

长江中游城市群雾霾污染的空间关联测度与分析

陈明华¹ 王山¹ 岳海珺¹ 张晓萌²¹

(1. 山东财经大学 经济学院, 山东 济南 250014;

2. 中国人民大学 应用经济学院, 北京 100872)

【摘要】: 文章基于 2015—2018 年长江中游城市群的空气质量指数 (AQI) 日报数据, 采用非线性 Granger 因果关系检验方法识别长江中游城市群城市间雾霾污染的空间关联关系, 借助社会网络分析方法刻画雾霾污染的整体及个体网络结构特征, 运用方差分解方法考察单个城市对整体雾霾污染的贡献程度、城市雾霾污染的内部与外部贡献程度、地理距离对雾霾污染来源的贡献程度。研究发现: 长江中游城市群雾霾污染由西北向东南、西南方向逐渐减弱; 城市间雾霾污染存在非线性关联关系, 萍乡、新余、宜昌、荆门等城市在关联网络中处于核心位置; 湖北省城市对长江中游城市群雾霾污染的综合贡献度最大, 雾霾污染主要是由自身因素造成的, 但是外部因素也具有重要影响, 外部空间来源贡献度的大小与地理距离远近并无严格的反向对应关系。

【关键词】: 长江中游 雾霾污染 空间关联 方差分解

【中图分类号】: F205; F290 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1007-5097 (2021) 02-0020-11

一、引言

长江中游城市群是我国雾霾污染较为严重的区域之一。根据国家环保部发布的 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日的空气质量指数 (Air Quality Index, AQI) 日报数据, 长江中游城市群 27 个地级城市空气质量平均不达标天数为 247 天, 其中不达标天数排名前五位的城市分别是荆门市、宜昌市、武汉市、荆州市和鄂州市, 而荆门市不达标天数最多, 为 424 天; 重度及以上污染天数排名前五位的城市分别是宜昌市、荆门市、荆州市、武汉市、长沙市, 其中宜昌市重度及以上污染天数最多, 达到 66 天¹。另一方面, 在大气环流、大气化学等自然条件以及经济社会发展因素的共同作用下, 长江中游城市群雾霾污染呈现较强的空间联动性。2017 年 1 月 4 日, 长江中游城市群爆发严重的雾霾污染天气, 其中宜昌 AQI 高达 313, 衡阳、黄冈、孝感等 32 个城市均构成重度及以上污染, 这表明雾霾污染已经不再是孤立的单个城市污染现象, 城市间雾霾污染可能存在一种互为因果的内在联系。然而, 目前长江中游城市群雾霾治理主要是以行政区域为单元展开的, 未能充分考虑雾霾污染源头城市, 这一环境管理模式与雾霾污染的大范围区域性连片特征显然存在矛盾 (孙亚男等, 2017; 刘晨跃和尚远红, 2017)^[1-2]。鉴于此, 本文关心的主要问题是: 长江中游城市群雾霾污染呈现怎样的空间关联关系? 具有何种关联结构特征? 单个城市对城市群整体雾

作者简介: 陈明华 (1978-), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 经济增长与绿色发展;

王山 (1995-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向: 经济增长与绿色发展;

岳海珺 (1997-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向: 经济增长与绿色发展;

张晓萌 (1993-), 女, 山东淄博人, 博士研究生, 研究方向: 能源经济与绿色发展。

基金项目: 国家社会科学基金项目“空间异质性视角下长江经济带生态效率评价及提升路径研究”(19BJY087)

霾污染的贡献度如何？城市雾霾污染的内部与外部贡献度如何？空间来源贡献度与城市间地理距离有何关系？基于以上问题的分析，对于分析长江中游城市群雾霾污染的空间关联关系、调整并构建区域联防联控体系，具有重要的理论意义和应用价值。

从已有相关文献看，对于城市雾霾污染关联关系的研究主要从三个方面展开：(1)在给定气象条件下基于多样化的空气质量模型就雾霾污染的跨区域传输进行数值模拟 (Wang et al., 2016)^[3]。这类文献主要基于特定区域的少数城市选取几天或几个月的数据展开分析，难以揭示雾霾污染在更长时间维度、更大空间维度的空间关联和交互影响关系。另外，这类文献通常将雾霾污染的跨区域传输动力完全归结为自然因素，忽略了经济、社会等因素的影响。(2)利用地理信息系统 (GIS)、探索性空间数据分析 (ESDA)、Pearson 相关系数、小波分析等分析工具考察雾霾污染的时空分布特征以及空间关联关系 (刘华军和杜广杰, 2016)^[4]。这类研究较好地揭示了跨区域雾霾污染的线性相关特征，但未能从结构角度揭示雾霾污染的复杂空间关联特征。(3)从信息流视角基于线性 Granger 因果检验、广义脉冲响应函数等时间序列分析方法，就雾霾污染的空间关联、冲击大小、调整时滞等方面进行研究 (潘慧峰等, 2015; 刘华军等, 2017)^[5-6]。因受到自然、社会、经济等因素的影响，雾霾污染的空间关联可能并非呈现简单的线性关系，但这类研究主要基于线性方法展开，无法揭示城市雾霾污染空间关联的非线性特征以及空间关联方向上的非对称性特征，导致其研究结论可能存在偏误，而非线性 Granger 因果检验方法能够克服这一问题 (刘华军和杜广杰, 2018)^[7]。另外，方差分解方法有助于揭示雾霾污染的空间来源贡献程度。

鉴于已有研究局限性，本文将首先基于 2015—2018 年空气质量指数 (AQI) 日报数据，借助非线性 Granger 因果检验方法识别长江中游城市群雾霾污染的空间关联关系；其次，运用社会网络分析 (SNA) 方法从结构视角分析长江中游城市群雾霾污染的整体及个体网络结构特征，以揭示各城市在关联网络中的地位和作用；最后，运用方差分解方法分别考察单个城市对城市群整体雾霾污染的贡献程度、城市雾霾污染的内部与外部贡献程度、城市间地理距离对雾霾污染空间来源贡献度的影响。

二、方法与数据

(一) 雾霾污染空间关联关系的检验方法

目前，Granger 因果检验方法已经广泛应用于城市雾霾污染的空间关联关系识别中，然而，这种方法只能揭示变量之间的线性关系。Granger and Newbold (1986)^[8]认为，非线性关系是真实世界的主要构成，故而非线性模型能够更加准确地模拟现实世界。为此，Baek and Brock (1992)^[9]、Hiemstra and Jones (1994)^[10]、Diks and Panchenko (2006)^[11]相继提出了非线性 Granger 因果检验方法，这一方法可以通过线性 Granger 因果检验模型对序列间的线性“预测能力”进行过滤，继而基于残差中的有用信息识别变量间的非线性 Granger 因果关系。

1. BDS 检验

在非线性 Granger 检验之前，需要对时间序列进行 BDS 检验，以确定序列之间是否存在非线性关系。假设有 m 维时间序列 Z_t ，其观测值为 $(z_t, z_{t+1}, \dots, z_{t+m-1})$ ，因此跨期空间概率估计量关联积分可以定义为：

$$C_m(T, d) = \frac{\sum_{i=1}^{T_m-1} \sum_{j=i+1}^{T_m-1} I(Z_i^m, Z_j^m, d)}{T_m(T_m-1)} \quad (1)$$

