

多尺度视角下武汉城市圈碳排放时空格局演化特征及脱钩效应研究¹

丁乙宸^{1,2,3} 谢来荣⁴ 黄亚平^{1,2,3*} 鲁仕维^{1,2,3} 朱雷洲^{1,2,3}

(1. 华中科技大学建筑与城市规划学院, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北省城镇化工程技术研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 自然资源部城市仿真重点实验室, 湖北 武汉 430074;

4. 武汉华中科大建筑规划设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

【摘要】: 基于武汉城市圈 2008~2017 年 48 个区县的碳排放数据, 采用空间自相关、标准差椭圆等方法, 从城市圈、市级、县级三个尺度来研究碳排放的时空演化特征, 并运用 Tapio 脱钩模型来分析不同尺度下经济发展与碳排放量变化之间的关系。结果表明: (1) 在城市圈尺度, 武汉城市圈的碳排放总量在 2012 年前不断增加、之后逐渐趋于稳定, 武汉城市圈经济增长与碳排放量的脱钩趋势也在总体向好。(2) 在市级尺度, 各市碳排放水平均已趋于平稳, 其中, 武汉、黄冈、孝感的碳排放量高于武汉城市圈 9 市的平均值, 且武汉碳排放量远高于其他 8 个市, 天门、仙桃、孝感、黄冈 4 市经济增长与碳排放之间已经由弱脱钩状态转变为强脱钩状态。(3) 在县级尺度, 武汉城市圈碳排放呈现出显著的圈层分布空间特征, 紧密圈层区县的碳排放量普遍较高, 核心圈层、外围圈层区县的碳排放量普遍相对较低; 脱钩状态的圈层特征也已显现, 强脱钩的区县主要位于武汉城市圈的核心圈层与外围圈层, 弱脱钩区县主要位于紧密圈层。最后, 针对武汉城市圈碳排放脱钩效应存在的问题, 从圈层、极核等方面提出相应措施, 以期为武汉城市圈的高质量发展及相关规划的编制提供决策参考。

【关键词】: 碳排放; 不同尺度; 时空演化; 脱钩关系; 圈层特征; 武汉城市圈

【中图分类号】: F301; X32 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023)03- 0558- 13

【DOI】: 10. 11870/cjlyzyyhj202303011

长江中游城市群发展“十四五”实施方案指出, 长江中游城市群绿色低碳转型任务繁重, 要构建绿色低碳的生产生活方式

¹ **【收稿日期】**: 2022- 04- 25; **【修回日期】**: 2022- 06- 29

【基金项目】: 国家自然科学基金项目(51978299; 41901390); 国家重点研发计划项目(2018YFD1100302); 湖北省自然科学基金项目(2021CFB012)

【作者简介】: 丁乙宸(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为城市与区域可持续发展. E-mail: 124346413@qq

【* 通讯作者 E-mail】: hust_hyp@sina

和建设运营模式^[1]。武汉城市圈是长江中游城市群的三大子城市群之一，2007年被国务院批准为全国资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验区。近年来，武汉城市圈不断调整优化经济结构、淘汰落后产能，武汉城市圈碳排放权交易试点示范也在持续推进，因此，对其碳排放时空演变特征及与经济增长之间的关系进行研究，对武汉城市圈的高质量发展以及长江中游城市群双碳目标的实现都具有十分重要的意义。

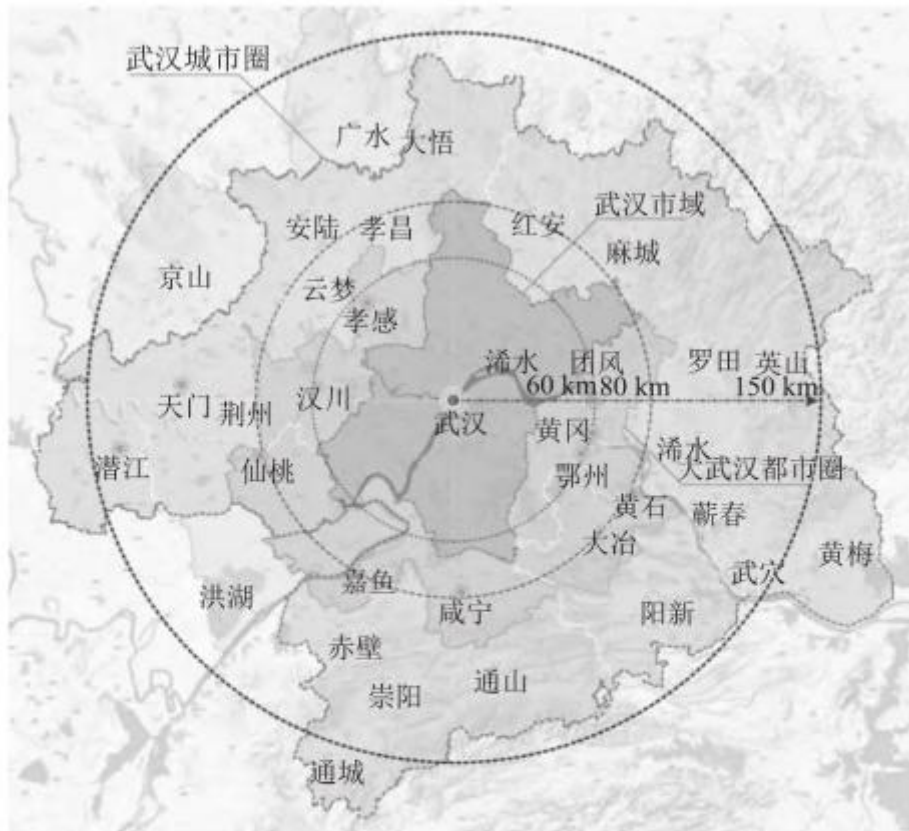
目前已有不少研究关注不同地理尺度下碳排放的时空格局特征，或是对单一尺度上碳排放与经济发展之间的关系进行揭示。在碳排放格局特征方面，城市群尺度的研究已较为丰富，Shen等^[2]利用Theil指数、空间自相关及社会网络分析(SNA)来研究长三角、成渝、粤港澳大湾区三大城市群之间及内部的碳排放差距、城市群碳排放网络的协同能力；王少剑等^[3]运用Kaya恒等式对珠江三角洲城市群碳排放的影响因素进行分解，并基于多情景分析、蒙特卡罗法、Mann-Kendall趋势检验及Theil-Sen's趋势斜率估计等，来对珠三角城市群2021~2035年的碳排放量进行动态模拟。市尺度下的碳排放格局研究则主要聚焦城市碳排放的区域差异、碳排放的空间溢出效应、碳排放绩效的时空演变等方面，研究结果表明我国城市能源消费碳排放的区域差异逐渐缩小^[4]，碳排放强度的空间溢出效应明显^[5]，城市碳排放绩效水平虽较低、但却在波动中逐渐上升^[6]。对于县域层面，学者们运用空间马尔科夫链对黄河流域县域碳排放的时空演变进行研究，发现黄河流域CO₂排放逐渐呈现出东高西低的空间分布特征^[7]，同时，相关研究还较多关注全国县域碳排放的动态演进^[8]、县域碳收支空间分异等^[9]。在碳排放与经济发展之间的关系方面，现有研究主要是从国家^[10,11]、省^[12]、市^[13,14]尺度来分析碳排放与经济增长之间的时空耦合关系，较少从区县尺度或者多尺度综合来探讨二者之间的关系。然而，尺度、格局及过程是地理学研究中的基本问题^[15]，不同尺度的碳排放空间格局特征及其与经济增长之间的关系也可能呈现出较为显著的空间关联性与差异性。此外，对于本文的研究对象武汉城市圈而言，现有武汉城市圈碳排放相关研究主要集中在土地利用碳排放效率^[16]、碳排放影响因素^[17,18]、碳收支空间分异^[19]及碳减排责任分摊^[20]等方面，研究的尺度较为单一。总体而言，学者们已对碳排放的时空格局演变特征、碳排放与经济发展之间的关系形成了较为丰富的研究成果，对本文而言有重要的借鉴意义，但还较为缺乏从多个尺度来综合研究城市群碳排放的时空格局演变特征及其与经济发展之间的关系。

