

Temporal and Spatial Characteristics of Air Pollutants in Beijing

Ling Lu, Aiwu Zhang, Xiaoyan Kang

Ministry of Education Key Laboratory on 3D Information Acquisition & Application, Capital Normal University, Beijing

Email: lulingl163@163.com

Received: Jun. 8th, 2018; accepted: Jun. 22nd, 2018; published: Jun. 27th, 2018

Abstract

The temporal variation and spatial distribution of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, O₃ released by Beijing Municipal Environmental Monitoring Center of Beijing in 2016 were discussed by means of mathematical statistics and spatial analysis. Spearman correlation analysis was used to explore the correlation between these six pollutants. The results showed that in monthly average of 2016, PM₁₀, PM_{2.5} showed bimodal curves, NO₂, SO₂ showed wavy-shaped curve, CO showed a three-peak curve and O₃ showed a single-peak curve. During seasonal variation, the average concentrations of PM_{2.5}, NO₂, SO₂ and CO were the highest in winter, and PM₁₀ was the highest in spring. The average concentrations of these 5 pollutants were the lowest in summer, while O₃ was the opposite. In spatial distribution of 2016, the concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ and CO in the south were higher than the north, the concentration of NO₂ in urban was higher than the suburb, while the concentration of O₃ in the north was higher than the south. Correlation analysis result displayed there was a significant positive correlation between PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂ and CO, while O₃ showed a negative correlation with other pollutants.

Keywords

Beijing, Air Pollutants, Time Variations, Spatial Distribution, Relativity

北京市大气污染物时空变化特征

路 玲, 张爱武, 康孝岩

首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京

Email: lulingl163@163.com

收稿日期: 2018年6月8日; 录用日期: 2018年6月22日; 发布日期: 2018年6月27日

摘要

使用2016年北京市环境监测中心发布的大气污染物数据,运用数理统计和GIS空间分析的方法,分析了2016年北京市PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO、O₃的时空变化特征,同时利用Spearman相关分析法探讨了此6种污染物之间的相关性。结果表明:2016年月变化趋势中,PM₁₀和PM_{2.5}变化曲线相似呈双峰分布,NO₂、SO₂变化曲线相似呈波浪型分布,CO呈三峰分布,O₃呈单峰分布;季节变化中,PM_{2.5}、NO₂、CO秋冬污染高于春夏,PM₁₀春秋污染高于冬夏,SO₂春冬高于夏秋,O₃则春夏高于秋冬。空间分布上PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO均表现出由南向北逐渐降低的变化趋势,NO₂城区污染高于郊区,O₃北部污染高于南部。相关性分析结果显示PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO之间呈现出显著的正相关性,O₃则与其他污染物呈现出负相关性。

关键词

北京市, 大气污染物, 时间变化, 空间分布, 相关性

Copyright © 2018 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

1. 引言

随着工业化、城市化进程的加快,大量影响人体健康的物质如气态污染物(SO₂、NO₂、O₃、CO等)、颗粒污染物(如PM_{2.5}、PM₁₀等)被排放到大气中,引发了一系列大气污染问题,并引发生态环境危机。当前环境空气质量的污染特征已经由煤烟型向复合型转变,区域性大气污染问题和臭氧污染日益突出[1]。京津冀地区、长江三角洲、珠江三角洲等经济发达地区经常出现长期、持续的雾霾污染事件[2],不仅导致大气能见度下降,而且还增加呼吸道疾病发病率和人类死亡率[3]。北京市处于京津冀地区的中心,雾霾天气频繁发生,大气污染问题备受关注。因此本文对北京市大气污染物进行综合地监测和分析,科学准确地描述大气污染物浓度的时空分布规律,从而遏制大气污染问题,改善大气环境质量。

近年来,针对大气污染物污染特征的研究大多集中在两个方面,一是利用遥感卫星数据进行气溶胶反演模拟,结合地面监测数据进行相关分析,得出地面污染物和空气污染指数的遥感反演模型[4][5][6];二是利用污染物监测仪器进行采样研究,如使用颗粒物监测仪、浊度仪等,合理设立监测站点从而得出污染物不同时间的污染浓度资料并进行时空分布研究,得出污染物变化特征,或者对一种或多种污染物的组成成分进行研究进行源解析,得出污染物的污染源信息、扩散规律等[7]-[18]。在地面站点研究中,苗蕾等[7]对2005~2014年北京城区(宝联)和郊区(上甸子本底站)的监测数据进行研究发现日最大风速和相对湿度日变化影响着PM_{2.5}质量浓度;王占山等利用北京市环境保护中心的PM_{2.5}、O₃数据并结合天气背景场、气团运动轨迹等气象要素、PM_{2.5}化学组分、大气氧化性对北京市PM_{2.5}和O₃污染状况进行分析,发现了二者在污染扩散中的相互作用[9][10];程念亮等对2013~2014年NO₂研究发现了高浓度NO₂促进了O₃的生成,并在2000~2014年北京市一次重污染过程的SO₂浓度数据研究中发现了近年来SO₂浓度累计降低的趋势[11][12]。由于这些研究大都只考虑了一种或两种污染物,然而一个地区存在着多种大气污染物,这些污染物从来都不会单独影响大气环境质量。因此,本文综合研究2016年PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO、O₃的空间分布特征、逐月及季节变化特征及各污染物间的关系,并运用空间分析和数理统计

