氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

冬季采暖优化对北京地区空气质量的影响

吴凌云 谢军飞 张欣

Impacts of Clean-Energy Heating Transformation in Winter on the Air Quality in Beijing

WU Lingyun XIE Junfei ZHANG Xin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20098

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

北京市城六区2018年空气质量数值预报效果评估

Assessment of the Air Quality Numerical Forecast in the Main District of Beijing (2018)

气候与环境研究. 2020, 25(6): 616 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19158

秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析

Impact of Crop Straw Burning on Urban Air Quality Based on WRF-Chem Simulations

气候与环境研究. 2017, 22(2): 149 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16024

武汉地区疫情管控期间空气质量变化及改善措施研究

Air Quality Change and Improvement Measures during the COVID-19 Epidemic in Wuhan

气候与环境研究. 2021, 26(2): 217 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20081

烟花爆竹燃放对天津市空气质量的影响研究

Analysis on the Characteristics and Formation Mechanisms of Air Pollution Episodes in Tianjin during Spring Festival of 2015

气候与环境研究. 2018, 23(2): 210 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16109

北京地区一次空气重污染过程的目标观测分析

A Study on Target Observation of a Heavy Air Pollution Event in Beijing

气候与环境研究. 2018, 23(5): 619 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18025

秸秆燃烧排放对北京及其周边地区PM2.5浓度影响的数值模拟

Modeling the Impact of Emissions from Crop Residue Burning on PM2.5 Concentration in Beijing and Its Surrounding Areas

气候与环境研究. 2018, 23(5): 587 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17171

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴凌云, 谢军飞, 张欣. 2021. 冬季采暖优化对北京地区空气质量的影响 [J]. 气候与环境研究, 26(4): 391−402. WU Lingyun, XIE Junfei, ZHANG Xin. 2021. Impacts of Clean-Energy Heating Transformation in Winter on the Air Quality in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (4): 391−402. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20098

冬季采暖优化对北京地区空气质量的影响

吴凌云[1] 谢军飞[2] 张欣[3]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 北京市园林科学研究院园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室，北京 100102
3 河北农业大学园林与旅游学院，河北保定 071000

摘 要 空气污染能够影响人体健康、交通运输、农业生产等，会对国家经济造成损失。多年来，北京一直是空气污染严重地区，而冬季燃煤采暖是一个重要的原因。2016～2017 年，北京大力优化采暖的能源结构，旨在改善空气质量。本文通过分析 5 个位于北京不同区域的空气质量监测站的 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 污染物浓度，对比了 2018 年和 2015 年的空气质量变化情况。结果显示：2018 年 5 个站 5 种污染物浓度较 2015 均下降，平均下降幅度为 37.3%，而 5 个站降幅最大的污染物浓度都是 SO_2，平均降幅为 59.2%。进一步分析表明，两年 5 种污染物浓度的差距主要来自冬季的取暖时期。2018 年冬季 5 个站重空气污染（PM2.5 浓度>150 μg/m^3）天数较 2015 年平均下降率高达 91.3%，比其他季节多了 41.3%。相较于 2015 年，5 个站平均的 2018 年冬季 5 种污染物浓度平均下降值是其他季节的 4.8 倍，平均下降的幅度是其他季节的 2.3 倍。逐小时数据分析显示，2018 年较 2015 年冬季污染物浓度下降比较大的时刻主要来来自暖更多的时间段。结合气象条件分析表明，北京冬季采暖优化很大程度地提高了空气质量，这为有相似采暖方式的城市的空气污染治理提供借鉴和参考。

关键词 北京 冬季 采暖优化 空气质量

文章编号 1006-9585(2021)04-0391-12 **中图分类号** P421.1 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20098

Impacts of Clean-Energy Heating Transformation in Winter on the Air Quality in Beijing

WU Lingyun[1], XIE Junfei[2], and ZHANG Xin[3]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *Beijing Key Laboratory of Ecological Function Assessment and Regulation Technology of Green Space*, *Beijing Institute of Landscape Architecture*, *Beijing* 100102
3 *College of Landscape Architecture and Tourism*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding*, *Hebei Province* 071000

Abstract Air pollution can exert significant impacts on human health, transportation, agriculture, and etc., thereby causing huge losses in the economy. For many years, air pollution has been severe in Beijing, and coal heating is a major contributor. During 2016–2017, a clean heating-supply transformation was performed to improve the air quality in Beijing. This study compares the different concentrations of particulate matter (PM), PM2.5, PM10, O_3, SO_2, NO_2, and

收稿日期 2020-08-03；**网络预出版日期** 2021-01-27
作者简介 吴凌云，女，1975 年出生，副研究员，主要从事陆—气相互作用、城市气候与环境的研究。E-mail: wuly@lasg.iap.ac.cn
通讯作者 谢军飞，E-mail: xiejunfei@126.com
资助项目 国家自然科学基金面上项目 41675085、31770751
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675085 and 31770751)

CO, in 2018 to those in 2015 at five stations located in different districts of Beijing to evaluate the role of clean energy heating transformation in improving the air quality. Results show that the concentrations of PM2.5, PM10, SO_2, NO_2, and CO in 2018 all reduced compared with those in 2015, and the averaged reduction is 37.3%, with SO_2 concentration decreasing the most, that is, by 59.2%. Further analysis reveals that the difference in pollutant concentrations between 2018 and 2015 mainly occurs in winter when people use a heating supply. Compared with 2015, the number of heavily polluted days (PM2.5concentration> 150 μg/m^3) declined in winter by 91.3% on average and more than 41.3% in other seasons. The averaged difference between the winters of 2018 and 2015 in PM2.5, PM10, SO_2, NO_2, and CO concentrations is 4.8 times that of other seasons with 2.3 times the reduction percentage. Analysis from hourly data demonstrates that a relatively larger decrease mainly occurred at times when much more heating is used. Combined with meteorological conditions, these results imply that the clean energy heating transformation largely improves the air quality, providing a reference for other cities with a similar heating supply.

Keywords Beijing, Winter, Clean-energy heating transformation, Air quality

1 引言

空气污染能够对人体的呼吸系统、心血管系统、免疫系统、生殖系统、神经系统等造成危害，严重的可导致死亡（魏复盛等, 2000; 董雪玲, 2004; 刘勇等, 2011; Matus et al., 2012; 杨新兴等, 2012; 张莹等, 2014; Chen et al., 2017）。2010 年，大气颗粒物污染成为中国人群第四大治病因素，每年有大约一百万人死于空气污染（Yang et al., 2013; Yue et al., 2020）。除此之外，空气污染还能影响气候和气候变化，改变水循环，影响交通运输、土壤、农业生产和生态系统等，给国家经济带来重大损失，因而引起了广泛关注（Chameides et al., 1999; Ramanathan et al., 2001; 胡非等, 2003; 丁一汇等, 2009; 师华定等, 2012; 陈卫东等, 2015; Xie et al., 2016; Li et al., 2020; Wang et al., 2020）。

改革开放 40 年来，中国城镇化快速发展，城市人口不断增加，随之而来的城市的能源消耗也大幅增加，导致城市大气污染日趋严重（Chan and Yao, 2008; 吴兑, 2012; 谢杨等, 2016; 袁晓玲等, 2019）。2016 年《环境绩效指数报告》指出中国的空气质量位于 180 个国家倒数第二，因此空气污染是急需解决的问题（Zhang et al., 2012; 黄德生和张世秋, 2013）。京津冀地区城镇化水平高，人口密集，是中国空气污染最严重的地区（王跃思等, 2014; 国家发展与改革委员会和环境保护部, 2015; 赵辉等, 2020）。京津冀地处华北，冬季采暖期长，燃煤采暖是冬季形成雾霾的重要原因（姜小鱼, 2013; 潘慧峰等, 2015; 王玲芬和刘悦, 2019）。据统计，2015 年燃煤排放的污染物对秋冬季贡献率接近 50%，因此控制燃煤污染成为减少大气污染排放的重要措施。环境保护部在 2016～2017 年先后出台了一系列对于京津冀地区大气污染防治及治理的措施和方案，旨在改善空气质量（环境保护部, 2016; 环境保护部等, 2017a, 2017b）。

