

中国东北部城市群PM2.5网络研究

宋雨轩, 阎爽*, 顾长贵

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2022年5月21日; 录用日期: 2022年6月11日; 发布日期: 2022年6月21日

摘要

本文选取了2021年1月1日到2021年12月18日北京、天津、河北、山东、山西、辽宁两个直辖市、四个省份中的52个城市的实时PM2.5浓度数据, 通过计算转移熵, 分别构建中国东北部城市群之间的年度和月份PM2.5互相关网络, 寻找城市之间是否存在雾霾相互影响, 以及该影响随月份的演化规律。发现: 1) 聊城、晋中、济南、淄博、锦州、阜新6个城市在PM2.5污染传播的过程中和周边城市的关联性较强, 山东地区和辽宁地区属于PM2.5传播的重要省份; 2) 2021年1~3月和11~12月PM2.5浓度和传播程度处于全年较高水平, 6~9月处于全年较低水平, PM2.5浓度在全年中呈现“U”型变化特征; 3) 辽阳、朔州、邯郸为波动较小结构中的重要节点, 泰安、承德、衡水、滨州为波动较大结构中的重要节点。

关键词

转移熵, 复杂网络, PM2.5, 污染传播, 城市群

Network of PM2.5 in Urban Clusters in Northeastern China

Yuxuan Song, Shuang Yan*, Changgui Gu

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 21st, 2022; accepted: Jun. 11th, 2022; published: Jun. 21st, 2022

Abstract

In this paper, we selected some real-time PM2.5 concentration data. These data contain data of 52 cities in Beijing, Tianjin, Hebei, Shandong, Shanxi, and Liaoning from January 1, 2021 to December 18, 2021. By calculating the transfer entropy, this paper constructs annual and monthly PM2.5 cross-correlation networks among urban clusters in northeastern China, respectively. Thus, it is

*通讯作者。

possible to obtain whether there is a haze mutual influence between cities and the evolution pattern of this influence with month. It is found that 1) there are six cities with strong correlation with neighboring cities in the process of PM_{2.5} pollution propagation. These six cities are Liaocheng, Jinzhong, Jinan, Zibo, Jinzhou, and Fuxin. Shandong region and Liaoning region belong to the important provinces for PM_{2.5} propagation. 2) In 2021, PM_{2.5} concentration and transmission are at a high level from January to March and from November to December, and at a low level from June to September, showing a “U”-shaped change in PM_{2.5} concentration throughout the year. 3) Liaoyang, Shuozhou and Handan are important nodes in the less volatile structure, while Tai’an, Chengde, Hengshui and Binzhou are important nodes in the more volatile structure.

Keywords

Transfer Entropy, Complex Networks, PM_{2.5}, Contamination Spread, City Cluster

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来,中国工业化进程迅速得到推进,在区域经济不断发展的同时,大气污染也不断增加,出现了一系列环境污染问题。近年来,以PM₁₀(可吸入颗粒物)和PM_{2.5}(可入肺颗粒物)为核心污染物的复合型雾霾肆虐我国大面积领土,虽然出台并实施了较多严格的污染控制措施,大气污染治理任务仍然任重道远[1]。与PM₁₀相比,PM_{2.5}的粒径小、面积大、活性强,因此更易吸附有害物质,从而对人们的呼吸道、心血管等产生危害[2]。

我国大多城市空气PM_{2.5}浓度展现出“高浓度”、“长时间滞留”和“重污染区域性”特点[3]。2016年,国内雾霾污染的影响范围达到188万平方公里,全国空气质量达到严重污染的城市一共有24个,其中19个位于京津冀及周边地区,石家庄市的PM_{2.5}浓度更是突破1000 μg/m³;至2020年,PM_{2.5}年均浓度排名前十名的城市有7个属于河北,3个属于山东[4]。在中国东北部的省份中,辽宁作为传统的老工业基地,入冬后雾霾污染较重,2016年各个城市均未到达世卫组织制定的最低标准[5]。山西作为我国重要的重化工和能源基地,PM_{2.5}的污染较为严重[6],且在西南风存在的情况下山西的大气污染物会远距离输送至北京等地区[7]。山东省西部城市的PM_{2.5}污染情况受河北省传播较为严重,由于冬季的盛行风向,各市受区域影响较大的城市也多数集中在西部或者北部[8]。京津冀地区雾霾呈明显的空间自相关[9],且在近20年进行了重拳治污,在工业和燃煤等领域产生了一些较为良好的治理效果,但是来自于周边区域的污染物的空间溢出效应以及交通污染会在某种程度上抵消了这些治理效果,这些因素使得京津冀的重拳治污效果一直以来都并不理想[10]。

复杂网络是一种可以将复杂系统中对象及各对象之间的关联抽象为复杂网络中节点和连边的特殊网络结构,一般具有小世界特性、无标度特性和社团结构特性[11]。自从Watts和Strogatz提出了小世界模型以及Barabasi和Albert提出了无标度网络模型,复杂网络理论产生并得到发展[12][13]。如今,复杂网络已经广泛应用于各个领域,包括建筑工程领域[14]、金融风险研究领域[15][16][17]、医学领域[18][19]。诸多学者对中国东北部地区(尤其是京津冀地区)的大气污染状况进行了网络构建,从时间上的演化与空间上的相关两个方面对网络进行了分析,并分别提出了相应的PM_{2.5}治理对策。从时间维度,薛安等人使用2014年5月到2015年4月的数据构建了中国城市PM_{2.5}加权网络,并采用GN算法对网络进行划分,