手段得出大气污染物的空间分布规律，为大气污染防治查漏补缺。

2. 数据与方法

2.1. 研究数据

本文使用 2016 年北京市环境保护监测中心 35 个监测站点发布的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 O_3 逐日平均浓度资料。35 个大气环境自动监测子站分布情况如图所示(图 1)，主要包括 23 个环境评价点，1 个城市清洁对照点，6 个区域背景传输点，5 个分布在北京二环、三环和四环主干道上的交通污染控制点。35 个监测点分布地区涵盖区域背景、郊区、城区、城镇、交通干道、居住区等不同的环境类型，基本覆盖所有区县。本研究使用的数据为 35 个监测站点 2016 年 1~12 月的逐日平均浓度资料。

空间分布小节中北京市及各区域工业产值、能源消费、汽车保有量数据来源于《北京市统计年鉴》和《北京市区域统计年鉴》，土地利用数据来源于 Globeland 30 数据(分辨率 30 m)。

2.2. 实验方法

为了便于分析北京地区 6 种大气污染物的季节分布特征，本文依据北京地区气候特征，将一年划分为春季 3~5 月、夏季 6~8 月、秋季 9~11 月、冬季 1 月、2 月和 12 月。本文采用取均值法得到 2016 年 1~12 月各监测站点的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 的日均浓度数据、月均浓度值、季浓度均值、年浓度均值。同时为了得到北京地区大气污染物的区域变化特征，本文将北京市按照行政区划分为 5 个地区，分别为城六区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山)、西北部(延庆、昌平)、东北部(怀柔、密云、顺义、平谷)、西南部(门头沟、房山)和东南部(通州、大兴、亦庄)，并将坐落在各区的所有站点的各个污染物的平均浓度作为每个地区的污染物浓度。本文所采用的插值方法为 Kriging 插值法，此方法不仅考虑了待插值点的位置与已知数据位置的相互关系，而且还考虑了变量的空间相关性[19] [20]。表达式(式 1)如下：

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (1)$$

其中： $Z(S_i)$ 为第 i 个位置处的测量值； λ_i 为第 i 个位置处的测量值的未知权重； S_0 为预测位置； N

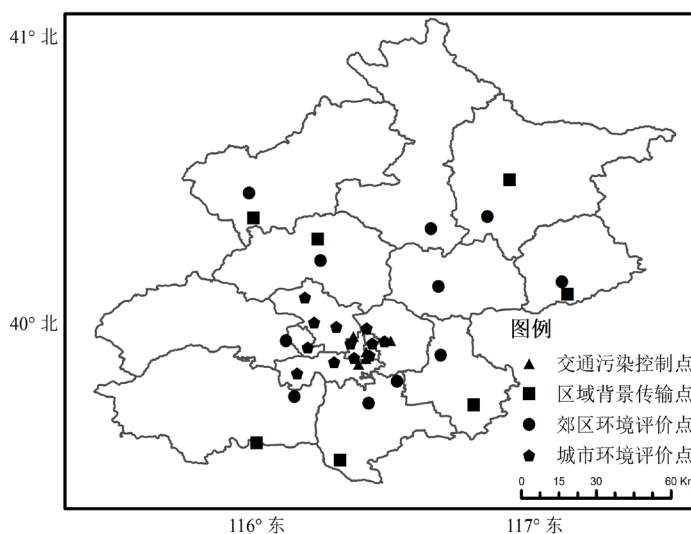


Figure 1. Location of 35 monitoring sites in Beijing

图 1. 北京市 35 个监测站点位置

为测量指数。权重 λ_i 取决于测量点、预测位置的距离和预测位置周围的测量值之间空间关系的拟合模型本文使用的半方差模型为球面模型，即空间自相关随着距离的增加逐渐减小，超出某个距离后自相关为零。

由于 6 种污染物全年质量浓度总体分布状况不明确，各个污染物之间的相互关系也不一定为线性关系，故本文采用的相关性分析方法为 Spearman 秩相关系数法，此方法能提供 2 个随机变量在线性或非线性相关下的共变趋势程度，因此能更加客观地反应各个污染物质量浓度之间的相关关系。计算过程如下(式 2)：

