

京津冀地区“以电代煤”空气质量改善影响

马小会¹, 徐敬^{2*}, 张自银², 李朋³, 吴华成³, 周卫青³

¹京津冀环境气象预报预警中心, 北京

²中国气象局北京城市气象研究院, 北京

³国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京

收稿日期: 2022年5月10日; 录用日期: 2022年6月14日; 发布日期: 2022年6月21日

摘要

基于2018年京津冀地区民用散煤消费调研结果, 建立空气质量改善计算模型, 模拟评估“以电代煤”措施对大气环境空气质量改善的定量影响。结果显示, “以电代煤”措施对北京、天津和河北南部城市PM_{2.5}浓度的降低起到明显作用, 对河北西北部、北部城市的改善没有太大影响。月平均浓度变化显示, 京津冀重点地区在措施实施后PM_{2.5}月平均浓度下降3 μg/m³~26 μg/m³之间。特定气象条件下, 京津冀地区“以电代煤”措施的影响范围可扩散至山东、江苏和河南北部以及山西西部, 京津冀周边部分地区小时浓度变化量最大值超过了50 μg/m³。

关键词

燃煤, 模型, 以电代煤, 空气质量

The Study of the Improvement of Air Quality by Electricity in Place of Coal in Beijing-Tianjin-Hebei Region

Xiaohui Ma¹, Jing Xu^{2*}, Ziyin Zhang², Peng Li³, Huacheng Wu³, Weiqing Zhou³

¹Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing

²Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing

³Jibe Electric Power Research Institute, State Grid Jibe Electric Power Co., Ltd., North China Electric Power Research Institute Company Limited, Beijing

Received: May 10th, 2022; accepted: Jun. 14th, 2022; published: Jun. 21st, 2022

*通讯作者。

文章引用: 马小会, 徐敬, 张自银, 李朋, 吴华成, 周卫青. 京津冀地区“以电代煤”空气质量改善影响[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(3): 481-494. DOI: 10.12677/aep.2022.123065

Abstract

Air environment quality model based on research results of civil coal combustion in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 was established. The impact of electricity in place of coal on air quality in Beijing-Tianjin-Hebei region was evaluated. The results showed that it has played a significant role in $PM_{2.5}$ concentration decreased by electricity in place of coal in Beijing, Tianjin and Southern Hebei. The influence on air quality improvement is not obvious in the northwest of Hebei and cities in north. Monthly average concentration of $PM_{2.5}$ decreased by $3 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in key cities in Beijing-Tianjin-Hebei region after electricity in place of coal. The influence spread over to Shandong, Jiangsu, North Henan and Western Shanxi after electricity in place of coal in typical weather process. The maximum hourly concentration variation of $PM_{2.5}$ exceeded $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the surrounding areas of Beijing-Tianjin-Hebei.

Keywords

Coal, Model, Electricity in Place of Coal, Atmospheric Environment

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

京津冀城市群是我国华北平原核心区域，人口稠密，城市化发展迅速，能源消耗带来了明显的负面环境效应。2000~2020年，京津冀地区积极实施可持续发展战略，生态环境急剧恶化的趋势有所减缓，但与国家环境空气质量标准相比仍有一定的差距， $PM_{2.5}$ 浓度超标是最为突出的环境问题[1] [2] [3] [4]。京津冀城市群污染物排放总量空间分布差异明显，经济发展和人口规模较大的北京、天津、唐山、石家庄，其污染物排放总量高于其它城市；其中北京、天津、唐山、石家庄4个城市的污染物排放量大、约占京津冀地区污染物排放量的37%~69% [5] [6] [7] [8]。

国家及各地区颁布的“减排”宏观政策对京津冀地区主要污染物排放的控制具有积极的作用。自2000年开始，国家相继出台的“十五”和“十一五”计划明确提出污染物排放总量控制目标，同时，京津冀地区各城市也出台了一系列污染物排放管理的政策和措施，各项政策的实施使得京津冀地区主要的传统污染物排放呈下降趋势。然而，由于污染物排放量较大，京津冀地区的污染物排放强度仍高于其它地区[9] [10]。

煤炭在我国能源结构中扮演着重要的角色，目前仍主导着我国的能源消耗，2016年我国煤炭消耗约占能源消耗总量的62%，近几十年来，随着我国经济的快速发展，城市化进程的加快，大量化石燃料燃烧加剧了我国空气质量的恶化，对人体健康造成了严重的危害[11]，受到公众的广泛关注。为了改善空气质量，政府采取了一系列严格的措施来降低重点行业(燃煤电厂、水泥厂、钢铁厂等)及机动车等重点源大气污染物排放，例如燃煤电厂实现超低排放[12] [13] [14] [15] [16]，工业锅炉逐步实现安装脱硝、高效除尘以及脱硫净化设施[17] [18]，随着控制措施及净化系统的不断完善，大气污染物排放已经得到实质性的降低。然而，居民燃煤(小锅炉、家庭取暖、餐饮等用煤)在燃煤源中排放贡献加大，其燃烧设备主要为各式各样的小锅炉及煤炉，难以有效地对其燃烧装置进行控制和改进，同时居民燃煤存在低效、不完全燃

烧的特点, 燃烧过程污染控制难度大, 进而导致大量的大气污染物(PM、SO₂、NO_x、CO、VOCs、PAHs 等有害物质等)排入大气环境, 从而影响周边环境质量和人体健康[19] [20] [21] [22]。

京津冀地区居民燃煤消费数据调研显示: 1995~2015 年北京居民燃煤消耗量比较稳定, 并没有发生显著变化, 平均每年消耗 287.2 万吨燃煤; 天津居民燃煤消耗逐年降低明显, 从 1995 年消耗 147.5 万吨降低到 2015 年消耗 78.2 万吨; 河北居民燃煤消耗先下降后上升, 且总体用量较大。由于河北省居民燃煤消费量在京津冀地区居民消费中占比大, 京津冀地区居民燃煤消耗 2007 年以后呈现稳中有升的趋势, 在整体燃煤消耗量的占比增加, 需要引起足够的重视[23] [24] [25] [26] [27]。

“以电代煤”政策是京津冀地区散煤清洁化替代的重要措施[28]-[34]。本文基于神经网络建立户均年燃煤量估算模型, 神经网络(ANN)是一种非线性统计性数据建模工具, 通过 ANN 的训练可以掌握样本的内在规律, 建立输入与输出之间的非线性映射, 这种非线性映射对训练数据外的样本也具有有良好的适应能力。ANN 由于具有强大的非线性拟合能力以及良好的预测效果, 被广泛应用于解决图像识别、电力负荷预测、气象预报等实际问题, 其中 BP 神经网络是最常用的模型之一。本文通过对京津冀地区民用散煤消费特征的入户调研, 建立基于人工神经网络的民用散煤消费量预测模型, 以 2018 年为基准年份, 计算了京津冀地区“以电代煤”实施后替代民用散煤大气污染物排放清单。通过对空气质量模型的考察和研究[35]-[40], 利用大气环境模型计算北京市居民燃煤大气污染物排放结果, 结果显示从空间分布情况来看, 应加强对人口较多、分布密集的城市、城乡结合部地区散煤控制和管理。降低和解决因散煤燃烧带来的污染问题对于缓解京津冀大气污染治理面临的严峻压力以及改善冬季雾霾重污染发生具有极其重要的作用。

