

北京市空气质量的时间特征及影响因素分析

严彦文, 谢碧霄, 孟得新, 范 申

中国石油大学(北京)理学院, 北京

收稿日期: 2023年12月15日; 录用日期: 2024年1月9日; 发布日期: 2024年1月15日

摘 要

基于描述性统计和非参数统计方法, 对北京市2017年春至2020年冬的AQI (Air Quality Index, 空气质量指数)和大气污染物的时间特征, 及它们与温度和风力的关系进行分析。结果表明: 北京市春夏季的空气质量相对秋冬季较差, 夏季大气中污染物O₃的浓度偏高, 秋冬季PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂的浓度更高; 近四年来, 北京市的空气质量得到改善, 但在大气污染物O₃和CO方面的工作仍需加强; 可吸入颗粒物、CO、NO₂和O₃是影响北京市空气质量的重要因素; 高温会在一定程度上降低北京市的空气质量, 而大风不是北京市影响空气质量的主要因素。

关键词

空气质量, 大气污染物, 非参数统计, 气象因素

Analysis of Temporal Characteristics and Influencing Factors of Air Quality in Beijing

Yanwen Yan, Bixiao Xie, Dexin Meng, Shen Fan

College of Science, China University of Petroleum, Beijing

Received: Dec. 15th, 2023; accepted: Jan. 9th, 2024; published: Jan. 15th, 2024

Abstract

Based on descriptive and non-parametric statistical methods, the temporal characteristics of air quality index (AQI) and atmospheric pollutants, and their relationships with temperature and wind effect in Beijing from spring 2017 to winter 2020 were analyzed. The results show that: the air quality in Beijing is worse in spring and summer compared to autumn and winter, the concentration of atmospheric pollutant O₃ is higher in summer, and the concentration of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, CO, and NO₂ is higher in spring and winter. The air quality in Beijing has been improved in the past four years, but the work on atmospheric pollutants O₃ and CO still needs to be strengthened.

Inhalable particles, CO, NO₂, and O₃ are important factors affecting air quality in Beijing. High temperature will reduce air quality in Beijing to some extent, while strong wind is not the main factor affecting air quality in Beijing.

Keywords

Air Quality, Air Pollutants, Non-Parametric Statistics, Meteorological Factors

Copyright © 2024 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

空气是人类赖以发展的宝贵资源。探究北京市大气污染物和空气质量的时间变化特征及和气象因素的关系,有助于加深对北京市大气环境变化的认识,为空气污染的防治工作提供参考。

现有的文献在空气质量及大气污染物的时间分布方面的研究,多采用描述性研究方法[1]。而本文在描述性统计的基础上辅以非参数方法,对样本间差异和样本趋势的显著性进行进一步检验。在空气质量、污染物和气象因素的相关性分析部分,文献多采用 Pearson 相关系数。而本文选取的数据并非服从正态分布且变量中存在非定量数据,此时 Pearson 相关系数的使用前提不成立。而非参数统计中的 Spearman 秩相关检验不对数据的总体分布有要求,且以样本值的秩代替实际数据,解决了 Pearson 相关检验的局限性,据此本文利用非参数统计中的 Spearman 秩相关检验探究它们之间的关系。

2. 问题及背景

随着我国工业化和城市化的高速发展,化石能源的消耗量增加,大气污染物的排放量增加,使我国的空气质量受到严重影响[2] [3]。各地污染天气频发,空气质量不佳不仅会诱发心血管及呼吸道系统疾病,也会对社会发展造成严重影响。大气污染作为环境污染的一种,已然成为环境和人类健康的主要影响因素[4]。如何降低空气污染,提高空气质量,促进可持续发展已成为新时代的主题。

北京市作为我国的政治、文化、经济中心,其空气质量受到政府和公众的高度关注。

近几年,为治理空气污染问题,北京市及周边地区采取联合防控、联合治理的措施使得北京市的空气质量得到显著改善。但雾霾和沙尘暴天气等重污染天气仍时有发生,可见空气污染防治仍是一项长期而艰巨的工作。

我国环境部从 2012 年开始使用 AQI 来评定空气质量状况,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 作为大气主要污染物,其污染浓度指标影响着空气质量[5]。而不同的气象条件下,即使大气污染物的排放量相同,大气中的污染物浓度也会存在差异[6]。