北京是中国的首都，京津冀地区人口密度最大的城市，能源消耗大，加上独特的地形等原因，很容易形成空气污染（杨欣等, 2014; 王跃思等, 2016）。自从 1998 年被国务院定为环境治理重点地区，20 年来北京连续实施了一系列大气污染措施，大气污染物 PM2.5、PM10、NO_2、SO_2、CO 浓度与 20 年前相比下降超过 50%，环境质量得到明显的改善（Zhang et al., 2016; 王振波等, 2017）。但是 2015 年，北京 PM2.5 年均浓度仍位于全国省自治区和直辖市首位。2016～2017 年，北京对于冬季燃煤采暖造成的空气污染足够的重视，不断地优化采暖的能源结构，实现了能源结构的巨变（陈讲运, 2014; 薛亦峰等, 2014; 陶双成等, 2016; 周伟等, 2020）。例如，2016 年北京 7000 多个燃煤锅炉被改造成为清洁能源，2017 年新建锅炉实行 30 mg/m^3 污染物排放标准等。2016 年和 2017 年这些采暖能源优化的措施是否能够改善北京的空气质量，程度有多大？本文分析了 5 个位于北京不同区域的空气质量监测站 2018 年和 2015 年的 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2、CO 污染物的浓度，来对比采暖优化前后的空气质量变化。

2 数据与方法

本文所使用的近地面大气中 PM2.5、PM10、

SO_2、NO_2、CO 的浓度数据来源于北京市环境保护监测中心的空气质量自动监测网（http://www.bjmemc.com.cn[2020-10-21]）。数据均分别通过美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的 1405F 连续环境空气监测仪、1405F 连续环境空气监测仪、49C 臭氧测定仪、43C 二氧化硫分析仪、42 C（NO-NO_2 -NO_x）分析仪、48C 一氧化碳分析仪。各监测仪器均有校准仪参照国家标准定期校准，以保证监测数据的准确性和有效性。各监测仪输出的为 5 min 数据，根据每个小时内 5 min 数据的算术平均值求得小时浓度，研究中使用的均为小时数据（王占山等, 2015）。监测仪器采样口周围没有阻碍空气流通的高大建筑物、树木或者其他障碍物，周围 50 m 范围内没有明显的固定污染源。对因设备故障等原因造成的个别缺测数据进行了相邻内插填充，即当某一具有连续特性的定时观测数据缺测时，用前、后两定时数据内插，而连续多时的缺测则通过同一时间段相邻站点的观测数据进行补充。

本文选取永定门、万寿西宫、万柳、奥体中心、云岗 5 个位于北京不同区域和下垫面的空气质量监测站来对比 2018 年较 2015 年空气质量的变化情况（表 1）。图 1 显示了 5 个站的地理位置，5 个站点分别位于东城区、西城区、海淀区、朝阳区和丰台区。其中永定门站为交通污染控制点，其他 4 个站为城区环境评价点，海拔高度均为 50 m。

本文选取北京站的气象数据来分析气象条件对 PM2.5、PM10、O_3、SO_2、NO_2 和 CO 的浓度的影响。2015～2018 年日平均气温、降水量、平均

表 1　本文选取的北京 5 个空气质量监测站的描述

Table 1　Description of the five air quality monitoring stations in Beijing used in this study

站点名称	所属区	具体位置	站点类别
永定门	东城区	永定门内大街城市交通干道	交通污染控制点
万寿西宫	西城区	万寿公园	城区环境评价点
万柳	海淀区	长春健身园	城区环境评价点
奥体中心	朝阳区	奥林匹克体育中心附属绿地	城区环境评价点
云岗	丰台区	丰台城区西南部的云岗街道	城区环境评价点

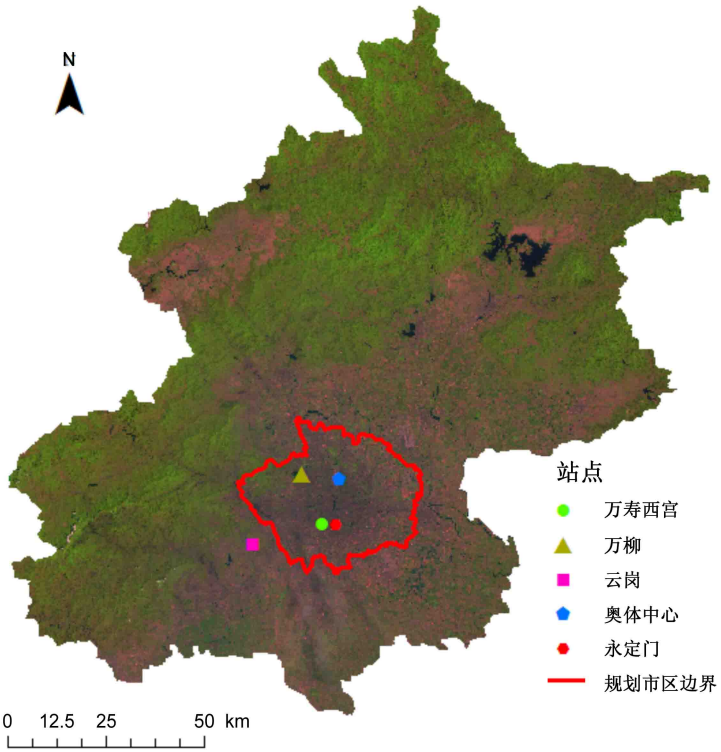

图 1　本文选取的北京 5 个空气质量监测站位置

Fig. 1　Locations of the five air quality monitoring stations in Beijing used in this study

风速和平均相对湿度数据来自于中国气象数据网（http://data.cma.cn/[2020-10-21]）。2014～2018 年煤炭消耗数据、集中供热面积和燃煤锅炉数据来自于 2019 年北京市统计年鉴（http://tjj.beijing.gov.cn/[2020-10-21]）和文献资料（周扬胜, 2020）。

3 结果

表 2 是 2015 年和 2018 年 5 个站年平均 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 浓度，以及 2018 年较 2015 年的变化情况。2018 年 5 个站的年均 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 浓度较 2015 年都下降。其中，下降最大的都是 SO_2，降幅为 56.9%～62.4%，平均降幅为 59.2%。其次为 CO，平均降幅为 41.2%。5 种污染物平均降幅在 5 个站的值分别为 37.3%、35.3%、37.2%、38.0% 和 38.9%，平均值为 37.3%。

图 2 是 5 个站 2018 年与 2015 年月平均污染物 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 浓度差值（2018 年的值减去 2015 年的值）。相比 2015 年，2018 年 5 个站 PM2.5 一致地表现为，在 3～10 月变化不大，而 1 月、2 月、11 月、12 月大幅下降，尤其是冬季的 1 月、2 月、12 月这 3 个月下降最大。PM10 的变化虽然与 PM2.5 略有差别，但是相同的是差值比较大的也出现在冬季的 3 个月。5 个站 SO_2 浓度在 2018 年较 2015 年全年 12 个月均下降，降幅比较大的值是冬季 3 个月和 3 月。尽管 NO_2 的变化 5 个站表现的并不完全一致，但是在冬季的 3 个月 2018 年较 2015 年下降值比较大。CO 形式类似于 PM2.5，两年差值都是在 1 月、2 月、11 月、12 月比较大。综上所述，5 种污染物浓度在 2018 年较 2015 年下降最多的大都出现在冬季的 3 个月，这几个月正是北京的集中采暖期。下面我们将一年 12 个月分为冬季（1 月、2 月、12 月）和其他季节（3～11 月）来分析一下 5 个站 2018 年较 2015 年污染物浓度的变化情况。