因此，本文基于中国碳核算数据库CEADs中的县域碳排放数据集，从武汉城市圈、市级、县级三个尺度出发，利用探索性空间数据分析方法(ESDA)来分析多尺度下武汉城市圈碳排放的时空演化特征，并运用Tapio脱钩模型来研究不同尺度下碳排放与经济增长之间的关系，以期对武汉城市圈的高质量发展及相关规划的编制提供决策参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

武汉城市圈位于长江中游，包括武汉、鄂州、黄石、黄冈、天门、仙桃、潜江、咸宁、孝感9市，下辖48个区县(图1)，面积为5.78万km²，既是湖北省经济发展的核心区域，也是中部地区崛起的重要战略支点。武汉城市圈所属的湖北省于2010年被确定为第一批国家低碳试点省区，2012年武汉城市圈的核心城市武汉市被确定为第二批国家低碳试点城市，2014年湖北省发改委发布《湖北省碳排放权配额分配方案》，同时，武汉城市圈碳排放交易试点示范也在加快推进。此外，本文所涉及到的武汉城市圈三大圈层(核心圈层、紧密圈层、外围圈层)的范围来源于已有相关研究^[21]，即武汉城市圈的核心圈层、紧密圈层分别为武汉都市发展区、武汉大都市区，外围圈层为剩余的区县。



资料来源：武汉市国土空间总体规划(2021-2035年)

图 1 研究区范围图

Fig. 1 Map of study area

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关

(1) 全局自相关

全局 Moran' s I 用于分析武汉城市圈碳排放量空间分布的整体关联程度。计算公式见吕倩等^[22]的研究。

(2) 局部自相关

采用局部自相关中的聚类 and 异常值 (Anselin Local Moran' s I) 分析局域空间是否存在相关性，即反映局部单元数值与邻近周边单元数值的相关程度，计算公式如下：

$$I_k = \frac{x_k - \bar{x}}{S_k^2} \sum_{p=1, p \neq k}^n W_{kp} (x_p - \bar{x}) \quad (1)$$

并且：

$$S_k^2 = \frac{\sum_{p=1, p \neq k}^n (x_p - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2)$$

式中： x_k 是县(区) k 的碳排放量、 \bar{x} 是对应属性的平均值； W_{kp} 是县(区) k 与县(区) p 间的空间权重； n 是县(区)的总数。

1.2.2 标准差椭圆

标准差椭圆是一种测度地理要素分布特征的技术方法，通过重心、转角 θ 、 x 轴和 y 轴标准差等参数，来揭示要素的空间分布格局与时空演化趋势^[23]，具体计算公式见白冰等的研究^[24]。

1.2.3 脱钩模型

2005 年，Tapio 在研究欧盟交通运输规模与碳排放关系时提出了“弹性脱钩”概念^[25]。根据相关研究，一国或地区的能源脱钩和碳排放脱钩状态，一般理解为能源投入量(碳排放量)的增长与 GDP 增长趋势相脱离^[26]，即经济增长的同时带来的环境压力更小或消耗的资源更少^[27]。其表达式如下：

$$T_{Se} = \frac{\Delta C_{se}/C_s}{\Delta G_{se}/G_s} = \frac{(C_e - C_s)/C_s}{(G_e - G_s)/G_s} \quad (3)$$

式中： T_{Se} 表示第 s 年至第 e 年时期碳排放对经济发展的脱钩弹性指数； ΔC_{se} 和 ΔG_{se} 分别表示第 s 年至第 e 年碳排放、GDP 的变化量； C_s 和 C_e 分别表示起始年与末年的碳排放量； G_s 与 G_e 分别表示起始年与末年的 GDP。

根据 Tapio 等^[28]的研究，以弹性指数 0.8、1.2 作为临界点^[29]，再结合碳排放量变化率、GDP 变化率的正负，细分为 8 种状态(表 1)。

表 1 脱钩程度衡量标准

脱钩状态	$\Delta G_{se}/G_s$	$\Delta C_{se}/C_s$	T_{Se}	脱钩类型特征
------	---------------------	---------------------	----------	--------

强脱钩	>0	<0	<0	经济水平提高，碳排放量不断降低
衰退脱钩	<0	<0	≥ 1.2	经济水平衰退速度大于碳排放量降低速度
衰退连接	<0	<0	$0.8 \leq T < 1.2$	经济发展与碳排放量保持相对同步降低趋势
弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq T < 0.8$	经济水平衰退速度小于碳排放量降低速度
强负脱钩	<0	>0	<0	经济水平衰退，碳排放量增加
扩张负脱钩	>0	>0	≥ 1.2	经济发展水平提高速度小于碳排放量增加速度
扩张连接	>0	>0	$0.8 \leq T < 1.2$	经济发展与碳排放量增加保持相对同步增长趋势
弱脱钩	>0	>0	$0 \leq T < 0.8$	经济水平提高速度要大于碳排放量增加速度

1.3 数据来源

本文使用的数据主要包括碳排放数据及社会经济统计数据。碳排放数据来源于 2008~2017 年的中国碳核算数据库 CEADs 中的县域单元碳排放数据 (<https://www.ceads.net.cn/data/county/>)，该数据集是由粒子群优化-反向传播 (PSO-BP) 算法统一 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 卫星图像的规模，估算得到县的 CO₂ 排放量^[30]。各区县的 GDP 数据来源于《湖北统计年鉴》(2009-2018 年)、湖北省各市统计年鉴(2009-2018 年)，并对部分数据缺失年份利用 Stata 16 软件进行线性插值。此外，各市的数据由县级数据汇总得到，武汉城市圈的总量数据由各市的数据汇总得到。为了消除通货膨胀的影响，以 2008 年为基期对历年国内生产总值进行不变价处理。

2 不同尺度的碳排放时空演化特征

2.1 城市圈尺度：碳排放总量逐渐趋于稳定

武汉城市圈碳排放总量前期不断增加，之后便在一定水平上略微浮动、保持相对稳定。2008~2012 年武汉城市圈碳排放总量不断增加，主要是因为二三产业比重不断增加、三次产业结构趋向合理，此外，湖北省利用中央批准武汉城市圈“两型社会”（即资源节约型和环境友好型）综合配套改革试验区的机遇，策划和启动了一批重大项目，促进了经济的平稳增长。2012~2014 年武汉城市圈碳排放总量先减少、后增加至最大值，之后“十二五”期间继续调整优化经济结构、节能减排、淘汰落后产能及武汉城市圈碳排放交易试点改革等措施成效显著，2014~2017 年武汉城市圈碳排放总量也随之有所降低(图 2)。

