourism development: Based on the non-static spatial Markov chain model[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 854–865.]
- [33] Rey S J, Montouri B D. US regional income convergence: A spatial econometric perspective[J]. Regional Studies, 1999, 33 (2): 143–156.
- [34] 刘华军, 乔列成, 孙淑惠. 黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 57–68. [Liu H J, Qiao L C, Sun S H. Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 57–68.]
- [35] 孙俊杰. 中国省级区域碳排放脱钩及减排潜力研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. [Sun J J. Research on the Decoupling Status and Mitigation Potential of China's CO₂ Emissions at Provincial Level[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.]
- [36] 左发伟. 中国各省碳排放脱钩指数的测定与影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016. [Zuo F W. Research on Carbon Emissions Decoupling Index and Influencing Factors[D]. Chongqing: Chongqing

- ing University, 2016.]
- [37] 张赫, 张建勋, 王睿, 等. 小城市建成环境对居民出行交通碳排放的影响机理[J]. 城市问题, 2020, 4(7): 4–10. [Zhang H, Zhang J X, Wang R, et al. Built environment factors influencing CO₂ emissions from residential trips in small Chinese cities[J]. Urban Problems, 2020, 4(7): 4–10.]
- [38] 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[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(10): 84–93. [Zhao G M, Zhao G Q, Chen L Z, et al. Research on spatial and temporal evolution of carbon emission intensity and its transition mechanism in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(10): 84–93.]

Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China

ZHANG He, HUANG Yazhe, WANG Rui, ZHANG Jianxun, PENG Jingyi

(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The decoupling relationship between carbon emissions and economic development affects the realization of carbon emission reduction target and the choice of economic growth model. Based on the Tapio decoupling model and spatial autocorrelation analysis, this study explored the spatiotemporal change characteristics and spatial aggregation pattern of the decoupling relationship between carbon emissions and economic growth in 1741 county-level administrative units in China's mainland from 2002 to 2017. The Markov model was used to analyze the spatial convergence effect of carbon emission decoupling at the county level in both spatial and temporal dimensions. The study found that: (1) The relationship of carbon emission decoupling at the county level is mainly strong decoupling, weak decoupling, and expanded negative decoupling. The trend of decoupling is greater in the south than in the north, and the number of negative decoupling cases increases gradually and is concentrated in the west and northeast. (2) The decoupling of carbon emissions at the county level shows a positive spatial correlation. After experiencing local aggregation and a spatial differentiation of “positive in the east and negative in the west”, there exists an aggregation and differentiation coexistence pattern of “positive in the south and negative in the north”. (3) Carbon emission decoupling at the county level tended to be stable and developed well, and there was a spatial “club convergence” phenomenon. Most of the regions present ideal decoupling agglomeration characteristics, but the northern region presents a cluster agglomeration pattern of downward transfer of the county and neighboring areas. Therefore, China should focus on the state instability and regional imbalance of the decoupling relationship between county carbon emissions and economic development, implement differentiated carbon emission control strategies, and achieve spatially balanced decoupling.

Key words: at county level; carbon emissions; decoupling relationship; spatiotemporal characteristics; spatial autocorrelation; Markov chains; China