表 3 列出了 5 个站 2015 年和 2018 年冬季和其他季节的重污染天气的日数（PM2.5 浓度

表 2 北京 5 个站 2015 年和 2018 年平均 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 污染物浓度以及 2018 年相比于 2015 年变化情况

Table 2 Annual mean of PM2.5, PM10, SO_2, NO_2, and CO concentrations in 2015 and 2018 at the five stations in Beijing and their changes in 2018 relative to 2015

	PM2.5浓度				PM10浓度				SO_2浓度				NO_2浓度				CO浓度			
	2015	2018	差值	变幅	2015	2018	差值	变幅	2015	2018	差值	变幅	2015	2018	差值	变幅	2015	2018	差值	变幅
永定门	89.5	56.8	−32.7	−36.6%	119.7	85.8	−33.9	−28.3%	18.1	7.8	−10.3	−56.9%	70.8	55.4	−15.4	−21.7%	1.5	0.8	−0.6	−43.2%
万寿西宫	84.2	51.6	−32.6	−38.7%	112.5	86.0	−26.5	−23.6%	14.5	5.8	−8.7	−60.2%	53.1	42.8	−10.3	−19.4%	1.4	0.9	−0.5	−34.7%
万柳	80.2	50.1	−30.1	−37.6%	111.9	78.7	−33.2	−29.6%	15.0	5.7	−9.4	−62.4%	57.8	47.3	−10.5	−18.1%	1.3	0.8	−0.5	−38.2%
奥体中心	81.6	52.2	−29.4	−36.1%	115.8	88.3	−27.5	−23.7%	14.4	5.9	−8.6	−59.3%	60.7	45.1	−15.6	−25.7%	1.4	0.8	−0.6	−45.0%
云岗	81.4	48.1	−33.3	−40.9%	114.9	77.7	−37.3	−32.4%	12.4	5.3	−7.1	−57.4%	40.7	33.0	−7.7	−19.0%	1.3	0.7	−0.6	−44.9%
5站平均	83.4	51.8	−31.6	−38.0%	115.0	83.3	−31.7	−27.5%	14.9	6.1	−8.8	−59.2%	56.6	44.7	−11.9	−20.8%	1.4	0.8	−0.6	−41.2%

注：2015、2018分别表示2015年、2018年污染物浓度，差值表示2018年污染物浓度减去2015年污染物浓度，PM2.5、PM10、SO_2、NO_2浓度和差值单位：μg/m^3，CO浓度和差值单位：mg/m^3；变幅表示2018年与2015年污染物浓度之间的变化幅度。

表 3 2015 年和 2018 年北京 5 个站的冬季和其他季节重污染天气（PM2.5 浓度>150 μg/m^3）日数

Table 3 Number of heavily polluted days in winter and other seasons in 2015 and 2018 at the five stations in Beijing

	冬季重污染天气日数				冬季外其他季节重污染天气日数				全年重污染天气日数			
	2015年/d	2018年/d	差值/d	变幅	2015年/d	2018年/d	差值/d	变幅	2015年/d	2018年/d	差值/d	变幅
永定门	32	4	−28	−87.5%	26	14	−12	−46.1%	58	18	−40	−69.0%
万寿西宫	29	2	−27	−93.1%	23	10	−13	−56.5%	52	12	−40	−76.9%
万柳	22	1	−21	−95.5%	21	12	−9	−42.9%	43	13	−30	−69.8%
奥体中心	22	2	−20	−90.9%	25	12	−13	−52.0%	47	14	−33	−70.2%
云岗	29	3	−26	−89.7%	21	10	−11	−52.4%	50	13	−37	−74.0%
5站平均	26.8	2.4	−24.4	−91.3%	23.2	11.6	−11.6	−50.0%	50	14	−36	−72.0%

注：差值表示2018年数值减去2015年数值，变幅表示2018年与2015年数值之间的变化幅度。

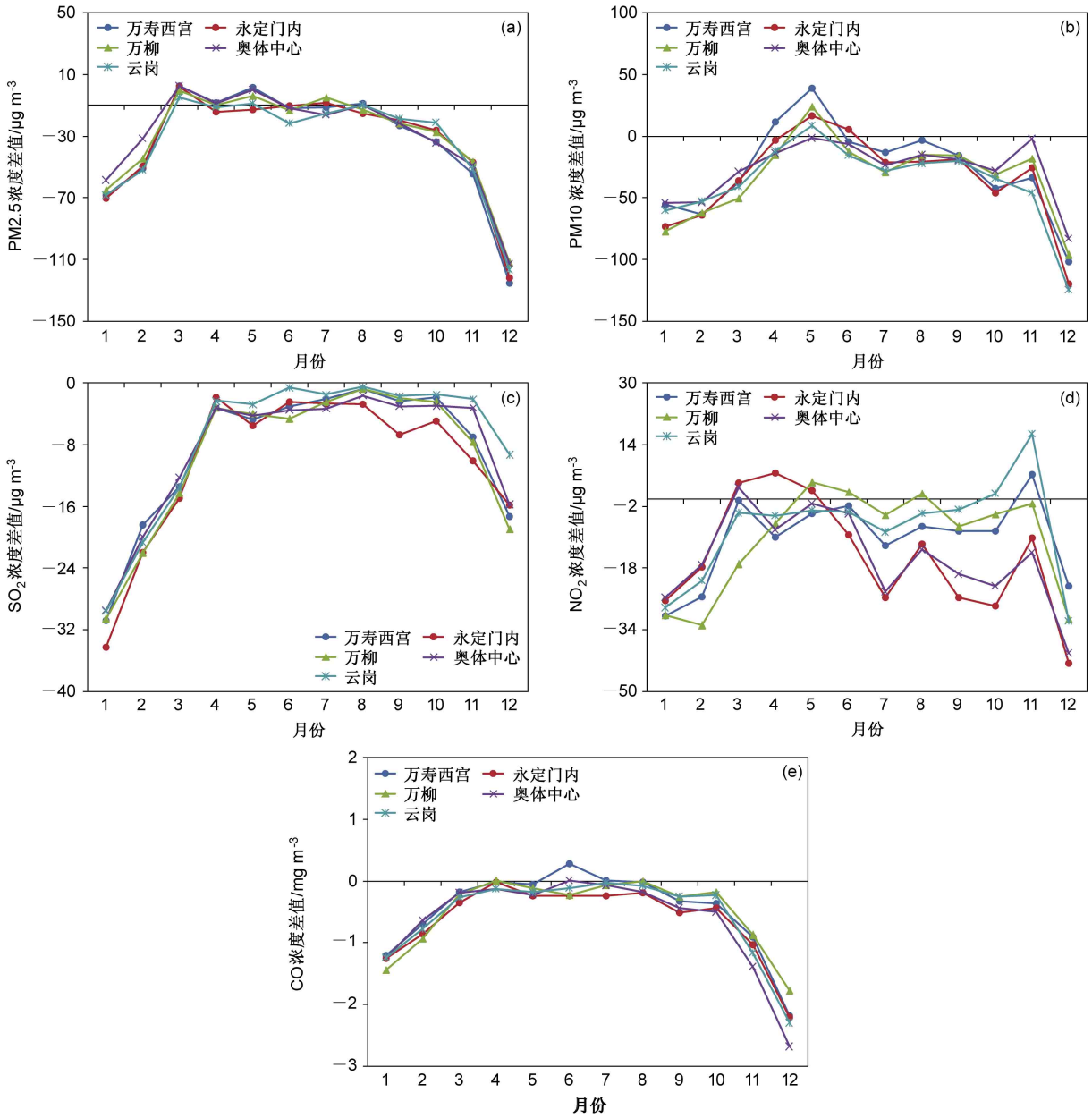

图 2　北京 5 个站 2018 年和 2015 年月平均的（a）PM2.5、（b）PM10、（c）SO_2、（d）NO_2、（e）CO 污染物浓度差值

Fig. 2　Monthly average difference of the concentrations of (a) PM2.5, (b) PM10, (c) SO_2, (d) NO_2, and (e) CO at five stations in Beijing between 2018 and 2015