其中： $I(Z_i^m, Z_j^m, d)$ 为指标函数； $\|Z_i^m, Z_j^m\|$ 表示序列 Z_i^m 和 Z_j^m 之间的欧式空间距离； T 为总样本数； d 为带宽。当满足条件 $\|Z_i^m, Z_j^m\| < d$ 时， $I(Z_i^m, Z_j^m, d) = 1$ ；否则， $I(Z_i^m, Z_j^m, d) = 0$ 。序列 Z_t 可以分为 T_m 个 m 维的子样本，且 $Z_i^m = (z_i, z_{i+1}, \dots,$

z_{t+m-1}), $Z_s^m = (z_t, z_{t+1}, \dots, z_{t+m})$ 。因此, BDS 检验统计量可以定义为:

$$W_m(T, d) = \frac{\sqrt{T [C_m(T, d) - C_1(T, d)^m]}}{\sigma_m(d)} \quad (2)$$

其中, $\sigma_m(d)$ 为 m 维样本标准差。若 BDS 检验结果显示拒绝原假设, 那么可以判定序列中存在非线性关系。

2. 非线性 Granger 因果关系检验

给定两个时间序列变量 X_t 和 Y_t , 并定义 X_t 的 m 维领先向量为 X_t^m , X_t 和 Y_t 的 Lx 期滞后向量分别为 X_{t-Lx}^{Lx} 和 Y_{t-Ly}^{Ly} , 公式如下:

$$\begin{aligned} X_t^m &= (x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+m-1}), \\ m &= 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, n \\ X_{t-Lx}^{Lx} &= (x_{t-Lx}, x_{t-Lx+1}, \dots, x_{t-1}), \\ Lx &= 1, 2, \dots, n; t = Lx + 1, Lx + 2, \dots, Lx + n \\ Y_{t-Ly}^{Ly} &= (y_{t-Ly}, y_{t-Ly+1}, \dots, y_{t-1}), \\ Ly &= 1, 2, \dots, n; t = Ly + 1, Ly + 2, \dots, Ly + n \end{aligned} \quad (3)$$

给定任意小的常数 $d > 0$ 且满足 $m, Lx, Ly > 1$, 如果式 (4) 右端序列 X_t 的条件概率给定, 并且无论有无序列 Y_t 作为条件都不会对其造成影响, 那么序列 Y_t 就不是序列 X_t 的 Granger 原因。式 (4) 中的条件概率也可以通过式 (5) 表达。其中, $\Pr(\cdot)$ 为概率, $\|\cdot\|$ 为最大范数, $s = \max(Lx, Ly) + 1, \dots, T - m + 1$, 且 $t = \max(Lx, Ly) + 1, \dots, T - m + 1$ 。

$$\frac{CI(m + Lx, Ly, d)}{CI(Lx, Ly, d)} = \frac{CI(m + Lx, d)}{CI(Lx, d)} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} CI(m + Lx, Ly, d) &= \Pr(\|X_{t-Lx}^{m+Lx} - X_{s-Lx}^{m+Lx}\| < d, \\ &\|Y_{t-Ly}^{Ly} - Y_{s-Ly}^{Ly}\| < d) \\ CI(Lx, Ly, d) &= \Pr(\|X_{t-Lx}^{Lx} - X_{s-Lx}^{Lx}\| < d, \\ &\|Y_{t-Ly}^{Ly} - Y_{s-Ly}^{Ly}\| < d) \\ CI(m + Lx, d) &= \Pr(\|X_{t-Lx}^{m+Lx} - X_{s-Lx}^{m+Lx}\| < d) \\ CI(Lx, d) &= \Pr(\|X_{t-Lx}^{Lx} - X_{s-Lx}^{Lx}\| < d) \end{aligned} \quad (5)$$

假定序列 X_t 和 Y_t 严格平稳且满足混合条件, Diks and Panchenko(2006)^[11]在“ Y_t 不是 X_t 的严格 Granger 原因”原假设的基础上, 构造了渐进正态分布的 T 统计量:

$$T = \left[\frac{CI(m + Lx, Ly, d, \tau)}{CI(Lx, Ly, d, \tau)} - \frac{CI(m + Lx, d, \tau)}{CI(Lx, d, \tau)} \right] \sim N\left(0, \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sigma^2(m, Lx, Ly, d)\right) \quad (6)$$

其中: $\tau = T+1-m-\max(Lx, Ly)$; $\sigma^2(\cdot)$ 表示修正后的检验统计量渐进方差。根据式 (6) 可以依次检验向量自回归模型中的残差序列。如果检验结果为拒绝“序列之间 Granger 非因果关系”的原假设, 那么可以判定两个序列之间存在非线性 Granger 因果关系。

(二) 雾霾污染的空间关联网络分析方法

1. 整体网络结构特征刻画

根据陈明华等 (2016)、刘华军和刘传明 (2017)^[12-13]的研究, 网络密度、网络关联度、网络等级度、网络效率等可以作为刻画整体网络结构特征的指标。(1)网络密度。就本文研究而言, 网络密度是指城市雾霾污染关联网络中实际连线数与最大可能连线数之比, 反映雾霾污染关联网络的疏密程度, 取值在 0~1 之间。网络密度越大, 意味着城市雾霾污染关联就越紧密。(2)网络关联度。网络关联度反映城市雾霾污染关联网络的稳健性和脆弱性, 取值在 0~1 之间。如果网络中多数节点之间均存在连接路径, 则网络关联度较高; 如果网络中多数节点仅与某一个或几个节点相连, 则网络关联度较低。此时网络对少数城市的依赖程度就较高, 一旦排除这些城市, 网络就可能崩溃。(3)网络等级度。网络等级度表示雾霾污染关联网络中城市间非对称可达程度, 能够反映各城市等级结构, 取值在 0~1 之间。网络等级度越高, 就会有越多的城市处于从属地位。(4)网络效率。网络效率反映雾霾污染关联网络中城市间连接效率, 取值在 0~1 之间。网络效率越高, 表明城市间的冗余连线越少, 城市雾霾污染关联越稀疏, 网络就越不稳定。

2. 个体网络结构特征刻画

根据陈明华等 (2016)、刘华军和刘传明 (2017)^[12-13]的研究, 度数中心度、接近中心度、中介中心度等可以作为刻画个体网络结构特征的指标。(1)度数中心度。就本文研究而言, 度数中心度是根据连接数来衡量各城市在雾霾污染关联网络中所处中心程度。度数中心度越高, 那么该城市与其他城市间的连接线就越多, 该城市也就处于雾霾污染关联网络更加中心的地位。度数中心度可以分成点出度、点入度。点出度是该城市指向其他城市的连线数, 反映该城市雾霾污染对其他城市的影响程度; 点入度是其他城市指向该城市的连线数, 反映其他城市雾霾污染对该城市的影响程度。(2)接近中心度。接近中心度用来刻画某个城市在雾霾污染关联网络中“对其他城市控制”的程度。接近中心度越高, 意味着该城市与其他城市的“距离”越短, 联系越紧密, 对其他城市的控制程度就越强, 该城市也就处于雾霾污染关联网络更加中心的位置。(3)中介中心度。中介中心度反映某城市对其他城市间雾霾污染关联的控制程度。中介中心度越高, 意味着该城市越能控制其他城市间雾霾污染关联, 该城市也就处于雾霾污染关联网络更加中心的位置。

