

An Spatial Statistical Analysis on the Air Quality Change in Multi-Cities System of China with Once Weather Process

Li Teng, Di Cai*

School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong
Email: tengli@gzhu.edu.cn, stonechua@sina.com

Received: Aug. 14th, 2015; accepted: Aug. 28th, 2015; published: Aug. 31st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

Due to the spatial spreading of Air pollution, it is necessary to discuss the air quality from the view of the multi-urban system, rather from the single city. The research on the cross board environmental spillover of the air quality among different cities is helpful for controlling the regional air pollution. Data from the China Meteorological Administration reported high values of API in 86 Chinese cities during a cold air process. With the cold air passing, the spatial pattern of the air quality changed. Based on the facts, the spatial auto-correlation analysis is adopted. It showed that before the cold air came, there existed spatial auto-correlation of API among the eighty six cities. Moreover, the degree of correlation was influenced by the geographical distance among the cities, the weaker the correlation, the farther the distance. In other words, the cities closer one another were similar on the pollution behaviors and the condition of pollution spreading. However, when the cold air arrived, which was strong enough to affect all cities in the region, the condition of air pollution spillover changed partly. As a result, the original spatial correlation is still maintained. After the cold air passed, the original situation was destroyed. The pollution materials in those cities, of which are serious in air pollution, spread around. It means that the air quality of urban has the cross board spillover.

Keywords

Air Pollution Index (API), Cross Border Environmental Spillover, Spatial Autocorrelation

*通讯作者。

一次天气过程影响中国城市空气质量的空间统计分析

滕丽，蔡砥*

广州大学地理科学学院，广东 广州

Email: tengli@gzhu.edu.cn, stonechua@sina.com

收稿日期：2015年8月14日；录用日期：2015年8月28日；发布日期：2015年8月31日

摘要

城市空气质量具有区域扩散性，基于单个城市为单元的空气质量研究具有较大的局限，有必要从区域角度来分析不同城市之间的空气质量的内在联系，为区域空气质量管治提供有效的依据。选择一次冷空气过程时段，采用空间统计方法，对中国大陆86个城市在该时段的空气污染指数进行分析。结果发现，1) 当没有发生全局性影响的天气过程时，中国各城市的空气污染指数存在空间自相关性，且这种空间自相关性随着城市间距离的增大而减小，这种现象可以理解为距离较小的城市之间，其污染行为和扩散条件相对比较相似。2) 当具有全局性影响的冷空气行进时，会改变部分城市的污染扩散条件，从而可能使得这种空间自相关性得以保持。3) 在冷空气过后，所有原先空气质量较差的城市的污染得到扩散，打破了原有的空间自相关性。这证明城市空气质量的跨界溢出是客观存在的。

关键词

空气污染指数，跨界环境溢出，空间自相关

1. 引言

由于人口、资源和产业向城市高度集聚，城市环境问题不断涌现，城市空气污染就是其中之一。城市空气污染是多个系统共同作用的结果，受到气象、地理、生态、人文和经济等多方面因素的影响，且具有区域扩散性。基于单个城市的空气质量研究具有较大的局限，无法对区域空气质量管治提供有效的依据。因此有必要基于多个城市开展区域空气质量研究。

目前对城市空气质量的研究框架大体可分为两种。一种是数值模拟。马春香，赵淑敏(2007)介绍了国内外主要大气污染扩散模式及其在城市空气污染预报中的应用[1]。李杰，杨文夷等(2014)利用嵌套网格空气质量模式模拟研究了2010年东亚地区可吸入颗粒物(PM10)的时空演变[2]。胡晓宇，李云鹏(2011)利用Models-3/CMAQ模拟系统，对珠江三角洲地区2006年10月的大气PM10污染进行模拟研究[3]。数值模拟研究往往以环境小区为研究单元，基于试验场数据和大气动力学探讨城市环境质量变化的微观机制(徐祥德，周秀骥，2005)[4]。另一种是数理统计分析。这种研究往往从一个相对长的时间尺度来探讨城市空气质量的变化规律。段玉森，魏海萍等(2008)利用经验正交函数EOF方法将全国47个环保重点城市2004年~2006年逐日API指数时空分布资料分解为模态特征向量和时间系数，并对模态间差异性进行了小波分析，研究其频谱差异，建立全国环保重点城市API指数时空模态区域分异体系[5]；孙丹，杜吴鹏(2012)利用2001年~2010年京津冀、长三角和珠三角三大城市群9个代表城市近10年的每日API