>150 μg/m^3）。5 个站 2015 年重污染天数在冬季为 22～32 d，平均为 26.8 d；2018 年下降到仅为 1～4 d，平均为 2.4 d，减少了 20～28 d，平均减少 24.4 d，下降率高达 87.5%～95.5%，平均减少 91.3%；而在其他季节，2018 年较 2015 年重污染天数平均减少 11.6 d，平均下降率为 50%，比冬季少 41.3%。5 个站的重污染天数的下降主要都出现在冬季，为全年下降天数的 60.6%～70.3%，平均为 67.7%。

表 4 对比了 2018 年冬季和其他季节平均的 5 个站的 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 污染物浓度较 2015 年的下降幅度。2018 年相比较 2015 年，5 个站平均在冬季 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 浓度下降的幅度分别为 64.0%、51.0%、72.1%、39.3% 和 63.6%，均值为 58%。在其他季节 5 个站 PM2.5、PM10、SO_2、NO_2 和 CO 浓度平均的降幅为 23.4%、16.4%、45.6%、12.7% 和 25.5%，均值为 24.7%。总结来说，2018 年 5 个站的 5 种污染

表4 北京5个站2018年冬季和其他季节相比于2015年各污染物下降幅度

Table 4 Reduction percentage of pollutants in winter and other seasons at the five stations in Beijing

站点名称	季节	污染物浓度下降幅度（P）					
		PM2.5	PM10	SO_2	NO_2	CO	平均
永定门	冬季	62.0%	55.9%	71.6%	37.4%	61.4%	57.7%
	其它季节	22.2%	15.5%	44.6%	15.9%	30.9%	25.8%
万寿西宫	冬季	65.8%	49.2%	72.0%	36.7%	61.6%	57.1%
	其它季节	23.0%	11.1%	47.2%	10.9%	16.3%	21.7%
万柳	冬季	65.4%	53.7%	74.9%	40.6%	62.7%	59.5%
	其它季节	22.5%	18.1%	48.6%	7.1%	20.8%	23.4%
奥体中心	冬季	62.6%	44.4%	70.7%	38.8%	65.1%	56.3%
	其它季节	22.9%	14.6%	46.6%	20.3%	30.9%	27.0%
云岗	冬季	64.4%	51.5%	71.5%	43.1%	67.5%	59.6%
	其它季节	26.8%	22.9%	40.3%	4.0%	28.1%	24.4%
5站平均	冬季	64.0%	51.0%	72.1%	39.3%	63.6%	58.0%
	其它季节	23.4%	16.4%	45.6%	12.7%	25.5%	24.7%

注：$P=(V_{2018}-V_{2015})/V_{2015}\times100\%$，$P$为变化幅度，$V_{2018}$和$V_{2015}$分别表示的是2018年和2015年的污染物浓度。

物浓度与2015年差值在冬季远大于其他季节，是其他季节的4.8倍。就下降幅度而言，在冬季平均的下降幅度都超过了50%，是其他季节的2.3倍，其中SO_2在冬季的下降幅度最高，5个站都超过了70%。

4 讨论

影响污染物浓度的主要因素包括污染源的排放和气象条件。首先，我们讨论气象条件是否对2018年北京污染物浓度下降产生影响（由于5个站的结果比较相似，为了叙述简洁，此部分只选取永定门站和万寿西宫站为例）。图3a是2015～2018年冬季的降水总量。2015年北京在冬季有6 d发生降水，降水总量为13.4 mm。从2016年到2018年冬季降水总量持续下降，到2018年北京仅有1天发生降水，降水量仅为0.2 mm。我们去除降水日，2018年万寿西宫站冬季平均的PM2.5、PM10、SO_2、NO_2和CO浓度分别为41.2 μg/m^3、74.3 μg/m^3、8.7 μg/m^3、44.3 μg/m^{3}和0.8 mg/m^3，明显低于2015年的114.2 μg/m^3、143.1 μg/m^3、31.8 μg/m^3、71.0 μg/m^{3}和2.2 mg/m^3，下降幅度为63.9%、48.1%、72.8%、37.6%、61.3%，平均下降幅度为56.7%；类似地，永定门内站2018年冬季平均的5种污染物浓度的值为48.3 μg/m^3、66.2μg/m^3、9.6 μg/m^3、48.2μg/m^3、0.9 mg/m^3，明显低于2015年的121.9 μg/m^3、145.5 μg/m^3、34.7 μg/m^3、78.3 μg/m^{3}和2.3 mg/m^3，下降幅度为60.4%、54.4%、72.4%、38.4%、61.3%，平均下降幅度为57.4%（图3b）。在去除降水的影响后，两站冬季5种污染物浓度平均下降在57%左右，与整个冬季的污染物浓度下降率基本一致，这表明2018年较2015年5种污染物浓度的下降基本上不受降水的影响。

再来分析风速是否对2018年污染物降低起到一定作用。图4a显示，2015年冬季的平均风速为2.1 m/s，2018年为2.3 m/s，两年的风速差别非常小。2015年和2018年永定门站和万寿西宫站冬季平均风速与各污染物均呈显著负相关，即风速的增加可降低各污染物浓度含量，这个结果是与前人的结论是一致的。本文将风速分为≥2 m/s和<2 m/s两种情况进行分析。对比2018年和2015年，发现万寿西宫站和永定门站PM2.5、PM10、SO_2、NO_2和CO浓度在两种风速的情况下都发生下降，而在风速<2 m/s下降更多，两年5种污染物浓度的差值是在风速≥2 m/s情况下的2.5倍。就下降幅度而言，两站在风速<2 m/s时下降57%左右，在风速≥2 m/s时下降49%左右（图4b）。也就是说，在风速很小的情况下污染物浓度下降的更多，表明风速并不是2018年较2015年冬季污染物浓度下降的主要原因。

接着讨论气温是否能够对2018年较2015年5

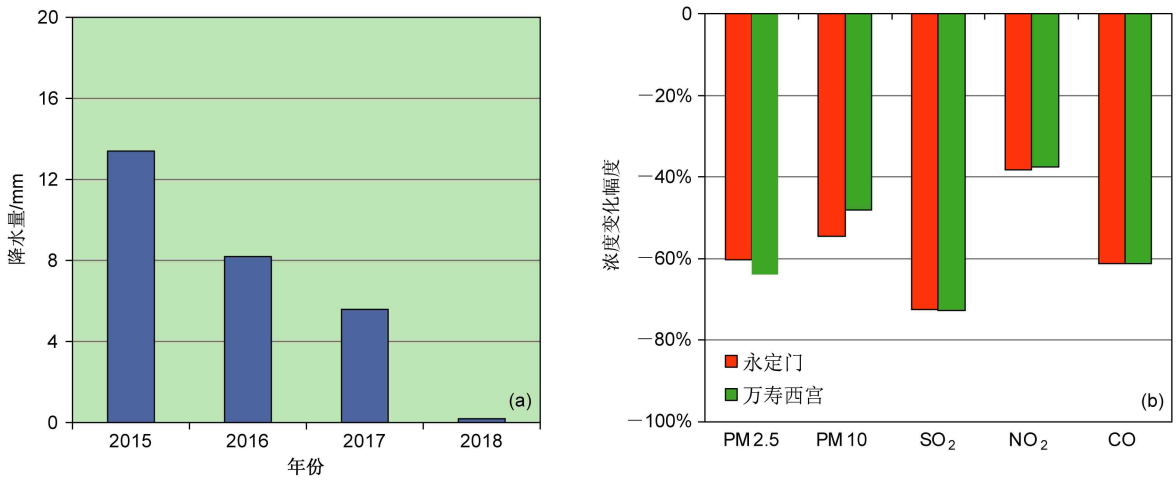

图 3　（a）2015～2018 年北京站冬季降水总量；（b）永定门站和万寿西宫站 2018 年相比于 2015 年冬季非降水日各污染物变化的幅度

Fig. 3　(a) Total precipitation in the winters from 2015 to 2018 at Beijing station and (b) the reduction percentage of pollutants on non-precipitation days in the winter of 2018 relative to 2015 at Yongdingmen and Wanshouxigong stations