2. 资料处理与天气形势分析

2.1. 模型介绍及数据来源

本次研究选取 WRF-Chem 作为大气环境影响评价模型, WRF (Weather Research and Forecasting Model)模式是由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等美国科研机构中心着手开发的一种统一的中尺度天气预报模式。WRF-Chem 是在 WRF 基础上增加了化学模块而构成的。WRF-Chem 被称为新一代空气质量模式系统, 它将空气质量模式也就是大气化学模式(Chem)与气象模式(WRF)在线耦合而成, 可同步计算物理和化学过程, 即化学和气象子模式采用同一套水平和垂直坐标系统, 同样的物理参数, 因为大气化学输送过程是在与气象完全相同的格点和时间步长的情况下处理的, 从而可以有效减少由于时间和空间插值造成的误差。总体上来说, WRF-Chem 较为全面地考虑了物理和化学过程, 包括大气污染物的平流和对流输送、湍流扩散、干湿沉降、辐射传输等主要大气物理过程, 生物质排放与人为排放、多相化学、气溶胶化学和动力学等大气化学过程, 以及气溶胶与大气辐射、光解和微物理过程相互作用的气溶胶反馈过程。此外, 该模式还能够实现大气动力、辐射和化学过程之间的耦合和反馈过程。

本研究需要的初始气象场和侧边界条件数据来源于美国大气环境预测中心(NCEP)提供的全球再分析资料 FNL (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)、全球天气预报场 GFS (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>)。地形和地表类型数据来源于美国地质勘探局(USDS)的 geog 数据 (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html)。

本次研究的京津冀各地区户均年燃用量基于神经网络计算, 排放清单以 2018 年为基准年份, 对京津冀各县市农村地区民用散煤燃用情况开展入户调研, 根据调研结果, 基于 BP 神经网络建立民

用散煤消费量预测模型,影响民用散煤燃用量的主要因素有气温、经济水平、房屋保暖结构等[41] [42] [43] [44] [45],确定气温(10月到次年4月日均最低气温与日均最高气温)、人均可支配收入、人均住房面积和人均常住人口作为BP神经网络的5个输入参数,计算京津冀地区“以电代煤”实施后替代民用散煤大气污染物排放清单[46]。

计算中原煤与型煤的排放因子引用文献中相关数据[47],其中SO₂的排放因子计算方法参考《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南》[48]中相关规定。京津冀各地区“煤改电”每年替代散煤产生大气污染物排放量通过公式(1)计算:

$$EM_i = A \cdot [C \cdot EF_{ij} + (1 - C) \cdot EF_{ik}] / 1000 \quad (1)$$

式中:EM_i代表某污染物排放量,t/a;A代表地区年燃煤量,t/a;C代表地区原煤使用比,%;EF_{ij}和EF_{ik}分别代表该污染物排放因子,kg/t。

北京、天津各区以及河北各县市“煤改电”用户详细清单由国家电网公司各省公司提供,气象数据由北京市气象局提供,空气质量数据由中国环境监测总站提供。

2.2. 气象背景分析

“以电代煤”措施涉及的民用燃煤与温度条件密切相关,其中京津冀地区取暖季集中于11月~3月,因此首先分析了2018年11月~2019年3月华北地区地面平均温度和风场等气象背景特征(图1),其中将11月分为上半月(采暖前1日~14日)和下半月(采暖后15日~30日)两个阶段。

图1地面平均风场分布形势显示:冬季在整体偏西气流的控制下,京津冀地区西部和北部由于受到山体的阻挡,偏西风沿山体向北、自东北部南下进入渤海后回流转向形成东北风,影响山东半岛东部、江苏、安徽和河南等地。山东临海地区,由于纬向海陆热力差异,气压梯度较大,这些地区风速明显较大;受城市粗糙下垫面影响北京周边风速明显偏小;受西部和北部山体阻挡,京津冀平原地区地面形成气流辐合中心,不利于污染物扩散。污染严重时,风场特征如下:1)燕山山前偏南风,有利于山前污染汇聚;2)位于北京东南的天津、廊坊、唐山东南风增强,污染物由东南向往北京输送;3)在太行山东南有明显的南风增强带,与山走势一致,该强南风带向南一直延伸到河南境内,靠近北京地区较弱,存在风速辐合。风场分布形势显示:对京津冀地区造成污染影响的三条输送通道,东路、东南路和偏南路,其中位于太行地区的偏南通道,风场变化最为明显,对外源输送贡献最大,环渤海地区风场变化也比较明显,经过天津,从东南方向影响北京空气质量,东路风场变化较小,但燕山对污染的汇聚作用,使得这条输送通道同样重要。

地面月平均温度场逐月对比显示:采暖期间,京津冀地区在12月~2月期间地面平均温度接近、且明显低于11月和3月。因此,受气温影响,12月~2月京津冀地区燃煤消耗量明显高于其余两个月份。此外,对比11月上半月(采暖前)和下半月(采暖后)地面温度场的差异可以看出,11月采暖前后华北平原地区地面气温相差不多,但内蒙古及河北北部地面温度在11月后期明显低于前期,表明河北北部如张家口、承德等纬度较高的地区采暖可能较河北南部地区提前。

2.3. 京津冀及周边地区PM_{2.5}浓度的污染特征

在利用模型开展“以电代煤”措施实施对区域大气环境质量改善的定量影响计算前,首先针对本研究关注的冬季采暖期研究分析了京津冀及周边地区PM_{2.5}浓度的污染特征。图2显示了2018年11月~2019年3月PM_{2.5}月平均浓度和月平均地面风场的空间分布,其中2018年11月按照华北地区供暖起始日(一般为11月15日)分为两段,分别为采暖前期和采暖期。总体来看,2018年11月至2019年3月,PM_{2.5}

在整个京津冀平原地区浓度都比较高,特别是沿河南北部-石家庄-保定-北京方向出现了 $\text{PM}_{2.5}$ 的高浓度带,这一方面是因为沿线这些城市颗粒物排放较强,造成浓度较高;另一方面,由于西部太行山脉的阻挡作用,在弱的偏南风作用下,污染物容易累积,形成了污染带。此外,天津、河北唐山和东南部城市也出现了 $\text{PM}_{2.5}$ 的高浓度点,这与当地的污染源强有着直接的关系。从平均风场来看,在颗粒物浓度较高的这段时期,京津冀平原地区风场较弱,不利于污染物的扩散。造成冬季京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的原因除了不利的气象条件之外,冬季取暖等污染排放也起到了十分重要的负面作用,后续将利用模型开展定量贡献研究。

11月采暖前后对比显示,进入采暖期后华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 月平均浓度明显升高,绝大部分地区上升幅度超过 $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。逐月对比来看,京津冀西部沿山如河南北部-石家庄-保定-北京污染带12月平均浓度最高,这些地区 $\text{PM}_{2.5}$ 月平均浓度超过了 $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图1地面平均温度分布显示,12月京津冀及周边地区地面温度在整个冬季处于较低的水平,燃煤消耗量较其他月份偏高。以上分析表明冬季民用燃煤燃烧采暖排放可能对华北地区污染物浓度的增加起到了十分重要的作用。