数据,研究了各个城市群和城市 API 年际和季节变化特征[6];王斌,高会旺(2008)根据沿海 23 个城市 2001 年~2005 年四年的空气污染指数资料,用聚类分析和时间序列分析揭示了中国沿海城市 API 的变化特征[7];李小飞,张明军(2012)以 2001~2010 年我国 42 个城市逐日空气污染指数、主要污染因子、空气质量级别和空气质量状况资料为基础,分析了近 10 年我国空气质量的变化特征[8];刘永红,余志(2012)运用空气质量数据统计分析方法研究了广东省城市间空气污染的分布特征[9]。从这些实证研究可以看出,在我国,衡量城市空气质量采用的指标是空气污染指数。空气污染指数是对大气中的 SO₂、NO₂ 和 PM10 等污染物浓度的监测结果为基础,考虑了污染物的生态环境效应及其对人体健康的影响形成的综合性的概念指标,该指标越大,反映空气质量越差。目前我国有上百个城市提供空气质量日报数据,国家环保总局对 86 个城市的空气质量进行日报。这为研究城市空气质量变化和形成机理提供了重要的基础数据。但是上述研究考虑的是城市空气质量的区域差异,对城市空气质量的空間依赖性研究不足。

从国外文献看,跨界环境溢出也是一个研究热点。大部分研究采用经济学范式(Hansen, M. 1999; Hilary S. 2004; Matthew A. C. 2008) [10]-[12]。Shunli li Wang, Peter Nijkamp (2005)提出了一个生态环境与经济系统相互作用的概念模型[13]。Facundo A.等(2009)则从企业的角度,验证外国直接投资与企业环境行为的关系,发现环境溢出路径[14]。这些研究从宏观或微观的角度说明跨界环境溢出是一种客观事实。这为研究多城市间空气污染提供了理论基础。本文认为空间距离上彼此靠近的城市可能存在空气污染。而且,从污染扩散的天气条件方面看,相似的天气过程往往在大范围影响到多个城市,因此相互靠近的城市在污染扩散方面可能存在某些相似性。发展全局性的分析方法研究中国城市空气质量变化意义重大。本文采用空间统计方法对中国大陆 86 个城市的空气污染指数进行了分析,目的是在全局范围内研究城市空气质量的空間自相关性,并且分析了一次冷空气过程对这种空間自相关性的影响。

2. 方法与数据

空间上的相关分析,可以包括二元相关分析、多元相关分析和自相关分析。透过相关分析(correlation analysis),可以检测两个或多个统计量的变化是否存在相关性,如果所分析的统计量是出于不同空间坐标的观察对象的同一个属性变量,也就是对于一个统计量在不同空间位置采样值的相关性的分析,则称为自相关分析(autocorrelation)。空間自相关性即指空間变量的取值是否与相邻空間上该变量的取值有关。自相关分析在采样设计以及影响因素分析等方面有重要的应用意义。尤其在生态、环境研究中应用较多。对于空間自相关的度量,通常有两种方法。第一种方法是地统计方法,即变异矩分析,第二种方法是空間统计方法,Moran's I 指数分析。

2.1. 空間自相关分析

2.1.1. 变异矩分析

变异矩的基本计算公式为:

$$g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

其中, $Z(X_i)$ 和 $Z(X_i + h)$ 分别为区域化变量 Z 在空間位置 X_i 和 $X_i + h$ 上的取值, $N(h)$ 为距离为 h 的点个数, $g(h)$ 即为变异矩。同理,通过对 h 和 $g(h)$ 作图可获得变异矩分布图。根据需要,可以取对数或双对数形式。显然,变异矩分析只能获得相关程度大小的测度,并不能判断相关性的正负性。