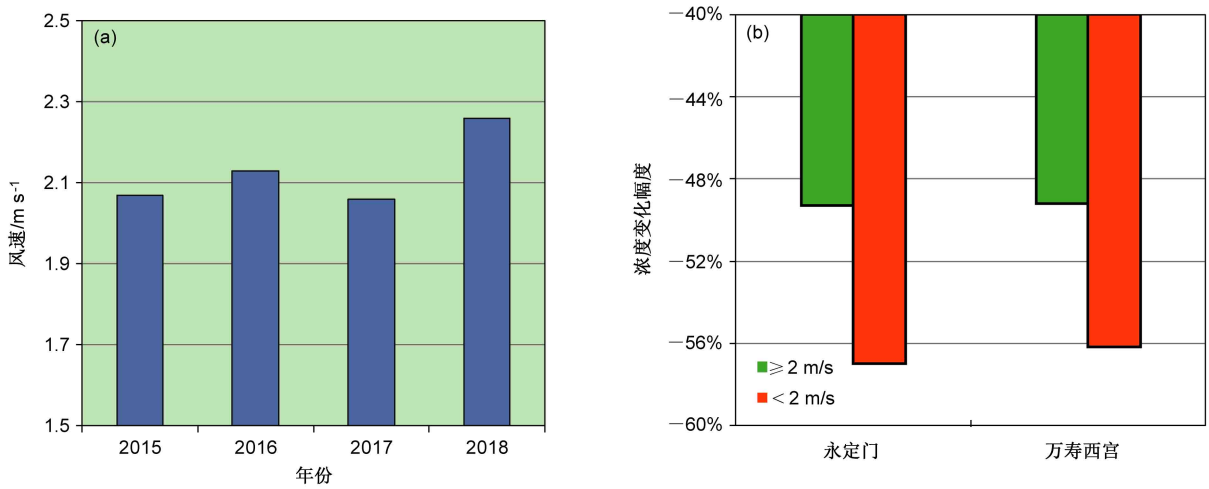

图 4　（a）北京站 2015 年到 2018 年冬季平均风速；（b）永定门站和万寿西宫站在风速≥2 m/s 和风速<2 m/s 情况下 2018 年相比于 2015 年冬季 5 种污染物浓度的平均降幅

Fig. 4　(a) The averaged wind speed in the winters from 2015 to 2018 at Beijing station and (b) the reduction percentage of pollutants on wind speeds greater than or equal to 2 m/s and less than 2 m/s days in the winter of 2018 relative to 2015 at Yongdingmen and Wanshouxigong stations

种污染物的降低有一定的作用。我们检查了 2015 年气温和 5 种污染物浓度的相关，发现两站的污染物浓度与气温的相关并不显著，说明气温不是 2018 年污染物浓度降低的主要原因。虽然气温与污染物浓度不成线性相关，但是在冬季，温度低会增加取暖，就会相应增加污染物含量。我们对比了 2015 年冬季气温在≥0°C 和<0°C 的情况，发现两站在<0°C 的情况下 5 种污染物的浓度含量均大于气温在≥0°C 的情况，是其 1.2 倍，说明取暖的增加确实加重了污染。2016 年到 2018 年冬季的平均气温都低于 2015 年，尤其是 2018 年比 2015 年低 2.5°C（图 5a）。如果在其他条件不变的情况下，2018 年温度降低会增加取暖相应加重污染，但是 2018 年的污染反而大幅度降低。我们对比 2018 年较 2015 年污染物浓度在气温≥0°C 和<0°C 下的变化情况，发现在两种情况下 2018 年 5 种污染物浓度均下降，但是永定门站和万寿西宫站在气温<0°C 情况下平均下降值是气温≥0°C 的 2 倍和 1.2 倍，平均下降幅度是 1.6 倍和 1.1 倍（图 5b）。这一结果说明，取暖方式的改变对北京 2018 年冬季污染物降低有重要作用。

进一步，我们分析了永定门站和万寿西宫站 2018 年与 2015 年冬季 5 种空气污染物浓度差的逐小时变化（图 6）。两站的 PM2.5、PM10、SO_2、

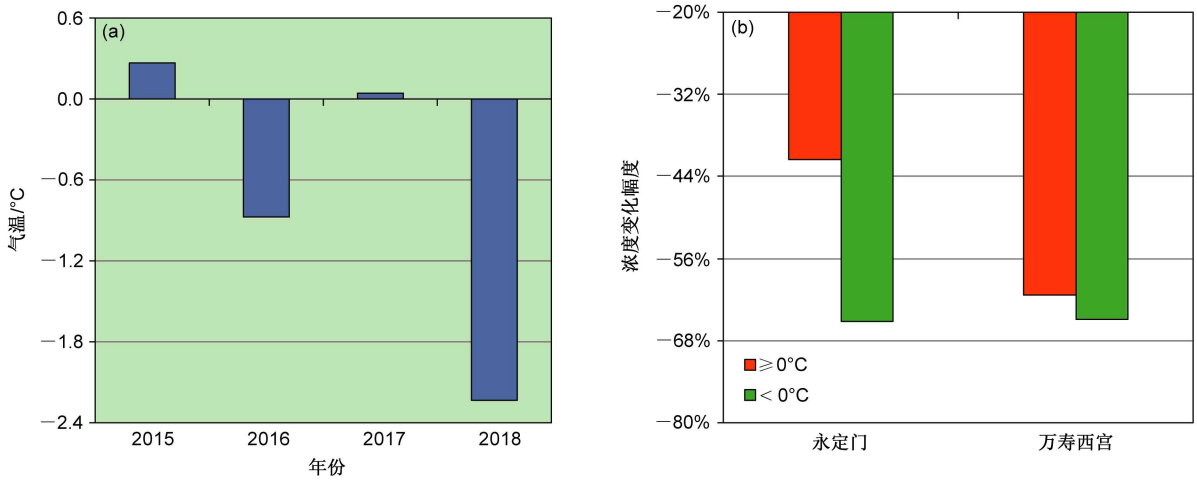

图 5 （a）北京站 2015 年到 2018 年冬季平均气温；（b）永定门站和万寿西宫站在气温≥0°C 和气温<0°C 情况下 2018 年相比于 2015 年冬季 5 种污染物浓度的平均降幅

Fig. 5 (a) The averaged air temperature in the winters from 2015 to 2018 and (b) the reduction percentage of pollutants on air temperatures greater than or equal to 0°C and less than 0°C days in the winter of 2018 relative to 2015 at Yongdingmen and Wanshouxigong stations