(三) 雾霾污染的空间来源贡献度分析方法

本文借助方差分解方法对雾霾污染的空间来源贡献度进行分析，具体思路如下：

$$y_{it} = \sum_{j=1}^k (\theta_{ij}^{(0)} \varepsilon_{jt} + \theta_{ij}^{(1)} \varepsilon_{j,t-1} + \theta_{ij}^{(2)} \varepsilon_{j,t-2} + \theta_{ij}^{(3)} \varepsilon_{j,t-3} + \dots)$$

$$i = 1, 2, \dots, k; t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

式 (7) 反映了第 j 个扰动项 ε_j 从无限过去到现在时点对 y_i 影响的总和。假定 ε_j 无序列相关，可求方差：

$$E[(\theta_{ij}^{(0)} \varepsilon_{jt} + \theta_{ij}^{(1)} \varepsilon_{j,t-1} + \theta_{ij}^{(2)} \varepsilon_{j,t-2} + \dots)^2] =$$

$$\sum_{q=0}^{\infty} (\theta_{ij}^{(q)})^2 \sigma_{jj}, \quad i, j = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

假定扰动项向量的协方差为对角矩阵，则 y_i 的方差是上述方差的 k 项简单和：

$$\text{VAR}(y_i) = \sum_{j=1}^k \left\{ \sum_{q=0}^{\infty} (\theta_{ij}^{(q)})^2 \sigma_{jj} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

上述方差可以分解成 k 种不相关的影响，为测定各个干扰项对 y_i 的方差的贡献程度，做如下定义：

$$\text{RVC}_{j \rightarrow i}(\infty) = \frac{\sum_{q=0}^{\infty} (\theta_{ij}^{(q)})^2 \sigma_{jj}}{\sum_{j=1}^k \left\{ \sum_{q=0}^{\infty} (\theta_{ij}^{(q)})^2 \sigma_{jj} \right\}},$$

$$i, j = 1, 2, \dots, k \quad (10)$$

式中 RVC 反映了第 j 个变量基于冲击的方差对 y_i 的方差的相对贡献度。如果模型满足平稳性条件，则 $\theta_{ij}^{(q)}$ 随着 q 的增大而呈几何级数衰减，不需用 $s \rightarrow \infty$ 的 $\theta_{ij}^{(q)}$ 项和来评价，只需取有限的 s 项即可。VAR(p) 模型的前 s 期的预测误差是：

$$\Theta_0 \varepsilon_t + \Theta_1 \varepsilon_{t-1} + \Theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \Theta_{s-1} \varepsilon_{t-s+1} \quad (11)$$

那么可以得到近似的相对方差贡献率 (RVC)：

$$\text{RVC}_{j \rightarrow i}(s) = \frac{\sum_{q=0}^{s-1} (\theta_{ij}^{(q)})^2 \sigma_{jj}}{\sum_{j=1}^k \left\{ \sum_{q=0}^{s-1} (\theta_{ij}^{(q)})^2 \sigma_{jj} \right\}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, k \quad (12)$$

如果 $RVC_{j-i}(s)$ 的数值较大，则表明第 j 个城市雾霾污染对第 i 个城市雾霾污染的影响较大，反之则反。

（四）样本数据

本文以长江中游城市群 27 个地级城市 2 作为样本，具体包括武汉、黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、宜昌、荆门、荆州、长沙、株洲、湘潭、岳阳、益阳、常德、衡阳、娄底、南昌、九江、景德镇、鹰潭、新余、宜春、萍乡、上饶、抚州、吉安。本文以空气质量指数 (AQI) 3 作为衡量城市雾霾污染的综合指标，AQI 越大，则雾霾污染程度越大，反之，则雾霾污染程度越小。样本数据来源于国家环保部数据中心发布的 2015 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日 AQI 日报数据。

三、长江中游城市群雾霾污染的客观事实

本文根据样本观测期内长江中游城市群 27 个城市 AQI 均值数据，在 ArcGIS 支持下，利用 Kriging 插值法绘制了长江中游城市群雾霾污染的空间分异图如图 1 所示。根据图 1，可以发现：(1) 长江中游城市群雾霾污染具有显著的空间非均衡特征；(2) 长江中游城市群雾霾污染较为严重的地区主要集中在荆门、宜昌、荆州等西北部城市，而东南部的上饶、鹰潭、景德镇、抚州等城市雾霾污染相对较轻；(3) 雾霾污染总体呈现由西北向东南、西南方向不断蔓延的趋势。

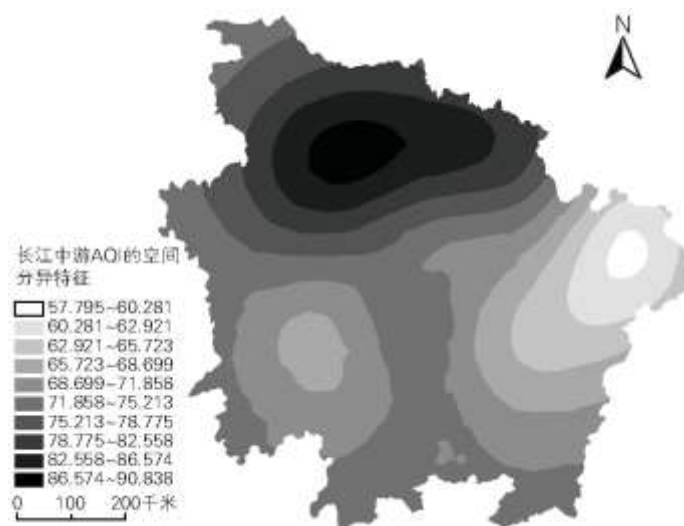


图 1 长江中游城市群雾霾污染的空间分异

图 2 反映了长江中游城市群 27 个地级城市雾霾污染平均差异情况。根据图 2，湖北省的荆门、宜昌、荆州、武汉、鄂州 5 个城市的 AQI 均值超过了 85，接近轻度污染级别；湖南省的大部分城市 AQI 均值分布在 70~80；江西省的城市空气质量普遍较好，大部分城市 AQI 均值低于 70。图 3 反映了长江中游城市群整体雾霾污染的波动变化态势。根据 AQI 均值的拟合趋势线，长江中游城市群雾霾污染呈显著的 U 形变化趋势，图 4、图 5 分别从月度变化和季节变化视角清晰地反映了这一特征。从图 4 可以看出，2015 年 1 月和 2 月份长江中游城市群处于轻度污染状态，其中 1 月份雾霾污染最严重，AQI 的均值达到 126.2；此后空气质量状况逐渐得到改善，7 月份的空气质量最好，AQI 均值为 56.8；8—10 月份雾霾污染逐渐加剧，虽然 11 月份有所缓解，但 12 月份又出现强势反弹。其他年份雾霾污染的月度变化态势与 2015 年基本一致。从图 5 可以看出，长江中游城市群冬季雾霾污染最为严重，其次是春季、秋季，而夏季空气质量状况最好。