对原始数据 x_i, y_i 按从大到小排序，记 x'_i, y'_i 为原始 x_i, y_i 在排序后列表中的位置，

x'_i, y'_i 称为 x_i, y_i 的秩次，秩次差 $d_i = x'_i - y'_i$ 。

秩相关系数的表达式如下：

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

3. 结果分析

将北京市 2016 年 1~12 月各个监测站点的污染 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 O_3 的浓度进行整理统计，得出 2016 年浓度均值分别为 $73.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $97.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $47.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $11.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.32 \text{mg}/\text{m}^3$ 、 $56.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。根据 GB3095-2012 环境空气质量标准[21]可知 2016 年 SO_2 、 CO 浓度水平达标，而 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 年均浓度均高于国家二级标准。据相关资料分析显示，2015~2016 年 O_3 污染也有加重趋势[22]。因此，北京市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 O_3 治理仍需继续加大力度。

3.1. 时间变化

3.1.1. 逐月变化

图 2(a)为 2016 年北京市 6 种大气污染物月均浓度变化情况。可以看出，6 种大气污染物均出现了峰值。其中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 变化曲线相似呈双峰分布，二者第一个浓度峰值都出现在 3 月份且 $PM_{2.5}$ 在 7 月份达到第二个峰值， PM_{10} 则在 11 月份达到第二个峰值。二者浓度最低值都出现在 8 月份，最高值则分别在 12 月份和 11 月份。全年 CO 变化波动较大，呈三峰分布，峰值分别出现在 3 月份、7 月份、9 月份，浓度最低值出现在 5 月份，浓度最高值出现在 12 月份。全年 O_3 变化呈单峰分布，1~6 月份浓度呈上升趋势，6-12 月份浓度呈下降趋势，其中 6 月份为全年月均浓度最高值，11 月份为全年月均浓度最低值。全年 NO_2 、 SO_2 全年变化呈波浪型分布且变化趋势相似，均在 3 月份有一个峰值，其中 NO_2 变化幅度大于 SO_2 ， NO_2 月均浓度年最低值出现在 7 月份，最高值出现在 12 月份， SO_2 浓度最低值出现在 8 月份，最高值出现在 1 月份。总体来说，2016 年 6 种大气污染物月均浓度变化中，除 O_3 之外，其他 5 种污染物在 1~5 月份变化趋势相似，且均在 3 月份有一个峰值， $PM_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 均在 8~12 月份呈浓度逐渐升高趋势。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 全年浓度最低值均出现在 8 月份， $PM_{2.5}$ 、 CO 、 NO_2 浓度最高值均在 12 月份。

3.1.2. 季节变化

图 2(b)为 2016 年北京市 6 种大气污染物季节变化趋势图。由图 5 可以看出，受北京地区夏季降雨频繁，植被覆盖度高等因素的影响，除 O_3 之外，其他 5 种污染物均呈现出了夏季浓度最低的季节特征。因受冬季采暖燃煤、持续逆温等不利的气象条件的影响[23] [24]， $PM_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 均在冬季浓度最高。 PM_{10} 则在春季浓度最高，出现这种现象的原因可能为 PM_{10} 直接来源于燃煤、机动车和扬尘等一次排放，同时春季又多风沙天气，刮风携带的颗粒物及地面扬尘又促进了 PM_{10} 的生成[25] [26]，因而导致 PM_{10} 春季达到一年中的最大值。由图 3 可知， $PM_{2.5}$ 、 NO_2 、 CO 浓度降序排列为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季，三者秋季污染高于春季主要受秋季多逆温，大气垂直运动小的天气形势不利于污染物扩散的影响。