2.1.2. Moran's I 指数分析

Moran (1950)提出的测度空間自相关性的指标是 Moran's I 指数,其计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j w_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_i \sum_j w_{i,j}\right) \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

其中, n 指样本总量, w_{ij} 为空间权重矩阵 W 第 i 行 j 列元素, x_i, x_j 分别代表第 i 和第 j 个样本的取值, \bar{x} 为样本平均值, i, j 都分别从 1 到 n 变化。从式(1)可以看出, 全局 Moran's I 实际是一个进行了空间加权的相关系数, 其理论期望值为 $-1/n$, n 很大时, 近似为 1。当实际计算出的全局 Moran's I 大于 $-1/n$ 时, 样本数值的分布呈现正的空间自相关; 反之, 呈现负的空间自相关。空间权重矩阵 W 的选取对于该指数的计算有明显影响, 通常空间权重矩阵利用三种方式给出:

1) 距离阈值方式: 对于点状对象样本, 给定空间距离阈值 d , 当样本对的空间距离小于 d 时, 相应的矩阵元素赋值为 1, 否则赋值为 0;

2) 邻接矩阵方式: 对于多边形对象样本, 当两个多边形之间具有公共边时, 为邻接关系, 相应的矩阵元素赋值为 1, 否则赋值为 0;

3) k 邻居方式: 对于点状对象样本, 距离某样本点最近的 k 个样本点视为该样本点的邻居, 互为邻居的两个样本点所对应的矩阵元素赋值为 1, 否则为 0。

空间权重矩阵可以看成是一个过滤器, 用于指定某样本在空间上相近的样本有哪些。

给定空间权重矩阵计算出相应全局 Moran's I 指数后, 还必须作相应的 Z 检验。

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (2)$$

式(2)中, $E(I)$ 是全局 Moran's I 的期望值; $\sqrt{\text{Var}(I)}$ 为标差。计算中可采用随机变换的方式, 将各样本的原始数值打乱, 多次重新随机分配给各样本后, 计算各次随机分布的全局 Moran's I 指数, 从而统计出实验平均值和标差, 作为对全局 Moran's I 的期望值和标差的一种估计。

假定 Z 值服从标准正态分布, 则可以在给定的置信水平下判断 Z 值是否不为 0, 其中, 置信水平用 p 值表示, p 值越小说明相关性的可信度越好, 反之越差。当 $Z > 0$ 显著时, 认为样本数值存在正的空间自相关; 当 $Z < 0$ 显著时, 认为样本数值存在负的自相关; $Z = 0$ 则样本数值为空间上随机的分布。

2.2. 数据

本研究采用 2007 年 1 月 1 日至 2007 年 1 月 8 日共 8 天时间中国国家环保局发布的中国大陆 86 个城市的空气污染指数数据。采用这些数据的原因是 2007 年元旦假日期间, 华北、东北多数城市 2、3 级以下南北风交替, 加上地表温度下降, 出现大雾天气, 这种天气直到 4 日到 6 日期间一股冷空气过境才得以改变。大雾天气意味着污染扩散条件变差, 使得华北大部分城市的空气污染指数升高。而到 7 日, 冷空气过后, 华北及东北各城市的空气污染指数有明显下降(见图 1)。

从图中可以看出, 这次冷空气过程对中国大陆 86 个城市的空气污染指数空间格局产生了明显的影响, 3 日北方城市大部分空气污染指数高, 到 7 日, 几乎所有北方城市的空气质量都到达良; 相比而言, 南方城市空气污染指数的空间格局基本没有发生变化。

上述过程在研究天气过程对城市空气质量的影响很有意义, 通过对冷空气来临前、中、后三个时段中国大陆城市空气污染指数的研究, 可以初步判断不同因素对城市空气质量空间自相关性的不同影响。