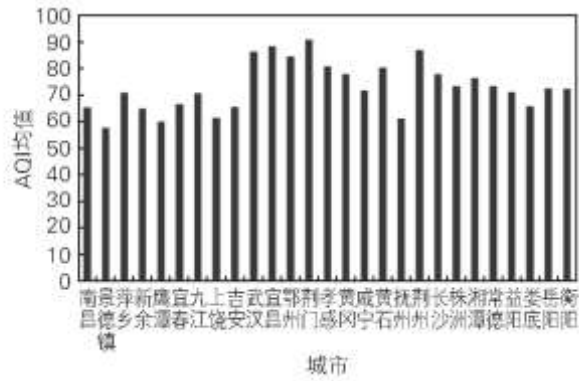


图 2 长江中游城市群各城市雾霾污染比较

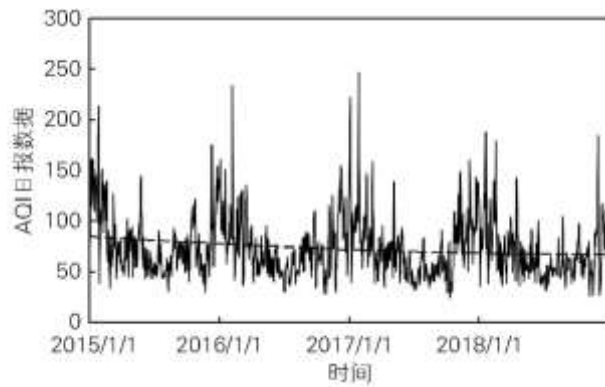


图 3 长江中游城市群雾霾污染的波动态势

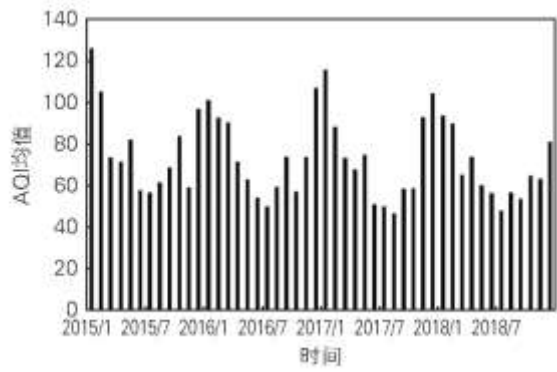


图 4 长江中游城市群雾霾污染的月度变化

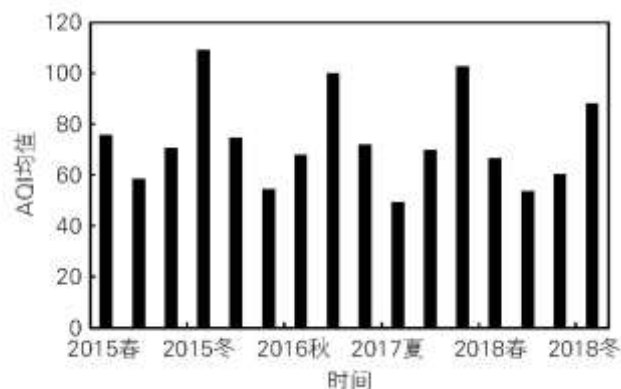


图 5 长江中游城市群雾霾污染的季节变化

四、长江中游城市群雾霾污染的空间关联关系及结构特征

(一) 单位根检验

时间序列具有平稳性是非线性 Granger 因果检验的前提条件 4, 因此本文采用 ADF 单位根检验方法对所有序列进行平稳性检验 5。根据检验结果, 在 1%显著性水平下, T 统计值均小于临界值, 拒绝“存在单位根”的原假设, 即水平序列均为平稳序列。接下来本文将基于长江中游所有城市的 AQI 指数进行非线性 BDS 检验和非线性 Granger 因果关系检验。

(二) BDS 检验

在对城市间雾霾污染的非线性因果关系展开分析之前, 必须进行非线性检验, 以考察城市雾霾污染空间关联关系中是否存在显著的非线性特征 (杨子暉等, 2013)^[14]。本文基于主流的 BDS 检验方法 (Broock et al., 1996)^[15]对 27 个城市 AQI 序列两两之间的非线性变化趋势进行检验。首先构建两两城市 AQI 序列的 VAR 模型, 确定相互影响关系, 并对其线性依存成分进行过滤; 然后基于过滤后的残差序列进行非线性 BDS 检验。根据检验结果 6, 在 5%显著性水平下, 基于回归残差的 BDS 检验均拒绝“线性关系”的原假设, 这意味着两两城市间均存在显著的非线性变化关系。鉴于此, 本文将基于非线性 Granger 因果关系检验方法考察长江中游城市群城市雾霾污染的空间关联关系。

(三) 雾霾污染的空间关联关系及结构特征

最优滞后阶数的选择对于非线性 Granger 因果关系检验结果至关重要, 但目前关于最优滞后阶数并没有统一的选择标准 (Diks and Panchenko, 2006)^[11]。本文认为, 如果所有滞后阶数下的检验结果均接受“不存在非线性 Granger 因果关系”的原假设, 则变量间一定不存在传导关系。如果所有滞后阶数下检验结果均显著地拒绝“不存在非线性 Granger 因果关系”的原假设, 则变量间就存在“稳健” (Robust) 传导关系。本文将基于这种稳健传导关系所形成的关联网络定义为“稳健性关联网络” (Robust Network, 简称 R-Network), 并根据非线性 Granger 因果关系检验确定了长江中游城市群 27 个城市之间雾霾污染的稳健性关联关系。

1. 雾霾污染关联的整体结构特征

根据长江中游城市群 27 个城市之间雾霾污染的稳健性关联关系, 本文借助 Ucinet 对关联网络进行可视化处理, 如图 6 所示。根据图 6, 可以发现长江中游城市群城市间雾霾污染呈现出多线程的复杂关联网络结构形态。网络中稳健性关联关系数为

642 个，理论上最大关联系数为 702，网络密度为 0.91，表明长江中游城市群城市间雾霾污染存在较为广泛的空间关联关系。网络关联度为 1，表明稳健性网络的联动性强，具有较高的网络通达性，各城市间存在普遍的雾霾污染关联效应。网络等级度为 0，表明稳健关联网络并不存在等级森严的结构，城市间对称可达点的程度较高，处于从属和边缘的城市较少，长江中游城市群城市间即使距离较远，也存在雾霾污染的空间关联效应。网络效率为 0.0154，说明稳健性关联网络中各城市间存在较多的冗余连线，雾霾污染的非线性关联关系存在多重叠加现象，网络较为稳定。以上特征表明，长江中游城市群雾霾污染已经连成一片，没有哪个城市能够处于关联网络之外。换言之，一个城市的雾霾污染可能部分地由其他城市的雾霾污染所引起，这要求长江中游城市群雾霾污染联防联控政策的制定必须从全局、整体视角进行考虑。