基于上述背景,本文探究北京市空气质量及大气污染物的时间变化规律、大气污染物与空气质量之间的相关性以及气象因素对污染物浓度与空气质量的影响。

3. 相关理论简述

3.1. Friedman 检验

Friedman 检验是一种用于判断多相关样本的总体分布之间是否存在显著差异的非参数统计方法。其原假设为多个样本来自的总体分布之间无差异,备择假设则认为总体分布之间存在差异。现假设有一个 n

个区组和 k 个处理的完全区组设计, Friedman 检验的基本思路为:

1) 将区组中的样本值按从小到大排序, 计算出区组中各处理的秩 $R_{ij} (i=1, \dots, k; j=1, \dots, n)$, 当存在多个相同的样本值时, 它们的秩取平均;

2) 计算出各处理的平均秩 $\bar{R}_i = \left(\sum_{j=1}^n R_{ij} \right) / n$, 进一步计算出组间平方和 $SSR = n \sum_{i=1}^k (\bar{R}_i - \bar{R})^2$, 其中 $\bar{R} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n R_{ij} / nk$;

3) 由组间平方和得到 Friedman 检验统计量 $Q = 12 \cdot SSR / [k(k+1)]$, 检验统计量渐近服从 $\chi^2(k-1)$ 分布, 当 $p(\chi^2(k-1) \geq Q) \leq \alpha$ (α 为显著性水平) 时应拒绝原假设, 认为 k 个处理之间存在差异。

3.2. Jonckheere-Terpstra 检验

Jonckheere-Terpstra 检验用于多独立样本位置参数的有方向性检验。其原假设为多样本总体的位置参数全相等 ($\theta_1 = \dots = \theta_k$), 备择假设则为各样本总体的位置参数越来越大 ($\theta_1 \leq \dots \leq \theta_k (\theta_1 < \theta_k)$) 或越来越小 ($\theta_1 \geq \dots \geq \theta_k (\theta_1 > \theta_k)$)。设 x_{i1}, \dots, x_{in_i} 为来自第 i 个总体的样本, 则该检验的基本思路为:

1) 将各组的样本值由小到大排序, 计算出 Mann-Whitney U 统计量

$$W_{ij} = \#\left\{ (x_{ir}, x_{js}) : x_{ir} < x_{js}, i < j; r=1, \dots, n_i; s=1, \dots, n_j \right\};$$

2) 由 Mann-Whitney U 统计量得到检验统计量 $J = \sum_{1 \leq i < j \leq k} W_{ij}$, 该检验统计量渐近服从正态分布:

$$N \left(\left(N^2 - \sum_{i=1}^k n_i^2 \right) / 4, \left(N^2 (2N+3) - \sum_{i=1}^k n_i^2 (2n_i+3) \right) / 72 \right)$$

其中 $N = \sum_{i=1}^k n_i$ 。当检验的 p 值小于显著性水平 α 时, 拒绝原假设, 认为独立样本总体的位置参数存在趋势[7]。

3.3. Spearman 秩相关检验

Spearman 秩相关检验是一种测定变量间等级相关程度的非参数统计相关性分析方法, 其适用于原始变量的总体分布未知, 存在等级资料的相关性分析。设 x_1, \dots, x_n 和 y_1, \dots, y_n 为来自不同总体的样本, 则该检验先评定出 x_i 和 y_i 在各自样本中的秩, 分别记为 R_i 和 S_i , 然后根据秩计算 Spearman 等级相关系数:

$$r = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S}) / \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}$$

其中 $\bar{R} = \sum_{i=1}^n R_i / n$, $\bar{S} = \sum_{i=1}^n S_i / n$ 。当 r 大于零时, 两变量正相关; r 小于零时, 两变量负相关。同 Pearson 相关系数, $|r|$ 越接近 1, 样本之间的相关程度越大; $|r|$ 越接近 0, 样本之间的相关程度越小。当 $r \geq r^\alpha$ 时, 拒绝原假设, 认为变量之间存在相关性(正相关性/负相关性)。

4. 实证分析

4.1. 数据来源

本文选取 2017 年春到 2020 年冬共计 1466 天的 AQI、六种主要大气污染物和两种气象因素数据, 对北京市空气质量的时间特征和影响因素进行分析。六种主要大气污染物包括 PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、CO 和 O₃, 两种气象因素为气温和风力。其中, 大气污染物和 AQI 的数据来源于 RESSET 数据库的空气质量检测大数据平台, 而气象因素数据来源于天气后报网。