得出不同季节的 PM_{2.5} 污染的区域性程度顺序如下: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季[20]。安海岗等人取京津冀及周边共 31 个城市从 2015~2019 年的日均 AQI 数据作为研究样本, 构建京津冀及周边城市的空气污染关联网络, 结果表明在不同季节城市空气污染关联紧密性存在较大差别, 其中冬季网络的关联性最强, 需要根据不同季节分别制定治理措施[21]。从空间维度, 肖琴等人选取了 2017 年华东、华西、华南、华中、华北五大区域的 68 个城市的 PM_{2.5} 数据进行研究, 用相关性大小构建了空气污染的复杂网络, 并对网络性质进行分析, 得到了 13 个度较大的地区, 表示空气污染相对严重的区域, 分别是北京、苏州、廊坊、长沙、天水、天津、唐山、张家口、石家庄、张家界、中山、西宁、兰州[22]。安海岗等人选取 2015 年到 2020 年的京津冀及周边 31 个城市的日均 PM_{2.5} 数据构建了空间关联网络, 并分析了网络的整体特征, 发现网络图比较紧密, 且在中间城市带(石家庄、邢台等地) PM_{2.5} 污染较为严重, 得到了中间城市带应重点监控的结果[23]。崔丽珠用小世界网络, 基于演化博弈理论, 分析了各个地方政府在协同治理网络中进行个体博弈时, 在考虑异质性的条件下的均衡点和稳定状态, 研究发现, 小规模的大气污染协同治理网络可以明显提高地方政府协同治理决策的演化速度, 同时得出当收入异质性的比值区间在 [0.6, 1]、偏好异质性的比值区间在 [1.2, 1.4], 分配异质性比值区间在 [0.6, 1] 时可以更好地实现大气污染协同治理合作涌现, 并为改善区域异质性带来的大气污染协同治理困境提出建议[24]。马宇博等人根据 PM_{2.5} 浓度数据建立无向网络模型研究京津冀各城市节点的重要性, 得到重要性由高到低排名, 分别是保定、唐山、廊坊、石家庄、天津、北京、沧州、衡水、邢台、秦皇岛、邯郸、承德, 并提出 3 点防治建议[25]。

现有的对于研究大气污染的复杂网络模型大多基于无向网络模型, 而 PM_{2.5} 等污染物在城市之间的传播往往具有不对称性, 故本文选取有向网络中的转移熵对各个城市之间 PM_{2.5} 传播过程进行分析。转移熵是分析多个时间序列因果关系的有效方法, 可以测量两个随机过程之间有向信息传递量[26]。转移熵是一种非线性方法, 假设数据是平稳序列[27], 且通常在较低维的情况下更有效[28]。它不仅可以描述两个随机序列之间是否有相互作用, 还能描述两个序列之间的相关度[29], 所以适用于构建 PM_{2.5} 污染传播网络。

本文通过转移熵计算各个城市之间的 PM_{2.5} 影响程度, 通过研究设定一个合理的阈值, 确定网络中的连边情况, 依据此规则建立中国东北部城市群的互相关网络和月份网络, 之后通过对连边波动程度的分析和网络建立, 并出一定的防治建议。文章其余结构如下。第二章为数据描述与方法, 第三章为实验结果分析, 第四章为结论。

2. 数据描述与方法

2.1. 数据描述

由于中国东北部地区 PM_{2.5} 污染较严重且根据上述文献可知研究东北部城市群之间 PM_{2.5} 传播的重要性, 本文选取了京津冀及其周边省份(山东省、山西省和辽宁省)的 54 个城市作为研究对象, 其中因为廊坊和临汾两个城市雾霾数据缺失值过多, 故排除这两个城市, 对其余 52 个城市进行研究。最终本文选取中国东北部地区的共 52 个城市作为研究对象, 包括北京、天津、河北省、山东省、山西省、辽宁省的城市, 依次为北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、保定、张家口、承德、沧州、衡水、邢台、太原、沈阳、大连、济南、青岛、营口、丹东、盘锦、葫芦岛、临沂、德州、淄博、枣庄、烟台、潍坊、济宁、泰安、日照、威海、菏泽、大同、长治、阳泉、鞍山、抚顺、本溪、锦州、晋城、朔州、晋中、运城、忻州、吕梁、阜新、辽阳、铁岭、朝阳、聊城、东营、滨州, 数据来源于天气后报官方网站(<http://www.tianqihoubao.com>)。对以上 52 个城市分别选取 2021 年 1 月 1 日 0 时至 2021 年 12 月 18 日 23 时 8391 个 PM_{2.5} 浓度数据进行研究。如果有缺失数据, 则采用诱导有序加权相对贴度(IOWRCD)的方

法进行补全[30]。

通过计算 PM2.5 浓度均值，选取 PM2.5 平均浓度最小的威海以及 PM2.5 平均浓度最大的太原为例，绘制 PM2.5 浓度实时波动图(见图 1(a)和图 1(b))，横坐标为月份，纵坐标为 PM2.5 浓度，单位为($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。威海和太原的实时 PM2.5 浓度均值分别为 $21.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $51.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。又绘制了威海和太原两个城市的 PM2.5 浓度增长率图(见图 1(c)和图 1(d))。可见太原总体 PM2.5 浓度较大，增长率较小；威海总体 PM2.5 浓度较小，增长率较大。