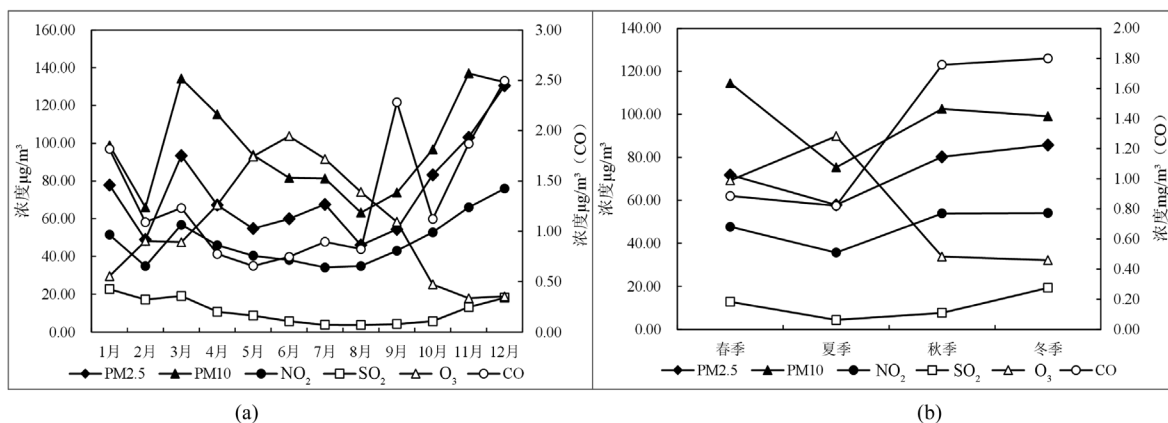
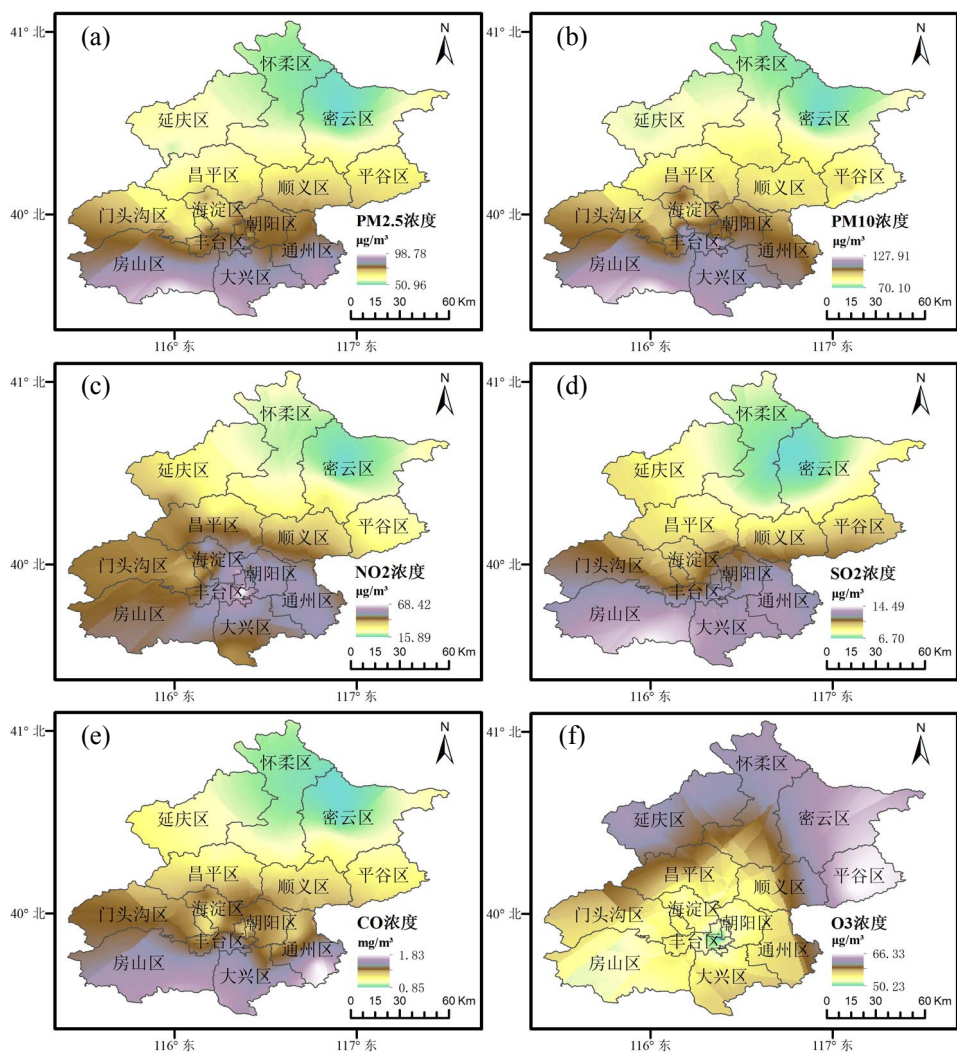


Figure 2. Monthly and seasonal changes of six pollutants in Beijing in 2016
图 2. 2016 年北京市 6 种污染物逐月及季节变化情况



(a)~(f)分别代表 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 O_3 空间插值分布图

Figure 3. Spatial interpolation distribution of 6 air pollutants in Beijing in 2016
图 3. 2016 年北京市 6 种大气污染物空间插值分布

PM₁₀ 浓度降序排列为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季, 其中秋季和冬季浓度相差不大, 仅为 3.44 μg/m³; SO₂ 浓度变化降序排列为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 这与程念亮研究的多年 SO₂ 时空分布结果一致[12], SO₂ 的主要来源为化石燃料的燃烧与城市工业活动, 冬春高于秋夏可能受冬春季采暖燃料的大量使用的影响。6 种大气污染物中 O₃ 季节浓度变化与其他 5 种污染物差异较大, 污染浓度降序排列为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 造成这种现象的主要原因为 O₃ 的生成受 NO_x 和挥发性有机物(VOC_s)影响作用, 夏季温度高、白昼长, 植被排放的 VOC_s 较多, 在高温、强光照等气象条件下更有利于 NO_x 和 VOC_s 的二次转化[10] [11] [26]。