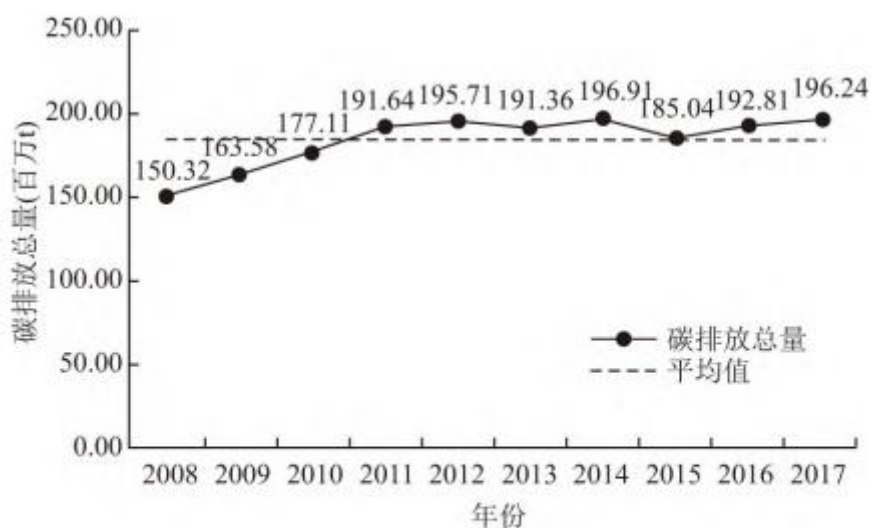


图 2 2008~2017 年武汉城市圈碳排放总量变化

Fig. 2 Change in total carbon emissions of Wuhan City Circle

2.2 市级尺度：各市碳排放水平趋于平稳

各市碳排放水平均已趋于平稳，武汉、黄冈、孝感的碳排放量高于武汉城市圈 9 市的平均值，其中，武汉碳排放量远高于其他 8 个市。2008~2012 年，武汉城市圈 9 市经济发展较快，各市碳排放量均在不断增加。2012~2014 年，武汉、黄石、天门、潜江 4 市的碳排放量有略微降低，其他 5 市的碳排放量则略微增加，主要是因为武汉市于 2012 年被确定为第二批国家低碳试点城市，随后《武汉市低碳城市试点工作实施方案》也经国家发改委同意，此外，武汉市的能源消费结构有一定程度改善，能源使用效率有一定提高。2014~2017 年，黄冈、孝感、天门、仙桃 4 市的碳排放量均有小幅度下降，其他 5 市的碳排放量仅在小幅度增加，可能与武汉城市圈碳排放交易试点示范的加快推进有关(图 3、图 4)。

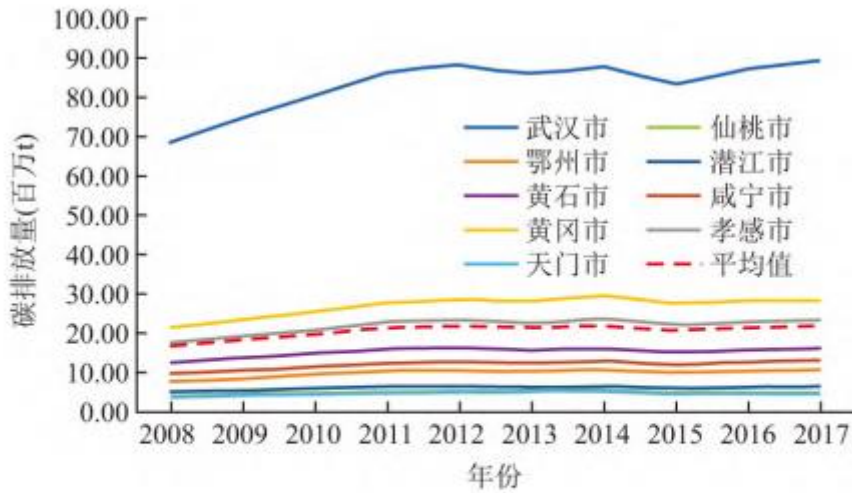


图3 2008~2017年9市碳排放量及平均值变化
Fig. 3 Carbon emissions and average change in nine cities

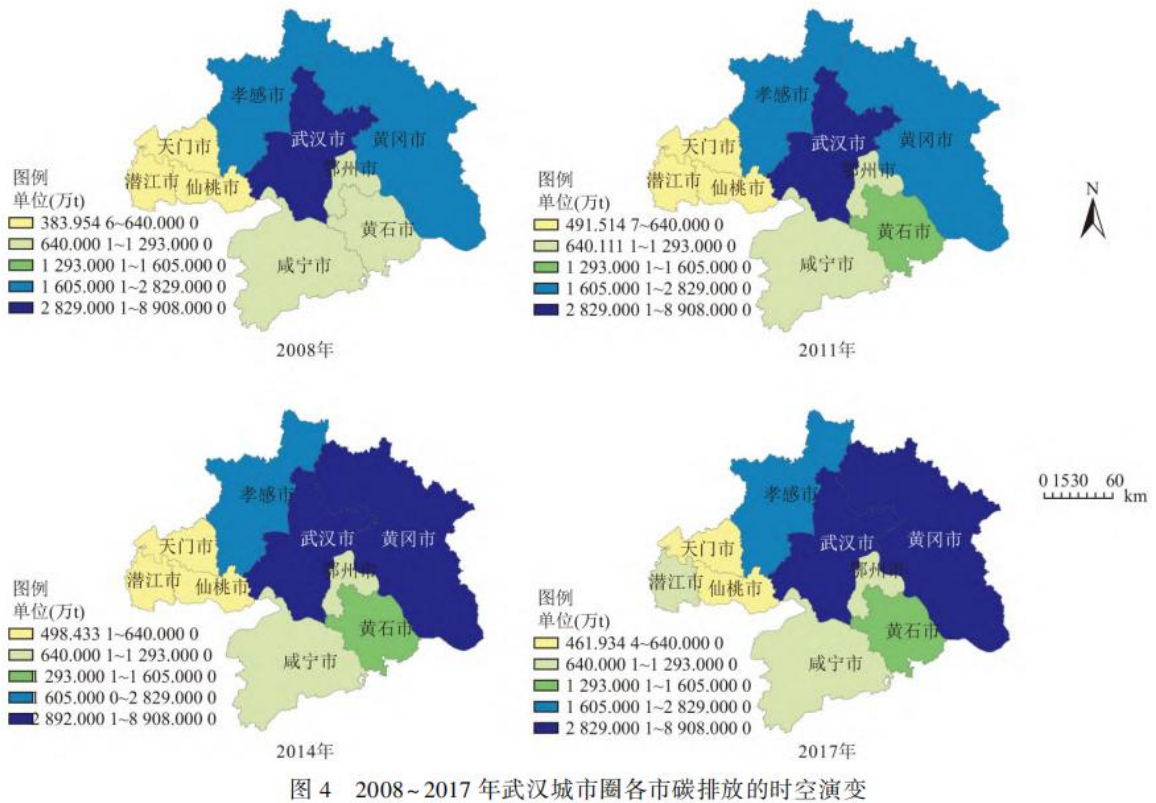


图4 2008~2017年武汉城市圈各市碳排放的时空演变
Fig. 4 Temporal and spatial evolution of carbon emissions in cities of Wuhan City Circle from 2008 to 2017

四个年份的武汉城市圈各市碳排放全局 Moran' s I 指数均大于 0, 但 p 值均未通过显著性检验, 表明四个年份武汉城市圈的碳排放均呈现出不显著的空间正相关关系(表 2)。此外, 从 2008 到 2014 年, Moran' s I 的值逐渐增大, 碳排放的空间相