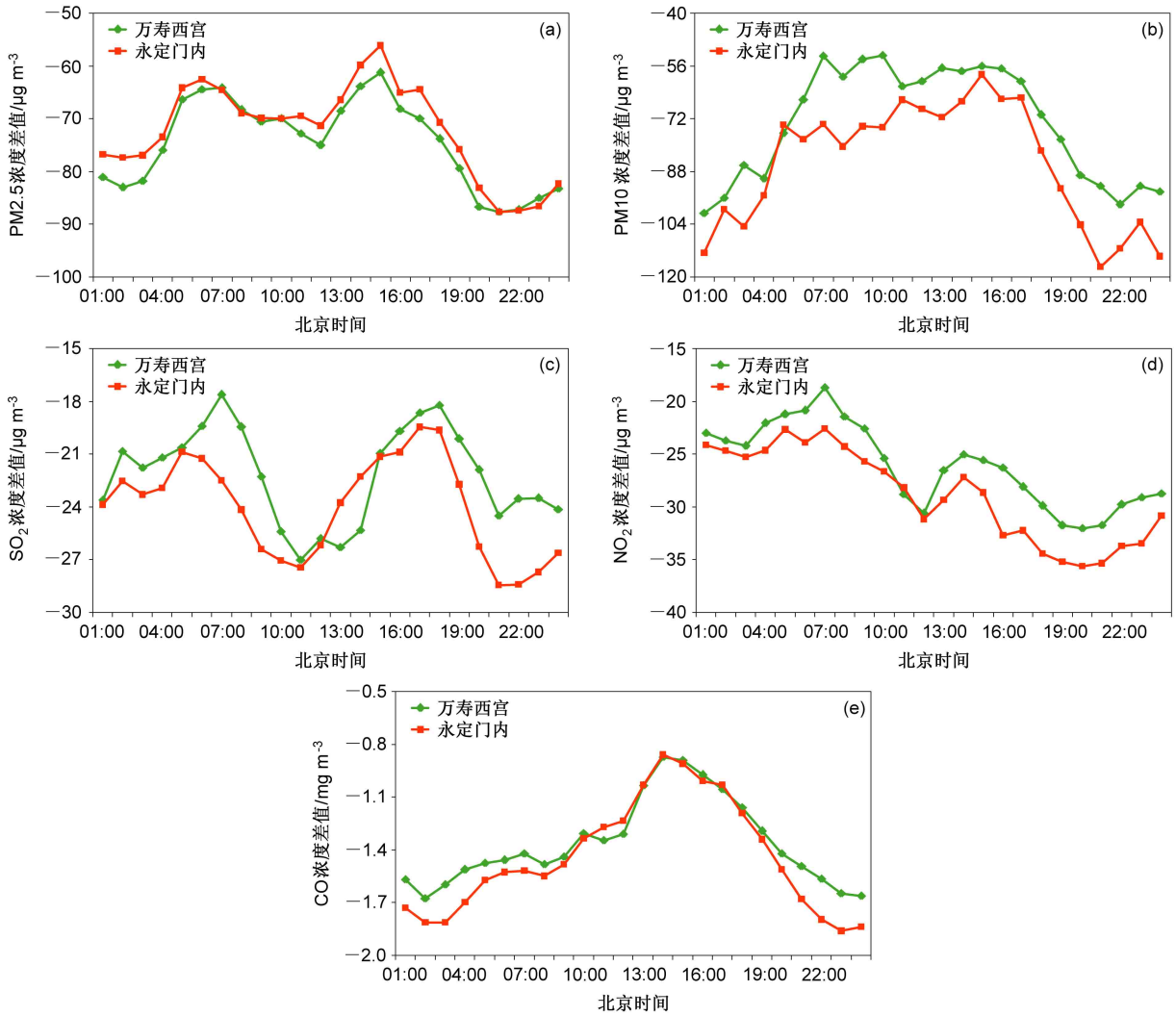

图 6 2018 年和 2015 年冬季永定门站和万寿西宫站（a）PM2.5、（b）PM10、（c）SO_2、（d）NO_2、（e）CO 浓度差值的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of (a) PM2.5, (b) PM10, (c) SO_2, (d) NO_2, and (e) CO concentrations difference between the winters of 2018 and 2015 at Yongdingmen and Wanshouxigong stations

NO_2 和 CO 在一天 24 h 2018 年较 2015 年都呈下降。PM2.5、PM10 和 CO 表现一致在 20:00（北京时间，下同）至 04:00 的时间段降低的比较大，是其他时刻的 1.2 倍、1.5 倍和 1.3 倍。SO_2 和 NO_2 在 20:00 至 04:00 和 12:00 左右这一段时间下降最多，这些时间段是一天中取暖较多的时刻。这一结果进一步表明，采暖优化对 2018 年污染物浓度下降的重要作用。

最后分析一下相对湿度对 2018 年 5 种污染物浓度的下降是否起到一定作用。图 7a 显示，2015 年相对湿度是 49.6%，从 2016 年以后相对湿度逐年减少，到 2018 年的相对湿度降低到 32.6%，比 2015 年小了 17%。2015 年永定门站和万寿西宫站相对湿度和 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度呈显著正相关，超过了 99% 的信度检验，平均贡献的方差为 48% 和 46.5%，但是与 SO_2 呈不显著相关。也就是说 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度在冬季随相对湿度变小而降低，这有可能是导致 2018 年 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 降低的一个原因。我们以相对湿度为回归因子，建立回归方程，估计 2018 年如果只有相对湿度影响的情况下的数值。用回归方程计算出永定门站 2018 年冬季平均的 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度为 70.5 μg/m^3、96.5 μg/m^3、62.9 μg/m^3 和 1.5 mg/m^3，比 2018 年的实际值高，相对湿度对 2018 年 4 种污染物降低贡献的平均方差为 31.1%。类似地，万寿西宫站 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度在冬季分别为 106.7 μg/m^3、94.8 μg/m^3、57.5 μg/m^3 和 1.3 mg/m^3，相对湿度对 2018 年 4 种污染物降低贡献的平均方差大约为 24.3%（图 7b）。这个结果表明，相对湿度对 2018 年 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度降低起到一定作用，但是对 SO_2 的降低作用不大。

气象条件只是大气污染的触发因子，而污染源的排放才是主要的原因。我们的结果表明，2018 年 5 种污染物浓度在冬季下降远大于其他季节，冬季和其他季节污染源排放的最主要的区别就是采暖。而且，我们的结果进一步揭示在冬季一天中取暖更多的时刻污染物浓度下降更多。以上分析表明，气象条件中仅有相对湿度对 2018 年 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度的下降起到一定作用，但不是最重要的作用，尤其对 SO_2 浓度的降低并没有很大的影响，而 SO_2 在所有污染物中冬季下降幅度最大，也是燃煤主要产物。尹晓梅等（2019）估算出 2017 年减少的大气污染 65% 归功于减排，35% 因为气象条件。北京 2015～2018 年致力于治理燃煤采暖，用天然气、电力等代替煤炭，不断优化供热能源结构，控制采暖造成的大气污染。北京燃煤锅炉房供热面积从 2014～2015 年的采暖季的 12236×10^4 m^2 下降到 2017～2018 年采暖季的 1262×10^4 m^2，占比从 16.3% 下降到 1.5%，2018～2019 的采暖季已经无燃煤采暖（周扬胜，2020）。北京的煤炭消耗占比从 2014 年的 20.37% 下降到 2015 年、2016 年、2017 年的 13.68%、9.81%、5.65%，到 2018 年仅占 2.8%

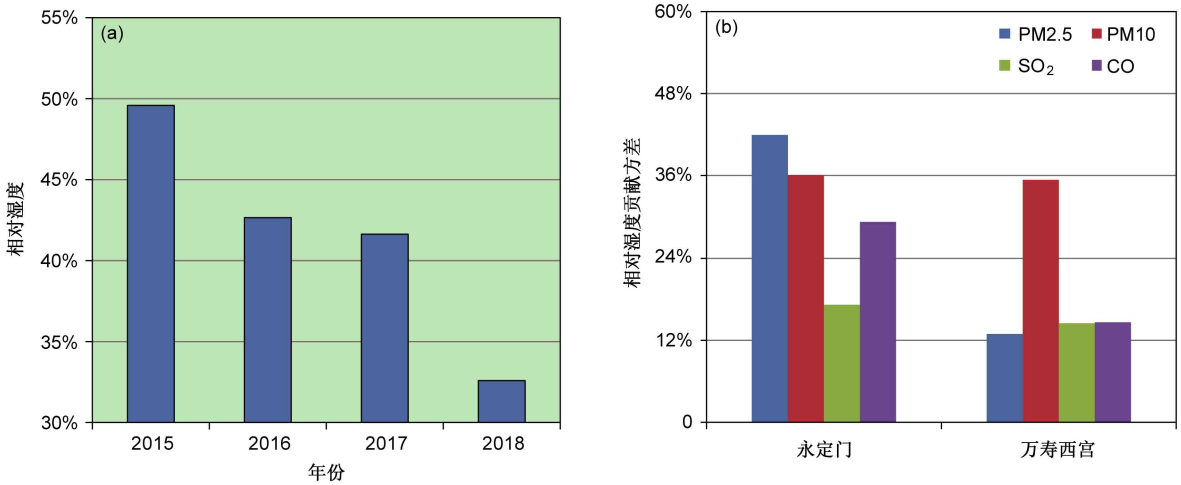

图 7　（a）北京站 2015 年到 2018 年冬季平均相对湿度；（b）永定门站和万寿西宫站相对湿度对 2018 年污染物 PM2.5、PM10、NO_2 和 CO 浓度下降贡献的方差

