

江西省城市化与大气颗粒物污染的 时空特征及耦合协调关系

阳海鸥¹ 廖玲莉¹ 冷清明²¹

(1. 九江学院 旅游与地理学院, 江西 九江 332005;

2 九江学院 计算机与大数据科学学院, 江西 九江 332005)

【摘要】 基于江西省 11 个地级市 2015~2019 年数据, 利用空间自相关法分析城市化和大气颗粒物时空分布特征, 构造耦合协调度模型探究二者动态关系。结果表明: (1) 2015~2019 年全省城市化综合水平稳步上升, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度先升高后降低。(2) 城市化综合水平空间离散特征显著, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 自 2016 年起具有空间集聚特征, 城市化综合水平、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的局部自相关特征高度一致, 呈“西北高, 东南低”格局。(3) 2015~2019 年城市化与大气环境的耦合协调度整体提高, 城市化往大气环境友好型发展, 11 个地级市耦合协调度提升差异显著, 部分地市仍有较大提升空间; 耦合协调度具有空间离散特征, 以南昌为中心呈“中间高, 四周低”分布格局。江西省会城市南昌实现了城市化与大气环境的良好协调发展, 除南昌以外多数地级市的发展仍以牺牲生态环境为代价, 建议各地级市因地制宜地探索具有区域特色的新型城镇化道路。

【关键词】 城市化 大气颗粒物 空间自相关 耦合协调度

【中图分类号】 X513 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1004-8227(2022)04-0890-13

改革开放以来, 中国的城市化率一直保持快速增长, 由 1978 年的 17.92% 增至 2017 年的 58.5%, 预计 2030 年将超过 70%^[1]。快速城市化进程使得城市人口不断增加, 面积急剧扩大, 工业化进程持续推进, 产生了水体污染、水资源短缺、城市热岛、大气污染等一系列生态环境问题。其中, 大气污染是直接影响人类身体健康的关键生态环境问题^[2,3], 以 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 为主的气溶胶状态污染物由于对人体的呼吸系统、心血管系统等具有严重危害近年来受到全社会的广泛关注, 也成为了学术界研究的热点^[4,5]。厘清区域城市化和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的时空特征及二者的关系, 对于促进区域新型城镇化、保障区域生态安全、推进可持续发展具有重要意义^[6]。

城市化与生态环境之间存在复杂的胁迫关系, 协调二者的关系是世界性难题^[7,8]。早在 20 世纪 90 年代, Grossman 等^[9]就提出城市环境污染首先随着经济水平提高越来越严重, 当经济水平达到一定限值后环境污染程度会降低, 城市生态环境呈倒“U”型演变。这一规律被称之为环境库兹涅茨曲线假说(EKC), 对后续城市化与生态环境研究产生了深远影响。目前国内外关于城市化与生态环境系统之间的研究成果颇多, 包括时空演化规律^[10,11]、耦合关系特征^[12,13]、作用机制^[14,15]等。作为直接影响人类身体健康的关键生态环境要素, 大气环境与城市化关系的研究也日益增多。高明等^[16]、黄亚林等^[17]、丁镭^[18]发现我国的大气污染程度

¹作者简介: 阳海鸥(1988~), 女, 讲师, 主要研究方向为土地利用、景观生态. E-mail: yanghaiou2007@163.com; 冷清明, E-mail: lengqming@126.com

基金项目: 江西省社会科学基金(20GL42); 江西省教育厅科技项目(GJJ190919); 国家自然科学基金地区项目(62066021)

与城市化水平之间的关系并不完全符合倒“U”型的EKC曲线。吴浪等^[19]、Han等^[20]对城市大气污染物浓度的影响因子进行探究，发现城区人口密度、建成区绿化覆盖率、城市人口和第二产业占比是影响PM_{2.5}分布的主要因子。汪元发等^[21]、李小帆等^[22]分别以湖北和武汉城市圈为例，研究发现城市化水平与大气污染SO₂、NO₂和PM₁₀具有较高关联度，城市化水平提高大气污染更严重。总体来说，城市化与大气污染二者关系的研究仍处于起步阶段，相关理论需要更多实证研究案例支撑。

耦合度是物理学上用于衡量系统或要素之间相互影响程度的指标，有学者在城市化与生态环境关系研究中对耦合度进行改进提出了耦合协调度模型，用于判别一个地区城市化与生态环境的协调程度，揭示系统间的互动关系，此模型一经提出便得到广泛应用^[23, 24, 25, 26]。地理学第一定律指出，所有的事物都是相互联系的，离得越近，彼此之间的联系越强，这种关系被称之为空间自相关。目前，学者们在进行城市化与生态环境关系的研究中，鲜有考虑二者的空间自相关性。然而，经济地理的极化扩散效应和大气环境的区域性分异特征恰恰是这两个领域中最基本的空间特征^[11]。因此，本文以PM_{2.5}和PM₁₀为典型大气污染物，将空间自相关方法与耦合协调度模型结合起来用于城市化与大气环境关系的研究，首先利用空间自相关方法探究以江西省11个地级市城市化与大气颗粒物污染的时空特征，然后构造耦合协调度模型分析城市化与大气环境关系的时空变化。本文主要目的有两点：(1)城市化和大气颗粒物污染的空间自相关特征分别如何？二者是否具有相似性？(2)近年来，江西11个地级市城市化综合水平与大气环境的耦合协调关系如何？有何空间特征？研究结果为江西省城市化与大气环境的协调发展提供有效参考，同时为其他欠发达地区协调二者关系提供借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域

江西，简称“赣”，地处 $24^{\circ} 29' 14'' N \sim 30^{\circ} 04' 41'' N, 113^{\circ} 34' 36'' E \sim 118^{\circ} 28' 58'' E$ ，东与浙江省、福建省相邻，南与广东省接壤，西连湖南省，北毗湖北省、安徽省。全省面积16.69万km²，下辖11个地级市，包括南昌、九江、景德镇、赣州、新余、抚州、萍乡、宜春、吉安、上饶、鹰潭，省会城市为南昌。作为我国中部典型的欠发达地区，近年来随着中部崛起、长江经济带、一带一路等区域发展战略的实施，江西发展势头迅猛。2019年全省实现生产总值24757.5亿元，常住人口4666.1万人，常住人口城镇化率从2009年的43.18%增加到2019年的57.4%，但仍然低于全国平均水平60.6%。快速城镇化的同时，区域内部资源环境问题也日益突出，如何实现城市化与生态环境协调发展是江西省面临的新挑战。