4.2. 北京市空气质量的时间特征分析

4.2.1. 空气质量的季节变化特征

在研究季节变化特征时, 本文选用气象划分法来划分四季, 以阳历 3 月至 5 月为春季, 6 月至 8 月

为夏季，9月至11月为秋季，12月至次年2月为冬季。同时，依据国家在2012年发布的空气质量评价标准AQI将空气质量划分为六个等级：优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染。本文将四年中每年春夏秋冬的空气质量进行了统计，如图1所示。

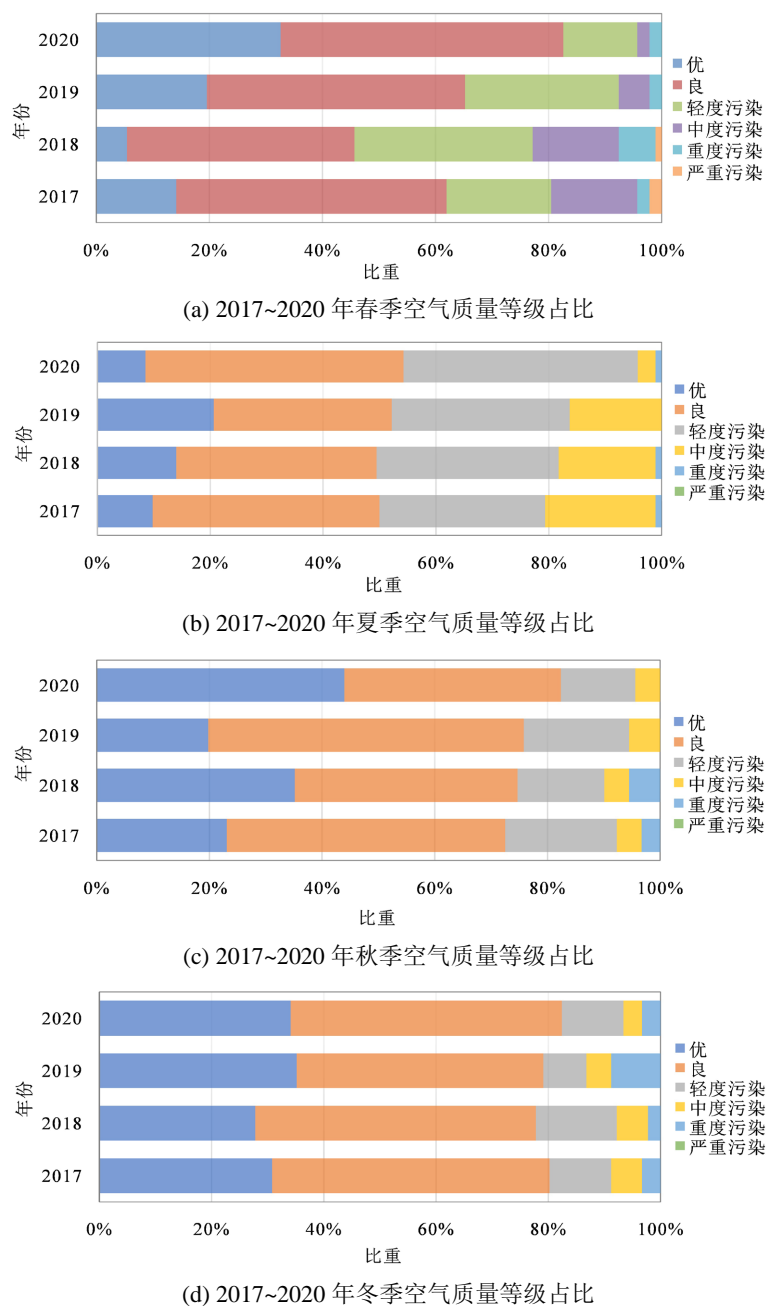
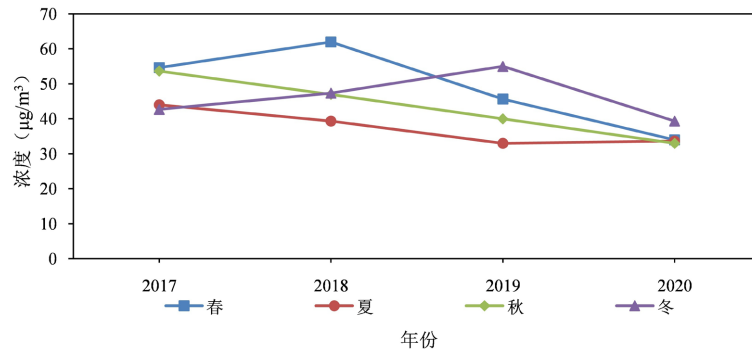