3.2. 空间分布

3.2.1. 年空间分布

图 3 为 2016 年北京市 6 种大气污染物空间插值分布图, 可以看出, 颗粒污染物(PM_{2.5}、PM₁₀)和气态污染物中的 SO₂、CO 浓度空间分布相似, 均呈现出由北向南逐渐升高的梯度变化特征, PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO 浓度高值区主要分布在房山区、大兴区、通州区的南部, 低值区主要分布在延庆区的东北部、怀柔区北部、密云区的西北部。结合 2016 年北京市各区县的能源消耗、工业生产总产值汽车保有量、土地利用分布数据等(图 4、图 5)分析可知出现这种现象的原因受以下因素的影响: 第一, 南部地区机动车、工业、燃煤等污染排放源多于北部, 而重污染日多偏南风, 南部地区的污染物通过传输作用扩散至北部 [7] [8], 随着污染物自南向北扩散浓度逐渐降低; 第二, 北部多山区, 生态环境优良, 植被覆盖率高, 空气净化能力高于南部地区[8]。NO₂ 浓度高值区主要分布在城六区、通州区、大兴区的北部、房山区的东部污染, 城六区污染最重, 怀柔区的东北部和密云区北部污染最轻。主要原因为 NO₂ 浓度主要来源于机动车排放, 城区机动车排放量远大于周边地区。O₃ 高值区主要分布在延庆、怀柔北部、密云、平谷, 城六区污染反而最轻, 出现这种现象的原因有: 第一, 城区排放的氮氧化物较多, 氮氧化物和 O₃ 之间发生氧化还原反应从而消耗了 O₃ 导致 O₃ 浓度比郊区低; 第二, 郊区多山区, 植被覆盖率高高于城区, 植被排放的挥发性有机物(VOCs)有助于 O₃ 的生成。第三, O₃ 的形成受光化学反应的影响, 由图 3(a)、图 3(b) 可知, 北部地区的颗粒物比南部和中心地区少, 全年光照更强, 更有利用 O₃ 的生成[10] [11] [26]。

3.2.2. 各地区逐月变化

图 6 为绘制出的城六区、西北部、东北部、西南部、东南部地区 1~12 月 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO、O₃ 月均浓度变化玫瑰图。可以看出, 6 种污染物在 5 个地区不同月份间的变化趋势具有较高的一致

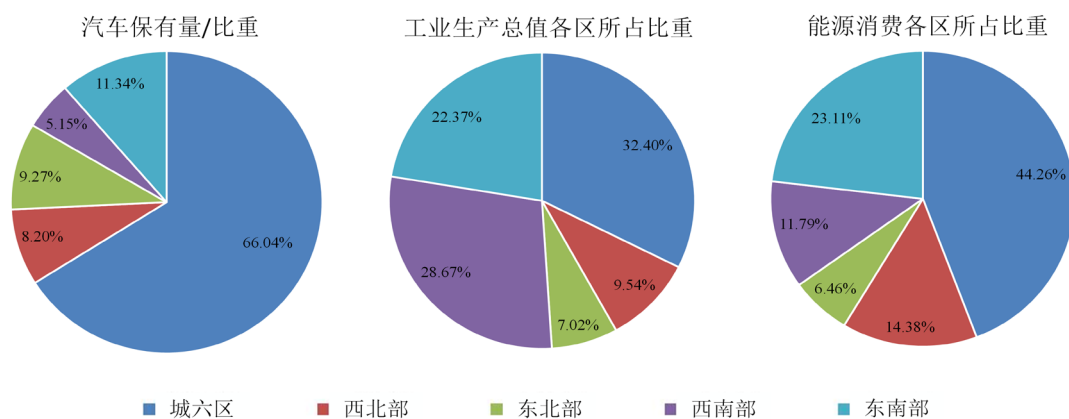


Figure 4. Regional share of energy consumption, industrial production, and car ownership in Beijing in 2016
图 4. 2016 年北京市各地区能源消费、工业生产总产值、汽车保有量所占比重