1.2 数据来源与处理

城市化内涵丰富，本文在参考相关文献的基础上^[10, 12, 13, 27]，遵循科学性原则、系统整体性原则、层次性原则、数据可获取性和定性与定量结合原则，形成了人口城市化、经济城市化、空间城市化和社会城市化4个一级指标，城镇人口比重、人均GDP等12个二级指标所构成的城市化综合水平评价指标体系，并采用熵值法进行权重计算。

本文城市化指标数据来源于《江西省统计年鉴(2016-2020)》，各城市《统计年鉴(2016-2020)》和《国民经济和社会发展统计公报(2016-2020)》；大气颗粒物浓度数据来源于江西省生态环境厅，将江西省各地级市空气质量监测站点的PM_{2.5}、PM₁₀日均数据按地级市进行汇总获取各市的年平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

空间自相关可分析同一个变量在不同空间位置上的相关性，是空间域中集聚程度的一种度量^[28, 29]。已有研究表明，经济地理具有明显的极化及扩散效应，生态环境具有明显的区域性分异特征。为了更全面地分析不同地级市的城市化和大气颗粒物的自

相关程度和空间分布状态，本文采用全局空间自相关和局部空间自相关识别城市化和大气颗粒物污染的空间集聚特征。

(1) 全局空间自相关

在本文中反映各个地级市城市化和大气颗粒物空间关联程度的总体特征，采用全局 Moran's I 统计量表示，计算公式如下^[24]：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中： x_i 和 x_j 分别为 i 和 j 地级市城市化或大气颗粒物的观测值； n 为地级市数量； \bar{x} 为观测值的平均值； W_{ij} 为空间权重。Moran's I 指数取值范围为 $-1 \sim 1$ ，其大于 0 表示观测值呈空间正相关性；其小于 0 表示呈空间负相关性。Moran's I 指数绝对值体现空间相关程度的大小，绝对值越大表示空间相关程度越大，反之则越小。

(2) 局部空间自相关

全局空间自相关能揭示观察值在空间上的整体分布情况，但难以探测出集聚的位置所在及区域相关的程度，不能明确指出各地级市之间集聚的结构和特征^[29]。局部空间自相关用于揭示每一个空间单元与邻近单元就某一属性的相关程度，能够进一步展示空间集聚或离散的位置及范围。局部空间自相关一般采用 Moran 散点图反映，Moran 散点图通过 4 个象限表示 HH(高—高)、LL(低—低)、HL(高—低) 和 LH(低—高) 4 种类型。在本文中可以反映城市化和大气颗粒物浓度在哪些地区高哪些地区低或者哪些地区与周围差异大。

1.3.2 耦合协调度模型

耦合是物理学、系统科学等学科中的概念，指两种或两种以上系统相互依赖、相互协调、相互促进的动态关联关系及其最后发展的结果^[8]。有学者根据系统之间耦合关系的相似性对耦合度模型加以改进提出了耦合协调度模型^[10]，目前被广泛应用于城市化与生态环境的关系研究。本文采用耦合协调度模型测度城市化与大气环境的关系，公式如下：

$$C = \{f(U)g(E)/([f(U) + g(E)]/2)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

$$T = \alpha f(U) + \beta g(E) \quad (3)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (4)$$

式中： C 是城市化与大气环境的耦合度； $f(U)$ 、 $g(E)$ 分别代表城市化综合水平和大气环境综合指数； T 是城市化和大气环境的综合协调指数； α 、 β 为指数权重； D 是城市化与大气环境的耦合协调度。对于江西省 11 个地级市而言，城市化发展水平与大气环境重要性相同，所以本文中 $\alpha = \beta = 0.5$ 。借鉴已有成果^[10, 13, 25, 26, 30]，结合江西省实际情况，将江西省城市化综合水平与大气环境的耦合协调类型分为 10 个协调等级（表 1）。

表 1 江西省城市化综合水平与大气环境耦合协调度分类

协调类型	协调等级	耦合协调度 D
失调衰退类	极度失调	$0 < D \leq 0.1$
	严重失调	$0.1 < D \leq 0.2$
	中度失调	$0.2 < D \leq 0.3$
	轻度失调	$0.3 < D \leq 0.4$
过渡类	濒临失调	$0.4 < D \leq 0.5$
	勉强协调	$0.5 < D \leq 0.6$
协调发展类	初级协调	$0.6 < D \leq 0.7$
	中级协调	$0.7 < D \leq 0.8$
	良好协调	$0.8 < D \leq 0.9$
	优质协调	$0.9 < D \leq 1$

2 结果与分析

2.1 江西省城市化与大气颗粒物的时间变化特征

图1展示了2015~2019年江西全省及各地级市城市化综合水平和PM_{2.5}与PM₁₀年均浓度变化情况，由图可知：

(1) 2015~2019年全省及各地级市城市化综合水平稳步上升。全省平均城市化综合水平由2015年的37.21%提升到2019年51.85%，说明5年间江西省整体发展速度较快，城市范围不断扩张，非农业人口持续增长，人们生活水平得到提高。不同地级市间城市化综合水平增长速度差异明显。南昌城市化综合水平5年间提升了21个百分点，增长最多，其次是景德镇、赣州、萍乡、宜春、九江、鹰潭，增长14~17个百分点，上饶和吉安增长12个百分点，抚州和新余增长10个百分点，增长最小。

(2) 2015~2019年全省及各地级市PM_{2.5}浓度总体呈先升高后降低的趋势。全省和绝大部分地级市的PM_{2.5}浓度在2017年达到最大值，2018和2019年快速下降。这与国家近年来的空气质量管控措施密切相关。2015年全省年均PM_{2.5}浓度44.45 μg/m³，超过国家空气质量浓度二级标准(35 μg/m³)27.01%，2017年峰值为47.22 μg/m³，2019年PM_{2.5}浓度下降到37.61 μg/m³，仍然超国家空气质量浓度二级标准7.46%。与2015年相比，2019年各地级市的PM_{2.5}浓度均有所下降，下降幅度排序为：萍乡>景德镇>赣州>上饶>抚州>吉安>南昌>九江>宜春>新余>鹰潭。其中，萍乡和景德镇5年来呈连续下降趋势，分别下降17.42和15.67 μg/m³。赣州、抚州、吉安、宜春和新余5市PM_{2.5}浓度均先上升后降低，九江、南昌、鹰潭和上饶4市PM_{2.5}浓度均波动下降。