3. 计算与结果分析

3.1. 计算

在研究中, 我们运用空间统计中常用的全局 Moran's I 指数分别对上述 8 天的 86 个城市空气污染指

20070103

20070107

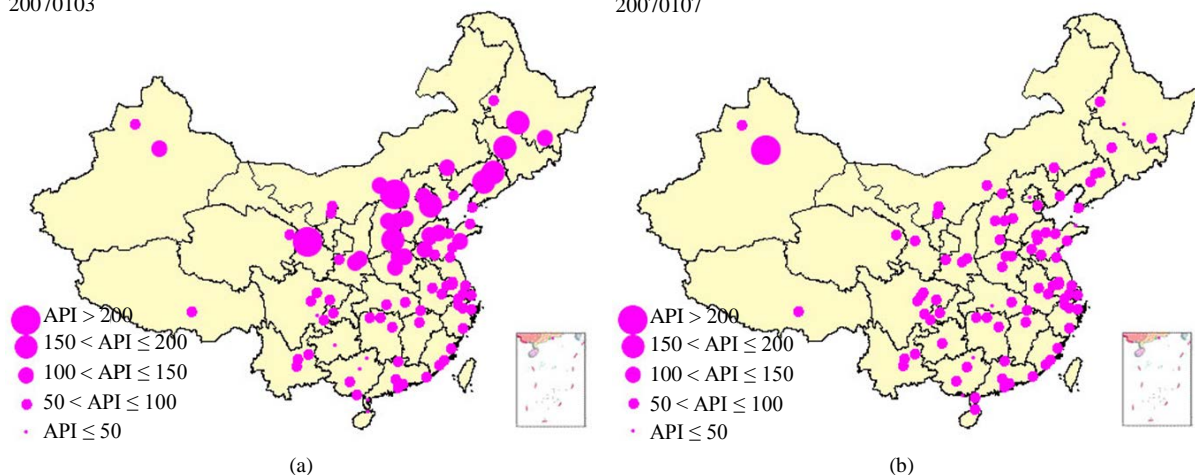


Figure 1. Spatial pattern change of API of multi-cities before and after cold air transit
图 1. 一次冷空气过境前后城市空气质量的空间格局

数计算了空间自相关性, 在计算中区别了不同空间权重矩阵带来的变化。运用全局 Moran's I 指数的计算和检验原理, 我们在对 86 个城市的空气污染指数进行空间自相关检验时, 采用了以下计算策略:

在空间权重矩阵的生成方面, 考虑到中国不同地区的城市密度有所不同, 单纯的距离阈值不能很好地反映城市之间是否相近。例如, 东部地区最接近的城市之间的空间距离在 100 km 以内, 而西部地区最接近的城市之间的空间距离可能超过 100 km。因此, 我们在空间权重矩阵的生成时, 采用 k 邻居方式。令 $k = 1, 2, 3, \dots, m; m = 10$, 分别生成不同的空间权重矩阵进行计算。在这里, k 邻居方式可以理解为结合了空间距离和城市密度的一种综合距离, k 值越大, 则综合距离越大; 反之综合距离小。

对 8 天的数据, 每 1 天都分别用 10 个空间权重矩阵进行计算, 每计算出一个全局 Moran's I 指数后, 都利用 GeoDA 软件的蒙特卡罗方法, 估计出全局 Moran's I 相应的期望值和标差, 从而计算 Z 值。计算结果每天都给出 10 个全局 Moran's I 指数值。从表 1 可以看出, 除了 7 日和 8 日的数据以外, 其它日期对应的各个值都显示出 86 个城市的空气污染指数存在空间自相关性。进一步考察每个全局 Moran's I 所对应的 p 值, 发现 p 值均小于 0.05, 即在 0.05 的置信水平下, 空间自相关性是显著的。

3.2. 空间分析

固定日期看 moranI 随邻居数 k 的变化情况。从图 2 中可以发现, 1 日至 6 日的曲线存在一个普遍的共同特点, 即当 k 值较大时, 相应的全局 Moran's I 指数随 k 值的增加而呈现下降的趋势, 其中, 这种趋势在 5 日、6 日最为明显。