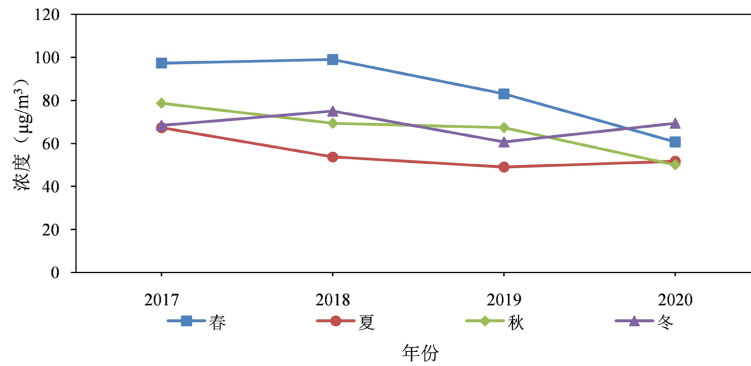
Figure 1. Seasonal changes of Beijing's air quality in 2017~2020
图 1. 北京市 2017~2020 空气质量的季节性变化

从图1可以看出，北京的空气质量大体存在季节性特征，春夏季的污染天气相对偏多，而秋冬季的优良天气更多。接着，本文基于这四年的季节AQI，进行Friedman检验，检验得到 p 值为0.019，取显著性水平为0.05，由此验证出北京的空气质量确实存在显著的季节差异。

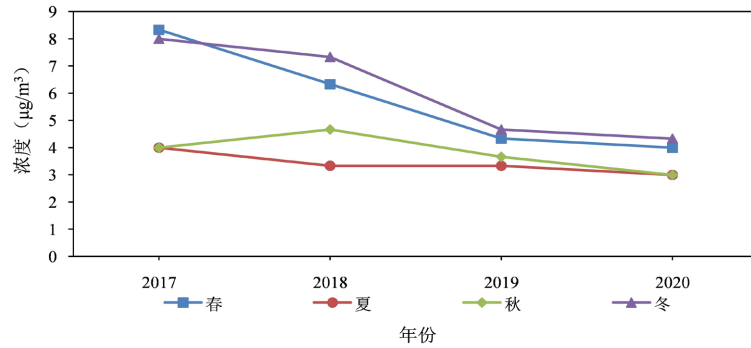
此外，为研究六种污染物随季节的变化，将 2017 至 2020 年各污染物四季的均值绘成折线图，如图 2 所示。