(3) 2015~2019年全省及各地级市PM₁₀浓度总体呈先升高后降低的趋势，与PM_{2.5}变化趋高度一致。2015年全省年均PM₁₀浓度68.32 μg/m³，符合国家空气质量浓度二级标准(70 μg/m³)，超过一级标准(40 μg/m³)70.8%，2017年峰值为73.72 μg/m³，2019年下降到64.13 μg/m³，超过一级标准60.33%。5年来，吉安和宜春的PM₁₀浓度分别上升11.17和5.42 μg/m³，其他各地级市的PM₁₀浓度均有所下降。其中，萍乡、景德镇、鹰潭和九江的PM₁₀浓度呈连续下降趋势，这4个地级市的PM₁₀浓度下降最多，分别为18.25、15.33、12.08和8.67 μg/m³，其他地级市的PM₁₀浓度下降幅度不大，上饶保持持平。

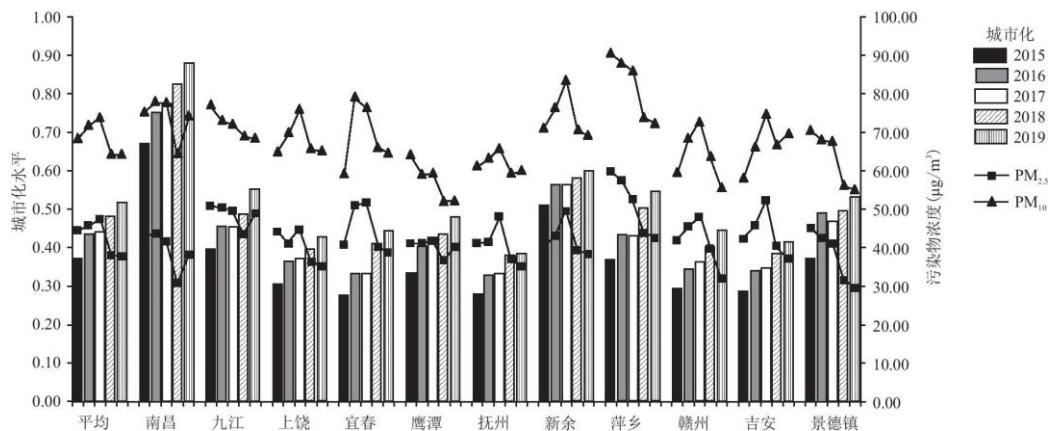


图 1 江西省城市化综合水平和 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的时间变化

2.2 江西省城市化与大气颗粒物的空间分布特征

2.2.1 全局空间自相关

本文基于 GeoDa 软件计算了 2015~2019 年江西省城市化综合水平和 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的全局 Moran' sI 指数，由图 2 可知：

(1) 城市化综合水平具有明显的空间离散特征。2015~2019 年，全局 Moran' sI 指数都在 1% 显著性水平下为负，说明 11 个地级市的城市化综合水平具有较强的负向空间自相关特征，即城市化综合水平高的城市和城市化综合水平低的城市相邻。观察 Moran' sI 曲线的走势，2015~2019 年 Moran' sI 值先降低后升高，总体上较为平稳。2015 年全局 Moran' sI 值为 -0.149，2017 年全局 Moran' sI 值下降到最低值 -0.164，2018 和 2019 年全局 Moran' sI 值有小幅上升，但仍表现为负的空间自相关。

(2) $\text{PM}_{2.5}$ 的空间相关性随时间推移发生着变化，自 2016 年起具有明显空间集聚特征。除 2015 年外，2016~2019 年全局 Moran' sI 指数都在 5% 显著性水平下为正，说明 11 个地级市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有较强的正向空间自相关特征，即 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高的城市、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低的城市分别聚集。观察 Moran' sI 曲线的走势，2015~2019 年 Moran' sI 值先升高后降低，2016 和 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的全局 Moran' sI 值分别为 0.283 和 0.398，表现为显著的正向空间自相关，而 2018 和 2019 年正向空间自相关特征有所减弱。结合 $\text{PM}_{2.5}$ 的时间变化趋势发现， $\text{PM}_{2.5}$ 的空间集聚程度随着其浓度变化而变化，浓度越高集聚特征越明显。

(3) PM_{10} 的空间相关性随时间的变化与 $\text{PM}_{2.5}$ 一致，自 2016 年起具有明显空间集聚特征。2015~2019 年全局 Moran' sI 指数都在 5% 显著性水平下为正，说明 11 个地级市的 PM_{10} 浓度具有较强的正向空间自相关特征，即高浓度的城市、低浓度的城市分别聚集。 PM_{10} 的 Moran' sI 曲线先升高，然后下降到一定水平小幅震荡下降。2016 全局 Moran' sI 值达到最大值 0.211，呈现明显的正向空间自相关，2018 和 2019 年保持在较低的正向空间自相关，空间上仍然呈现集聚格局。 PM_{10} 浓度越高其集聚特征越明显，这一点与 $\text{PM}_{2.5}$ 相似。

2.2.2 局部空间自相关

本文运用 Moran 散点图考察了 11 个地级市 2015~2019 年平均城市化综合水平和平均 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的局部关联特征。图 3 中 4 个象限分别代表空间单元与相邻单元间 4 种形式的空间关系，其中第一象限表示空间单元的属性值高，其邻居单元的属性值也较高；第二象限表示属性值低的空间单元被属性值高的邻居围绕；第三象限表示空间单元及其邻居的属性值均较低；第四象限表示低属性值区域包围着高属性值单元。由图 3 可知：