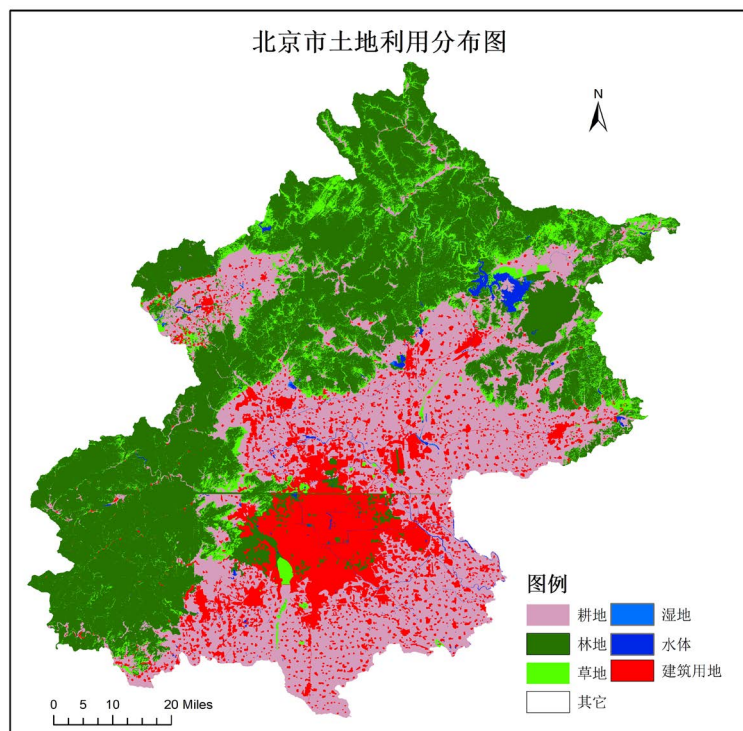


Figure 5. Land use map of Beijing
图 5. 北京市土地利用分布图

性, 这从一个角度体现了北京市大气污染的区域性特征。与其他月份相比, 5 个地区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 均在 1~3 月份、10~12 月份为浓度高值月份, 均在 7、8 月份为浓度低值月份; O_3 则在 5~8 月份为浓度高值月份, 10~12 月为浓度低值月份; NO_2 在 1~12 月份浓度变化较稳定。每种污染物中, 当浓度处于全年的低值月份时, 各个地区之间污染物浓度相差较小, 当浓度处于全年高值月份时, 各个地区之间污染物浓度相差较大, 体现了北京市大气污染物之间的扩散与传输特征。五个地区六种污染物在 12 个月份中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 西南部、东南部浓度要高于其他地区, 城六区居中, 西北部和东北部浓度较低; NO_2 城六区高于其他地区; O_3 西北部、东北部高于其他地区, 这些规律与上文污染物年际空间分布一致, 表明上文空间插值分布图有一定的准确性。

3.3. 相关性分析

为了得到 2016 年 6 种污染物之间的相互关系, 将 35 个监测站点的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 O_3 日均浓度数据进行样本统计后进行分布类型检验, 取其中的有效样本进行分析(表 1)。由于 6 种污染物数据均不服从正态分布, 对 6 组数据进行 Spearman 相关性统计分析。结果(表 1)显示, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 之间都显示出显著的正相关性, 与 $PM_{2.5}$ 相关性由高到低的污染物依次为 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 ; 与 PM_{10} 相关性由高到低的污染物依次为 $PM_{2.5}$ 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 ; 与 NO_2 相关性由高到低的污染物依次为 CO 、 $PM_{2.5}$ / PM_{10} 、 SO_2 ; 与 SO_2 相关性由高到低的污染物依次为 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$; 与 CO 相关性由高到低的污染物依次是 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 。造成这种结果的影响从污染物来源角度分析, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 主要来源于扬尘、秸秆垃圾的焚烧、化石燃料的燃烧、机动车尾气排放、环境空气中 SO_x 、 NO_x 、 VOC_x 及其它化合物反应生成; NO_2 、 SO_2 主要来自化石燃料的燃烧, 比如机动车尾气排放、火力发电厂、工业废气等; CO 来源于含碳物质不完全燃烧过程, 如内燃机排气、锅炉中化石燃料的燃烧。由于此 5