Fig. 7　(a) Average relative humidity in the winters from 2015 to 2018 and (b) the contribution variance of relative humidity to the reduction of PM2.5, PM10, NO_2, and CO concentrations in 2018 relative to 2015

（北京市统计局, 2019; 周扬胜, 2020）。研究表明，2017年燃煤排放PM2.5、PM10、SO_2、NO_x较2015年下降30%、32%、44%和48%（王彦超等, 2018）。由此，我们可以推论北京冬季采暖方式的优化很大程度提高了2018年的空气质量。

5 结论

北京地处华北平原，长期经受严重空气污染的困扰，而冬季燃煤采暖造成的空气污染是非常重要的一个因素。为此，北京在2016年和2017年实施了一系列清洁能源的改造，来改善空气质量。本文通过分析5个位于北京不同区域的空气质量监测站的PM2.5、PM10、SO_2、NO_2和CO 5种污染物浓度，对比了使用清洁能源后的2018年较2015年的空气质量的变化情况。得出如下结果：

（1）2018年较2015年5个站的PM2.5、PM10、SO_2、NO_2和CO浓度均下降，5种污染物平均降幅为37.3%，其中降幅最大的是SO_2，降幅为59.2%。

（2）5个站的PM2.5、PM10、SO_2、NO_2和CO浓度2018年较2015年下降的峰值大多出现在冬季3个月，这个时间刚好是北京的采暖季节。

（3）2018年较2015年相比，5个站的重污染天数（PM2.5浓度>150 μg/m^3）平均下降36天，其中冬季下降幅度在91.3%，而其他季节下降幅度为50%。

（4）5个站2018年较2015年冬季PM2.5、PM10、SO_2、NO_2和CO浓度平均下降值是其他季节的4.8倍，下降幅度是其他季节的2.3倍。

（5）2018年较2015年而言，污染物浓度在冬季取暖更多的时刻较其他时间下降的幅度更大。

（6）通过气象条件分析表明，降水、风速和气温不是导致2018年污染物下降的主要原因，相对湿度对PM2.5、PM10、NO_2和CO浓度下降有一定的贡献，但是对SO_2浓度的降低作用不显著。

（7）冬季采暖优化对2018年较2015年5种污染物浓度降低起到重要的作用，尤其是SO_2。

参考文献（References）

北京市统计局. 2019. 北京统计年鉴——2019 [M]. 北京: 中国统计出版社. Beijing Municipal Bureau of Statistics. 2019. Beijing Statistical Yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press.

Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. 1999. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 96(24): 13626−136333. doi:10.1073/pnas.96.24.13626

Chan C K, Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmos. Environ., 42(1): 1−42. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.003

陈讲运. 2014. 北京农村供暖将推空气能、电采暖等多能互补系统 [J]. 供热制冷, (9): 54−55. Chen Jiangyun. 2014. Beijing rural heating will promote multienergy complementary systems such as air energy and electric heating [J]. Heating and Refrigeration, (9): 54−55.

Chen L, Shi M S, Gao S, et al. 2017. Assessment of population exposure to PM2.5 for mortality in China and its public health benefit based on BenMAP [J]. Environ. Pollut, 221: 311−317. doi:10.1016/j.envpol.2016.11.080

陈卫东, 付丹红, 苗世光, 等. 2015. 北京及周边城市气溶胶污染对城市降水的影响 [J]. 科学通报, 60(22): 2124−2135. Chen Weidong, Fu Danhong, Miao Shiguang, et al. 2015. Impacts of aerosols from Beijing and the surrounding areas on urban precipitation [J]. Chin. Sci. Bull. (in Chinese), 60(22): 2124−2135. doi:10.1360/N972015-00217

丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 2009. 空气污染与气候变化 [J]. 气象, 35(3): 3−14. Ding Yihui, Li Qiaoping, Liu Yanju, et al. 2009. Atmospheric aerosols, air pollution and climate change [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 35(3): 3−14. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.3.001

董雪玲. 2004. 大气可吸入颗粒物对环境和人体健康的危害 [J]. 资源·产业, 6(5): 50−53. Dong Xueling. 2004. Impact of inhalable particles in atmosphere on environment and human health [J]. Resources & Industries (in Chinese), 6(5): 50−53. doi:10.3969/j.issn.1673-2464.2004.05.014

国家发展与改革委员会, 环境保护部. [2015-12-30]. 京津冀协同发展生态环境保护规划 [EB/OL]. http://www.ocn.com.cn/hongguan/201611/oskqj22115116.shtml.

胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. 大气科学, 27(4): 712−728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 712−728. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.18

环境保护部. 2016. 关于印发《京津冀大气污染防治强化措施(2016–2017)年》的通知 [EB/OL]. http://www.envsc.cn/details/index/6130.

环境保护部, 国家发展和改革委员会, 财政部, 等. 2017a. 关于印发《京津冀及周边地区2017年大气污染防治工作方案》的通知 [EB/OL]. https://pilu.tianyancha.com/regulations/49cccd17616a5b60f71fec6530ad1417.

环境保护部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 2017b. 关于印发《京津冀及周边地区2017～2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知 [EB/OL]. http://www.mee.gov.

cn/gkml/hbb/bwj/201708/t20170824_420330.htm.

黄德生, 张世秋. 2013. 京津冀地区控制 PM2.5 污染的健康效益评估 [J]. 中国环境科学, 33(1): 166−174. Huang Desheng, Zhang Shiqiu. 2013. Health benefit evaluation for PM2.5 pollution control in Beijing–Tianjin–Hebei region of China [J]. China environmental Science (in Chinese), 33(1): 166−174. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2013.01.024

姜小鱼. (2013-12-04)[2015-02-05]. 京津冀雾霾根源: 过度依赖煤炭的能源供应 [EB/OL]. http://www.cb.com.cn/economy/2013_1204/1026024.html. Jiang Xiaoyu. (2013-12-04)[2015-02-05]. Roots of Beijing –Tianjin –Hebei smog: Over-reliance on coal for energy supply (in Chinese) [EB/OL]. http://www.cb.comcn/economy/2013_1204/1026024.html.

Li L, Lu C, Chan P W, et al. 2020. Tower observed vertical distribution of PM2.5, O3 and NO_x in the Pearl River delta [J]. Atmos. Environ., 220: 117083. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117083

刘勇, 芦茜, 黄志军, 等. 2011. 大气污染物对人体健康影响的研究 [J]. 中国现代医学杂志, 21(1): 87−91. Liu Yong, Lu Xi, Huang Zhijun, et al. 2011. Air pollution and its health impact [J]. China Journal of Modern Medicine (in Chinese), 21(1): 87−91. doi:10.3969/j.issn.1005-8982.2011.01.022

Matus K, Namk M, Selin N E, et al. 2012. Health damages from air pollution in China [J]. Glob. Environ. Change, 22(1): 55−66. doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.08.006

潘慧峰, 王鑫, 张书宇. 2015. 重雾霾污染的溢出效应研究—来自京津冀地区的证据 [J]. 科学决策, (2): 1−15. Pan Huifeng, Wang Xin, Zhang Shuyu. 2015. Severe haze pollution spillover effect: Evidence from Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Scientific Decision-Making (in Chinese), (2): 1−15. doi:10.3773/j.issn.1006-4885.2015.02.001

Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 294(5549): 2119−2124. doi:10.1126/science.1064034