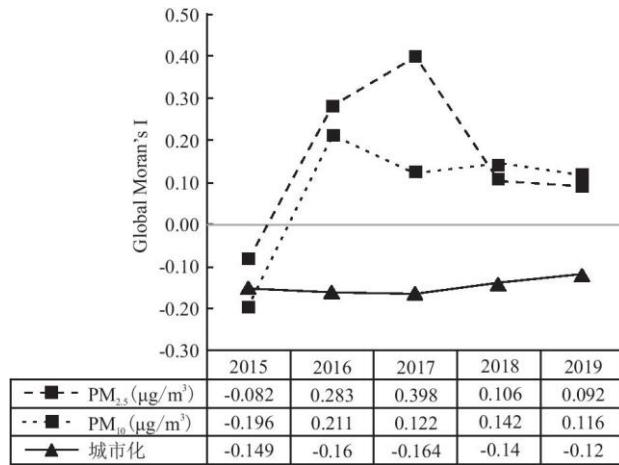


图 2 江西省城市化综合水平和 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的全局自相关变化

(1) 城市化综合水平在空间上呈“西北高东南低”的分布态势。图 3a 城市化综合水平 Moran 散点图中, 第一象限为九江, 是高一高集聚区, 说明九江市城市化综合水平高, 且其周边地区的城市化综合水平也较高, 即赣北在空间上是江西省高城市化综合水平的集聚区域。第三象限为鹰潭、抚州、赣州和吉安, 是低一低集聚区, 表明这 4 个地级市在空间上是江西省低城市化综合水平的集聚区域, 即赣东南是城市化综合水平低值区。宜春和上饶分布在第二象限, 说明这 2 个地级市被城市化综合水平较高的城市包围。南昌、萍乡、景德镇和新余分布在第四象限, 表明这 4 个地级市的城市化综合水平较高, 且被城市化综合水平较低的城市包围。综合可知, 江西省城市化综合水平呈“西北高, 东南低”的空间分布格局。

(2) PM_{2.5} 浓度在空间上呈“西北高东南低”的分布态势。图 3b PM_{2.5} 浓度 Moran 散点图中, 宜春、萍乡和吉安处于第一象限, 是高一高集聚区, 表明这 3 个地级市 PM_{2.5} 浓度高, 且其周边地区的 PM_{2.5} 浓度也较高, 即赣西在空间上是江西省 PM_{2.5} 高污染集聚区域。第三象限为上饶、鹰潭、抚州、赣州和景德镇, 是低一低集聚区, 表明这 5 个地级市在空间上是江西省 PM_{2.5} 低浓度集聚区域, 即赣东和赣南是 PM_{2.5} 浓度低值区。南昌和新余分布在第二象限, 说明这 2 个地级市 PM_{2.5} 浓度低, 被 PM_{2.5} 浓度高的城市包围。赣北的九江分布在第四象限, 表明其本身 PM_{2.5} 浓度高, 被 PM_{2.5} 浓度低的城市包围。综合可知, 江西省 PM_{2.5} 浓度呈“西北高, 东南低”的空间分布格局。

(3) PM₁₀ 浓度在空间上呈“西北高东南低”的分布态势, 与 PM_{2.5} 浓度的局部自相关特征高度一致。图 3c PM₁₀ 浓度 Moran 散点图中, 位于第一象限的有九江和宜春, PM₁₀ 浓度较高, 其周围地区的 PM₁₀ 浓度也较高, 表现为高一高集聚性, 所以, 赣西北是江西省 PM₁₀ 高污染集聚区域。第三象限为鹰潭、抚州和赣州, 是低一低集聚区, 表明这 3 个地级市 PM₁₀ 浓度较低, 其周边地区的 PM₁₀ 浓度也较低, 因此, 鹰潭、抚州和赣州在空间上是江西省 PM₁₀ 低浓度的集聚区域, 即赣东南是 PM₁₀ 浓度低值区。南昌、萍乡和新余分布在第四象限, 表明这 3 个地级市的 PM₁₀ 浓度较高, 且被浓度 PM₁₀ 较低的城市包围。吉安位于第二象限, 说明其 PM₁₀ 浓度较低, 且被浓度 PM₁₀ 较高的城市包围。综合可知, 江西省 PM₁₀ 浓度呈“西北高, 东南低”的空间分布格局。

(4) PM_{2.5} 浓度和 PM₁₀ 浓度的局部空间自相关特征整体一致, 局部有一定差异。由图 3b 和 3c 可知, 鹰潭、抚州、赣州、上饶、景德镇、宜春 6 市位于同一象限, 九江和萍乡位于第一或者第四象限, 变化主要体现在吉安和南昌、新余 3 市。吉安由图 3b 第一象限变为图 3c 第二象限, 南昌和新余由图 3b 第二象限变为图 3c 第四象限。出现这一变化的主要原因在于各个城市 PM_{2.5}/PM₁₀ 比不同。吉安 PM_{2.5}/PM₁₀ 比略高于全省平均值, 而南昌和新余的 PM_{2.5}/PM₁₀ 比显著低于全省平均值。PM_{2.5}/PM₁₀ 比在一定程度上能够反映颗粒物污染的来源与特征(图 4)。PM_{2.5}/PM₁₀ 比低, 说明颗粒物中细颗粒物比例低, 粗颗粒物比例高, 扬尘源贡献高。

通过上述可知, 城市化综合水平和 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度三者的局部自相关特征具有高度一致性, 高一高集聚都在赣西北地区,