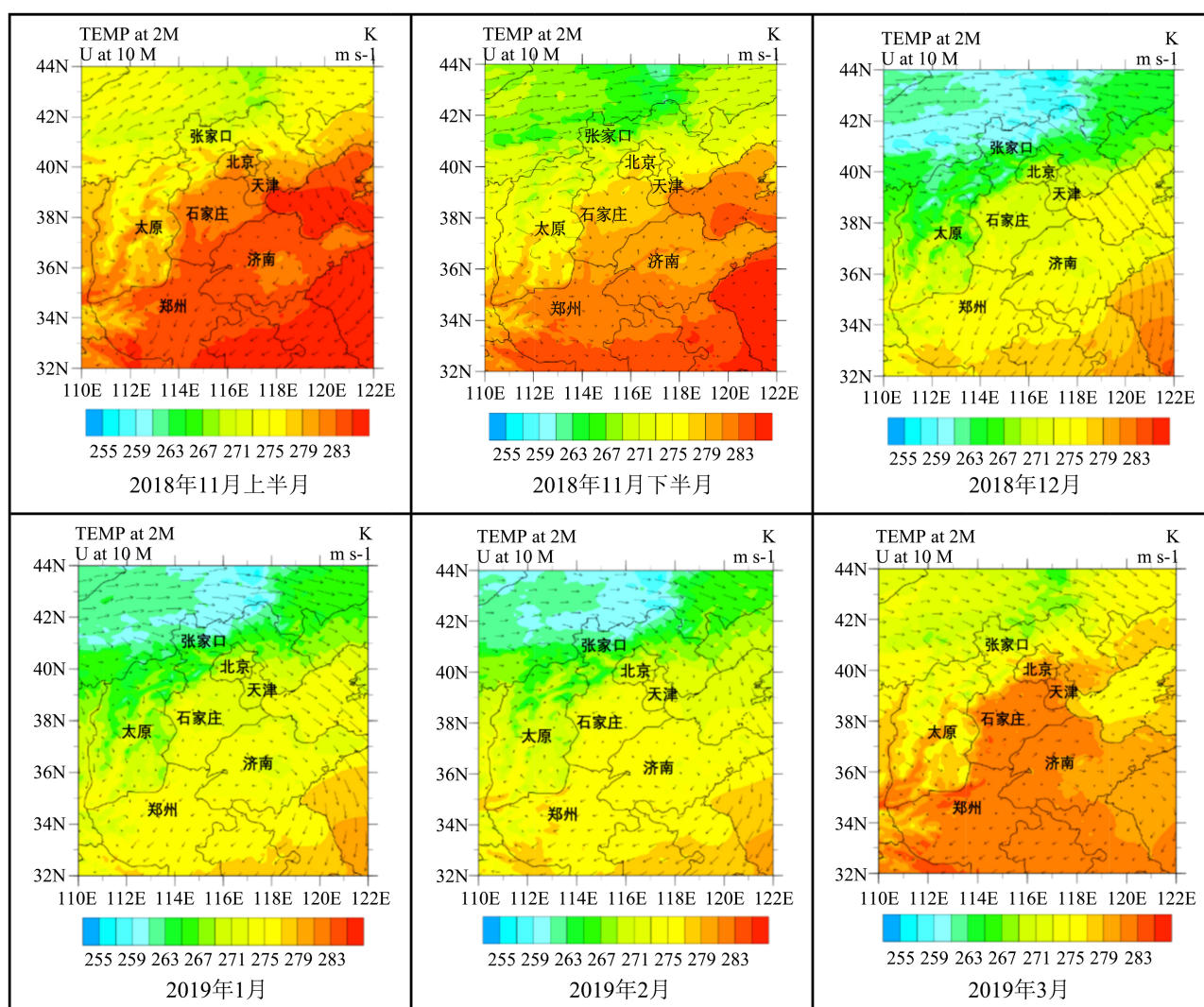


Figure 1. Monthly variation of temperature and wind in Beijing-Tianjin-Hebei region from November 2018 to March 2019

图 1. 2018 年 11 月~2019 年 3 月京津冀地区地面平均温度及风场逐月变化

3. 结果分析

3.1. “以电代煤”实施后京津冀地区污染物浓度变化空间分布特征

根据估算模型计算得出“以电代煤”前后大气污染物排放清单,通过“有散煤燃烧情景”和“无散煤燃烧情景”的模拟对比,评价“以电代煤”措施实施后对京津冀地区主要污染物浓度变化的影响。

图2为2018年11月~2019年3月京津冀及周边地区“以电代煤”措施实施后地面PM_{2.5}月平均浓度变化量。由图可见,就月平均浓度变化量空间分布来看,月均浓度变化较大的区域集中在北京城区、天津和和别南部地区,这些地区与“以电代煤”措施实施后地面污染物排放量变化较大的区域吻合,表明就月平均状况而言,该项措施的实施对当地污染物浓度的改善最显著;从月均浓度变化的程度来看,上述地区在措施实施后PM_{2.5}月平均浓度下降3 μg/m³~26 μg/m³之间,变化量占比在2%~35%之间(图3);采暖期逐月对比显示,2018年12月浓度变化最为显著,考虑这与该月气温较低,散煤燃烧取暖量较大密切相关。