由于转移熵假设数据是平稳序列且符合马尔科夫性，本文对补全后的 52 个城市的实时 PM2.5 浓度数据取对数差分。即城市 A_i 经处理后的序列可见公式(1)：

$$X_i = \{x_{it} \equiv |\log X_{t+1} - \log X_t|, t = 1, 2, \dots, 8390; i = 1, 2, \dots, 52\}。 \quad (1)$$

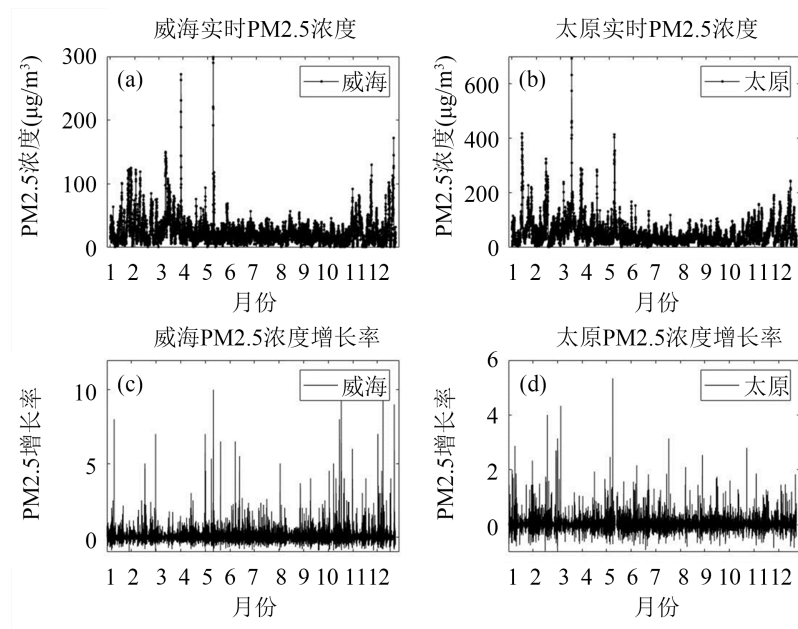


Figure 1. Real-time fluctuations of PM2.5 concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in four cities
图 1. 四个城市 PM2.5 浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)实时波动图

2.2. 转移熵网络

计算转移熵矩阵，得到两个序列之间的相互作用。假设两个随机时间序列 $x_n^m = \{x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-m-1}\}$ 和 $y_n^k = \{y_n, y_{n-1}, \dots, y_{n-k-1}\}$ ，则两者之间的转移熵可见公式(2) [31]：

$$T_{Y \rightarrow X} = \sum_{x, n+1} p(x_{n+1}, x_n^m, y_n^k) \log \left(\frac{p(x_{n+1} | x_n^m, y_n^k)}{p(x_{n+1} | x_n^m)} \right)。 \quad (2)$$

其中 $T_{Y \rightarrow X}$ 表示时间序列 y_n 到 x_n 的转移熵，及 y 传递给 x 的信息量。转移熵数值越大，则传递的信息较多，及可视为 y_n 对 x_n 的影响越大。如果考虑到 x_n^m 和 y_n^k 之间可能存在的较长的延迟时间，可以将转移熵改写成公式(3)：

$$T_{Y \rightarrow X} = \sum_{x, n+1} p(x_{n+\mu}, x_n^m, y_n^k) \log \left(\frac{p(x_{n+\mu}, x_n^m, y_n^k) p(x_n^m)}{p(x_n^m, y_n^k) p(x_{n+\mu}, x_n^m)} \right)。 \quad (3)$$

之后进一步确定有向网络连边方向。对计算出的 $T_{Y \rightarrow X}$ 和 $T_{X \rightarrow Y}$ 进行比较, 如果 $T_{Y \rightarrow X} > T_{X \rightarrow Y}$ 则说明 y 传递给 x 的信息量大于 x 传递给 y 的信息量, 即确定连边方向时应从 y 指向 x 。最后确定阈值, 决定是否连边。确定阈值使网络中没有孤立节点, 并保留转移熵数值大于阈值的序列主体及进行连边。

3. 实验结果分析

3.1. 转移熵网络

本文以选取的中国东北部地区的共 52 个城市作为 52 个网络节点, 将经过初步处理补全缺失数据后的实时 PM2.5 浓度数据取对数差分, 并计算其转移熵矩阵作为网络中连边的权重建立网络。设 A_i 和 A_j 为城市 ($i, j \in [1, 52]$), 则转移熵矩阵见公式(4):

$$R = \begin{pmatrix} A_i A_i & \cdots & A_i A_j \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_j A_i & \cdots & A_j A_j \end{pmatrix}. \tag{4}$$

通过对 52 个城市的转移熵矩阵的计算, 将转移熵(矩阵元)从大到小排列并绘图如下(见图 2(a)), 该图以转移熵数值为纵坐标, 以 $\log(\text{rank})$ 为横坐标, 共有 52×51 个数据。近似拟合出两条直线可得其交点的纵坐标为 0.0163, 即该网络中阈值定为 0.0163。在该组数据中满足阈值的有 17 个数据, 即网络中有 17 条有向边。