选取 6 日的曲线进行考察(如图 3), 随着 k 值增加到 3, 全局 Moran's I 达到最大值 0.3905, 此时相应的 p 值为 0.002, 即表现为显著的较强的空间正相关; 之后, 随着 k 值的增大, 空间自相关性逐步减小, 到 k 值为 10 时, 降为 0.2557, 并且 p 值保持在 0.001, 显示出很高的显著性。这说明空间自相关性确实存在且随着综合距离的增大呈现降低的趋势, 综合距离较近的城市空间质量呈现较大的相似性。考虑到在较小的范围内, 城市与城市之间在地形、地貌、天气等影响污染扩散条件的因素, 以及产业结构等的相似程度可能较高, 即污染行为和扩散条件可能更加相似, 因此 k 值较小时, 空间自相关性较高是合理的。而随着 k 值的增大, 城市之间的污染扩散条件可能产生较大的差异, 此时空间自相关性仍然很好地表现出来, 一个合理的解释是中国各大城市目前处于工业化快速发展的阶段, 其污染排放行为在较大范围内具有一定的相似性。

Table 1. Moran's I of API with 86 cities in mainland China
表 1. 中国大陆 86 个城市空气污染指数的 Morans' I 指数

邻居数 k	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日	6 日	7 日	8 日
1	0.4026	0.3824	0.5748	0.3732	0.559	0.2369	-0.0699	0.1157
2	0.4143	0.3665	0.536	0.4694	0.6173	0.3526	-0.0019	0.1817
3	0.3922	0.3533	0.5693	0.4924	0.4999	0.3905	0.0002	0.136
4	0.3788	0.3585	0.571	0.5297	0.4326	0.3656	0.0179	0.1628
5	0.3759	0.3449	0.5757	0.5125	0.4274	0.3486	0.0303	0.1958
6	0.3191	0.3162	0.548	0.4994	0.3994	0.3252	0.032	0.1938
7	0.3081	0.3151	0.5451	0.4673	0.3692	0.2968	0.0231	0.165
8	0.2966	0.2995	0.5345	0.4603	0.3484	0.2843	0.0269	0.1693
9	0.2862	0.2859	0.5124	0.4512	0.3528	0.2724	0.025	0.1602
10	0.2745	0.2743	0.4919	0.4356	0.3333	0.2557	0.0206	0.1432

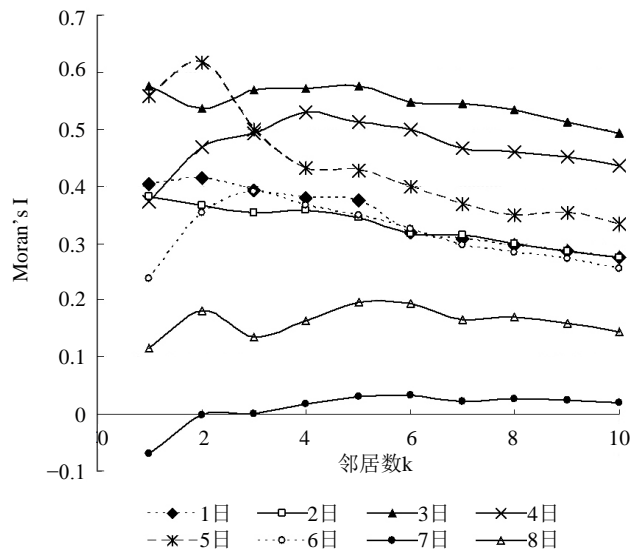


Figure 2. Moran's I of API with 86 cities in mainland China
图 2. 中国大陆 86 个城市空气污染指数的 Moran's I 指数变化