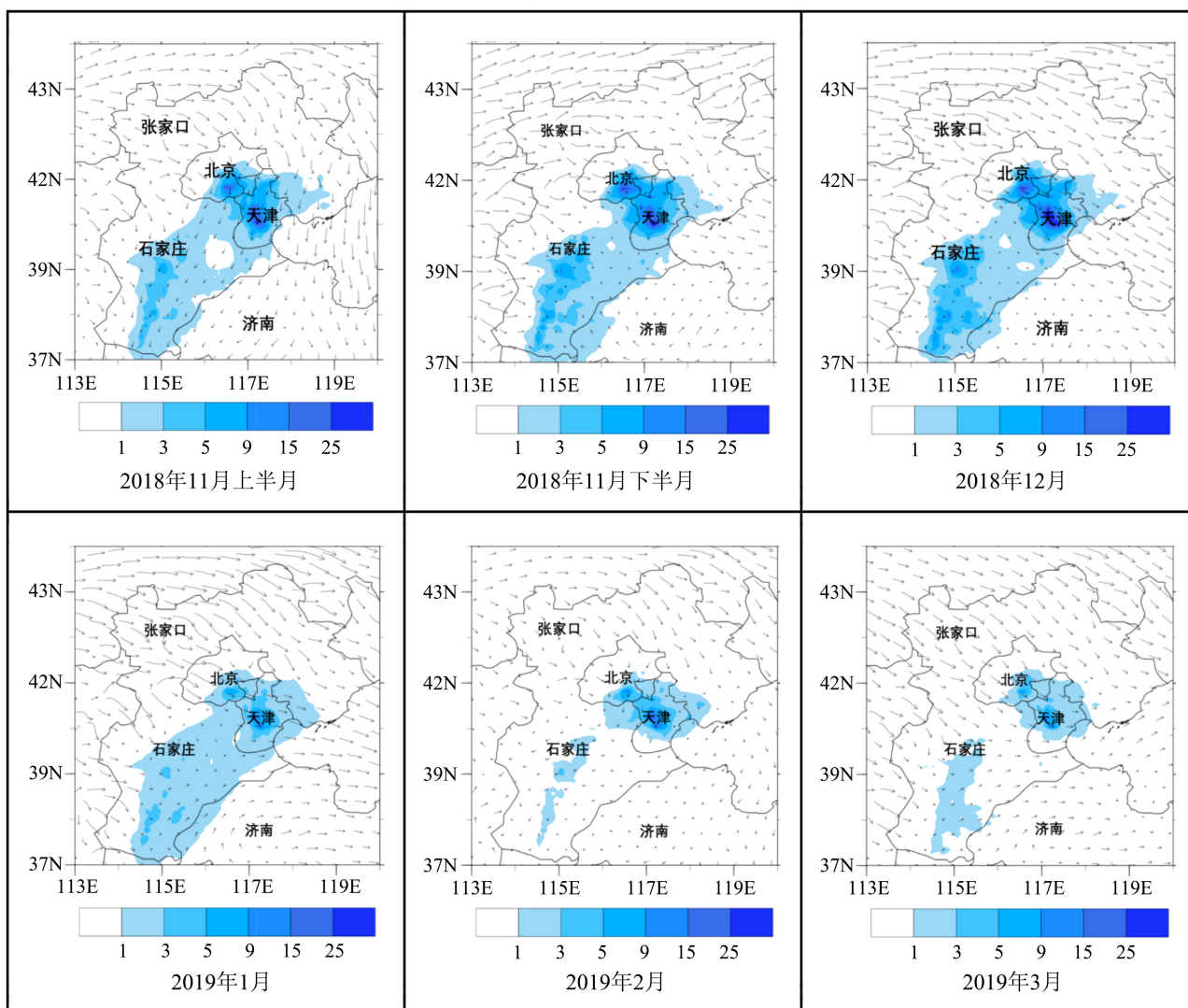


Figure 2. Variation of monthly mean concentration of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region from November 2018 to March 2019
图 2. 2018 年 11 月~2019 年 3 月京津冀地区“以电代煤”措施实施后地面 PM_{2.5} 月平均浓度变化

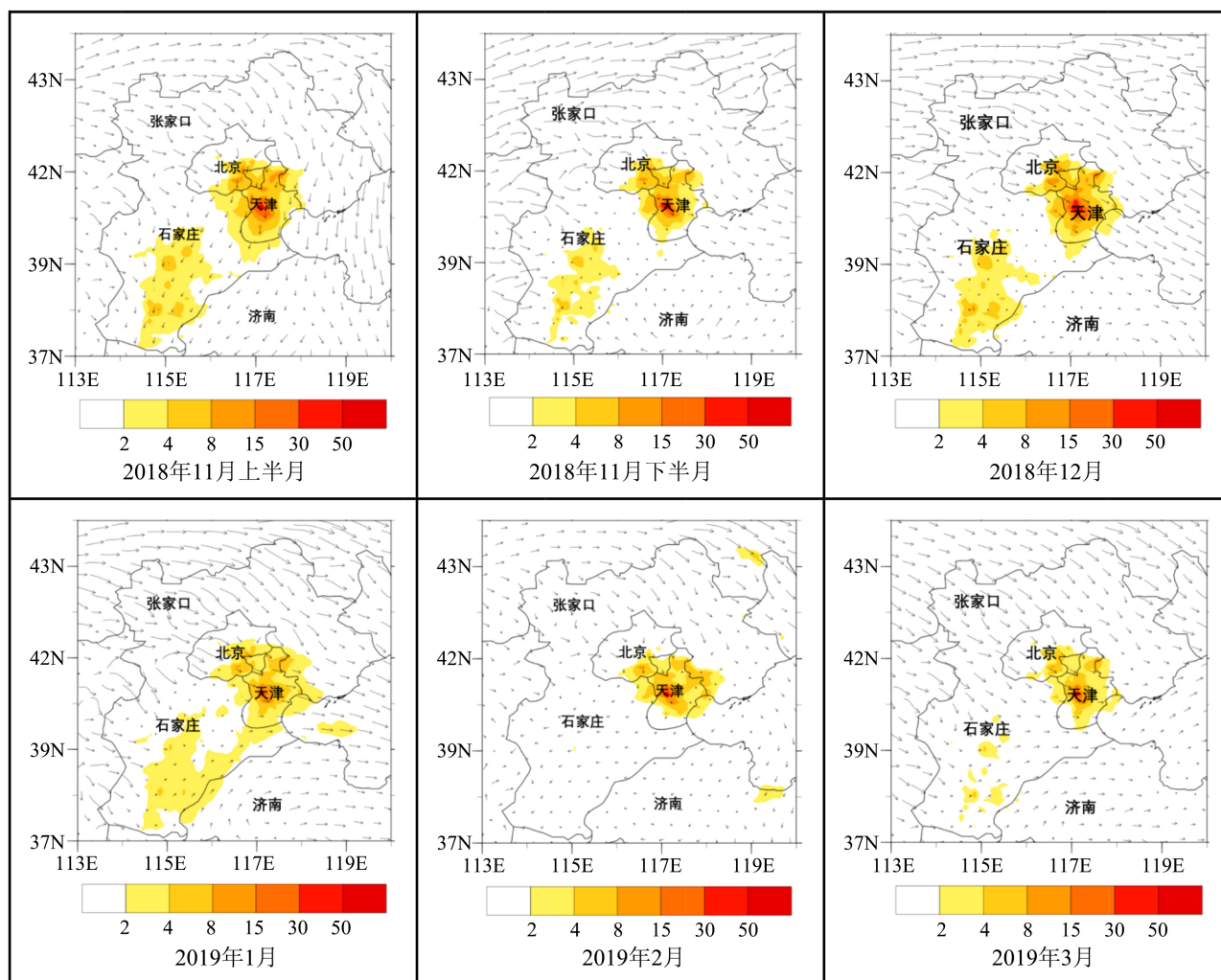


Figure 3. Percentage of monthly average concentration change in Beijing-Tianjin-Hebei region from November 2018 to March 2019
图 3. 2018 年 11 月~2019 年 3 月京津冀地区“以电代煤”措施实施后地面 PM_{2.5} 月平均浓度变化百分比

3.2. “以电代煤”实施后京津冀重点城市污染物浓度变化特征

“以电代煤”措施实施后,比较北京、天津、石家庄、唐山、张家口、承德、廊坊和邢台等 PM_{2.5} 浓度的变化情况(图 4~6),开展京津冀典型城市空气质量的影响研究。根据上面分析,选取污染物浓度变化最为显著的月份 2018 年 12 月作为典型月份进行分析。