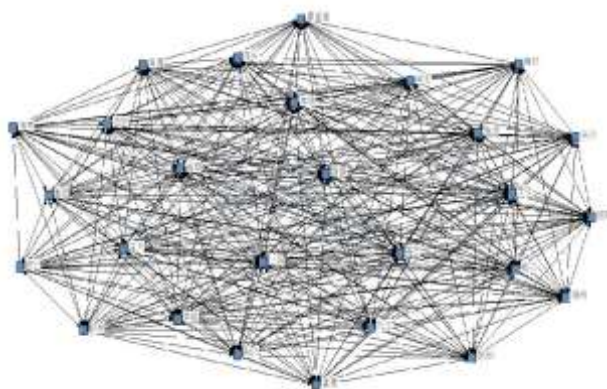


图 6 长江中游城市群雾霾污染的稳健关联网络

2. 雾霾污染关联的个体结构特征

本文选择点出度、点入度、度数中心度、接近中心度和中介中心度等中心度指标对长江中游城市群雾霾污染的个体结构特征进行刻画，以反映各城市在雾霾污染关联网络中的地位和作用，具体结果见表 1 所列。从点出度的测算结果看，长江中游城市群 27 个城市点出度均值为 23.8，排名靠前的城市依次是萍乡、新余、宜昌、荆门、孝感、黄石、荆州等，表明这些城市雾霾污染对其他城市具有较强引导关系，在关联网络中起“引领”作用。从点入度的测算结果看，点入度均值为 23.8，排名靠前的城市依次是衡阳、新余、宜昌、荆门、娄底、宜春等，表明这些城市雾霾污染受到其他城市的较强影响，在关联网络中处于“跟随”地位。从度数中心度的测算结果看，度数中心度均值为 98.6，其中有 20 个城市的度数中心度超过这一数值，达到 100，表明在关联网络中这些城市与其他城市之间存在较多的非线性引导关系。从接近中心度的测算结果看，接近中心度均值为 98.7，排名靠前的城市依次是萍乡、新余、宜昌、荆门、孝感、黄石、荆州等，表明这些城市能够更快速地与其他城市雾霾污染产生引导关系，在关联网络中扮演着中心行动者的角色。而南昌、鹰潭、鄂州、咸宁、黄冈、景德镇、抚州等城市的接近中心度则排名靠后，在关联网络中扮演着边缘行动者的角色。从中介中心度的测度结果看，中介中心度的均值为 0.06，萍乡、新余、宜昌、荆门、孝感、黄石、荆州等城市排名靠前，这些城市对长江中游城市群城市间雾霾污染的关联关系具有较强的控制能力，发挥着重要的中介作用。而鄂州、黄冈、咸宁、南昌、鹰潭、景德镇、抚州等城市的中介中心度均处于 0.04 以下，表明这些城市在稳健关联性网络中不具有桥梁作用，受制于中介中心度较高的其他城市。

表 1 长江中游城市群雾霾污染稳健关联网络的中心性

城市	出度	入度	中心度			城市	出度	入度	中心度		
			度数	接近	中介				度数	接近	中介
南昌	24	24	96.154	96.296	0.038	黄冈	18	22	92.308	92.857	0.039

景德镇	13	22	92.308	92.857	0.026	咸宁	20	23	96.154	96.296	0.039
萍乡	26	25	100	100	0.065	黄石	26	25	100	100	0.065
新余	26	26	100	100	0.065	抚州	19	22	92.308	92.875	0.026
鹰潭	25	21	96.154	96.296	0.038	荆州	26	21	100	100	0.065
宜春	20	26	100	100	0.065	长沙	26	24	100	100	0.065
九江	20	14	100	100	0.065	株洲	26	24	100	100	0.065
上饶	18	25	100	100	0.065	湘潭	26	23	100	100	0.065
吉安	24	24	100	100	0.065	常德	26	23	100	100	0.065
武汉	25	24	100	100	0.065	益阳	26	22	100	100	0.065
宜昌	26	16	100	100	0.065	娄底	25	26	100	100	0.065
鄂州	24	25	96.154	96.296	0.533	岳阳	25	23	100	100	0.065
荆门	26	26	100	100	0.065	衡阳	26	26	100	100	0.065
孝感	26	19	100	100	0.065						

五、长江中游城市群雾霾污染的空间贡献度分析

以上分析主要考察了三个方面的问题：第一，长江中游城市群城市间雾霾污染的非线性关联关系如何？第二，雾霾污染关联网络呈现怎样的整体结构特征？第三，各城市在雾霾污染关联网络中的地位和作用如何？接下来，本文将根据方差分解方法就长江中游城市群雾霾污染的空间来源贡献度进行分析。

（一）长江中游城市群雾霾污染的城市综合贡献度分析

根据方差分解方法对长江中游城市群各城市雾霾污染进行分解，结果见表 2、表 3 所列。将每个城市对自身及其他城市雾霾污染的贡献度进行加总，可得长江中游城市群雾霾污染的各城市综合贡献度结果，具体见表 3 所列。根据表 3，武汉市对长江中游城市群整体雾霾污染的综合贡献度最高，达到了 156.17%，其中对自身的贡献度为 83.71%，对另外 26 个城市的贡献度之和为 72.46%；排名 2-10 位的分别是抚州、荆门、荆州、常德、宜昌、新余、黄冈、景德镇、鄂州，综合贡献度均在 100% 以上。而鹰潭的综合贡献度最低，为 78.96%，其中对自身的贡献度为 73.52%，对另外 26 个城市的贡献度之和仅为 5.44%；上饶、宜春、吉安、湘潭、黄石、萍乡、益阳、咸宁、长沙等城市的综合贡献度相对较低，均在 90% 以下。从总体上看，综合贡献度排名前 4 的城市均属于湖北省，排名靠后的城市大多分布在湖南省、江西省。另外，湖北省城市对长江中游城市群雾霾污染的平均贡献度为 111.97%，湖南省城市的平均贡献度为 93.29%，江西省城市的平均贡献度为 94.60%，这表明湖北省城市是长江中游城市群雾霾污染的区域联防联控重点。

表 2 长江中游城市群各城市雾霾污染的方差分解结果¹

城市	南昌	景德镇	萍乡	新余	鹰潭	宜春	九江	上饶	吉安	武汉	宜昌	鄂州	荆门	孝感
南昌	78.827	0.290	0.610	4.490	2.415	1.701	0.373	0.975	1.319	0.040	0.031	0.015	0.149	0.158
景德镇	1.738	82.298	0.961	0.837	0.650	0.330	1.023	5.559	0.271	0.887	0.857	1.744	0.121	1.038
萍乡	1.718	1.622	70.249	1.254	3.592	2.038	0.024	1.204	1.754	0.256	0.004	0.148	0.207	0.081
新余	2.158	3.668	0.786	69.665	1.358	0.251	1.185	0.236	0.470	2.570	1.333	2.694	1.748	3.139
鹰潭	0.028	1.079	1.292	0.086	73.522	0.084	0.162	0.558	0.046	0.090	0.077	0.086	0.273	0.239
宜春	0.163	0.584	1.056	0.164	0.474	72.515	0.054	0.036	0.043	0.046	0.246	0.084	0.661	0.024
九江	1.916	0.655	0.071	0.779	1.346	0.394	80.853	0.365	0.344	0.153	0.837	0.140	0.410	0.415