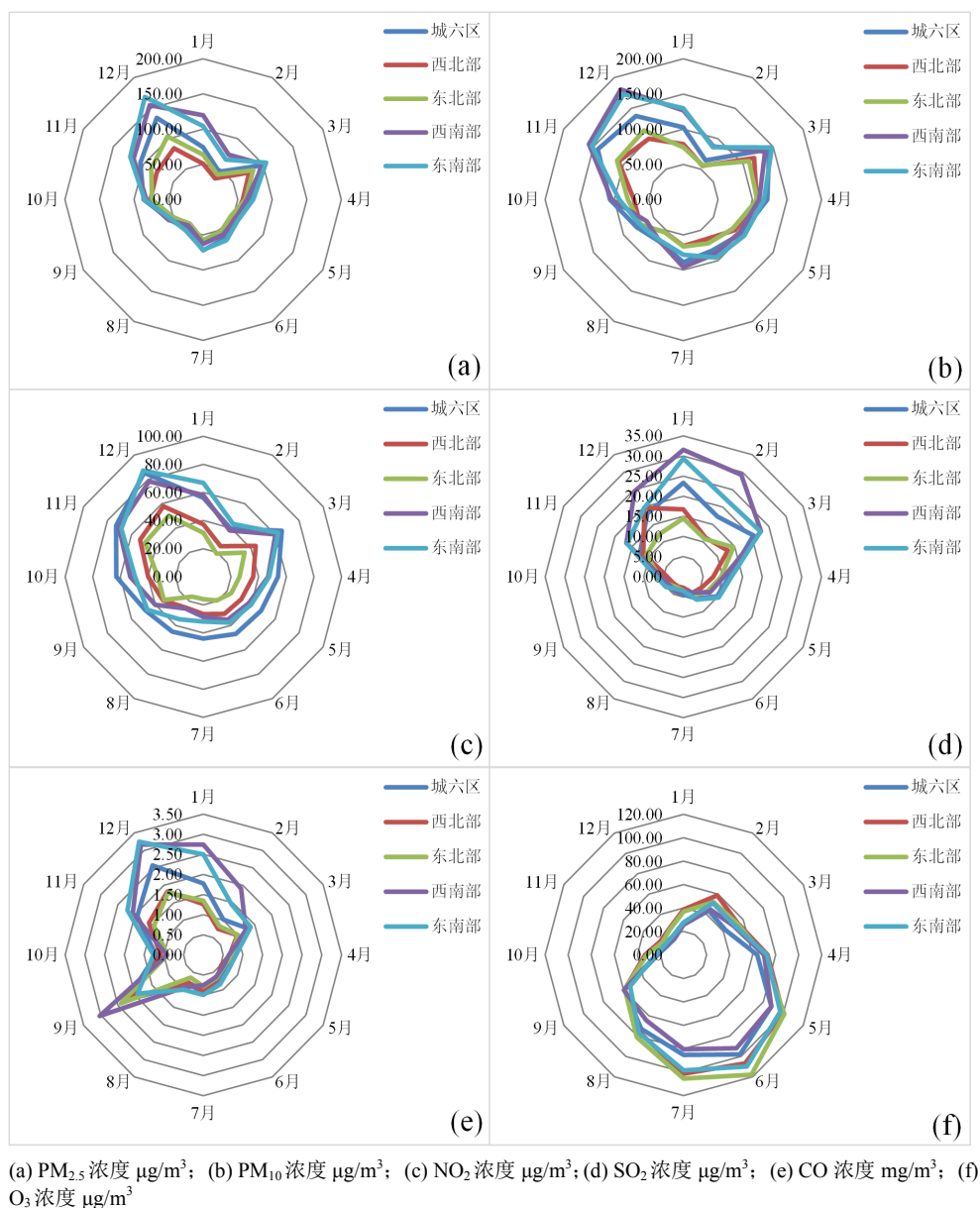


Figure 6. The monthly mean concentration of air pollutants in various districts of Beijing in 2016

图 6. 2016 年北京市各区大气污染物月均浓度

种污染物均同时来源于工业生产、居民生活、采暖等过程中化石燃料的燃烧、机动车尾气排放等，故此 5 种污染物呈现出一定的正相关性。因 $\text{PM}_{2.5}$ 是 PM_{10} 的直接组成部分，故二者相关性最高。有关研究表明，大气氧化性对 $\text{PM}_{2.5}$ 的形成有显著的影响[9]，而 NO_2 和 O_3 在一定条件下反应可以生成大气氧化剂，同时 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 是构成 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组分，这又从一个角度上解释了 $\text{PM}_{2.5}$ 与 NO_2 、 SO_2 之间的正相关性。 O_3 产生于氮氧化物和挥发性有机物之间的光化学反应，而氮氧化物产生于空气参与的燃烧，挥发性有机物则来源于工业排放、机动车尾气、装修、油漆等，故 O_3 与其他 5 种污染物则均表现出了负相关性。 O_3 与其他污染物的负相关性由高到低依次为 NO_2 、 CO 、 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 。又因 O_3 可在合适的气象条件下与 NO_x 、 CO 直接发生反应，故与 NO_2 、 CO 负相关性相对较高。6 种污染物之间的这些相关性充分说明了北京市大气污染物之间具有相互作用、彼此耦合的复合特性，即北京市大气污染物具有

Table 1. Correlation coefficients of 6 main pollutants in Beijing in 2016
表 1. 2016 年北京市 6 种主要大气污染物的相关系数

污染物	均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	有效样本数	Spearman 相关系数						
			PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	CO	O ₃	
PM _{2.5}	73.82	12415	1.00						
PM ₁₀	93.77	11598	0.87	1.00					
NO ₂	47.73	12466	0.63	0.63	1.00				
SO ₂	11.11	12489	0.49	0.51	0.56	1.00			
CO	1.32 (mg/m^3)	12396	0.81	0.67	0.65	0.57	1.00		
O ₃	56.33	12431	-0.21	-0.18	-0.51	-0.39	-0.46	1.00	