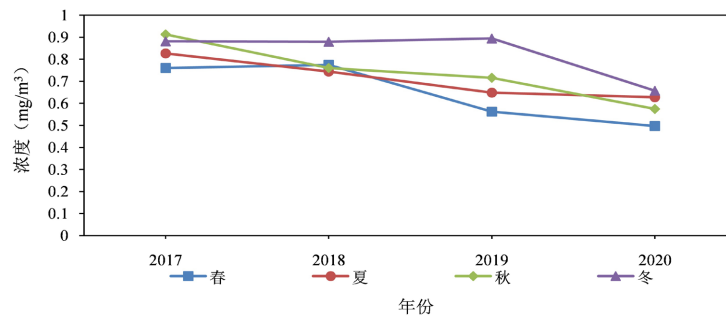
(a) 2017~2020 年 PM_{2.5} 的季节变化



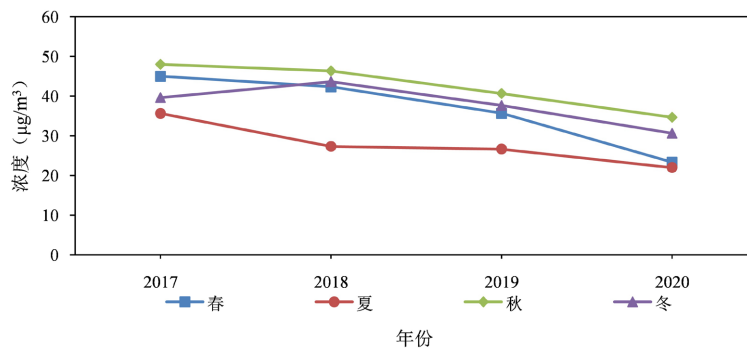
(b) 2017~2020 年 PM₁₀ 的季节变化



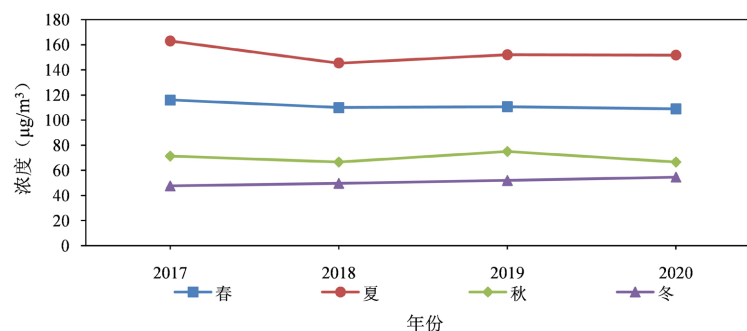
(c) 2017~2020 年 SO₂ 的季节变化



(d) 2017~2020 年 CO 的季节变化



(e) 2017~2020 年 NO₂ 的季节变化



(f) 2017~2020 年 O₃ 的季节变化

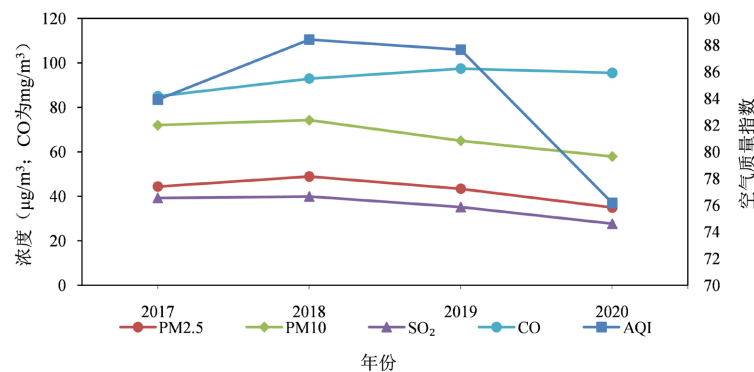
Figure 2. Seasonal changes of six air pollutants

图 2. 六种大气污染物的季节变化

由图 2 可以看出, 大体上, PM_{2.5}、PM₁₀ 和 SO₂ 在春冬的浓度相对较高。CO 在冬季最高, 其次是秋季。NO₂ 在夏季最低, 在其他季节都较高, 而 O₃ 在夏季最高, 春季次之, 在秋冬相对较低。PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂ 在春冬浓度较高的原因可能在于北京市春冬燃煤供暖, 煤的不完全燃烧造成污染物增多。而春夏的气温较高, 日照时间较长, 这有利于有机物发生大气光化学反应, 从而造成 O₃ 增多。

4.2.2. 空气质量的年际变化特征

为研究北京市空气质量的年际变化规律, 本文将各类数据算年平均, 并绘制出 AQI 和六种污染物随年份的曲线图。由于 SO₂ 和 CO 的数值与其他变量数值之间的差异很大, 为反映出二者的变化特点, 便将它们单独绘制, 如图 3 所示。