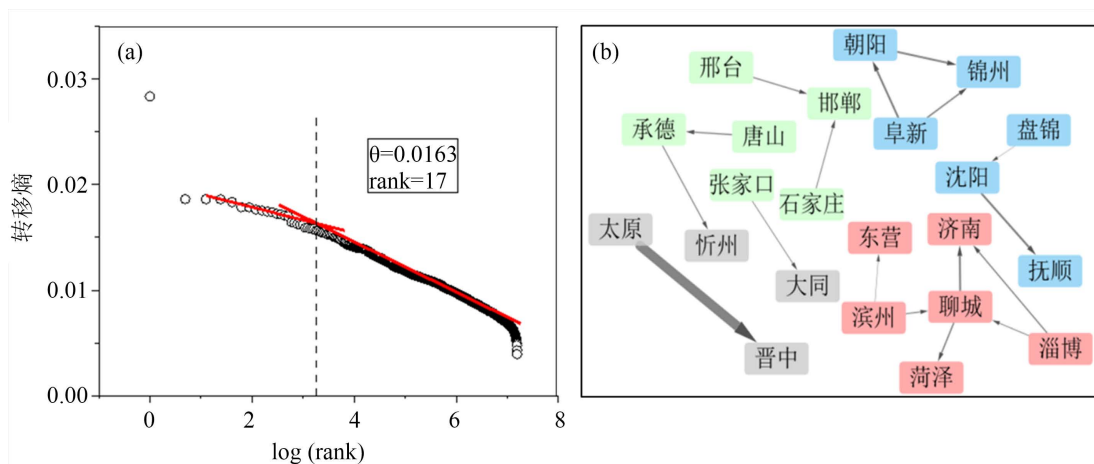


Figure 2. Transfer entropy network. (a) Network threshold selection; (b) transfer entropy network
图 2. 转移熵网络。(a) 网络阈值选取; (b) 转移熵网络

排除网络的孤立节点, 转移熵网络剩 21 个节点, 17 条连边(见图 2(b))。其中箭头代表 PM2.5 在城市间影响的方向, 节点指出的箭头个数越多, 代表越多城市受该城市影响, 指向某节点的箭头个数越多, 代表该城市受越多城市影响。例如指向聊城的箭头较多, 说明影响聊城的周边城市较多, 包括滨州、淄博; 指向大同的只有来自张家口的一个箭头, 说明影响张家口的城市数量较少。连边的粗细由转移熵代表的权重决定, 连边越粗, 表示转移熵值越大, 即影响的程度越大, 反之, 代表转移熵值越小, 即影响的程度越小。例如太原指向晋中的连边转移熵值为 0.0283, 相对于其他节点之间的连边较粗, 较为明显。盘锦指向沈阳的连边转移熵值为 0.0164, 相对于其他节点之间的连边较细, 较为不明显。

从图 2(b)可以看出, 综合考虑转移熵网络的出度、入度以及转移熵数值, 聊城、晋中、济南、淄博、锦州、阜新 6 个城市在 PM2.5 污染传播的过程中和周边城市的关联性较强。其中聊城受滨州、淄博影响

较大,对济南、菏泽影响较大,且来自外界的影响小于对外界传播的影响;晋中受太原影响较大;济南受淄博和聊城共同影响,影响较大;淄博对济南、聊城影响较大;锦州受朝阳和阜新共同影响,阜新对朝阳、锦州影响较大。

图 2(b)中不同颜色的节点属于不同省份,由此可以看出,山东地区和辽宁地区在 2021 年度中国东北部地区属于 PM_{2.5} 传播的重要省份。不仅重要城市节点个数更多,且图 2(b)得出的度值最大的 6 个城市中,3 个城市来自山东省(聊城、济南、淄博),2 个城市来自辽宁省(锦州、阜新)。相比较,山西省重要城市节点较少,与周边城市的关联性也较弱。河北省总体 PM_{2.5} 传播能力居中,但有部分节点受其他节点的影响较大,如晋中。

3.2. 时序网络

本文以选取的中国东北部地区的共 52 个城市作为 52 个网络节点,以经过初步处理补全缺失数据后的 12 个月的实时 PM_{2.5} 浓度数据的转移熵矩阵作为网络中边权分别建立时序网络。建网规则与转移熵网络建网规则相同。

通过计算 52 个城市在 2021 年 1 月至 12 月每个月的转移熵矩阵,对矩阵中 (i, j) 的值和 (j, i) 的值比较之后可以获得 12 个 52×52 的矩阵,将矩阵中的数值按降序排列,绘图 3 如下。该图以转移熵为纵坐标,以 $\log(\text{rank})$ 为横坐标,共 $52 \times 51 \times 12$ 个数据。近似拟合出两条直线可得其交点的纵坐标为 0.0439,即该网络中阈值定为 0.0439。