上饶	0.198	0.040	0.202	0.572	0.446	0.601	0.273	75.046	0.374	0.003	0.003	0.005	0.032	0.015
吉安	0.147	0.170	0.457	0.557	0.392	0.240	0.075	0.196	74.754	0.165	0.579	0.130	0.241	0.118
武汉	2.959	1.466	2.292	1.826	3.444	1.978	4.723	1.233	1.205	83.706	0.158	5.245	0.943	0.220
宜昌	1.469	2.397	2.452	1.308	2.124	0.979	0.680	2.108	1.490	0.705	83.370	0.591	1.256	1.332
鄂州	1.682	1.462	0.753	0.712	0.926	0.315	2.105	0.583	0.323	0.023	0.447	79.559	0.006	1.656
荆门	0.268	0.729	0.478	0.685	0.918	0.401	0.799	1.426	0.883	2.872	2.412	1.818	86.339	2.898
孝感	0.445	0.217	0.078	0.366	0.132	0.931	0.345	0.079	0.139	0.129	0.250	0.388	1.343	83.229
黄冈	1.499	0.023	0.925	0.017	0.711	0.968	1.286	0.047	0.009	3.376	1.765	2.633	2.132	0.935
咸宁	0.221	0.175	1.343	0.622	0.232	0.017	0.380	0.371	0.151	0.091	0.425	0.144	0.332	0.261
黄石	0.451	1.040	0.035	0.112	0.226	0.007	1.489	0.011	0.156	0.067	0.549	0.049	0.123	0.044
抚州	0.982	0.018	2.360	8.990	2.468	6.866	0.429	5.647	8.876	0.106	1.210	0.096	0.388	0.203
荆州	0.325	0.530	5.435	0.811	1.405	0.699	1.312	0.484	0.491	1.854	2.759	2.311	0.091	1.019
长沙	0.032	0.022	0.874	0.024	0.033	0.001	0.422	0.078	0.204	0.468	0.541	0.337	1.215	0.355
株洲	0.161	0.538	2.206	0.320	0.281	0.324	0.399	0.124	0.159	1.251	0.919	0.883	1.273	0.879
湘潭	0.009	0.123	0.269	0.491	0.266	0.650	0.009	0.429	1.044	0.004	0.123	0.277	0.105	0.010
常德	1.045	0.645	0.552	2.385	0.290	3.360	0.636	1.242	1.583	0.013	0.020	0.164	0.045	0.391
益阳	0.315	0.082	0.688	0.293	0.157	0.031	0.145	0.094	0.076	0.376	0.188	0.198	0.017	0.298
娄底	0.738	0.089	0.218	1.189	1.034	1.767	0.127	0.941	2.628	0.047	0.254	0.014	0.063	0.088
岳阳	0.048	0.017	0.219	0.119	0.162	0.243	0.660	0.127	0.085	0.618	0.441	0.202	0.280	0.851
衡阳	0.459	0.022	3.137	1.327	0.996	2.307	0.034	0.802	1.121	0.085	0.200	0.046	0.211	0.104

表3 长江中游城市群各城市雾霾污染的方差分解结果²

城市	黄冈	咸宁	黄石	抚州	荆州	长沙	株洲	湘潭	常德	益阳	娄底	岳阳	衡阳	总贡献度
南昌	0.029	0.110	0.019	1.414	0.063	0.060	0.139	0.063	0.219	0.019	0.297	0.673	0.011	94.508
景德镇	1.866	0.739	1.676	0.304	0.318	0.606	0.800	0.339	0.603	0.258	1.677	0.518	0.955	108.971
萍乡	0.058	0.086	0.264	2.211	0.168	0.046	0.043	0.044	0.017	0.015	0.026	0.024	0.011	87.164
新余	2.775	1.642	2.348	2.234	1.948	2.214	1.023	0.744	0.355	0.714	2.164	1.754	1.887	113.065
鹰潭	0.139	0.172	0.074	0.013	0.389	0.017	0.098	0.012	0.156	0.037	0.123	0.054	0.057	78.962
宜春	0.020	0.210	0.010	0.090	0.378	0.088	0.963	0.074	0.081	0.069	0.169	0.096	1.942	80.340
九江	0.186	0.125	0.110	0.706	0.286	0.119	0.043	0.092	0.090	0.074	0.077	0.124	0.199	90.911
上饶	0.007	0.096	0.051	0.649	0.018	0.147	0.147	0.217	0.054	0.144	0.078	0.104	0.370	79.893
吉安	0.101	0.181	0.109	0.160	0.311	0.118	0.141	0.151	0.354	0.270	0.046	0.163	0.270	80.595
武汉	4.915	3.809	4.307	1.345	0.965	5.993	3.812	5.209	1.469	2.609	1.834	6.583	1.919	156.167
宜昌	0.725	1.468	0.669	2.591	1.753	1.752	2.154	1.452	1.172	0.620	1.089	0.622	1.955	120.287
鄂州	2.409	2.041	1.791	0.441	0.019	0.477	0.780	0.432	0.034	0.172	0.435	0.478	0.893	100.953
荆门	1.942	1.160	1.513	0.640	4.409	1.785	1.326	2.272	2.599	2.023	1.506	2.237	0.801	127.138
孝感	0.560	0.337	0.577	0.052	1.423	0.031	0.047	0.023	0.030	0.001	0.260	0.025	0.057	91.493
黄冈	80.294	3.478	1.673	0.056	2.866	1.198	1.064	0.876	1.458	2.686	0.020	0.740	0.065	112.800
咸宁	0.163	78.848	0.530	0.048	0.076	0.601	1.751	0.236	0.060	0.058	0.772	0.718	0.131	88.758

黄石	0.020	0.117	79.341	0.100	0.227	0.248	0.129	0.128	0.145	0.106	0.515	0.038	0.026	85.499
抚州	0.243	0.749	0.217	78.626	0.784	0.945	0.671	2.298	2.084	2.303	2.490	0.985	0.523	131.558
荆州	1.978	2.540	2.466	1.213	79.982	1.353	1.213	1.179	3.417	3.824	2.666	1.451	1.803	124.610
长沙	0.245	0.309	0.172	0.088	0.390	76.138	0.912	0.935	1.537	0.085	2.459	0.771	0.936	89.584
株洲	0.834	0.670	0.569	0.236	1.061	0.379	74.206	0.299	0.813	0.204	0.130	0.186	3.227	92.532
湘潭	0.081	0.274	0.397	0.475	0.044	0.080	0.245	74.982	0.352	0.554	0.465	0.230	0.710	82.702
常德	0.222	0.422	0.112	2.683	0.366	2.758	4.789	4.171	82.131	2.188	1.786	2.022	4.272	120.294
益阳	0.034	0.067	0.349	0.172	0.253	0.345	0.776	1.498	0.138	79.714	0.526	0.160	1.562	88.553
娄底	0.004	0.033	0.148	1.865	0.168	0.540	0.398	0.998	0.270	0.445	76.135	0.078	0.377	90.657
岳阳	0.056	0.102	0.406	0.104	0.698	1.821	2.246	1.150	0.033	0.349	0.917	78.681	1.091	91.726
衡阳	0.092	0.215	0.101	1.483	0.636	0.139	0.083	0.128	0.325	0.459	1.337	0.482	73.948	90.281

(二) 城市雾霾污染的内部与外部贡献度分析

表 4 报告了长江中游城市群各城市雾霾污染的内部与外部贡献度分析结果。由表 4 可以看出，长江中游城市群各城市雾霾污染主要是由自身因素造成的，内部贡献度介于 69.67%~86.34%之间，均值为 78.04%，其中内部贡献度超过 80%的城市包括荆门、武汉、宜昌、孝感、景德镇、常德、九江、黄冈。长江中游城市群各城市雾霾污染来自外部的贡献度介于 13.66%~30.33%之间，均值为 21.96%，其中新余、萍乡、宜春、鹰潭、衡阳、株洲、吉安、湘潭 8 个城市来自外部的贡献度均达到 25%以上，这表明这些城市的雾霾污染受到其他城市较大程度的影响。如果仅就外部贡献而言，城市雾霾污染的外部影响主要来源于距离 400 公里以 27 内的城市，平均贡献度为：而来自公里以上城市的平均贡献度仅为 3.31%，这表明总体上看雾霾污染的空间来源贡献主要来自地理距离较近的城市。