(a) 2017~2020 年 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 CO 的年际变化

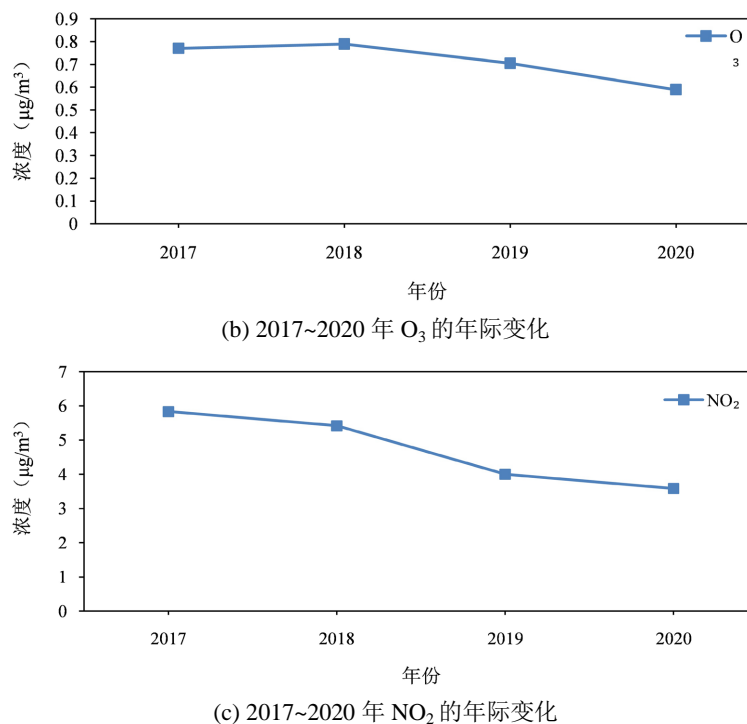


Figure 3. Interannual changes of Beijing's AQI and six air pollutants
图 3. 北京市 AQI 和六种大气污染物的年度变化

从图 3 观察得出, 除 CO 大体呈现上升趋势外, 其他五类污染物以及 AQI 均呈现下降趋势。为进一步验证上述趋势, 对 CO 做原假设: 各年的 CO 没有差异, 以及备择假设: CO 呈上升趋势; 对其他指标, 原假设为各年之间无差异, 备择假设为呈现下降趋势。本文基于 2017 年至 2020 年月数据和 Jonckheere-Terpstra 检验, 得到结果如下表 1 所示。

Table 1. *p* values of each index based on Jonckheere-Terpstra test
表 1. 各指标 Jonckheere-Terpstra 检验的 *p* 值

	AQI	PM2.5	PM10	SO ₂	CO	NO ₂	O ₃
<i>p</i> 值	0.050	0.004	0.038	0.013	0.000	0.001	0.971

取显著性水平为 0.05, 表 1 中除 O₃ 的 *p* 值大于 0.05 以外, 其他 *p* 值均小于显著性水平, 说明对于 O₃ 要接受原假设, 即认为各年之间的差异不大, 而对于 AQI、PM2.5、PM10、SO₂、CO 和 NO₂, 则应拒绝原假设, 认为 CO 随时间呈上升趋势, 而其他指标随时间呈下降趋势。

结果说明, 近四年来, 北京市采取的环境治理措施对空气质量的改善是有效的, 可吸入颗粒物、SO₂ 和 NO₂ 在减少。CO 来源于汽车尾气排放、生活及工业燃料的不完全燃烧, 建议北京市可以进一步加强这几方面的防治工作。

4.3. 相关性分析

4.3.1. AQI 与大气污染物的相关性

由数据的频率直方图观察得出, AQI、PM2.5、PM10、SO₂、CO、NO₂ 和 O₃ 数据的总体并不近似服从正态分布, 故本文选用 Spearman 秩相关检验探究 AQI 和污染物之间的关系。

由于表 2 中 p 值数据都很小, 故认为 AQI 与六种主要空气污染之间都有相关性。由相关系数数据可知, AQI 与它们均呈正相关, 且 AQI 与 PM2.5、PM10 和 CO 的相关程度更高, 与 NO₂、O₃ 的相关程度相对较低, 与 SO₂ 的相关程度最低。说明可吸入颗粒物、CO、NO₂ 和 O₃ 对北京市空气质量的影响程度更高。

Table 2. p values of AQI and six pollutants based on Spearman test

表 2. AQI 和六种污染物 Spearman 检验的 p 值

	PM2.5	PM10	SO ₂	CO	NO ₂	O ₃
相关系数	0.792	0.770	0.327	0.649	0.457	0.447
p 值	0.0001466	0.0001466	0.001466	0.0001466	0.0001466	0.001466