关性逐渐增强，从 2014 到 2017 年，碳排放的空间相关性则保持在较为稳定的水平。

表 2 2008~2017 年武汉城市圈各市碳排放的全局 Moran' s I 指数

年份	Moran I 指数	方差	Z 得分	P 值	结果
2008	0.021 1	0.032 4	0.811 3	0.417 2	不显著的正相关
2011	0.038 4	0.033 5	0.892 4	0.372 2	不显著的正相关
2014	0.043 7	0.035 2	0.899 1	0.368 6	不显著的正相关
2017	0.041 3	0.033 3	0.911 3	0.362 1	不显著的正相关

2.3 县级尺度：碳排放呈明显圈层分布特征

武汉城市圈碳排放的空间分布格局逐渐趋于稳定，并呈现出显著的圈层分布特征(图 5)。武汉城市圈紧密圈层区县的碳排放量普遍较高，核心圈层、外围圈层区县的碳排放量普遍相对较低，碳排放的圈层分布特征十分明显。此外，碳排放水平高的区县主要以中心城市武汉及其相邻的区县为主，伴随着经济的发展和人口的集聚，相应的能源需求不断提升^[31]，中心城市区县的碳排放水平也逐步上升，武汉城市圈碳排放的“核心-边缘”结构愈发明显。同时，碳排放水平高的区县具体集中在武汉市辖区内、中心城区以外，主要包括洪山区、江夏区、蔡甸区、东西湖区、黄陂区、新洲区，与光谷副城、车谷副城、临空经济区副城、长江新区副城“四副”的格局一致，表明其与制造业的分布可能有紧密的联系。

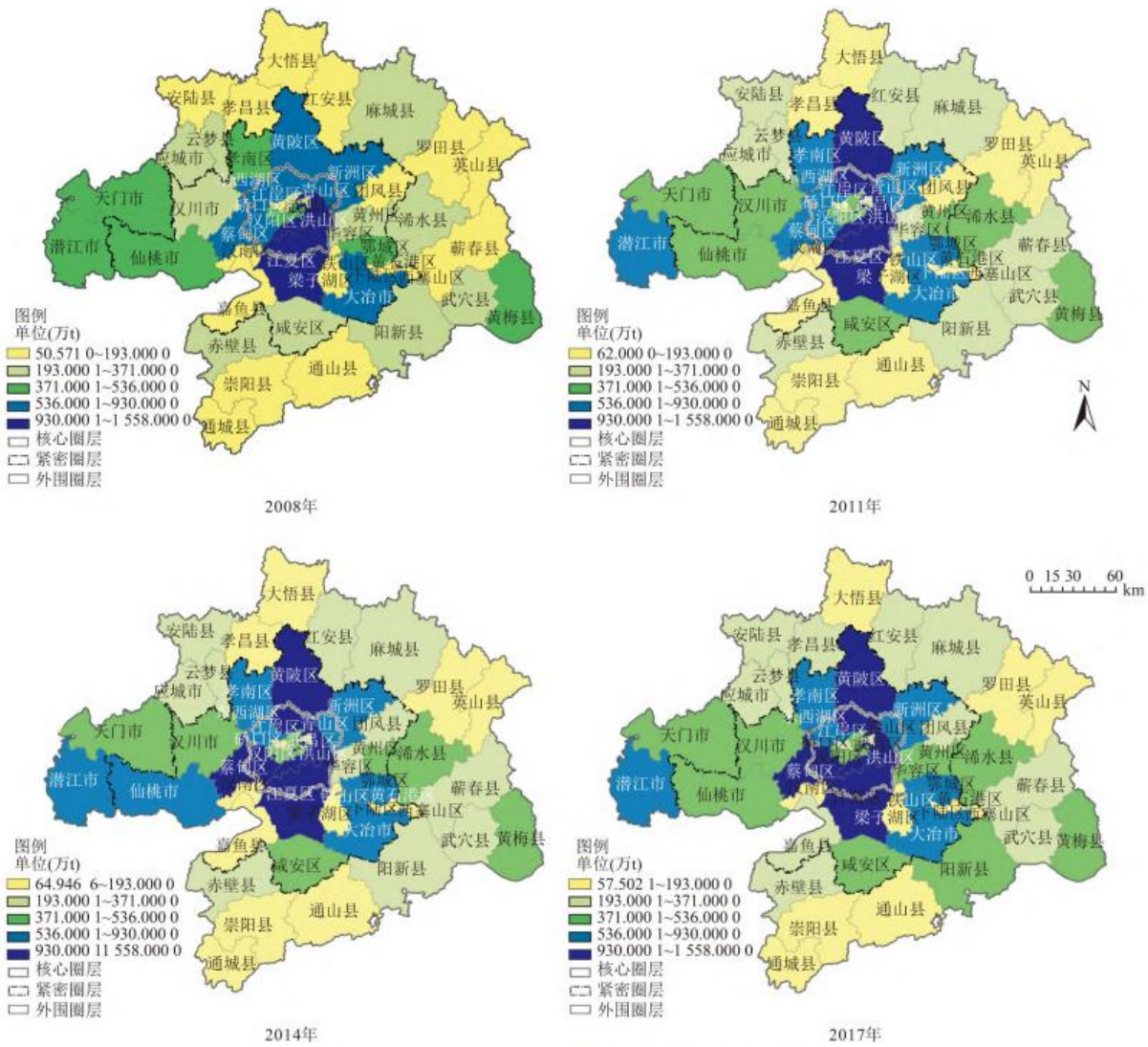


图5 2008~2017年武汉城市圈县域碳排放的时空演变

Fig. 5 Temporal and spatial evolution of carbon emissions in counties of Wuhan City Circle from 2008 to 2017

采用全局自相关的Moran's I指数来检验武汉城市圈区县碳排放的空间相关性,并用LISA图分析县域碳排放放在局部空间上的集聚和分散情况。2008~2017年武汉城市圈县域碳排放的空间相关性不断减弱,从2008年的0.0892降至2017年的0.0384, Moran's I指数虽然都大于零,但均未通过显著性检验(表3),这与市级尺度武汉城市圈碳排放的空间相关性先逐渐增强、后保持在较平稳水平的演化特征有所差异,也表明了市、县尺度武汉城市圈碳排放的空间异质性呈现出不同的空间格局特征。进一步采用聚类和异常值分析,发现高-高集聚(HH)由最初的均集中在武汉市而不断弱化,最终只分布于武汉市的武昌区。低-低集聚(LL)的分布则较为稳定,为黄冈市的罗田县。高-低离散(HL)类型的分布也较为稳定,集中在黄石市与鄂州市(图6)。低-高离散(LH)类型则由最初武汉市的青山区,转变为武汉市的青山区及汉南区。

表3 2008~2017年武汉城市圈县域碳排放的全局Moran's I指数

年份	Moran I 指数	方差	Z 得分	P 值	结果
2008	0.089 2	0.006 8	1.345 1	0.178 6	不显著的正相关

2011	0.066 2	0.006 8	1.061 2	0.288 6	不显著的正相关
2014	0.052 4	0.006 8	0.893 9	0.371 4	不显著的正相关
2017	0.038 4	0.006 8	0.722 7	0.469 8	不显著的正相关