表 4 长江中游城市群各城市雾霾污染的内部与外部贡献度分析

城市	内部	外部			城市	内部	外部		
		总贡献	0~400 公里	400 公里以上			总贡献	0~400 公里	400 公里以上
南昌	78.827	21.173	17.455	3.718	黄冈	80.294	19.706	19.602	0.104
景德镇	82.298	17.702	13.016	4.687	咸宁	78.848	21.152	21.056	0.096
萍乡	70.249	29.751	25.658	4.093	黄石	79.341	20.659	20.359	0.301
新余	69.665	30.335	28.341	1.993	抚州	78.626	21.374	10.801	9.217
鹰潭	73.522	26.478	19.151	7.327	荆州	79.982	20.018	17.562	2.456
宜春	72.515	27.485	25.503	1.982	长沙	76.138	23.862	23.092	0.771
九江	80.853	19.147	18.306	0.841	株洲	74.206	25.794	23.521	2.273
上饶	75.046	24.954	6.637	12.510	湘潭	74.982	25.018	24.667	0.351
吉安	74.754	25.246	22.242	3.004	常德	82.131	17.869	14.751	3.117
武汉	83.706	16.294	16.159	0.135	益阳	79.714	20.286	17.545	2.741
宜昌	83.370	16.630	11.252	5.377	娄底	76.135	23.865	16.646	7.218
鄂州	79.559	20.441	20.376	0.065	岳阳	78.681	21.319	21.161	0.158
荆门	86.339	13.661	9.568	4.093	衡阳	73.948	26.052	16.058	9.993
孝感	83.229	16.771	16.091	0.679					

（三）城市间地理距离对城市雾霾污染空间来源贡献度的影响

由前文分析可知，武汉、抚州、荆门对长江中游城市群雾霾污染的综合贡献度排名靠前，接下来本文以这三个城市为代表，就城市间地理距离对单个城市雾霾污染空间来源贡献度的影响进行分析。表 5 报告了三个代表性城市与其他城市间地理距离及雾霾污染的空间来源贡献度结果。根据表 5，除自身之外，武汉市雾霾污染的外部贡献主要来源于荆门、新余、荆州、株洲等城市，城市贡献度的大小与地理距离远近并无严格的对应关系。即使距离较近的城市，贡献度也可能相对较低，如鄂州，距离武汉 36.19 公里，但贡献度只有 0.023%；即使距离较远的城市，贡献度也可能相对较高，如新余，距离武汉 321.73 公里，贡献度却为 2.570%，明显高于距离较近的鄂州。就抚州而言，雾霾污染的外部贡献主要来源于常德、宜昌、新余、萍乡等城市，贡献度均在 2%以上。其中，宜昌距离黄冈 582.980 公里，贡献度却达到了 2.591%，这一贡献明显大于距离黄冈较近的鹰潭、吉安、宜春等城市。就荆门而言，雾霾污染的外部贡献主要来源于黄冈、新余、孝感、株洲等城市，贡献度均在 1.2%以上，其中新余是距离荆门较远的城市，达到 459.790 公里，但贡献度却达到了 1.748%，显著大于距离荆州较近的荆州、岳阳、常德等城市。以上结果表明，现阶段长江中游城市群的各城市雾霾污染存在普遍的空间影响，这一影响并不是只局限于临近区域，即使距离较远的城市间也可能存在较强的空间影响，基于这一现象，必须扩大长江中游城市群雾霾污染的联防联控范围，应该将那些距离较远但又存在显著影响的城市纳入其中，否则必将大大降低区域联防联控的有效性。

表 5 代表性城市雾霾污染的空间来源贡献（%）与城市间地理距离（公里）

武汉			抚州			荆门		
城市	地理距离	贡献度	城市	地理距离	贡献度	城市	地理距离	贡献度
武汉	0	83.706	抚州	0	78.626	荆门	0	86.339
黄冈	34.800	3.376	鹰潭	101.300	0.013	荆州	93.580	0.091
鄂州	36.190	0.023	南昌	111.070	1.414	宜昌	112.820	1.256
孝感	64.820	0.129	新余	163.330	2.234	孝感	145.120	1.343
黄石	89.340	0.067	吉安	171.260	0.160	武汉	209.940	0.943
咸宁	91.280	0.091	宜春	195.900	0.090	岳阳	219.860	0.280
岳阳	165.300	0.618	景德镇	197.620	0.304	常德	230.270	0.045
九江	170.300	0.153	九江	213.890	0.706	黄冈	244.530	2.132
荆州	194.180	1.854	萍乡	268.750	2.211	鄂州	246.130	0.006
荆门	209.940	2.872	上饶	292.130	0.649	咸宁	257.570	0.332
南昌	255.020	0.040	咸宁	293.950	0.048	益阳	296.210	0.017
宜昌	288.180	0.705	黄石	303.120	0.100	黄石	299.060	0.123
长沙	291.840	0.468	株洲	308.050	0.236	长沙	326.020	1.215
益阳	292.580	0.376	鄂州	336.860	0.441	九江	376.910	0.410
常德	296.780	0.013	黄冈	340.740	0.056	湘潭	391.630	0.105
景德镇	314.740	0.887	岳阳	357.820	0.104	娄底	401.820	0.063
宜春	320.640	0.046	长沙	361.120	0.088	株洲	401.900	1.273
新余	321.730	2.570	湘潭	363.250	0.475	萍乡	427.860	0.207
株洲	333.180	1.251	武汉	365.860	1.345	南昌	441.580	0.149
萍乡	338.100	0.256	衡阳	398.510	1.483	宜春	445.120	0.661
湘潭	353.220	0.004	益阳	403.410	0.172	新余	459.790	1.748
抚州	365.860	0.106	孝感	420.420	0.052	衡阳	500.420	0.211
吉安	367.310	0.165	娄底	456.400	1.865	吉安	500.610	0.241

鹰潭	371.040	0.090	常德	487.310	2.683	景德镇	524.560	0.121
娄底	410.030	0.047	荆州	488.750	1.213	抚州	550.740	0.388
衡阳	460.260	0.085	荆门	550.740	0.640	鹰潭	573.230	0.273
上饶	657.540	0.003	宜昌	582.980	2.591	上饶	834.510	0.032

六、结论及启示

文章基于长江中游城市群 2015—2018 年空气质量指数 (AQI) 日报数据, 采用非线性 Granger 因果关系检验方法识别长江中游城市群城市间雾霾污染的空间关联关系, 借助社会网络分析方法刻画雾霾污染的整体及个体网络结构特征, 并运用方差分解方法分别考察单个城市对城市群整体雾霾污染的贡献程度、城市雾霾污染的内部与外部贡献程度、城市间地理距离对雾霾污染空间来源贡献度的影响, 从而对长江中游城市群雾霾污染实现全面的空间关联分析。研究发现:

(1) 长江中游城市群雾霾污染具有显著的空间非均衡特征, 总体呈现由西北向东南、西南方向不断蔓延的趋势。

(2) 长江中游城市群 27 个城市间雾霾污染存在非线性关联关系, 并呈现出多线程的复杂网络结构形态。在稳健性网络中, 网络密度达到 0.91, 网络关联度为 1, 网络等级度为 0, 网络效率为 0.0154, 这表明网络通达性较好、城市间存在普遍的雾霾污染关联效应; 稳健关联网络并不存在等级森严的结构, 城市间即使距离较远, 也存在雾霾污染的空间关联效应; 城市间雾霾污染的非线性关联关系存在多重叠加现象, 网络较为稳定。度数中心度均值、接近中心度均值、中介中心度均值分别为 98.6、98.7、0.06, 萍乡、新余、宜昌、荆门、孝感、黄石等城市在稳健网络中处于核心位置。