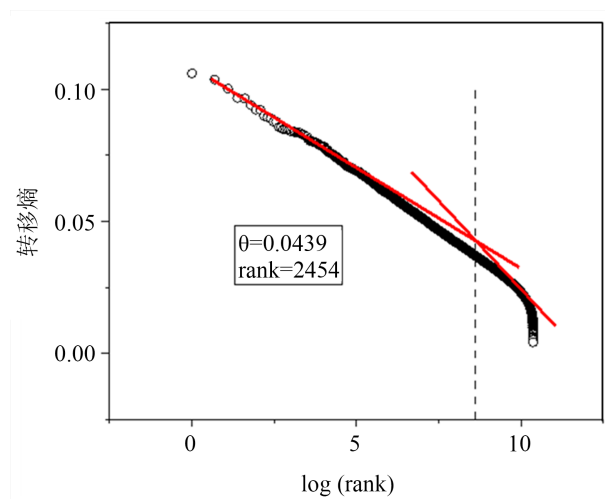


Figure 3. Timing network thresholds
图 3. 时序网络阈值

分别将每个月的数据使用相同的阈值(0.0439)进行处理,然后绘制每个月的网络(见图 4)。

由图 4 可知,1 月菏泽、邯郸、德州、聊城与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;2 月石家庄、德州、晋中、太原与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;3 月邢台、聊城、北京、德州、锦州与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;4 月大连、大同、张家口、聊城与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;5 月邯郸、邢台、抚顺与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;6 月大同、德州、邢台与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;7 月盘锦对锦州的影响极为显著,且铁岭受威海与鞍山共同影响显著;8 月晋城、邯郸、聊城与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;9 月晋城、聊城、长治与周边城市之间的影响较为显著;10 月菏泽、济宁、济南、德州、菏泽、阜新与周边城市之间的 PM_{2.5} 传播较为显著;11

月运城、保定、石家庄、长治、菏泽、聊城、泰安、德州、锦州与周边城市之间的 PM2.5 传播较为显著；12 月大多数城市与周边城市之间的 PM2.5 传播均较为显著。按省份来看，在以上所有省份中山东省和辽宁省 PM2.5 最为严重，其中淄博、滨州、济宁、潍坊、德州、锦州、抚顺、阜新、盘锦在多个月中均为 PM2.5 网络中重要性较大的节点。山西省的长治、大同、忻州，以及河北省的邯郸、衡水，以及北京，均为重要性较大的节点。