低—低集聚都在赣东南地区。

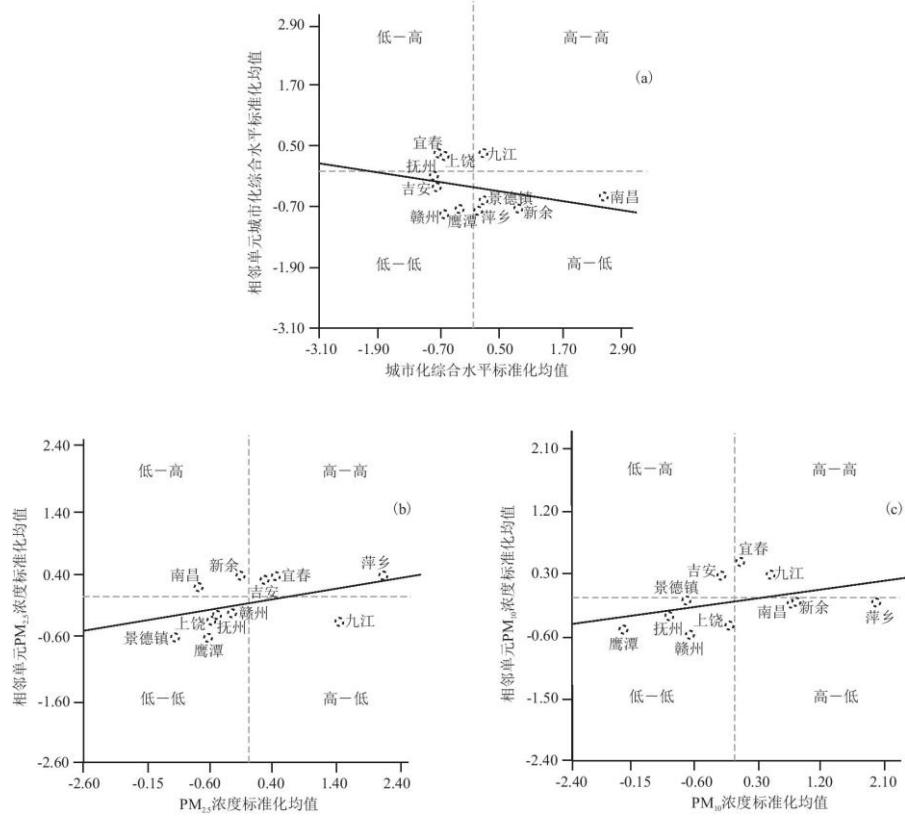


图 3 江西省城市化综合水平(a)和PM_{2.5}(b)、PM₁₀(c)浓度 Moran 散点图

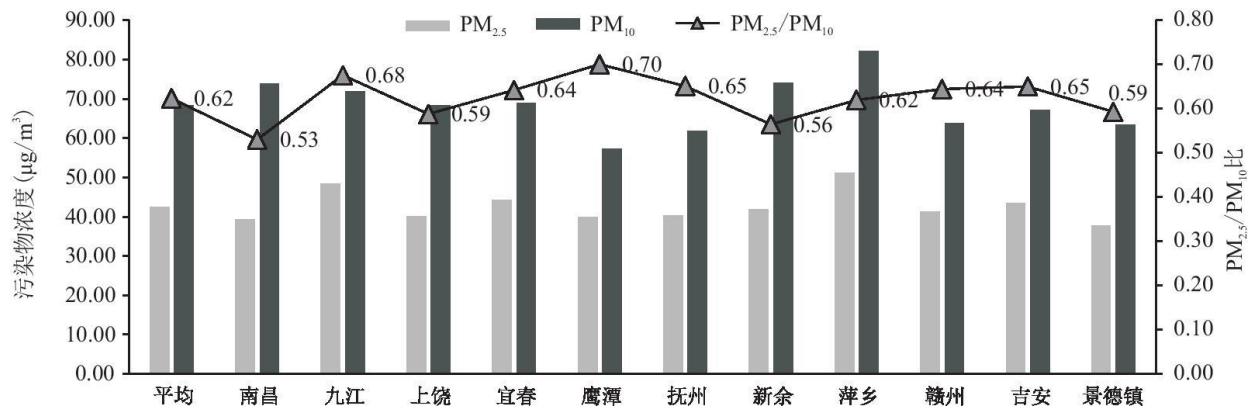


图 4 江西省各地级市年平均PM_{2.5}、PM₁₀及PM_{2.5}/PM₁₀比

2.3 江西省城市化与大气环境耦合协调关系的时空变化

2.3.1 江西省城市化与大气环境耦合协调关系的时间变化特征

进一步将各地级市PM_{2.5}、PM₁₀的年平均值负向标准化综合计算得到大气环境指数，结合城市化综合水平指数，计算各个地级

市城市化综合水平与大气环境的耦合协调度，得到表 2。分析发现：

(1) 2015~2019 年江西省城市化综合水平与大气环境的耦合协调度得到了整体提升，说明 11 个地级市的城市化进程整体正在往大气环境友好型发展，城市化和大气环境显现出协调发展的趋势，但耦合协调度的总体水平仍然不高。2015 年二者的耦合协调度介于 [0.3726, 0.7269] 之间，各地级市平均耦合协调度约为 0.5971，整体处于勉强协调类型；2017 年二者的耦合协调度介于 [0.5025, 0.7670] 之间，各地级市平均耦合协调度约为 0.5993，整体处于勉强协调类型；2019 年二者的耦合协调度介于 [0.6229, 0.8304] 之间，各地级市平均耦合协调度约为 0.7216，整体处于中级协调类型。2019 年，城市化综合水平与大气环境良好协调的城市实现了从无到有的跨越，中级协调的城市数量从 2015 年 2 个增加到 4 个，初级协调由原来 5 个增加到 6 个。说明 5 年来，江西省城市化综合水平与大气环境的耦合协调度整体提高较多，但是初级协调类型的城市仍然占据主导。

表 2 2015~2019 年江西省城市化与大气环境耦合协调发展

城市	指标	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
南昌	城市化综合指数	0.6708	0.7501	0.7740	0.8257	0.8806
	大气环境综合指数	0.4163	0.4039	0.4472	0.7233	0.5399
	耦合协调度	0.7269	0.7419	0.7670	0.8791	0.8304
	耦合协调类型	中级协调	中级协调	中级协调	良好协调	良好协调
赣州	城市化综合指数	0.2927	0.3441	0.3647	0.4015	0.4449
	大气环境综合指数	0.4430	0.3544	0.2967	0.4987	0.6903
	耦合协调度	0.6001	0.5910	0.5736	0.6689	0.7444
	耦合协调类型	初级协调	勉强协调	勉强协调	初级协调	中级协调
抚州	城市化综合指数	0.2795	0.3265	0.3339	0.3647	0.3831
	大气环境综合指数	0.4657	0.4533	0.2947	0.5687	0.6141
	耦合协调度	0.6007	0.6203	0.5601	0.6749	0.6965
	耦合协调类型	初级协调	初级协调	勉强协调	初级协调	初级协调
吉安	城市化综合指数	0.2862	0.3367	0.3476	0.3824	0.4146
	大气环境综合指数	0.4327	0.3483	0.1834	0.4843	0.5626
	耦合协调度	0.5933	0.5852	0.5025	0.6560	0.6950
	耦合协调类型	勉强协调	勉强协调	勉强协调	初级协调	初级协调
景德镇	城市化综合指数	0.3706	0.4899	0.4679	0.4966	0.5315
	大气环境综合指数	0.3627	0.4286	0.4636	0.7047	0.7501
	耦合协调度	0.6055	0.6769	0.6825	0.7692	0.7946