(3) 湖北省城市对长江中游城市群雾霾污染的综合贡献度最大; 长江中游城市群各城市雾霾污染主要是由自身因素造成的, 但是外部因素也具有重要影响; 就城市总体看, 雾霾污染的空间来源贡献主要来自地理距离较近的城市, 但就单个城市看, 空间来源贡献度的大小与地理距离远近并无严格的反向对应关系, 即使距离较远的城市, 也可能具有较高的贡献度。

基于以上结论, 本文可以得出如下启示:

(1) 加快构建长江中游城市群雾霾污染联防联控体系。《长江中游城市群发展规划》指出, 通过加强环境污染联防联控、完善生态补偿机制及实施环境监管执法联动等措施, 建立健全跨区域生态文明建设联动机制。目前, 长江中游城市群 27 个城市之间普遍存在雾霾污染关联关系, 没有哪个城市能够孤立于关联网络之外, 面对这一现状, 应该从更广视野、更大格局重新审视长江中游城市群雾霾污染问题, 加快构建雾霾污染的多层次、跨区域联防联控体系, 在更大的空间范围内实现雾霾污染的协同治理和空气质量的协同改善 (刘华军和彭莹, 2019)^[16]。湖北是区域联防联控的重点省份; 萍乡、新余、宜昌、荆门、孝感、黄石等是区域联防联控的重点城市。

(2) 扩大雾霾污染联防联控范围要充分考虑空间来源贡献。面对雾霾污染频发天气, 必须扩大雾霾污染联防联控范围, 提高防控措施的科学性和精准性。目前, 我国雾霾污染联防联控范围的确定主要依据地理距离远近以及行政区划关系, 忽视了空间来源贡献, 根据本文研究, 距离较远的城市之间雾霾污染也有可能存在较强的空间关联关系, 而距离较近的城市之间雾霾污染也有可能存在较弱的空间关联关系, 在此情形下联防联控效果必将大打折扣。因此, 本文以为扩大雾霾污染联防联控范围必须同时兼顾城市之间的地理距离远近、行政区划关系以及空间来源贡献。

(3) 要成立城市群雾霾污染管理机构, 完善考核机制与监督机制。为了保障长江中游城市群雾霾污染联防联控取得预期效果, 必须成立“城市群—城市”的权利保障机构, 负责统一制定联防联控政策、统筹城市群防控协调工作。同时, 还要加快构建以促进生态文明建设为导向的环境管理评价和考核体系, 完善环境污染的监督机制和责任追究制度, 以避免环境保护工作中

出现重建设轻成效、重投入轻产出等问题。另外,必须强调指出的是,雾霾污染在本质上是由人类社会经济活动造成的(石敏俊,2017)^[17]。因此,要实现真正意义上的雾霾污染联防联控必须从经济发展方式、能源结构、能源消耗、环境规制、科学研究与发展、要素流动、产业集聚、城市化、人口规模、人口集聚、交通设施条件等方面进一步展开研究。这一问题已超出本文的研究范围,将是作者未来研究需要拓展和深化的主要方向。

参考文献:

- [1]孙亚男,肖彩霞,刘华军.长三角地区大气污染的空间关联及动态交互影响——基于2015年城市AQI数据的实证考察[J].经济与管理评论,2017,33(2):121-131.
- [2]刘晨跃,尚远红.雾霾污染程度的经济社会影响因素及其时空差异分析——基于30个大中城市面板数据的实证检验[J].经济与管理评论,2017,33(1):75-82.
- [3]WANG S H,HUNG W T,CHANG S C,et al.Transport Characteristics of Chinese Haze over Northern Taiwan in Winter,2005-2014[J].Atmospheric Environment,2016,126:76-86.
- [4]刘华军,杜广杰.中国城市大气污染的空间格局与分布动态演进——基于161个城市AQI及6种分项污染物的实证[J].经济地理,2016,36(10):33-38.
- [5]潘慧峰,王鑫,张书宇.雾霾污染的持续性及空间溢出效应分析——来自京津冀地区的证据[J].中国软科学,2015(12):134-143.
- [6]刘华军,孙亚男,陈明华.雾霾污染的城市间动态关联及其成因研究[J].中国人口·资源与环境,2017(3):74-81.
- [7]刘华军,杜广杰.中国雾霾污染的空间关联研究[J].统计研究,2018(4):3-15.
- [8]GRANGER C W J,NEWBOLD P.Forecasting Economic Time Series[M].Salt Lake City:Academic Press,1986:500-501.
- [9]BAEK E,BROCK W.A General Test for Nonlinear Granger Causality:Bivariate Model[R].Madison:Iowa State University and University of Wisconsin at Madison Working Paper,1992.
- [10]HIEMSTRA C,JONES J D. Testing for Linear and Nonlinear Granger Causality in the Stock Price-Volume Relation[J].Journal of Finance,1994,49(5):1639-1664.
- [11]DIKS C,PANCHENKO V. A New Statistic and Practical Guidelines for Nonparametric Granger Causality Testing[J].Journal of Economic Dynamics&Control,2006,30(9):1647-1669.
- [12]陈明华,刘华军,孙亚男,等.城市房价联动的网络结构特征及其影响因素——基于中国69个大中城市月度数据的经验考察[J].南方经济,2016(1):71-88.
- [13]刘华军,刘传明.环境污染空间溢出的网络结构及其解释——基于1997-2013年中国省际数据的经验考察[J].经济与管理评论,2017,33(1):57-64.

[14] 杨子晖, 赵永亮, 柳建华. CPI 与 PPI 传导机制的非线性研究: 正向传导还是反向倒逼[J]. 经济研究, 2013(3):83-95.

[15] BROOCK W A, SCHEINKMAN J A, DECHERT W D, et al. A Test for Independence based on the Correlation Dimension[J]. *Econometric Reviews*, 1996, 15(3):197-235.

[16] 刘华军, 彭莹. 雾霾污染区域协同治理的“逐底竞争”检验[J]. 资源科学, 2019, 41(1):185-195.

[17] 石敏俊. 雾霾治理的经济成本与社会成本[EB/OL]. (2017-01-24) [2020-08-02]. <http://www.rmlt.com.cn/2017/0124/457460.shtml?winzoom=1>.

注释:

1 AQI 指数大于 100 即为空气质量不达标, AQI 指数大于 200 即为重度及以上污染。

2 根据 2015 年国务院批复同意的《长江中游城市群发展规划》, 长江中游城市群包括 31 个城市, 但环保部没有公布襄阳、潜江、仙桃、天门 4 个城市 AQI 数据。

3 根据国家环保部发布的《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633-2012), AQI 是定量描述空气质量状况的无量纲指数, 它综合考虑了二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)、粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物(PM_{10})、一氧化碳(CO)、臭氧(O_3)等多种污染物, 是衡量空气质量的综合指标。

4 如果时间序列存在单位根, 那么非线性 Granger 因果关系检验的 F 统计量可能不再具有标准的极限分布, 从而导致错误的检验结论。

5 由于篇幅所限, 本文省略单位根检验结果, 读者若有兴趣可向作者索取。

6 由于篇幅所限, 本文省略 BDS 检验结果, 读者若有兴趣可向作者索取。