月均值变化对比显示,北京城区 PM_{2.5} 月平均浓度变化最大,为 9.2 μg/m³,其次为廊坊 8.2 μg/m³,此后依次为天津 6.1 μg/m³,石家庄和廊坊 5.2 μg/m³,唐山变化很小,张家口和承德地几乎没有变化。最大 PM_{2.5} 日均浓度变化量同样出现在北京,为 41.3 μg/m³,石家庄与北京接近,为 38.73 μg/m³,其余依次为廊坊、天津、邢台和唐山,对应的 PM_{2.5} 日均浓度变化量分别为 22.1 μg/m³, 18 μg/m³, 10.7 μg/m³ 和 10.1 μg/m³,同样为张家口和承德地区变化最弱。

通过上述对比可以得到,“以电代煤”措施对北京、天津和河北南部城市 PM_{2.5} 浓度的降低起到了十分重要的作用,对河北西北部、北部城市的改善没有太大影响。就京津冀重点城市而言,该项措施的实施,尽管月均浓度变化不大,但从极值统计来看,日均浓度和小时浓度变化最大值均十分显著,表明“以电代煤”措施的实施在某些特殊条件下可能对当地及周边地区空气质量的改善起到十分突出的作用。

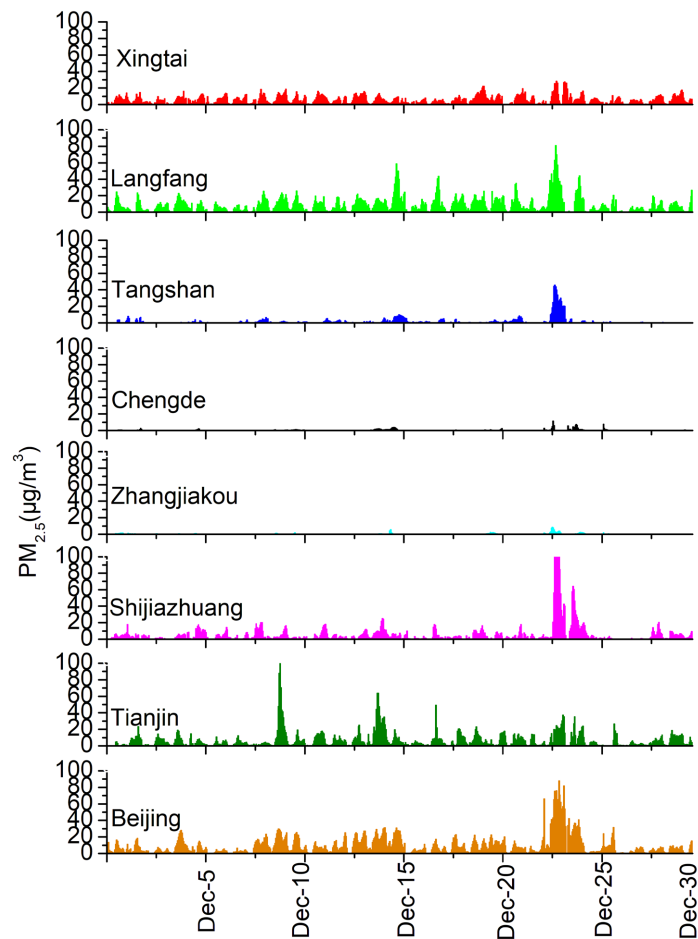


Figure 4. Hourly variation curve of $PM_{2.5}$ concentration in key cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2018 after electricity in place of coal

图 4. “以电代煤”措施实施后 2018 年 12 月京津冀重点城市地面 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化曲线

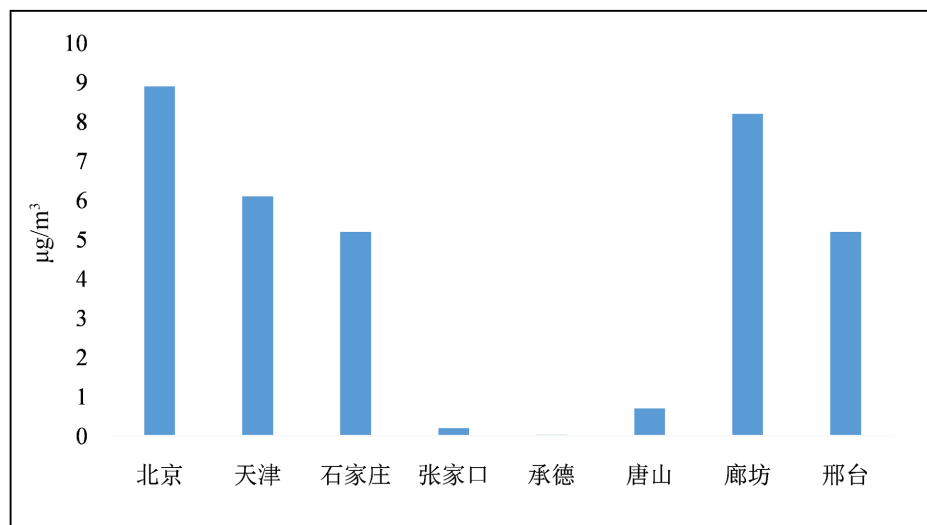


Figure 5. Monthly variation curve of $PM_{2.5}$ concentration in key cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2018 after electricity in place of coal