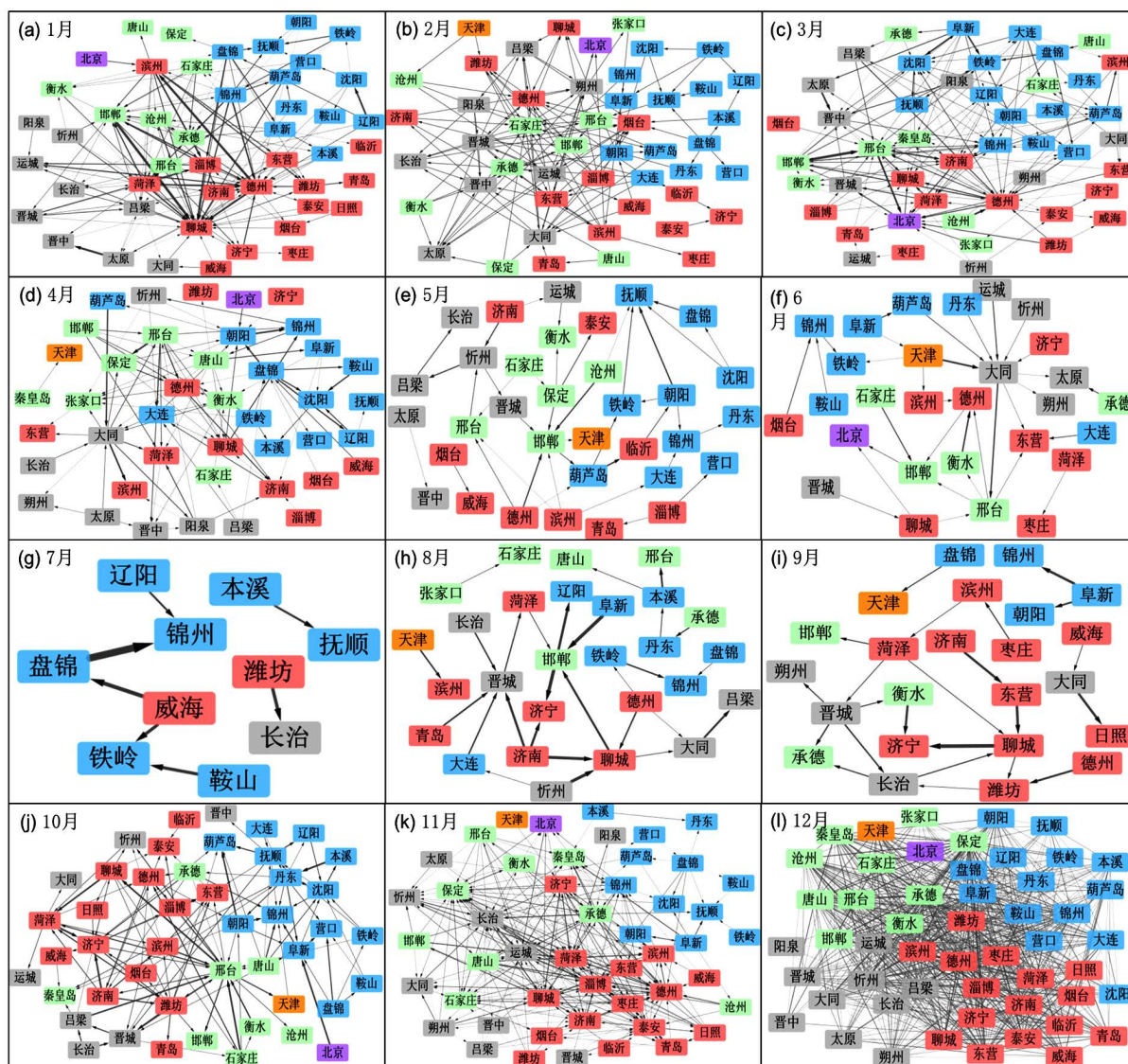


Figure 4. Timing network
图 4. 时序网络

为了进一步发现各个月之间 PM2.5 的总体规律，每个月的节点数和连边数见表 1。图 5 以折线图的方式展示出各月网络节点个数和连边条数。可见 2021 年 1~3 月和 11~12 月 PM2.5 浓度和传播程度处于全年较高水平，6~9 月处于全年较低水平。PM2.5 浓度在全年中呈现“U”型变化特征——夏季(6~9 月)处于“U”的底端，较为低发，PM2.5 浓度和传播程度均在一个较低的水平；冬季处于“U”的峰值，较为高发，尤其是 12 月，可见由于季节性原因导致的 PM2.5 浓度及传播程度的差异性较大。

Table 1. Number of network nodes and connected edges by month
表 1. 各月网络节点个数和连边条数

月份	节点数	连边数	月份	节点数	连边数
1月	47	158	7月	10	7
2月	48	127	8月	27	27
3月	47	147	9月	23	23
4月	42	94	10月	46	125
5月	33	39	11月	49	276
6月	28	32	12月	52	862

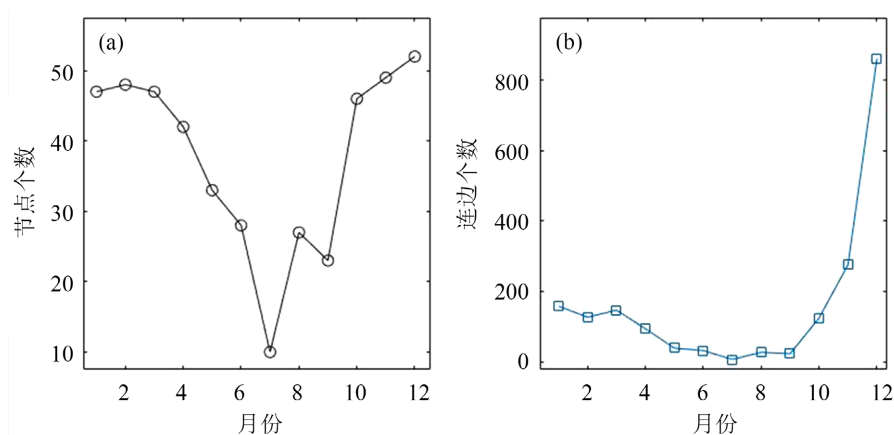


Figure 5. Line graph of nodes and number of connected edges by month
图 5. 各月节点及连边个数折线图

3.3. 波动程度

为了进一步对城市间 PM2.5 传播特性进行分析, 本文借助各个城市间的每个月的转移熵数据进行影响的波动程度分析, 从而划分出城市间波动程度较小的影响和波动程度较大的影响。波动程度较大表示 PM2.5 传播影响随月份变化较大, 波动程度较小表示 PM2.5 传播影响随月份变化较小。

首先将 3.2 建立月份网络中得到的 12 个月的转移熵矩阵进行处理, 求取对应位置的平均值和标准差。 $T_t (t \in [1, 12])$ 表示 1 月到 12 月的 12 个转移熵矩阵, $T_{ij} (i, j \in [1, 52])$ 表示 t 月的转移熵矩阵中第 i 行第 j 列的值, 则对应位置的平均值矩阵可表示为公式(5):

$$mean = \begin{pmatrix} T_{111} + \dots + T_{1211} & \dots & T_{1152} + \dots + T_{12152} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{1521} + \dots + T_{12521} & \dots & T_{15252} + \dots + T_{125252} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$mean_{ij}$ 表示对应位置的平均值矩阵 $mean$ 中第 i 行第 j 列的数值, std_{ij} 表示对应位置的标准差矩阵 std 中第 i 行第 j 列的数值, 则对应位置标准差矩阵可表示为公式(6):

$$std = \begin{pmatrix} std_{11} & \dots & std_{152} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ std_{521} & \dots & std_{5252} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中 std_{ij} 可表示为:

$$std_{ij} = \sqrt{\frac{(T_{1ij} - mean_{ij})^2 + \dots + (T_{12ij} - mean_{ij})^2}{12}} \quad (7)$$

将平均值作为横坐标，标准差(*std*)/平均值(*mean*)作为纵坐标进行散点图的绘制(如图 6(a))，同时根据现有数据结构取 $\frac{std}{mean} > 0.6$ 的部分的连边为波动程度较大连边， $\frac{std}{mean} < 0.16$ 的部分的连边为波动程度较小连边，并将这两条垂直于 $\frac{std}{mean}$ 坐标轴的直线绘制在散点图中(见图 6(a))。由此可以将整个散点图划分为三个区域，最上部分表示波动程度较大的联系，最下部分表示波动程度较小的联系。