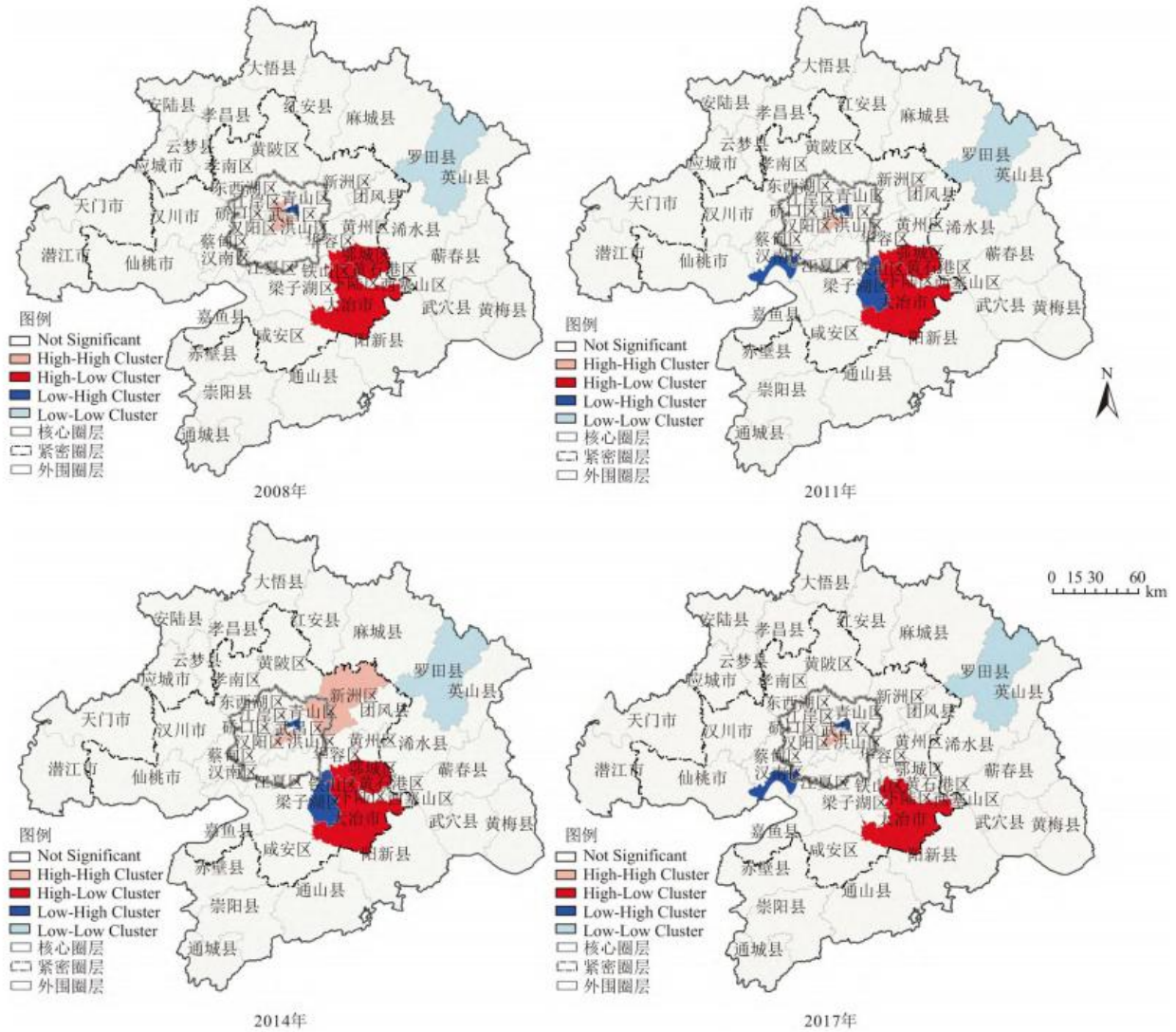


图 6 2008~2017 年武汉城市圈县域碳排放空间集聚分析

Fig. 6 Analysis on spatial agglomeration of carbon emissions in counties of Wuhan City Circle

采用标准差椭圆和重心移动轨迹来分析武汉城市圈碳排放时空演变的中心性、延展性及方向性，具体结果如图 7 与表 4 所示。在重心轨迹方面，四个时间截面武汉城市圈碳排放的空间重心始终位于武汉市洪山区内。武汉市是武汉城市圈的中心城市，经济总量及人口规模均居首位，洪山区是《武汉市国土空间总体规划(2021-2035)》提出的“一主四副”市域城镇空间格局中光谷副城的重要组成部分，其北部相邻的黄陂区、新洲区及南部相邻的江夏区、蔡甸区，分别隶属于“四大副城”中的长江新城、光谷副城及车谷副城，碳排放量均较高。在标准差椭圆方面，从标准差椭圆的旋转角来看，2008 年旋转角为 102.29°，武汉城市圈碳排放基本呈西北-东南的空间分布格局，2017 年旋转角为 102.52°，空间分布格局并无明显变化。从标准差椭圆的空间范

围来看，四个时间截面的武汉城市圈标准差椭圆基本重合，北至黄陂区，南抵咸安区，西到汉川市，东达浠水县，要素分布的集中程度并无明显变化。

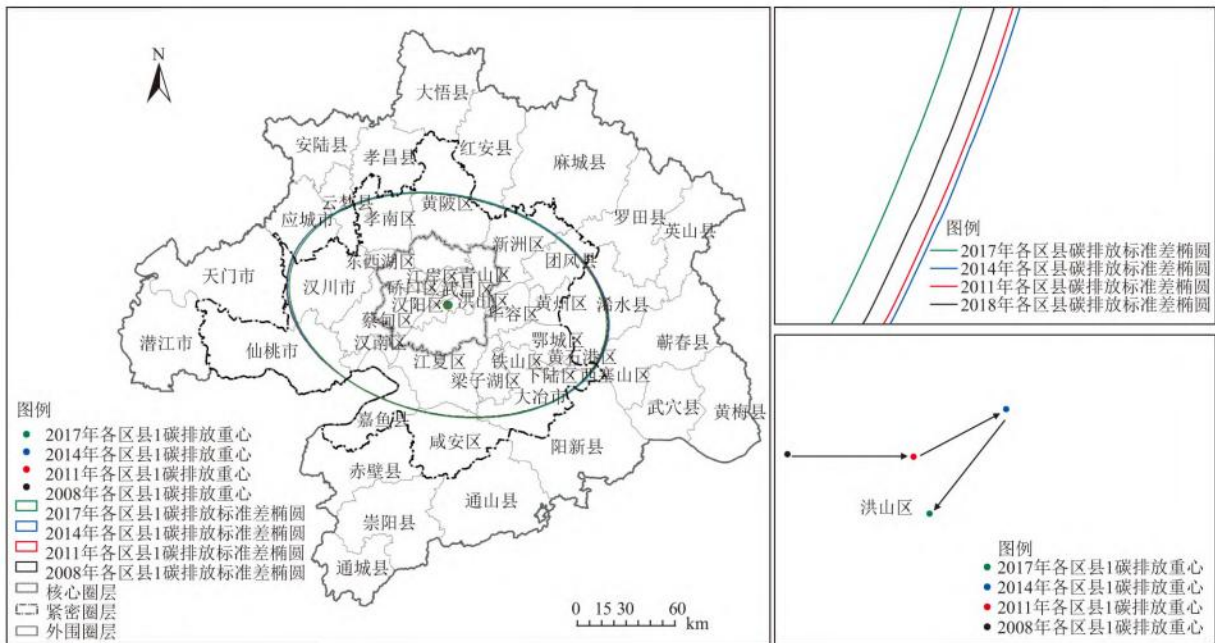


图 7 武汉城市圈区县碳排放的标准差椭圆及重心轨迹

Fig. 7 Standard deviation ellipse and gravity center trajectory of carbon emissions in Wuhan City Circle

表 4 武汉城市圈区县碳排放的标准差椭圆参数

年份	长轴标准差 (km)	短轴标准差 (km)	面积 (km ²)	旋转角 (°)
2008	59.30	88.97	16 573.42	102.29
2011	59.59	89.09	16 677.38	102.41
2014	59.71	89.07	16 705.63	102.42
2017	59.53	87.93	16 442.49	102.52