图 5. “以电代煤”措施实施后 2018 年 12 月京津冀重点城市地面 $PM_{2.5}$ 月浓度变化曲线

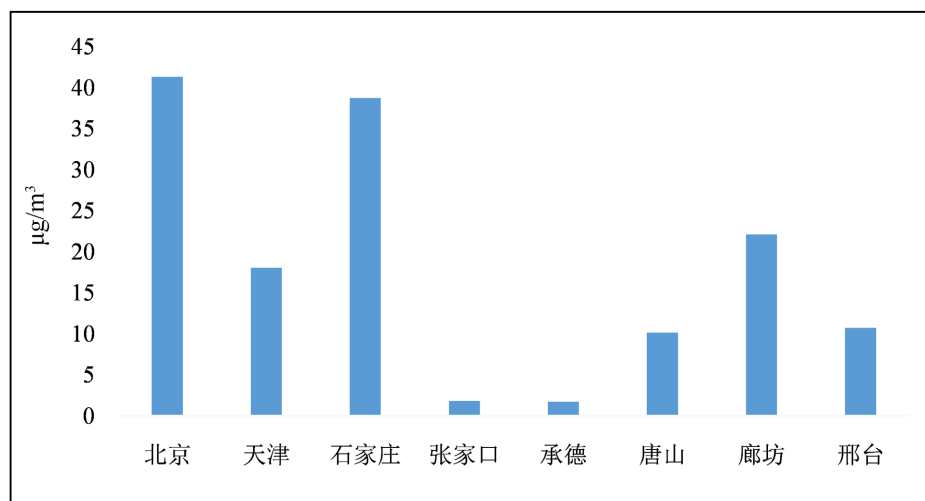


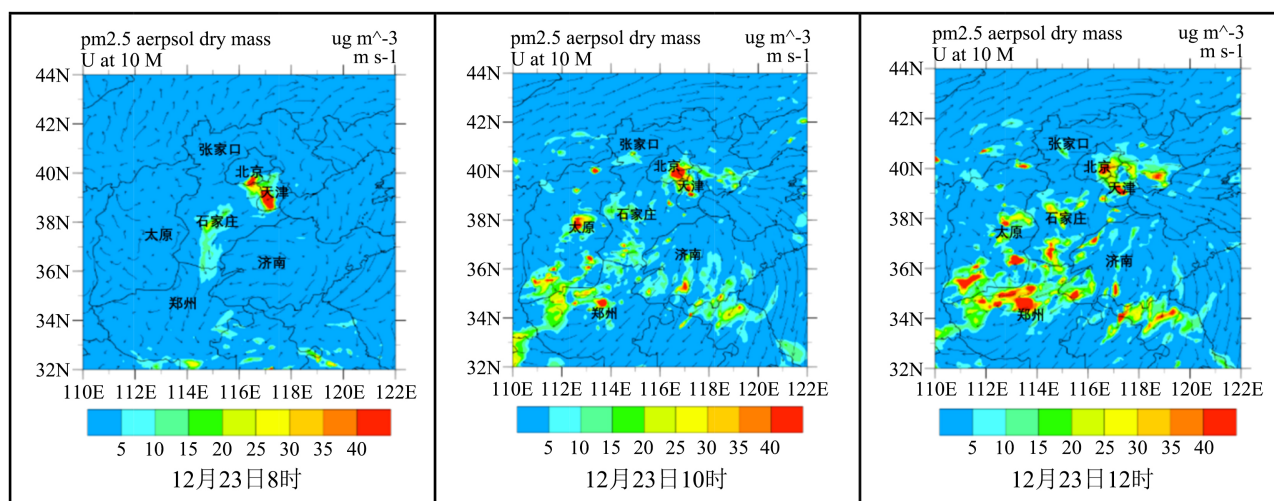
Figure 6. Daily variation curve of PM_{2.5} concentration in key cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2018 after electricity in place of coal

图 6. “以电代煤”措施实施后 2018 年 12 月京津冀重点城市 PM_{2.5} 日浓度变化曲线

3.3. “以电代煤”措施最大影响范围和程度分析

选取典型污染过程分析“以电代煤”措施实施在特定天气条件下的极端贡献，选取 2018 年 12 月 23~24 日作为典型过程，分析“以电代煤”实施后极端条件下地面污染物浓度的变化特征。由图 7 可见，这是该项措施实施后京津冀地区地面 PM_{2.5} 浓度变化最显著的时段，其中石家庄的小时浓度变化量均超过了 100 µg/m³，北京地区小时浓度变化量超过了 80 µg/m³，其余如廊坊、唐山和天津等地均变化明显，且此次过程持续的时间较长。

23~24 日天气形势分析显示，京津冀地区弱气压场控制，地面风速较小，天气形势稳定。在这种天气条件下，气团滞留时间较长，大气混合均匀，因此京津冀局地排放的变化对污染物浓度的改变贡献突出。进一步分析发现，23~24 日地面风场导致京津冀及周边地区形成了较为稳定、闭合的流场，表现为来自上游的偏西气流沿着东西走向的燕山山脉传输，自河北北部进入渤海转向，到达山东半岛时转为东北气流向南输送，在河南北部和河北东南部地区进一步转向为偏东气流，遇到太行山脉阻挡后向北传输，进一步影响京津冀地区，从而形成一个以京津冀平原地区为中心的顺时针走向的流场形势。



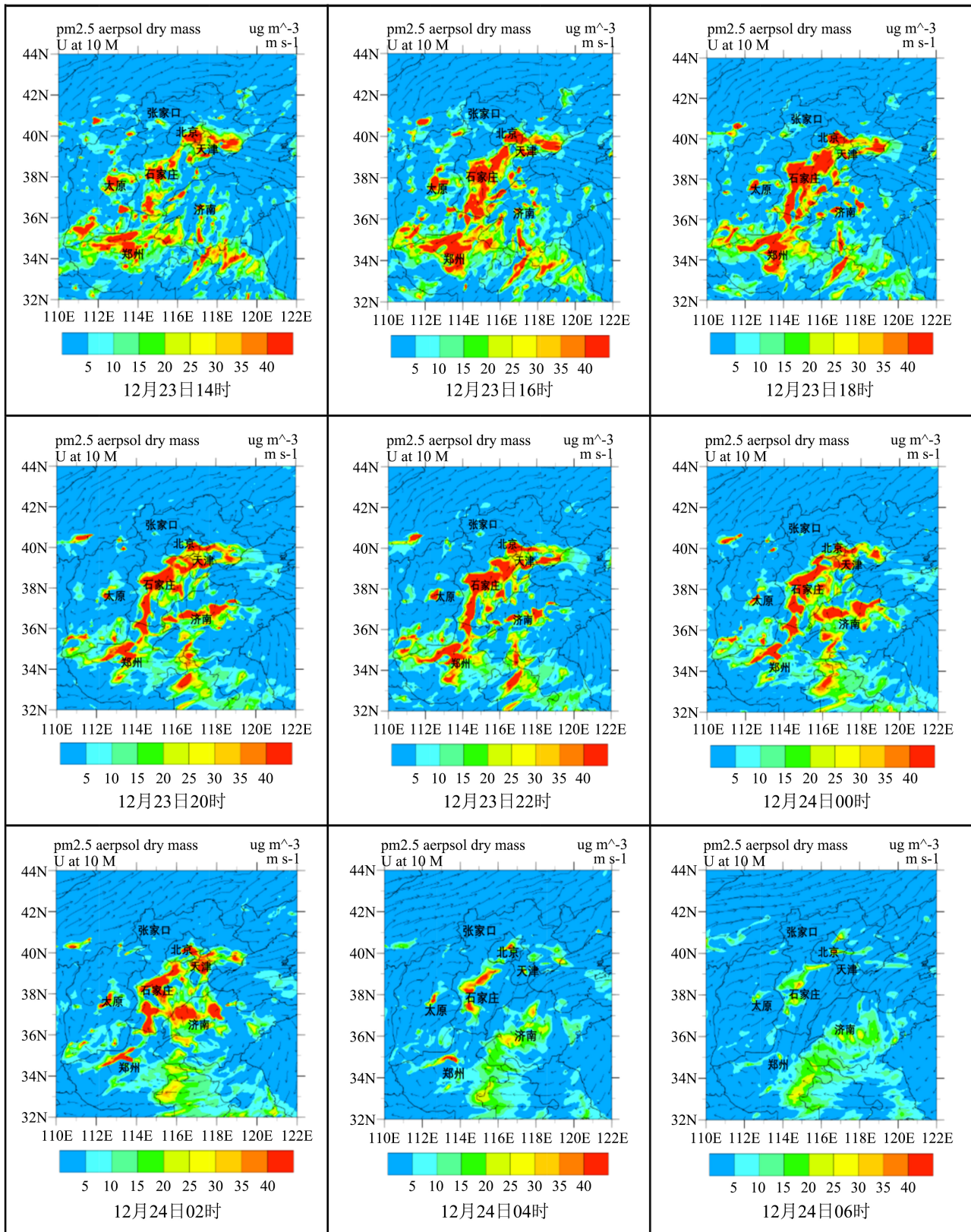


Figure 7. Distribution of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region after electricity in place of coal in typical weather process
图 7. 典型天气过程中“以电代煤”措施实施后京津冀地区 PM_{2.5} 浓度空间分布