注：置信度水平 $\alpha = 0.01$ (2-tailed)。

复合型的污染特征。

4. 结论

1) 2016 年北京市 6 种大气污染物月均变化中, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 变化曲线相似呈双峰分布, 且二者浓度均在 8 月份达到最低; NO₂、SO₂ 变化曲线相似呈波浪型分布, 但均在 7、8 月份出现浓度低值; CO 呈三峰分布, 其浓度在 12 月份出现最大值; O₃ 呈单峰分布, 在 1~6 月份浓度呈上升趋势, 6~12 月份浓度呈下降趋势, 6 月份达到浓度最大值。季节变化中, PM_{2.5}、NO₂、SO₂、CO 浓度均在冬季最高, PM₁₀ 在春季最高, 此 5 种污染物均在夏季最低, 而 O₃ 则在夏季浓度值最高。6 种大气污染在不同月份和不同季节展现了独特的变化特征, 这与北京地区四季分明的气候特点和冬季采暖等因素的影响密不可分。

2) 2016 年北京市 6 种大气污染物中 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO 浓度空间分布相似, 都呈现由北向南呈梯度升高的变化特征; NO₂ 则体现出城六区、南部的房山、大兴、通州地区污染较重的分布特征; O₃ 空间分布则与 NO₂ 正好相反, NO₂ 污染严重地区 O₃ 污染偏轻, 北部地区的延庆、怀柔、密云、平谷污染高于中南部。这些污染物在不同地区的空间分布特征与北京不同地区间地形分布、植被覆盖率、风向、工业发展和人口聚集程度等因素关系密切。

3) 北京市 5 个地区 6 种不同的污染物在 1~12 月间变化趋势大体一致, 说明大气污染具有区域性的特点。除 O₃ 之外, 其他 5 种污染物之间都显示出显著的正相关性, O₃ 与其他 5 种污染物均表现出了负相关性且与 NO₂ 负相关性最强, 说明污染物之间具有相互作用、相互耦合的特征, 体现了北京市大气污染的复合型特征。

基金项目

国家自然科学基金(编号: 41571369); 青海省科技计划项目(编号: 2016-NK-138); 科技创新服务能力建设 - 基本科研业务费(科研类)(编号: 025185305000/143)。

参考文献

- [1] 贺克斌, 贾英韬, 马永亮, 等. 北京大气颗粒污染的区域性本质[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 482-487.
- [2] 王英, 李令军, 刘阳. 京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3685-3692.
- [3] Rd, P.C., Burnett, R.T., Thun, M.J., et al. (2002) Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-Term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *Journal of the American Medical Association*, **287**, 1132-1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>

- [4] 孙晓雷, 甘伟, 林燕, 等. MODIS 3 km 气溶胶光学厚度产品检验及其环境空气质量指示[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1657-1666.
- [5] 谢志英, 刘浩, 唐新明. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM₁₀质量浓度的相关性分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3292-3299.
- [6] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 826-834.
- [7] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春. 基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2836-2846.
- [8] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5}和 PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.
- [9] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 PM_{2.5}的时空分布[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 110-120.
- [10] 王占山, 李云婷. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014(12): 4446-4453.
- [11] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013~2014 年北京市 NO₂ 时空分布研究[J]. 中国环境科学, 2016(1): 18-26.
- [12] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 2000~2014 年北京市 SO₂ 时空分布及一次污染过程分析[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 3961-3971.
- [13] Chen, B., Lu, S., Li, S., *et al.* (2015) Impact of Fine Particulate Fluctuation and Other Variables on Beijing's Air Quality Index. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**, 5139-5151. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4024-z>
- [14] Shi, M.N., Wu, H.C., Zhang, S.H., *et al.* (2014) Weekly Cycle of Magnetic Characteristics of the Daily PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, **98**, 357-367. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.079>
- [15] Huang, P., Zhang, J., Tang, Y., *et al.* (2015) Spatial and Temporal Distribution of PM_{2.5} Pollution in Xi'an City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **12**, 6608-6625. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606608>
- [16] Wang, S., Li, G., Gong, Z., *et al.* (2015) Spatial Distribution, Seasonal Variation and Regionalization of PM_{2.5} Concentrations in China. *Science China Chemistry*, **58**, 1435-1443. <https://doi.org/10.1007/s11426-015-5468-9>
- [17] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2031-2044.
- [18] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013~2014 年北京大气重污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2016(1): 27-35.
- [19] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2154-2163.
- [20] Davis, J.C. (2002) *Statistics and Data Analysis in Geology*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 57-61.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准: GB3095-2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [22] GSM, 北京雾霾四大帮凶 SO₂, NO₂, CO, O₃ 大起底[EB/OL]. <http://www.chndaqi.com/news/view?id=255677&page=1>, 2017-03-22.
- [23] 曲晓黎, 付桂琴, 贾俊妹, 等. 2005~2009 年石家庄市空气质量分布特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 29-32.
- [24] 程念亮, 陈添, 张大伟, 等. 2013-2014 年北京市 CO 时空分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016(3): 150-155.
- [25] 徐文帅, 李云婷, 孙瑞雯, 等. 典型沙尘回流天气过程对北京市空气质量影响的特征分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 297-302.
- [26] 郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气 NO₂ 污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1938-1945.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org