3 不同尺度碳排放与经济增长的脱钩状态

3.1 城市圈尺度：由弱脱钩向强脱钩转变

2008~2017 年武汉城市圈经济增长与碳排放量的脱钩趋势总体向好，出现的脱钩类型有弱脱钩与强脱钩两种、且主要以弱脱钩为主，但已在向强脱钩状态转变。2008~2011、2011~2014 年两阶段均表现为弱脱钩，即经济发展水平与碳排放水平均在提高，但经济发展水平提高速度要大于碳排放量增加速度。2014~2017 年武汉城市圈的脱钩状态则变为强脱钩，即经济发展水平提高、碳排放量降低，达到脱钩关系中最好的状态(表 5)。主要是因为湖北省于 2010 年被确定为第一批国家低碳试点省区，并于 2013 年印发《湖北省低碳发展规划(2011-2015 年)》，此外，“十二五”期间，湖北省在保持经济稳增长的同时，不断调整

优化经济结构、加快转变发展方式，出台了传统工业改造提升、高新技术产业和战略性新兴产业培育、现代服务业发展等一系列政策措施来促进结构升级，顺利完成淘汰落后产能和关停“五小”企业任务，并使单位 GDP 能耗不断下降，同时，武汉城市圈碳排放权交易试点示范也在稳步推进。

表 5 武汉城市圈 2008~2018 年脱钩状态演变

年份	碳排放变化率	GDP 变化率	脱钩指数	脱钩状态
2008~2011	0.274 9	0.492 8	0.557 8	弱脱钩
2011~2014	0.027 5	0.350 5	0.078 6	弱脱钩
2014~2017	-0.003 4	0.258 8	-0.013 2	强脱钩

3.2 市级尺度：部分市由弱脱钩向强脱钩转变

在市级层面，各市经济增长与碳排放量的变化幅度保持着良好的脱钩状态，且部分市已实现由弱脱钩向强脱钩的转变。2008~2011、2011~2014 年间，武汉城市圈 9 市经济增长与碳排放量变化幅度之间的关系均为弱脱钩状态，即经济与碳排放量均在增长，且经济水平提高速度要大于碳排放量增加速度。2014~2017 年间，天门、仙桃、孝感、黄冈 4 市已经由弱脱钩状态转变为强脱钩状态，即经济水平提高、碳排放量不断降低。相比武汉城市圈尺度 2014~2017 年经济发展与碳排放的强脱钩，强脱钩城市除与武汉城市圈尺度脱钩状态具有一致性的同时，因不同城市经济增长幅度与能源消费特征的差异，也具有城市圈内部的差异性(图 8)。

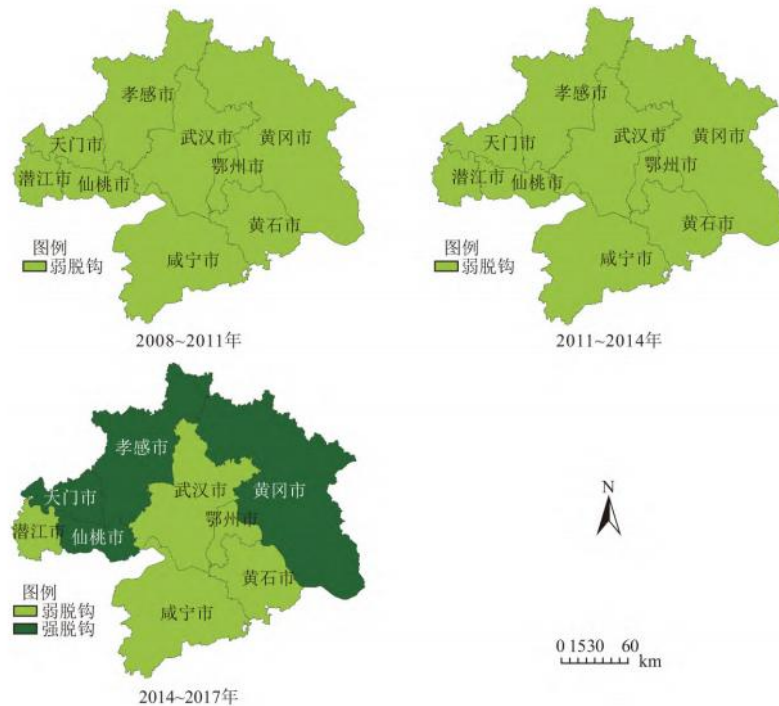


图 8 2008~2017 年武汉城市圈各市经济发展与碳排放的脱钩状态

Fig. 8 Decoupling state of economic development and carbon emissions in cities of Wuhan City Circle

3.3 县级尺度：脱钩状态的圈层特征已显现

在区县层面，武汉城市圈脱钩状态的圈层特征已经显现，经济增长与碳排放强脱钩的区县主要位于武汉城市圈的核心圈层与外围圈层，弱脱钩区县主要位于紧密圈层，表明核心圈层、外围圈层的经济水平不断提高且碳排放量不断降低，呈现良好的绿色发展态势。利用脱钩弹性指数模型方法，以武汉城市圈所辖区县作为研究单元，定量分析武汉城市圈 2008~2011、2011~2014、2014~2017 年间经济增长与碳排放水平之间的脱钩关系。在 2008~2011 年间，弱脱钩是武汉城市圈区县的主要脱钩状态，各区县经济与碳排放量均在不断增长，但是绝大部分区县的经济增长速度要大于碳排放量的增加速度，其经济增长与碳排放量变化之间表现出良好的耦合关系；华容区、红安县、罗田县的经济发展与碳排放量增加则保持相对同步增长的趋势。在 2011~2014 年间，武汉中心城区的江岸区、硚口区、汉阳区、武昌区、青山区以及外围圈层的一些区县等由弱脱钩状态转变为强脱钩状态，表明上述区县在经济增长的过程中、碳排放量在不断降低，呈现绿色发展的良好态势；上述特征可能主要与 2012 年武汉市被确定为全国第二批低碳试点城市，并编制低碳发展规划、制定相应配套政策等有紧密联系。在 2014~2017 年间，武汉城市圈脱钩状态的圈层特征已经显现，经济增长与碳排放之间强脱钩的区县主要位于武汉城市圈的核心圈层与外围圈层，表明在此期间核心圈层与外围圈层的经济水平不断提高、碳排放量不断降低，建议未来的发展依旧保持此良好态势，从而保证绿色高质量发展；此外，汉南区的脱钩状态为扩张负脱钩，即经济与碳排放量均在增长，但是经济发展水平提高速度小于碳排放量增加速度，嘉鱼县的经济增长幅度与碳排放量增加幅度则相对同步(图 9)。