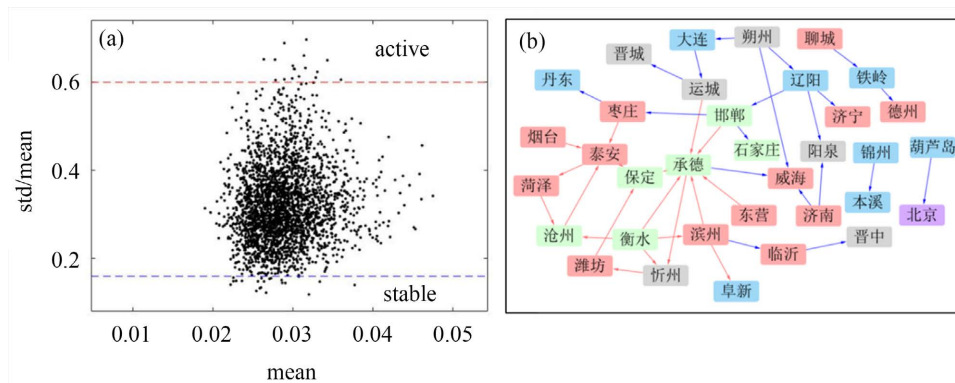


Figure 6. Fluctuation of the timing network. (a) *std/mean*-*mean* scatter plot; (b) fluctuation degree network
图 6. 时序网络波动程度。(a) *std/mean*-*mean* 散点图; (b) 连边波动程度网络

将波动较大的结构和波动较小结构提取出来，并绘制有向网络，其中波动较大的连边在网络图中由红色表示，波动较小的连边由蓝色表示，见图 6(b)。由图可知，一般波动较小的结构传播范围较小，大多均在省内或在相邻省份之间传播；波动较大结构可能传播范围较大，大多跨省传播。波动较大结构的数量大于波动较小结构。同时可以得出 2021 年度全年波动较小的传播大多分布在辽宁省，辽阳、朔州、邯郸为波动较小结构中的重要节点；2021 年度全年波动较大的传播主要存在于河北和山东两个省份之间，其中泰安、承德、衡水、滨州为波动较大结构中的重要节点。

4. 结论

PM2.5 等污染物在城市之间的传播往往具有不对称性，故本文选取有向网络中的转移熵作为网络连边规则对各个城市之间 PM2.5 传播过程进行分析。转移熵是分析多个时间序列因果关系的有效方法，可以用来分析北京、天津、河北、山东、山西、辽宁 52 个城市的 PM2.5 传播情况。本文将 PM2.5 实时浓度取对数差分，通过转移熵计算各个城市之间的 PM2.5 影响程度，经研究设定一个合理的阈值，确定网络中的连边数量和方向，并依据此规则建立城市群的年 PM2.5 网络和月 PM2.5 网络。转移熵网络中，聊城、晋中、济南、淄博、锦州、阜新 6 个城市在 PM2.5 污染传播的过程中和周边城市的关联性较强。山东地区和辽宁地区在 2021 年度中国东北部地区属于 PM2.5 传播的重要省份；山西省重要城市节点较少，与周边城市的关联性也较弱；河北省总体 PM2.5 传播能力居中，但有部分节点受其他节点的影响较大(如晋中)。月份网络中可见 2021 年 1~3 月和 11~12 月 PM2.5 浓度和传播程度处于全年较高水平，6~9 月处于全年较低水平。PM2.5 浓度在全年中呈现“U”型变化特征——夏季(6~9 月)处于“U”的底端，较为低发，PM2.5 浓度和传播程度均在一个较低的水平；冬季处于“U”的峰值，较为高发，尤其是 12 月，

可见由于季节性原因导致的 PM_{2.5} 浓度及传播程度的差异性较大。之后对连边的波动程度进行分析发现,一般波动较小的结构传播范围较小,波动较大结构可能传播范围较大。2021 年度全年波动较小的传播大多分布在辽宁省,辽阳、朔州、邯郸为波动较小结构中的重要节点;2021 年度全年波动较大的传播主要存在于河北和山东两个省份之间,其中泰安、承德、衡水、滨州为波动较大结构中的重要节点。通过分析全年的转移熵网络和月份网络,可以得出共同的在传播过程中与周边城市关联度较强的节点,如锦州、晋中、菏泽、淄博、邯郸、阜新。通过分析年转移熵网络和波动程度网络,可得辽宁省在 2021 年度 PM_{2.5} 传播中对周边城市影响较大,且该影响随月份变化程度较小、波动程度较小,应优先、重点治理。

为了有效降低这种区域性 PM_{2.5} 污染,本文依据转移熵网络、月份网络和波动程度网络,基于网络内 PM_{2.5} 污染防治一体化的理念,提出以下几点防治建议:

1) 根据年度 PM_{2.5} 网络对度值较大的 6 个城市,即聊城、晋中、济南、淄博、锦州、阜新建主体保护区,重点治理。同时应当设立区域监督防治联盟,交流经验、共同制定切实可行的防治方案,从而使整个区域的 PM_{2.5} 污染情况得到控制。

2) 根据季节 PM_{2.5} 网络,因地制宜,制定不同月份、不同季节的防治方案。例如夏季 PM_{2.5} 污染传播范围较小,即可在各个城市内部,或小范围内进行分点治理,冬季 PM_{2.5} 污染传播范围较广,则需要联合多个城市,扩大分区治理范围,加强各地环境部门内部的沟通,进行联合防治。