	耦合协调类型	初级协调	初级协调	初级协调	中级协调	中级协调
九江	城市化综合指数	0.3967	0.4555	0.4541	0.4898	0.5535
	大气环境综合指数	0.2226	0.2349	0.2576	0.4039	0.2720
	耦合协调度	0.5451	0.5719	0.5848	0.6669	0.6229
	耦合协调类型	勉强协调	勉强协调	勉强协调	初级协调	初级协调
萍乡	城市化综合指数	0.3696	0.4314	0.4291	0.5037	0.5452
	大气环境综合指数	0.0508	0.0577	0.1813	0.3977	0.4307
	耦合协调度	0.3726	0.3972	0.5281	0.6690	0.6961
	耦合协调类型	轻度失调	轻度失调	勉强协调	初级协调	初级协调
上饶	城市化综合指数	0.3051	0.3646	0.3738	0.3966	0.4267
	大气环境综合指数	0.3895	0.4636	0.3730	0.5832	0.6141
	耦合协调度	0.5871	0.6412	0.6111	0.6935	0.7155
	耦合协调类型	勉强协调	初级协调	初级协调	初级协调	中级协调
新余	城市化综合指数	0.5096	0.5635	0.5638	0.5818	0.6005
	大气环境综合指数	0.4884	0.4163	0.2576	0.5090	0.5358
	耦合协调度	0.7063	0.6959	0.6173	0.7377	0.7531
	耦合协调类型	中级协调	初级协调	初级协调	中级协调	中级协调
宜春	城市化综合指数	0.2775	0.3314	0.3337	0.4088	0.4440
	大气环境综合指数	0.4740	0.2184	0.2019	0.4884	0.5234
	耦合协调度	0.6022	0.5187	0.5095	0.6684	0.6943
	耦合协调类型	初级协调	勉强协调	勉强协调	初级协调	初级协调
鹰潭	城市化综合指数	0.3346	0.4043	0.4107	0.4358	0.4784
	大气环境综合指数	0.4657	0.4636	0.4513	0.5749	0.4884
	耦合协调度	0.6283	0.6580	0.6561	0.7075	0.6952
	耦合协调类型	初级协调	初级协调	初级协调	中级协调	初级协调

(2) 2015~2019年各地级市城市化综合水平与大气环境的耦合协调度提升差异显著，部分地级市的提升空间仍然很大。11个地级市二者耦合协调度提升排序为：萍乡>景德镇>赣州>上饶>南昌>吉安>抚州>宜春>九江>鹰潭>新余。5年间萍乡的耦合协调度提升最多，原因在于城市化发展和大气污染治理的共同作用。2015~2019年萍乡城市化综合水平提升了17.56个百分点，而PM_{2.5}、

PM_{10} 浓度分别下降 17.42 和 $18.25 \mu g/m^3$ 。耦合协调类型由 2015 年的轻度失调类型发展为 2019 年的初级协调类型，但仍然属于省内最低协调水平一类城市。景德镇、赣州、上饶耦合协调度提升原因在于大气颗粒物浓度的大幅下降。南昌耦合协调度的提高主要得益于城市化综合水平提升了 20.98 个百分点。抚州、宜春、九江、鹰潭、新余的耦合协调度变化都小，还有较大提升空间，其城市化综合水平都有 10 个百分点的提高，但是大气颗粒物浓度降低很少或者保持持平，可通过加大大气颗粒物治理力度实现耦合协调度提升。

2.3.2 江西省城市化与大气环境耦合协调关系的空间分布特征

为分析城市化综合水平和大气环境耦合协调度的空间分布特征，本文计算了 2015~2019 年耦合协调度的全局 Moran's I 值，分别为 -0.122, 0.115, 0.0904, -0.122 和 -0.234，2015 年、2018 和 2019 年具有负向空间自相关特征，2016 和 2017 年具有正向空间自相关特征。

其次，本文运用 Moran 散点图考察了 11 个地级市 2015、2017 和 2019 年城市化综合水平和大气环境耦合协调度的局部关联特征（图 5），并利用 ARCGIS 软件进行全省 11 个地级市耦合协调度的空间可视化（图 6）。结果显示：

城市化综合水平和大气环境耦合协调度呈以南昌为中心呈“中间高，四周低”的空间分布格局。2015 和 2019 年，耦合协调度呈负向空间自相关特征。第一象限没有城市分布，说明没有城市本身耦合协调度较高且被耦合协调度高的城市包围。第三象限为萍乡、吉安、宜春，是低—低集聚区，表明赣西在空间上是耦合协调度低水平集聚区域。九江、上饶始终处于第二象限，说明这 2 个地级市的耦合协调度低且被耦合协调度高的城市包围。南昌、新余、景德镇始终位于第四象限，表明这 3 个地级市的耦合协调度较高，且被耦合协调度较低的城市包围。2017 年，绝大多数城市的颗粒物浓度达到最高值，耦合协调度呈较低水平的空间正相关特征。第一象限为上饶和景德镇，这两个城市本身耦合协调度较高且被耦合协调度高的城市包围。第三象限为萍乡、吉安、宜春和赣州，赣西在空间上仍然是耦合协调度低水平集聚区域。九江和抚州位于第二象限，说明这 2 个地级市的耦合协调度低且被耦合协调度高的城市包围。南昌、新余、鹰潭位于第四象限，表明这 3 个地级市的耦合协调度较高，且被耦合协调度较低的城市包围。结合图 6 可知，11 个地级市中耦合协调度最高的始终是南昌，作为江西省省会其城市化综合水平与大气环境的耦合协调度遥遥领先其他城市，2015 年耦合协调度为 0.7269，2019 年为 0.8304，从中级协调到良好协调阶段，也是江西省内唯一一个达到了良好协调阶段的城市。次高的是新余和景德镇，中间水平的是赣州和上饶，抚州、萍乡、鹰潭、吉安、宜春、九江均是初级协调类型。综上可知，耦合协调度始终以南昌为中心呈“中间高，四周低”的空间分布格局。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 时间变化上，全省及各地级市 2015~2019 年城市化综合水平稳步上升，南昌城市化综合水平 5 年间提升了 21 个百分点，增长最多； $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 整体呈先升高后降低的变化趋势，其中萍乡和景德镇连续 5 年下降，大气污染治理效果显著。

(2) 空间分布上，城市化综合水平具有明显的离散特征， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的空间相关性随时间推移发生变化，二者自 2016 年起具有明显的空间集聚特征，城市化综合水平和 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度三者的局部自相关特征具有高度一致性，高—高集聚都出现在赣西北地区，低—低集聚都在赣东南地区，呈“西北高，东南低”的分布态势。