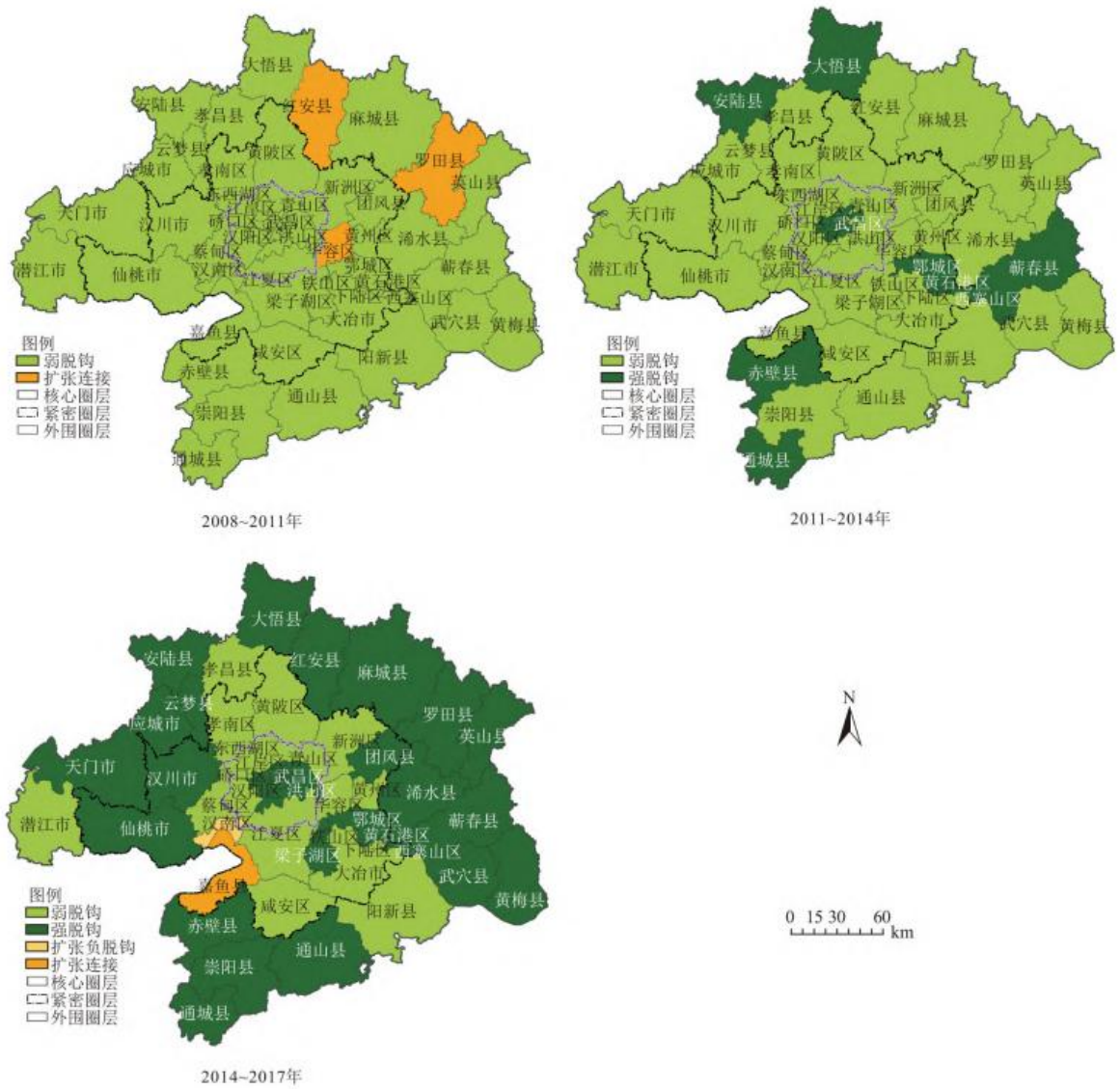


图9 2008~2017年武汉城市圈各区县经济增长与碳排放的脱钩状态
 Fig. 9 Decoupling state of economic growth and carbon emissions in counties of Wuhan City Circle

武汉城市圈区县层面脱钩指数分布呈现趋向集聚的空间演化特征。利用全局自相关分析计算武汉城市圈区县层面脱钩指数的全局Moran's I值,结果表明2008~2011年的县域碳排放脱钩指数在空间上呈现不显著的正相关,而2011~2014、2014~2017年县域碳排放的脱钩指数则呈现出显著的正相关关系(表6),空间集聚特征不断加强,这基本与武汉市低碳试点城市、武汉城市圈碳排放权交易试点及“十二五”、“十三五”期间产业结构的持续优化调整等相契合。

表6 2008~2017年武汉城市圈县域碳排放脱钩指数的全局Moran's I指数

年份	Moran I 指数	方差	Z 得分	P 值	结果
2008~2011	0.113 2	0.006 7	1.639 5	0.101 1	不显著的正相关

2011~2014	0.338 1	0.006 7	4.381 1	0.000 0	显著正相关
2014~2017	0.115 6	0.006 4	1.706 4	0.087 9	显著正相关

4 结论与政策建议

4.1 结论与讨论

本文利用 2008~2017 年武汉城市圈 48 个区县的碳排放数据和空间自相关、标准差椭圆等方法，从城市圈、市级、县级三个尺度来对武汉城市圈碳排放的时空演化特征进行分析，并运用 Tapio 脱钩模型来研究不同尺度下经济增长与碳排放之间的脱钩状态。主要结论如下：

(1) 在城市圈尺度，碳排放总量逐渐趋于稳定，经济增长与碳排放之间的关系已经由弱脱钩向强脱钩转变。2008~2012 年武汉城市圈碳排放总量不断增加，2012~2014 年武汉城市圈碳排放总量先减少、后增加至最大值，之后便有所降低。此外，2008~2011、2011~2014 年两阶段武汉城市圈经济增长与碳排放之间的关系均表现为弱脱钩，2014~2017 年武汉城市圈的脱钩状态则变为强脱钩。

(2) 在市级尺度，各市碳排放水平趋于平稳，部分市经济增长与碳排放之间的关系已经由弱脱钩向强脱钩转变。2008~2012 年，武汉城市圈 9 市碳排放量均在不断增加，2012~2014 年武汉、黄石、天门、潜江 4 市的碳排放量有略微降低，其他 5 市的碳排放量则略微增加，2014~2017 年，黄冈、孝感、天门、仙桃 4 市的碳排放量均有小幅度下降，其他 5 市的碳排放量仅在小幅度增加。2008~2011、2011~2014 年间，武汉城市圈 9 市经济增长与碳排放量变化幅度之间的关系均为弱脱钩状态，2014~2017 年间，天门、仙桃、孝感、黄冈 4 市已经由弱脱钩状态转变为强脱钩状态。

(3) 在县级尺度，碳排放呈明显圈层分布，脱钩状态的圈层特征也已经显现。武汉城市圈紧密圈层区县的碳排放量普遍较高，核心圈层、外围圈层区县的碳排放量普遍相对较低，碳排放的圈层分布特征十分明显。在 2008~2011 年间，弱脱钩是武汉城市圈区县的主要脱钩状态，在 2011~2014 年间，武汉中心城区的江岸区、硚口区、汉阳区、武昌区、青山区以及外围圈层的一些区县等由弱脱钩状态转变为强脱钩状态，在 2014~2017 年间，武汉城市圈脱钩状态的圈层特征已显现，经济增长与碳排放的强脱钩区县主要位于武汉城市圈的核心圈层与外围圈层。

然而，当前 CEADs 县级尺度碳排放数据库只更新至 2017 年，无法对 2017 年至今武汉城市圈碳排放的演化特征及脱钩状态进行分析，这也是本文研究的不足之处。未来的研究可结合历年土地利用、能源消耗量等多源数据来更进相关研究。

4.2 政策建议

(1) 武汉城市圈紧密圈层的碳排放量最高且还在增加，但其经济增长与碳排放之间的协调发展程度不如核心圈层及外围圈层，因此，要实现武汉城市圈的高质量一体化发展，就要注重推进紧密圈层经济增长与碳排放之间的关系向强脱钩转变，相应各区县应不断提高能源利用效率、促进碳排放权交易、鼓励公共交通出行及倡导低碳生活理念等，从而减少碳排放量，实现三个圈层的绿色协调发展。