受这种天气条件影响,京津冀地区污染源的变化会在气流的传输作用下影响周边地区,且由于持续时间较长,其影响程度较大。如图7所示,过程初期地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化明显的区域仅集中在京津冀排放源变化显著的地区,进一步随着气团在周边的混合传输,其影响范围逐渐扩散至山东、江苏和河南北部以及山西西部,部分地区小时浓度变化量最大值超过了 $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。上述分析表明,尽管月平均状况分析显示京津冀地区“以电代煤”措施的实施对局地空气质量的改善贡献最大,但在特殊天气条件下同样会对周边区域空气质量的改善起到十分积极作用。

3.4. “以电代煤”措施影响的日变化特征

散煤的燃烧排放既存在逐月的差异,也有日变化差异。以北京城区为例,进一步分析“以电代煤”措施实施对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日变化特征(2019年12月平均)。如图8所示,措施实施带来的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化量呈双峰形分布特征:两个峰值分别出现在上午9~10时和入夜后的22~23时;谷值出现在午后13~14时。总体来看,“以电代煤”措施实施对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响夜间显著,白天较弱。这种 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化量的日变化特征一方面体现了民用散煤的燃烧的排放日变化特征,即散煤燃烧与气温、居民日常作息密切相关;另一方面受到边界层结构日变化的影响,如夜间大气稳定、边界层高度较低,排放变化带来的浓度变化集中于近地层,而白天边界层发展旺盛,地面污染物随着垂直混合运动的加剧被带往高层,即便在地面相同的排放变化情况下对地面污染物浓度的影响会明显低于夜间。

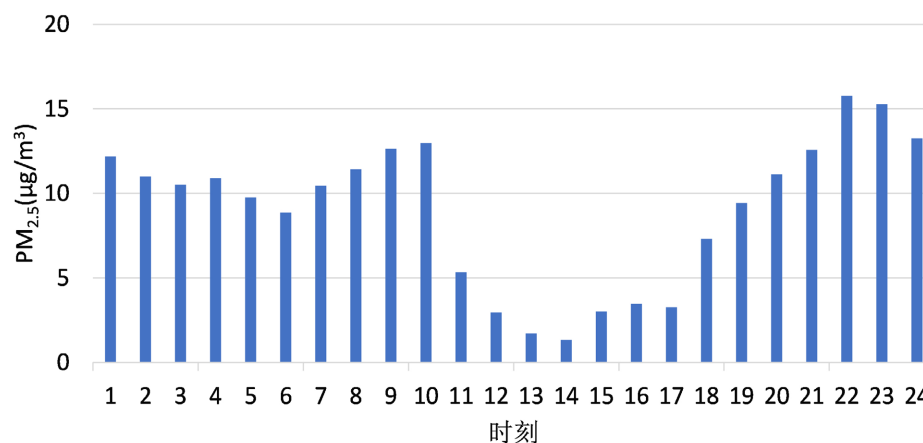


Figure 8. Hourly variation curve of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in urban area of Beijing after electricity in place of coal

图8. “以电代煤”措施对北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响日分布特征

4. 结论

1) 通过建立“以电代煤”对实施区域空气质量改善影响的计算模型,模拟评估了该项措施实施对空气质量改善的定量影响,结果表明降低和解决因散煤燃烧带来的污染问题对于缓解京津冀大气污染治理面临的严峻压力以及改善冬季雾霾重污染发生具有极其重要的作用。

2) 模型计算结果显示:“以电代煤”措施对北京、天津和河北南部城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降低起到了十分重要的作用,对河北西北部、北部城市的改善没有太大影响。从月平均浓度变化来看,京津冀重点地区在措施实施后 $\text{PM}_{2.5}$ 月平均浓度下降 $3\ \mu\text{g}/\text{m}^3\sim 26\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,变化量占比在2%~17%之间。从极值统计来看,重点城市日均浓度变化最大值十分显著,如北京和石家庄日均浓度变化量在 $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,表明“以电代煤”措施的实施可对当地空气质量的改善起到十分突出的作用。

3) 在特定气象条件影响下, 京津冀地区“以电代煤”措施实施的影响范围可逐渐扩散至山东、江苏和河南北部以及山西西部, 京津冀周边部分地区小时浓度变化量最大值超过了 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 表明尽管京津冀地区“以电代煤”措施的实施对局地空气质量的改善贡献最大, 但在特殊天气条件下同样会对周边区域空气质量的改善起到十分积极作用。

基金项目

本文由国家电网公司科技项目(52010118000C)京津冀等典型地区“以电代煤”大气环境改善效益研究项目资助。

参考文献

- [1] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 孙湛. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1212-1225.
- [2] 田军, 耿海清, 黄满堂, 高爽, 方雪, 余剑锋, 等. 京津冀及周边地区产业布局特征研究[J]. 环境影响评价, 2020, 42(5): 30-33, 62.
- [3] 宫倩楠, 王莹莹, 童玉芬. 京津冀人口对碳排放的压力: 空间格局及变动分析[J]. 首都经济贸易大学学报, 2020, 22(2): 56-67.
- [4] 蒋姝睿, 谭雪, 石磊, 马中. 京津冀大气污染传输通道城市的工业大气污染排放效率分析——基于三阶段 DEA 方法[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 141-149.
- [5] 冯冬, 李健. 京津冀区域城市二氧化碳排放效率及减排潜力研究[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 978-986.
- [6] 王媛, 李玥, 乔治, 卢亚灵. 京津冀城市群大气污染传输规律研究——两组排放清单的比较分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4561-4569.
- [7] 韩媛媛, 皮荷杰, 时泽楠, 吕儒云, 廖剑宇. 京津冀地区工业 CO_2 排放测度及其影响因素研究[J]. 世界地理研究, 2020, 29(1): 140-147.
- [8] 朱潜艇, 王萌, 周芳妮, 徐瑞. 京津冀一体化下交通运输业碳排放核算及其影响因素研究[J]. 重庆理工大学学报(社会科学版), 2019, 33(6): 23-31.
- [9] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲. 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 4897-4904.
- [10] 陈操操, 蔡博峰, 孙粉, 丁都, 于凤菊, 杨晓燕, 等. 京津冀与长三角城市群碳排放的空间聚集效应比较[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4371-4379.
- [11] 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 等. 中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5289-5295.
- [12] 徐静馨, 朱法华, 王圣, 张明, 赵秀勇, 孙雪丽, 等. 超低排放燃煤电厂和燃气电厂综合对比[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 164-172, 179.
- [13] 崔冬冬, 薛海涛, 于振波. 关于燃煤电厂超低排放改造的几点思考[J]. 动力与电气工程, 2020, 18(4): 28+30.
- [14] 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀. 超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 98-105.
- [15] 李玉柱, 董锐锋, 郭应新, 王锋涛, 杨硕. 燃煤电厂超低排放改造后脱硝系统优化运行控制技术[J]. 节能与环保, 2020, 42(4): 55-59.
- [16] 朱跃, 杨用龙. 燃煤电厂超低排放湿法脱硫治霾影响分析[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 295-300.
- [17] 李金玉, 闫静, 宋光武, 秦建平, 薛亦峰. 北京市工业锅炉脱硝系统运行状况分析[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(8): 120-124+150.
- [18] 赵元洲, 周君立, 戴竞, 许焕征, 解清杰. 超声波雾化-预滤导流法对工业锅炉烟气脱硫除尘处理的研究[J]. 山东化工, 2019, 48(4): 201+205.
- [19] 宗亚楠, 张强, 洪朝鹏, 贺克斌. 北京市燃煤源排放控制措施的污染物减排效益评估[J]. 环境规划与管理, 2017, 30(10): 1645-1652.
- [20] 张银晓, 卢春颖, 张剑, 王新锋, 李卫军. 民用燃煤排放细颗粒中金属元素排放特征及单颗粒分析[J]. 大气污染与控制, 2018, 38(9): 3273-3279.