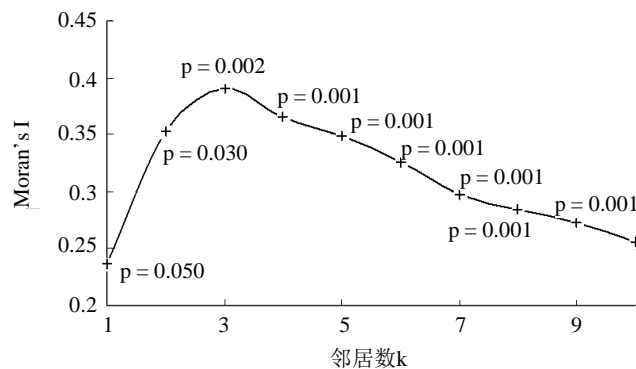


Figure 3. P-value changes with k on 6th
图 3. 6 日 Moran's I 指数的置信水平的变化

进一步地, 比较 $k = 2$ 和 $k = 5$ 时的全局 Moran's I, 虽然两者都在 0.35 附近, 但是 $k = 2$ 处对应的 $p = 0.030$ 而 $k = 5$ 处的 $p = 0.001$ (表 2), 前者空间自相关性的显著性不如后者。可以认为, 由于 k 值较小时, 邻居城市数较少而统计的稳定性较差。同样, $k = 1$ 处的 $p = 0.046$, 其统计稳定性也较差。若取 $p = 0.001$ 为置信度, 则 $k = 1$ 和 $k = 2$ 处的统计检验未通过。所以上述关于空间自相关性相对于距离的增加而减小的趋势, 在 $p = 0.001$ 上是更有意义的。类似的情况也在 1 日至 5 日的计算中表现出来。对于 7 日和 8 日的计算结果, 由于这两天是冷空气过后的结果, 我们必须在时间方面进行分析。

3.3. 时间分析

选用 $k = 3$ 做全局 Moran's I 随日期的变化折线图。从图 4 可以看出, 1 日至 6 日期间, 86 个城市的空间自相关性普遍较高, 并且在 $p = 0.001$ 下显著; 而 7 日和 8 日的空间自相关性很小且不显著, 7 日的全局 Moran's I 值为 0.002, $p = 0.389$, 可以认为没有空间自相关。实际上, 在 1 日至 3 日期间, 北方城市空气质量普遍较差, 而 4 日至 6 日期间, 冷空气影响下, 空气污染指数的空间自相关仍然维持较高水平, 这是因为冷空气过境期间, 部分城市扩散条件变化, 空气污染指数下降, 而部分城市由于冷空气还未到达而维持较高的空气污染指数, 这就导致从全局上看, 高空气污染指数的城市在空间上更为集中, 加强了这种空间自相关性。而等到 7 日, 冷空气改变了北方所有城市的扩散条件, 空气污染指数全面下降, 从而消除了空间自相关性。8 日, 指数略有回升, 但相应的 $p = 0.053 \gg 0.001$, 显著性较低, 意义不甚明显。上述分析表明, 2007 年伊始的这次冷空气过后, 对全局城市污染扩散条件产生了显著的作用, 导致先前各城市空气污染得到全面扩散, 打破了原有的空间自相关性强且显著的格局。

4. 结论

在这次冷空气过程前后, 中国 86 个城市空气污染指数的空间自相关性强度及其显著性都发生了变化, 综合前文的分析可以得出几个结论:

Table 2. Comparing global Moran's I with $k = 2$ and 5 on 6th
表 2. 6 日 $k = 2$ 和 5 的全局 Moran's I 比较

k	I	I 的期望值	I 的标差	p
2	0.3526	-0.0118	0.0985	0.030
5	0.3486	-0.0118	0.0574	0.001

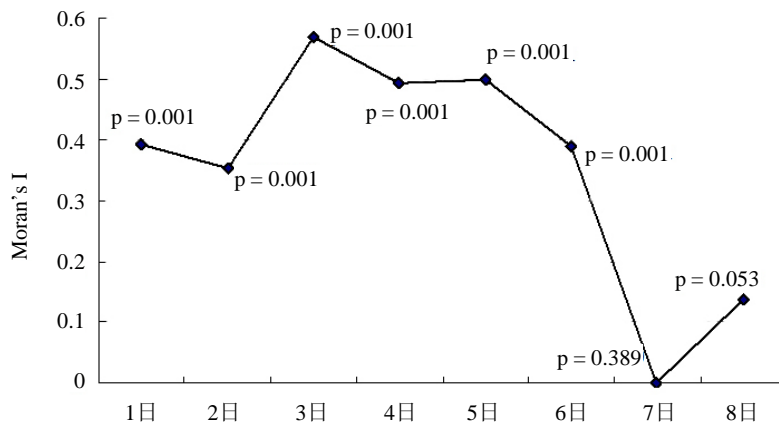


Figure 4. Global Moran's I changes with date ($k = 3$)