(2) 需推动鄂州副中心由弱脱钩向强脱钩转变，增强对周边的带动作用。已有研究将武汉城市圈划分为三级联系片区，即武汉、鄂州分别为主副中心，黄石、孝感、黄冈为集聚—辐射中心片区，其余城市为次级核心城市[32]。然而，根据前述分析结果来看，鄂州副中心经济发展与碳排放之间的关系为弱脱钩，即经济增长的同时碳排放量也在增加，且经济水平提高速度要大

于碳排放量增加速度。为了充分发挥武汉城市圈副中心的辐射带动及示范作用，未来，鄂州副中心应从产业结构、交通、建筑节能等方面出发，提高碳排放效率、降低碳排放，从而实现由弱脱钩向强脱钩的转变。

参考文献

- [1] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发长江中游城市群发展“十四五”实施方案的通知[EB/OL]. (2022-02-15) [2022-03-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/16/content_5679303.htm.
- [2] SHEN W, LIANG H, DONG L, et al. Synergistic CO₂ reduction effects in Chinese urban agglomerations: Perspectives from social network analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798:149352.
- [3] 王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰[J]. *科学通报*, 2022, 67(7):670-684. WANG S J, MO H B, FANG C L. Carbon emissions dynamic simulation and its peak of cities in the Pearl River Delta Urban Agglomeration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(7):670-684.
- [4] 王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素[J]. *地理学报*, 2018, 73(3):414-428. WANG S J, SU Y X, ZHAO Y B. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3):414-428.
- [5] 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[J]. *地理学报*, 2019, 74(6):1131-1148. WANG S J, HUANG Y Y. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6):1131-1148.
- [6] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. *地理学报*, 2020, 75(6):1316-1330. WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6):1316-1330.
- [7] 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.
- [8] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(12):1999-2010. WANG R, ZHANG H, QIANG W L, et al. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in County-level Cities of China based on urbanization[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(12):1999-2010.
- [9] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. *地理学报*, 2014, 69(10):1425-1437. ZHAO R Q, ZHANG S, HUANG X J, et al. Spatial variation of carbon budget and carbon balance zoning of Central Plains Economic Region at County-level[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10):1425-1437.
- [10] 王杰, 李治国, 谷继建. 金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于Tapio脱钩和LMDI模型的分析[J]. *世界地理研究*, 2021, 30(3):501-508. WANG J, LI Z G, GU J J. Decoupling analysis between energy consumption and economic growth in BRICS countries: Based on Tapio decoupling and LMDI model analysis[J]. *World Regional Studies*, 2021, 30(3):501-508.

-
- [11] 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.
- [12] 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]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(2):114-120.
- [13] 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.
- [14] 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. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1):206-222.
- [15] 安悦, 谭雪兰, 蒋凌霄, 等. 中国乡村贫困多尺度研究理论框架及对乡村振兴的启示[J]. 经济地理, 2022, 42(4):150-158, 201. AN Y, TAN X L, JIANG L X, et al. The theoretical framework of multi-scale research on rural poverty in China and its enlightenment to rural revitalization[J]. Economic Geography, 2022, 42(4):150-158, 201.
- [16] 崔玮, 苗建军, 邹伟. 武汉城市圈土地利用空间关联的碳排放效率及其收敛性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(12):1824-1831. CUI W, MIAO J J, ZOU W. Carbon emission efficiency of spatial association and its convergence of land use in Wuhan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(12):1824-1831.
- [17] 杨欣, 蔡银莺, 张安录. 武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究——基于 2001-2009 年市级面板数据的实证[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11):1389-1396. YANG X, CAI Y Y, ZHANG A L. Spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban circle from 2001 to 2009[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11):1389-1396.
- [18] 张俊峰, 张安录, 董捷. 武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5):595-602. ZHANG J F, ZHANG A L, DONG J. Carbon emission effect of land use and influencing factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(5):595-602.
- [19] 李璐, 董捷, 徐磊, 等. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区——以武汉城市圈为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5):1003-1015. LI L, DONG J, XU L, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A case study of Wuhan Urban Agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5):1003-1015.
- [20] 董捷, 魏旭华, 陈恩. 土地利用碳排放地域差异下减排责任分摊研究——以武汉城市圈为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4):872-882. DONG J, WEI X H, CHEN E. Research on the liability sharing of carbon emission reduction under the regional difference of land use carbon emission: A case study in Wuhan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4):872-882.

-
- [21] 吴挺可,王智勇,黄亚平,等.武汉城市圈的圈层聚散特征与引导策略研究[J].规划师,2020,36(4):21-28. WU T K, WANG Z Y, HUANG Y P, et al. Characters of agglomeration and diffusion of Wuhan metropolitan circles and its guiding strategies[J]. Planners, 2020, 36(4):21-28.
- [22] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J]. 经济地理, 2020, 40(12):12-21. LYU Q, LIU H B. Multiscale spatio-temporal characteristics of carbon emission of energy consumption in Yellow River Basin based on the nighttime light datasets[J]. Economic Geography, 2020, 40(12):12-21.
- [23] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究[J]. 地理科学, 2021, 41(11):1917-1924. LIU H J, SHAO M J, JI Y M. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on County carbon emission data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(11):1917-1924.
- [24] 白冰, 赵作权, 张佩. 中国南北区域经济空间融合发展的趋势与布局[J]. 经济地理, 2021, 41(2):1-10. BAI B, ZHAO Z Q, ZHANG P. Trends and layout of economic integration between north and South China[J]. Economic Geography, 2021, 41(2):1-10.
- [25] 宋梅, 郝旭光, 柳君波. 黄河流域碳均衡时空演化特征与经济增长脱钩效应研究[J]. 城市问题, 2021(7):91-103. SONG M, HAO X G, LIU J B. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon balance and decoupling effect of economic growth in the Yellow River Basin[J]. Urban Problems, 2021(7):91-103.
- [26] 孙睿. Tapio 脱钩指数测算方法的改进及其应用[J]. 技术经济与管理研究, 2014(8):7-11. SUN R. Improving tapio decoupling measurement method and its applications[J]. Technoeconomics & Management Research, 2014(8):7-11.
- [27] 王杰, 李治国, 谷继建. 金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的分析[J]. 世界地理研究, 2021, 30(3):501-508. WANG J, LI Z G, GU J J. Decoupling analysis between energy consumption and economic growth in BRICS countries: Based on Tapio decoupling and LMDI model analysis[J]. World Regional Studies, 2021, 30(3):501-508.
- [28] 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.
- [29] 王翔宇, 高培超, 宋长青, 等. 不同尺度下城市用地扩张与经济增长的脱钩关系——以山东省为例[J]. 经济地理, 2021, 41(3):97-104, 125. WANG X Y, GAO P C, SONG C Q, et al. Decoupling analysis between urban land expansion and economic growth at the different scale: A case study of Shandong Province in China[J]. Economic Geography, 2021, 41(3):97-104, 125.
- [30] CHEN J, GAO M, CHENG S, et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017[J]. Scientific Data, 2020, 7:391.
- [31] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12):3103-3118. WANG S J, XIE Z H, WANG Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO₂ emissions at the County level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12):3103-3118.

[32] 王逸舟, 王海军, 张彬, 等. 基于多维要素流视角的城市群网络结构及影响因素分析——以武汉城市圈为例[J]. 经济地理, 2021, 41(6):68-76. WANG Y Z, WANG H J, ZHANG B, et al. Analysis on the network structure of urban agglomeration and its influencing factors based on the perspective of multi-dimensional feature flow: Taking Wuhan urban agglomeration as an example[J]. Economic Geography, 2021, 41(6):68-76.