(3) 城市化综合水平与大气环境的耦合协调度结果表明，2015~2019 年全省耦合协调度得到整体提高，城市化正在往大气环境友好型发展，各地级市耦合协调度提升差异显著，部分地级市仍有较大提升空间；空间上，耦合协调度具有离散特征，以南昌为中心呈“中间高，四周低”的分布格局。

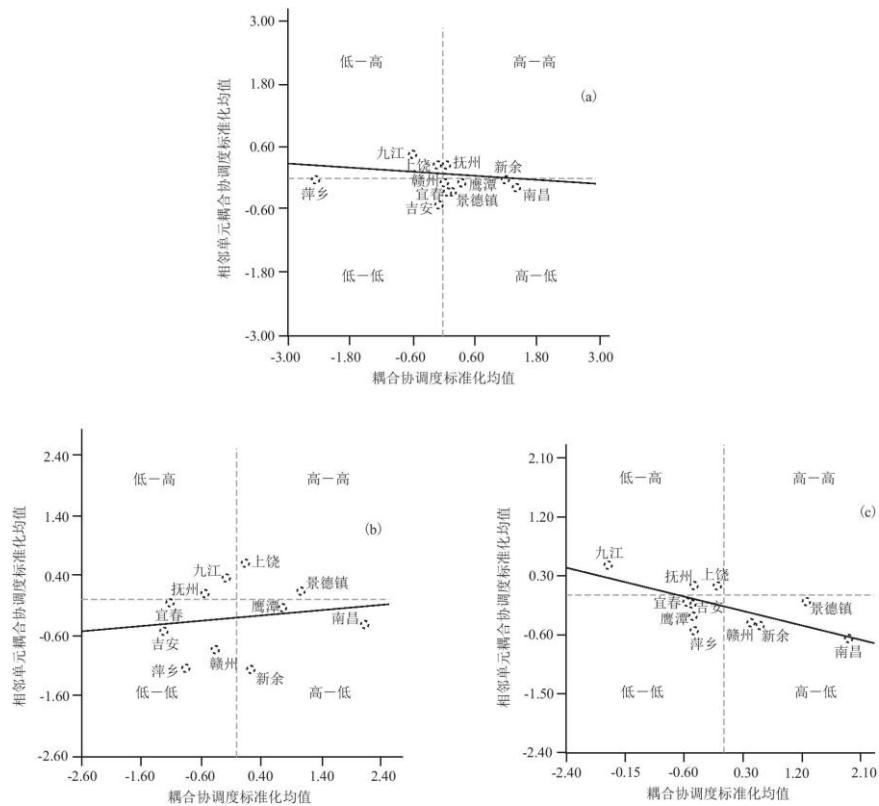


图 5(a)2015、(b)2017 和(c)2019 年江西省城市化综合水平与大气环境耦合协调度的 Moran 散点图

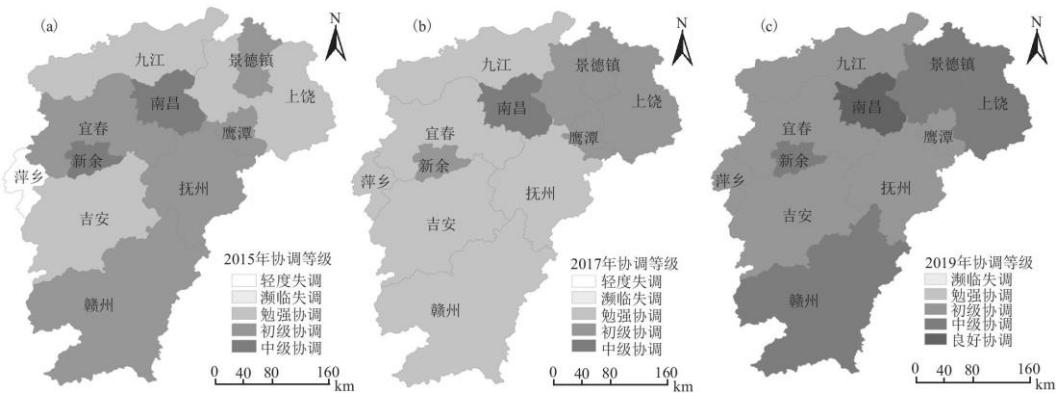


图 6(a)2015、(b)2017 和(c)2019 年江西省城市化综合水平与大气环境的耦合协调类型

3.2 讨论

城市发展和大气环境分别作为经济地理和生态环境领域的两大主题，具有典型的空间相关特征，本文研究发现，江西省城市化综合水平与大气颗粒物污染的空间分布格局高度一致，高—高集聚都出现在赣西北地区，低—低集聚都在赣东南地区，呈“西北高东南低”的分布态势。这与胡祥福等^[31]发现江西省城市化水平“北高南低”的研究结果一致，但与其生态环境“南北低中间高”的结果有一定差异。主要原因在于大气环境的特殊性。作为生态环境的重要部分，大气环境独立而完整地与城市化发生交互作用，相比自然因素，大气环境更多受社会经济因素的影响。前人在全国尺度上发现我国东、中、西部地区城市化水平与

生态环境之间的响应度呈现明显的区域差异^[32],中部地区城市化对生态环境起到了抑制作用,西部地区城市化较长时期内以牺牲生态环境为代价^[33, 34],这一结论在本文得到了印证。江西是我国中部欠发达地区,省会城市南昌首位效应明显^[35],其城市化综合水平与大气环境的耦合协调指数较高,属于良好协调类型,城市化对大气环境起到了抑制作用。但是,除南昌以外的多数地级市城市化发展与大气环境的耦合协调度不高,较长时间以牺牲生态环境为代价,还处于EKC倒“U”型曲线的左侧阶段。这与刘雅等^[23]的发现2002~2016年南昌城市化与大气环境的耦合协调类型由严重不协调到高度协调变化的结论,以及胡祥福等^[31]、梁云奇等^[36]发现江西省的城市化与生态环境协调程度南昌高、其他城市低的研究结论基本一致。