图 4. 全局 Moran's I 的时间变化($k = 3$)

首先, 当没有发生全局性影响的天气过程时, 中国各城市的空气污染指数高低存在空间自相关性, 且这种空间自相关性随着综合距离的增大而减小, 这种现象可以理解为综合距离较小的城市之间, 其污染行为和扩散条件相对比较相似。

其次, 当具有全局性影响的冷空气行进时, 会改变部分城市的污染扩散条件, 从而可能使得这种空间自相关性得以保持。

最后, 在冷空气过后, 所有原先空气质量较差的城市的污染得到扩散, 打破了空间自相关性。由此我们认为, 在研究城市空气污染的发生、扩散规律及其管治政策时, 都必须考虑到这种空间自相关性, 特别在针对单个城市构建空气污染模式时, 需要考虑到综合距离较为邻近的城市的影响。

本文仅对空气污染指数进行了空间自相关性的研究。而由于目前国家环保局发布的空气污染指数是一个综合性的指标, 反映的是城市空气质量的综合性概念, 不能对不同污染物进行区分。而实际上, SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 这三种污染物的来源各不相同, 各个城市的不同污染源的负荷也各不相同, 进一步区别不同污染物开展类似分析, 可能会获得更多的结果。

基金项目

教育部人文社科项目(编号: 12YJC790176)资助。

参考文献 (References)

- [1] 马春香, 赵淑敏 (2007) 几种大气污染扩散模式的应用比较. *环境科学与管理*, **10**, 35-36.
- [2] 李杰, 杨文夷, 陈焕盛, 王自发, 胡波, 宋涛, 李健军 (2014) 东亚大气可吸入颗粒物时空分布的数值模拟研究. *环境科学学报*, **34**, 548-557.
- [3] 胡晓宇, 李云鹏, 李金凤, 王雪松, 张远航 (2011) 珠江三角洲城市群 PM₁₀的相互影响研究. *北京大学学报(自然科学版)*, **47**, 519-524.
- [4] 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖 (2005) 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征. *中国科学(D 辑)*, **35**, 1-19.
- [5] 段玉森, 魏海萍, 伏晴艳, 等 (2010) 中国环保重点城市 API 指数的时空模态区域分异. *环境科学学报*, **28**, 384-391.
- [6] 孙丹, 杜吴鹏 (2012) 2001 年至 2010 年中国三大城市群中几个典型城市的 API 变化特征. *资源科学*, **34**, 1401-1407.
- [7] 王斌, 高会旺 (2008) 中国沿海城市空气污染指数的分布特征. *生态环境*, **17**, 542-548.
- [8] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (2012) 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析. *环境科学*, **33**, 1936-1943.
- [9] 刘永红, 余志, 黄艳玲, 蔡铭, 徐伟嘉, 李璐 (2011) 城市空气污染分布不均匀特征分析. *中国环境监测*, **27**, 93-96.
- [10] Hansen, M. (1999) Cross border environmental management in transnational corporations. An analytical framework. *Report as Part of UNCTAD/CBS Project: Cross Border Environmental Management in Transnational Corporations*.
- [11] Sigman, H. (2004) Transboundary spillovers and decentralization of environmental policies. *Working Paper 10717 of National Bureau of Economic Research*. <http://www.nber.org/papers/w10717>
- [12] Matthew, A.C., Robert, J.R.E. and Eric, S. (2008) The environmental performance of firms: The role of foreign ownership, training, and experience. *Ecological Economics*, **65**, 538-546.
- [13] Wang, S.L. and Nijkamp, P. (2005) Spatial externalities in an open environmental-economic system. *Interdisciplinary Studies in Economics and Management*, **4**, 19-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.025>
- [14] Facundo, A., Matthew, A.C. and Robert, J.R. (2009) In search of environmental spillovers. *The World Economy*, 136-163. http://dx.doi.org/10.1007/3-211-27175-9_2