师华定, 高庆先, 张时煌, 等. 2012. 空气污染对气候变化影响与反馈的研究评述 [J]. 环境科学研究, 25(9): 974−980. Shi Huading, Gao Qingxian, Zhang Shihuang, et al. 2012. Research review of impacts and feedback of air pollution on climate change [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 25(9): 974−980. doi:10.13198/j.res.2012.09.19.shihd.007

陶双成, 邓顺熙, 高硕晗, 等. 2016. 北京采暖期典型区域环境空气污染特征分析 [J]. 生态环境学报, 25(11): 1741−1747. Tao Shuangcheng, Deng Shunxi, Gao Shuohan, et al. 2016. Characteristics of air pollution in typical regions of Beijing during heating season [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 25(11): 1741−1747. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.11.001

王玲芬, 刘悦. 2019. 京津冀地区空气污染情况分析 [J]. 价值工程, 38(3): 1741−1747. Wang Lingfen, Liu Yue. 2019. Analysis of air pollution in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Value Engineering (in Chinese), 38(3): 1741−1747. doi:10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2019.03.054

王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 2014. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望 [J]. 地球科学进展, 29(3): 388−396. Wang Yuesi, Zhang Junke, Wang Lili, et al. 2014. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing –Tianjin –Hebei region [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 29(3): 388−396. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.03.0388

王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2015. 2013 年北京市 PM2.5 的时空分布 [J]. 地理学报, 70(1): 110−120. Wang Zhanshan, Li Yunting, Chen Tian, et al. 2015. Spatial –temporal characteristics of PM2.5 in Beijing in 2013 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 70(1): 110−120. doi:10.11821/dlxb201501009

王跃思, 宋涛, 高文康, 等. 2016. 北京市大气污染治理现状及面临的机遇与挑战 [J]. 中国科学院院刊, 31(9): 1082−1087. Wang Yuesi, Song Tao, Gao Wenkang. 2016. The challenge and opportunity on preventing and controlling air pollution of Beijing [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 31(9): 1082−1087. doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2016.09.013

王振波, 梁龙武, 林雄斌, 等. 2017. 京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 [J]. 环境科学, 38(10): 4005−4014. Wang Zhenbo, Liang Longwu, Lin Xiongbin, et al. 2017. Control models and effect evaluation of air pollution in Jing –Jin –Ji urban agglomeration [J]. Environmental Science (in Chinese), 38(10): 4005−4014. doi:10.13227/j.hjkx.201701007

王彦超, 蒋春来, 贺晋瑜, 等. 2018. 京津冀大气污染传输通道城市燃煤大气污染减排潜力 [J]. 中国环境科学, 38(7): 2401−2405. Wang Yanchao, Jiang Chunlai, He Jinyu, et al. 2018. Air pollutant emissions reduction potential from burning coal in cities of air pollution transmission channel in Beijing –Tianjin –Hebei area [J]. China Environmental Science (in Chinese), 38(7): 2401−2405. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2018.07.001

Wang Y H, Gao W K, Wang S, et al. 2020. Contrasting trends of PM2.5 and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017 [J]. Nat. Sci. Rev., 7(8): 1331−1339. doi:10.1093/nsr/nwaa032

魏复盛, 胡伟, 滕恩江, 等. 2000. 空气污染对人体健康影响研究的进展 [J]. 世界科技研究与发展, 22(3): 14−18. Wei Fusheng, Hu Wei, Teng Enjiang, et al. 2000. Advance of study on the impact of air pollution on human health [J]. World SCI-TECH R & D (in Chinese), 22(3): 14−18. doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2000.03.004

吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 32(2): 257−269. Wu Dui. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32(2): 257−269. doi:10.13671/j.hjkxxb.2012.02.011

Xie Y, Dai H C, Dong H J, et al. 2016. Economic impacts from PM2.5 pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis [J]. Environ. Sci. Technol., 50(9): 4836−4843. doi:10.1021/acs.est.5b05576

谢杨, 戴瀚程, 花岡達也, 等. 2016. PM2.5 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 26(11): 19−27. Xie Yang, Dai Hancheng, Hanaoka Tatsuya, et al. 2016. Health and economic impacts of PM2.5 pollution in Beijing–Tianjin–Hebei area [J]. China Population, Resources and Environment (in Chinese), 26(11): 19−27. doi:10.3969/j.issn.1002-2104.2016.11.003

薛亦峰, 闫静, 魏小强. 2014. 燃煤控制对北京市空气质量的改善分

析 [J]. 环境科学研究, 27(3): 253−258. Xue Yifeng, Yan Jing, Wei Xiaoqiang. 2014. Impact on air quality of Beijing city by controlling the consumption of coal-fired [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 27(3): 253−258. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2014.03.05

杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 2012. 大气颗粒物 PM2.5 及其危害 [J]. 前沿科学, 6(1): 22−31. Yang Xinxing, Feng Lihua, Wei Peng. 2012. Air particulate matter PM2.5 in Beijing and its harm [J]. Frontier Science (in Chinese), 6(1): 22−31.

Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, et al. 2013. Rapid health transition in China, 1990-2010: Findings from the global burden of disease study 2010 [J]. Lancet, 381(9882): 1987−2015. doi:10.1016/S0140-6736(13)61097-1

杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 2014. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析 [J]. 中国环境科学, 34(2): 282−288. Yang Xin, Chen Yizhen, Liu Houfeng, et al. 2014. Characteristics and formation mechanism of a serious haze event in January 2013 in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34(2): 282−288.

尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 2019. 2014～2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估 [J]. 环境科学, 40(3): 1011−1023. Yin Xiaomei, li Ziming, Xiong Yajun, et al. 2019. Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017 [J]. Environmental Science (in Chinese), 40(3): 1011−1023. doi:10.13227/j.hjkx.201807067

袁晓玲, 李朝鹏, 方恺. 2019. 中国城镇化进程中的空气污染研究回顾与展望 [J]. 经济学动态, (5): 88−103. Yuan Xiaoling, Li Zhaopeng, Fang Kai. 2019. Retrospect and prospect of research on air pollution in the context of China's urbanization [J]. Economic Perspectives (in Chinese), (5): 88−103.

Yue H B, He C Y, Huang Q X. 2020. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM2.5 pollution in China [J]. Nat. Commun., 11: 1462. doi:10.1038/s41467-020-15319-4

Zhang Q, He K B, Huo H. 2012. Cleaning China's air [J]. Nature, 484(7393): 161−162. doi:10.1038/484161a

张莹, 邵毅, 王式功, 等. 2014. 北京市空气污染物对呼吸系统疾病门诊人数的影响 [J]. 中国环境科学, 34(9): 2401−2407. Zhang Ying, Shao Yi, Wang Shigong. 2014. Relationship between air pollutant and respiratory diseases hospital outpatient visits in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34(9): 2401−2407.

Zhang H F, Wang S X, Hao J M, et al. 2016. Air pollution and control action in Beijing [J]. J. Cleaner Prod., 112: 1519−1527. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.092

赵辉, 郑有飞, 张誉馨, 等. 2020. 京津冀大气污染的时空分布与人口暴露 [J]. 环境科学学报, 40(1): 1−12. Zhao Hui, Zheng Youfei, Zhang Yuxin, et al. 2020. Spatiotemporal distribution and population exposure of air pollution in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 40(1): 1−12. doi:10.13671/j.hjkxxb.2019.0237

周扬胜. 2020. 北京市城乡供热取暖清洁化历程及启示 [J]. 环境与可持续发展, 45(3): 57−66. Zhou Yangsheng. 2020. Processes and enlightenment of urban-rural clean heating in Beijing [J]. Environment and Sustainable Development (in Chinese), 45(3): 57−66. doi:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202003057

周伟, 周旭, 李兆碧, 等. 2020. 京津冀地区清洁能源供暖对雾霾的影响 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 39(4): 98−103. Zhou Wei, Zhou Xu, Li Zhaobi, et al. 2020. Impact of clean energy heating on fog and haze in Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences) (in Chinese), 39(4): 98−103. doi:10.3969/j.issn.1674-0696.2020.04.17