- [21] 梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东. 北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1775-1782.
- [22] 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰. 不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4462-4469.
- [23] 毋波波, 薛亦峰, 钟连红, 田贺忠. 京津冀居民燃煤大气污染排放特征及控制对策[J]. 环境保护, 2017, 45(21): 27-31.
- [24] 严茹莎, 侯勇, 陆建宇, 毕晓亮, 卢清. 长三角区域燃煤排放污染物现状及其环境影响[J]. 环境影响评价, 2016, 38(6): 66-72.
- [25] 薛亦峰, 闫静, 魏小强. 燃煤控制对北京市空气质量的改善分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 253-258
- [26] 陆雅静, 倪爽英, 陈睿, 陈素强, 孙伟, 刘丹宁. 石家庄市 2017 年农村居民燃煤散烧排放量估算[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 321-327.
- [27] 支国瑞, 杨俊超, 张涛, 关键, 杜谨宏, 薛志钢, 等. 我国北方农村生活燃煤情况调查、排放估算及政策启示[J]. 环境科学研究, 2015, 28(8): 1179-1185.
- [28] 曹德光, 郑薇, 徐恺妮, 贾学涵, 杨宝渠. 徐以电代煤供暖的临界电价与各方受益分析[J]. 智能电网, 2016, 4(7): 712-716.
- [29] 贾德香, 韩净, 华章. 以电代煤发展模型和应用研究[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 190-192.
- [30] 王振宇, 王冰, 吴培肇, 李薇, 刘磊. 基于煤炭消费视角的北京市以电代煤减排效益研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1995-2000.
- [31] 张继平, 宁杨翠, 刘春兰, 李铮, 王海华, 陈龙, 等. 北京市门头沟区“煤改电”工程大气环境质量改善效果监测分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 898-906.
- [32] 范瑞卿, 蔡蕾, 韩蒲峰, 多葭宁, 张嘉睿, 杜宇. “煤改电”区域内的电网运行管控体系研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(3): 14-18+32.
- [33] 张增强, 王祺, 许叶林, 翟旭京, 谢宁. “煤改电”工程节能减排潜力分析方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 20-24.
- [34] 赵晓丽, 叶晓妹. 以电代煤的经济与环境效益分析[J]. 中国环境管理, 2017, 9(4): 51-57.
- [35] Dennis, R.L., Byun, D.W., Novak, J.H., Galluppi, K.J., Coats, C.J. and Vouk, M.A. (1996) The Next Generation of Integrated Air Quality Modeling: EPA's Models-3. *Atmospheric Environment*, **30**, 1925-1938. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00174-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00174-3)
- [36] Wang, T.J., Jiang F, Deng, J.J., Shen, Y., Fu, Q., Wang, Q., *et al.* (2012) Urbanair Quality and Regional Haze Weatherforecast for Yangtze River Delta Region. *Atmospheric Environment*, **58**, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.014>
- [37] Tie, X., Madronich, S., Li, G., Ying, Z., Weinheimer, A., Apel, E., *et al.* (2009) Simulation of Mexico City Plumes during the MIRAGE-Mex Field Campaign Using the WRF-Chem Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 4621-4638. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4621-2009>
- [38] Lei, W., Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., Volkamer, R. and Molina, L.T. (2007) Characterizing Ozone Production in the Mexico City Metropolitan Area: A Case Study Using a Chemical Transport Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 1347-1366. <https://doi.org/10.5194/acp-7-1347-2007>
- [39] Jiang, F., Wang, T., Xie, M., Xie, M. and Zhao, H. (2008) Numerical Modeling of A Continuous Photochemical Pollution Episode in Hong Kong Using WRF-Chem. *Atmospheric Environment*, **42**, 8717-8727. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.034>
- [40] Geng, F., Tie, X., Guenther, A., Li, G., Cao, J. and Harley, P. (2011) Effect of Isoprene Emissions From Major Forests on Ozone Formation in the City of Shanghai, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 10449-10459. <https://doi.org/10.5194/acp-11-10449-2011>
- [41] 谢卧龙, 张怀德, 刘鑫, 苏艳霞, 崔艳丽. 山西省农村地区燃煤采暖情况入户调查及排污量估算[J]. 环境科学研究, 2018, 31(4): 642-647.
- [42] Peng, L.Q., Zhang, Q., Yao, Z.L., Mauzerall, D.L., Kang, S., Du, Z., *et al.* (2019) Underreported Coal in Statistics: A Survey-Based Solid Fuel Consumption and Emission Inventory for the Rural Residential Sector in China. *Applied Energy*, **235**, 1169-1182. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.043>
- [43] Zhu, M.Y., Liu, L., Yin, S.S., Zhang, J., Wang, K. and Zhang, R. (2020) County-Level Emission Inventory for Rural Residential Combustion and Emission Reduction Potential by Technology Optimization: A Case Study of Henan, China. *Atmospheric Environment*, **228**, Article ID: 117436. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117436>

- [44] Yuan, P.L., Duanmu, L. and Wang, Z.S. (2019) Coal Consumption Prediction Model of Space Heating with Feature Selection for Rural Residences in Severe Cold Area in China. *Sustainable Cities and Society*, **50**, Article ID: 101643. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101643>
- [45] 袁鹏丽, 端木琳, 王宗山. 基于实测能耗数据的农宅供暖能耗影响因素分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(2): 28-37.
- [46] 李朋, 吴华成, 周卫青, 张子健, 汪美顺, 张茹婷, 等. 京津冀“以电代煤”替代大气污染物排放清单[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1489-1497.
- [47] Cheng, M.M., Zhi, G.R., Wei, T., Liu, S., Dang, H., Guo, Z., *et al.* (2016) Air Pollutant Emission From the Underestimated Households' Coal Consumption Source in China. *Science of the Total Environment*, **580**, 641-650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.143>
- [48] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布《民用煤燃烧污染综合治理技术指南(试行)》与《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》的公告[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201610/t20161031_366528.htm, 2020-08-03.