4.3.2. AQI 及大气污染物与气象因素的相关性

类似的, 本文仍选用 Spearman 秩相关检验分析 AQI 和气温、风力之间的相关性, 以及大气污染物与这两种气象因素之间的相关性, 结果见图 4。

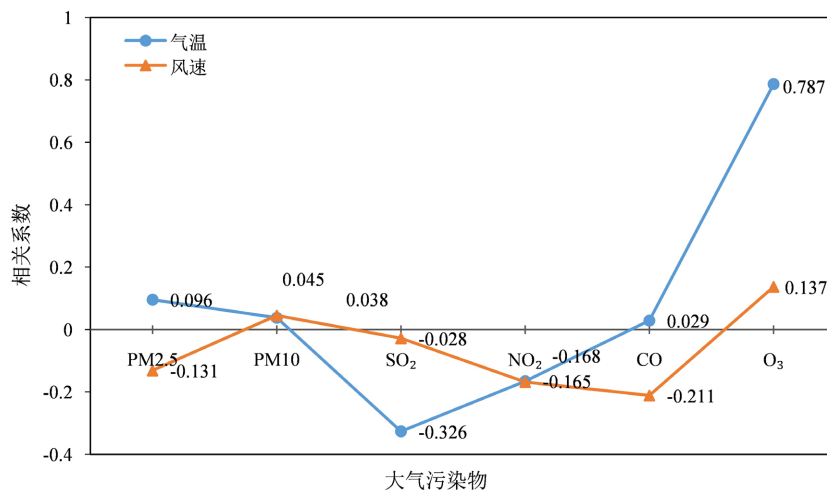


Figure 4. Results of Spearman test

图 4. Spearman 检验结果

由相关性分析的结果可知, AQI 与气温的相关系数为 0.385, 与风力的相关系数为 -0.071, 且 p 值均小于 0.01。由此说明 AQI 与气温呈正相关, 而 AQI 与风力呈负相关, 但与风力相关程度不大。进一步分析两种气象因素与各大气污染物之间的相关性发现, 温度与 O₃、PM2.5、SO₂、NO₂ 均相关, 而与 PM10 和 CO 没有显著相关性, 其中温度与 O₃、PM2.5 呈正相关, 与 SO₂、NO₂ 呈负相关, 且温度与 O₃ 的相关程度很高; 风力与 O₃ 呈正相关, 与 PM2.5、NO₂、CO 呈负相关, 而与 PM10 和 SO₂ 没有显著相关性。

相关性分析结果说明, 北京市的高温天气会影响其空气质量, 高温天气在一定程度上间接地作用于 O₃ 和 PM2.5 的浓度从而导致空气质量下降。同时, 大风天气虽会降低部分大气污染物的浓度, 但也会加速 O₃ 的扩散。风力增大虽能改善空气质量, 但并非是改善北京市空气质量的重要气象因素。

5. 结论

本文通过对北京市 2017 年春到 2020 年冬的 AQI、大气污染物和气象因素进行分析, 得到如下结论:

1) 北京市空气质量呈现出季节性,春夏的污染天气相对秋冬偏多,同时大气主要污染物 PM2.5、PM10、SO₂、CO、NO₂在春冬浓度更高,而 O₃则在夏季浓度更高,高温和充足的日照导致了这种差异。

2) 北京市近四年来,除 O₃的浓度变化不大以及 CO 的浓度随时间有所增加外,其他污染物浓度都呈下降趋势。总体上看,北京市的空气质量随年份在改善,说明北京市采取的政策措施是有效的,但在 O₃和 CO 排放控制和治理方面的工作仍需加强。

3) 空气质量与 PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、CO 和 O₃这六种大气污染物密切相关,可吸入颗粒物、CO、NO₂和 O₃对北京市空气质量的影响程度更大。

4) 对于北京市,高温天气会导致 O₃和 PM2.5 的浓度增大,在一定程度上间接导致空气质量下降,而大风天气对北京市空气质量的改善程度有限。

基金项目

中国石油大学(北京)教育教学改革项目(项目编号: yjs2020033, yjs2021014)。

参考文献

- [1] 金仁浩, 曾国静, 王莎. 基于聚类分析的北京市空气质量时空分布研究[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(1): 68-72.
- [2] 陆晓艳, 潘润西, 陈蓓. 2015 年 2 月广西典型空气重污染过程及成因分析[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(1): 20-23+49.
- [3] 桑燕鸿, 周大杰, 杨静. 大气污染对人体健康影响的经济损失研究[J]. 生态经济, 2010(1): 178-179.
- [4] 金鑫, 谢馨, 陆晓波, 许建华, 朱志锋. 春节除夕燃放烟花爆竹对环境空气质量影响分析[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(2): 64-66.
- [5] 刘杰, 杨鹏, 吕文生, 王金海. 基于北京市 6 类污染物的环境空气质量评价方法[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 310-315.
- [6] Paschalidou, A.K. and Kassomenos, P.A. (2004) Comparison of Air Pollutant Concentrations between Weekdays and Weekends in Athens, Greece for Various Meteorological Conditions. *Environmental Technology*, **25**, 1241-1255. <https://doi.org/10.1080/09593332508618372>
- [7] 王静龙, 梁小筠. 非参数统计分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 101-105.