3) 根据波动程度的分析,在联合防治策略的优先级上,需要优先进行 PM_{2.5} 传播波动较小的地区的防治。例如优先在辽阳、朔州、邯郸这种地区进行防治 PM_{2.5} 污染政策的制定。

参考文献

- [1] 张瑾,薛彩凤,温彪,杨桂实,李宏宇,武宇鹏,李宏艳,何秋生,李彦君. 浅谈 PM_{2.5} 的危害及我国的控制历程与经验[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 109-114.
- [2] 张生玲,王雨涵,李跃,张鹏飞. 中国雾霾空间分布特征及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 15-22.
- [3] 王稚真,倪佳慧. 国内空气 PM_{2.5} 的污染现状与优化途径分析[J]. 环境与发展, 2020, 32(4): 72-73.
- [4] Liang, X., Zou, T., Guo, B., Li, S., Zhang, H., Zhang, S., et al. (2015) Assessing Beijing's PM_{2.5} Pollution: Severity, Weather Impact, APEC and Winter Heating. *Proceedings of the Royal Society Mathematical Physical & Engineering Sciences*, **471**, Article ID: 20150257. <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0257>
- [5] 王宏杰,杨留辉. 辽宁城镇化的雾霾污染效应[J]. 现代经济信息, 2016(1): 498.
- [6] 李军霞,银燕,李培仁,李润君,晋立军,李劲. 山西夏季气溶胶空间分布飞机观测研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 1950-1959.
- [7] 孟伟,高庆先,张志刚,缪启龙,雷霆,李金环,康娜,任阵海. 北京及周边地区大气污染数值模拟研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 11-18.
- [8] 郑印. 山东省 PM_{2.5} 来源解析研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [9] 王一辰,沈映春. 京津冀雾霾空间关联特征及其影响因素溢出效应分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 41-44.
- [10] 谷峰,尹立峰,赵晶磊. 京津冀雾霾合作治理困境及其解决途径[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(17): 63-64.
- [11] 马宁,邢俊凤,宋宽. 复杂网络方法在中药复方数据挖掘中的应用[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(12): 68-70.
- [12] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of Small-World Networks. *Nature*, **393**, 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- [13] Barabási, A.L. and Albert, R. (1999) Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, **286**, 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [14] 吴静,严小丽,李桃. 复杂网络理论下建筑供应链网络核心节点识别研究[J]. 工程经济, 2021, 31(8): 66-70.
- [15] 中国人民银行广州分行课题组,彭化非. 基于复杂网络传染病模型的金融风险防控研究[J]. 南方金融, 2021(7): 29-39.

- [16] 孙嘉阳. 基于复杂网络的供应链金融信用风险传播机制研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [17] 牛晓健, 刘红梓. 中国证券市场多元金融上市公司的复杂网络动态拓扑结构研究[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版), 2021, 23(3): 65-73+147.
- [18] 邢颖, 皮敏, 张润顺, 刘保延, 文天才. 基于复杂网络社团发现算法的 2 型糖尿病证候演变及用药特点研究[J]. 中医杂志, 2021, 62(21): 1860-1868.
- [19] 沈亮, 高东雯, 尤圣富, 杨铭, 陈昕琳, 陈莉颖. 基于复杂系统熵网络方法的唐汉钧教授治疗桥本甲状腺炎用药规律研究[J]. 医药论坛杂志, 2021, 42(17): 17-20.
- [20] 薛安, 耿恩泽. 基于复杂网络的中国城市 $PM_{2.5}$ 区域划分[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(s1): 68-78.
- [21] 安海岗, 张翠芝, 赵素彦. 复杂网络视域下京津冀及周边城市空气质量空间关联、季节演化与协同治理[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(5): 112-118.
- [22] 肖琴, 陆钰婷. 基于复杂网络的区域空气污染 $PM_{2.5}$ 分析[J]. 应用技术学报, 2019, 19(1): 77-83.
- [23] 安海岗, 李佳培, 张翠芝, 董志良. 京津冀及周边城市 $PM_{2.5}$ 污染空间关联网络及季节演化研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1377-1386.
- [24] 崔丽珠. 复杂网络下大气污染协同治理演化博弈研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [25] 马宇博, 高广阔. 基于节点重要性评价的京津冀雾霾污染网络研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2287-2296.
- [26] Granger, C.W.J. (1969) Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods. *Econometrica*, **37**, 424-438. <https://doi.org/10.2307/1912791>
- [27] Tian, Y., Wang, Y., Zhang, Z. and Sun, P. (2021) Fourier-Domain Transfer Entropy Spectrum. *Physical Review Research*, **3**, Article ID: L042040. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.L042040>
- [28] Runge, J., Heitzig, J., Petoukhov, V. and Kurths, J. (2012). Escaping the Curse of Dimensionality in Estimating Multivariate Transfer Entropy. *Physical Review Letters*, **108**, Article ID: 258701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.258701>
- [29] Kaiser, A. and Schreiber, T. (2002) Information Transfer in Continuous Process. *Physica D*, **166**, 43-62. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(02\)00432-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(02)00432-3)
- [30] 李志朋, 张志伟, 丁茂华. 贴近度的诱导有序加权平均算子最优组合模型[J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 95-99.
- [31] 文琴, 罗飞. 熵在空气质量指数(AQP)预测中的应用[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2017, 30(4): 96-100.