因此,本文建议在贯彻新型城镇化道路的过程中,要牢牢把握生态文明建设的契机,因地制宜地探索具有区域特色的新型城镇化道路。对于南昌,虽然城市化综合水平与大气环境已经进入良好协调阶段,但城市发展仍然超前于大气环境,大气质量有待进一步提高。赣西的宜春、新余和萍乡大气颗粒物污染严重,其中新余和萍乡作为省内面积最小的地级市,本身工业基础好、基础设施完备,但人口和社会城市化明显落后于经济和空间城市化,城市化和大气环境两手都要抓两手都要硬。景德镇具有生态资源和自然资源优势,大气环境质量在省内排名第一,虽然本身工业基础好,但城市化水平不高,进一步推进城镇化过程中要充分发挥生态资源和自然禀赋优势,强化生态优势,避免走以牺牲生态环境为代价的老路。赣州作为省内面积最大、农业人口最多的地级市,虽然现阶段其城市化水平低,但作为革命老区拥有政策优势,近年来经济增长速度居全省第一。在今后的发展中,赣州应该在保护好大气环境的同时大力发展经济。鹰潭和抚州具有天然生态资源优势,城市化水平不高,大气环境一般,发展过程中要淡化经济指标,强化生态指标,考虑城市化对生态环境造成的影响。上饶、吉安、九江3市农业人口多,第一产业占比大,大气环境也不尽如人意。尤其是九江,城市化综合水平与大气环境的耦合协调度排名末端,主要原因在于其以九江石化为首的石油化工业,以水泥、建筑陶瓷、花岗岩等为主的建材业,以火力发电为主的能源电力业都会产生大量的颗粒物,今后的发展中要坚持产业转型升级、减少污染物排放,同时加大大气污染治理投入,把大气污染治理摆在首要位置。

参考文献:

- [1] SUN D, ZHOU L, LI Y, et al. New-type urbanization in China: predicted trends and investment demand for 2015~2030[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(8): 943~966.
- [2] 韩立建. 城市化与PM2.5时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1011~1021.
- [3] LIU W J, JIAO F C, REN L J, et al. Coupling coordination relationship between urbanization and atmospheric environment security in Jinan City[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204(12): 1~11.
- [4] OSTRO B, HU J, GOLDBERG D, et al. Associations of mortality with long-term exposures to fine and ultrafine particles, species and sources: Results from the California teachers study cohort[J]. Environmental Health Perspectives, 2015, 123(6): 549~556.
- [5] POPE C A, COHEN A J, BURNETT R T. Cardiovascular disease and fine particulate matter[J]. Circulation Research, 2018, 122(12): 1645~1647.
- [6] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 237~247.
- [7] FANG C L, LIU H M, LI G D. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(8): 1081~1116.
- [8] 方创琳, 崔学刚, 梁龙武. 城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2529~2546.

-
- [9] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Economic growth and the Environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 2(2) :25–30.
- [10] 张雅杰, 刘辉智. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调关系的时空分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6) :340–346.
- [11] 张佳田, 焦文献, 韩宝龙. 城镇化与生态系统服务的协调演化特征及空间耦合关系[J]. 生态学报, 2020, 40(10) :3271–3282.
- [12] 崔木花. 中原城市群 9 市城镇化与生态环境耦合协调关系[J]. 经济地理, 2015, 35(7) :72–78.
- [13] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 2015, 35(7) :2244–2254.
- [14] FANG C, ZHOU C, CHAOLIN G U, et al. A proposal for the theoretical analysis of the interactive coupled effects between urbanization and the eco-environment in mega-urban agglomerations[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(12) :1431–1449.
- [15] 刘贺贺. 东北地区城市化与生态环境耦合过程, 格局与机理研究[D]. 东北师范大学, 2016.
- [16] 高明, 郭施宏, 夏玲玲. 福州市城市化进程与大气污染关系研究[J]. 环境污染与防治, 2015(5) :44–49.
- [17] 黄亚林, 丁镭, 张冉, 等. 武汉城市圈城市化发展与环境空气质量关系探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12) :2117–2124.
- [18] 丁镭. 中国城市化与空气环境的相互作用关系及 EKC 检验[D]. 中国地质大学, 2016.
- [19] 吴浪, 周廷刚, 温莉, 等. 基于遥感数据的 PM2.5 与城市化的时空关系研究——以成渝城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9) :2142–2152.
- [20] HAN L J, ZHOU W Q, LI W F, et al. Impact of urbanization level on urban air quality:A case of fine particles (PM2.5) in Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2014, 194:163–170.
- [21] 汪发元, 郑军, 汪宗顺. 城市化水平、工业化水平对空气质量的影响分析——基于湖北省 16 城市 2005~2017 年数据的时空模型[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6) :1411–1421.
- [22] 李小帆, 邓宏兵, 谢伟伟. 武汉城市圈城镇化水平和大气污染的关系研究——基于灰色关联和空间计量方法[J]. 城市规划, 2019, 43(5) ;67–72.
- [23] 刘雅, 黄庭, 谢哲宇, 等. 南昌市城市化与大气环境耦合协调关系研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27, 128(2) :5–11.
- [24] 樊文平, 王鸿康, 刘红平, 等. 山东省城镇化发展与大气环境耦合协调性研究[J]. 华东经济管理, 2020, 34(3) :23–30.
- [25] 李玉红, 李旭东, 蔡振饶. 六盘水市城市化与大气环境耦合关系研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2018, 41(6) :13–19.

-
- [26] 马艳. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调效应测度与交互胁迫关系验证[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 275-286.
- [27] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 378-398.
- [28] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [29] 魏素豪, 李晶, 李泽怡, 等. 中国农业竞争力时空格局演化及其影响因素[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 183-196.
- [30] 李建新, 梁曼, 钟业喜. 长江经济带经济与环境协调发展的时空格局及问题区域识别[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2584-2596.
- [31] 胡祥福, 余陈焱, 蒋正云, 等. 江西省新型城镇化与生态环境耦合协调度及空间分异研究[J]. 生态经济, 2020, 36(4): 79-85.
- [32] LIU N N, LIU C Z, XIA X F, DA B W. Examining the coordination between urbanization and eco-environment using coupling and spatial analyses: A case study in China[J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 1163-1175.
- [33] 刘永强, 龙花楼. 长江中游经济带土地利用转型时空格局及其生态服务功能影响[J]. 经济地理, 2017, 37(11): 161-170.
- [34] 郭海红, 张在旭. 新型城镇化与生态环境响应度的区域差异研究[J]. 宁夏社会科学, 2018, 212(6): 88-98.
- [35] 李恩平. 城镇化驱动力与绩效逻辑——以内陆省江西经济转型发展为例[J]. 江西社会科学, 2020(7): 64-72.
- [36] 梁云奇. 基于耦合协调度的江西省 11 市城镇化与生态环境发展时空分析[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(10): 1903-1908.